

# CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS DIGITAIS INTERVALADAS DE UM ANO

Roosevelt de Lara Santos Jr. <sup>1</sup>

Edson A. Mitishita <sup>2</sup>

Alvaro Muriel Lima Machado <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – [rls@ufpr.br](mailto:rls@ufpr.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – [mitishita@ufpr.br](mailto:mitishita@ufpr.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – [alvaroml@ufpr.br](mailto:alvaroml@ufpr.br)

## RESUMO

No presente trabalho apresenta-se a calibração de duas câmaras digitais não métricas de pequeno formato modelo Sony DSC-F717, resolução de 5,2 megapixels, utilizando o Método das Câmaras Convergentes. A calibração das duas câmaras digitais de um mesmo modelo, com a peculiaridade de pertencerem a um mesmo lote de fabricação, permite analisar as estabilidades construtivas e dos parâmetros internos destas câmaras, tomando-se como referência as calibrações realizadas com os mesmos procedimentos e intervaladas de um ano.

Palavras-chave: **Câmara, digital, pequeno formato, não métrica, calibração, estabilidade.**

## CALIBRATION OF DIGITAL CAMERAS WITH AN INTERVAL OF ONE YEAR

### ABSTRACT

*In the present article it is shown the calibration of two non-metric digital cameras model Sony DSC-F717, with resolution of 5.2 megapixels, using the Method of Convergent Cameras. The calibration of two same model digital cameras, with the peculiarity of belonging to the same production lot, allows to analyze the constructive stabilities and internal parameters of these cameras. The calibrations were realized with same methodologies and with an interval of one year between them.*

**Keywords: Camera, digital, small format, non-metric, calibration, stability.**

## 1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho apresenta-se a calibração de duas câmaras digitais não métricas de pequeno formato, modelo Sony DSC-F717, resolução do CCD - *Charge Coupled Device* de 2560 x 1920 pixels (5,2 megapixels), utilizando o Método das Câmaras Convergentes. A calibração das duas câmaras digitais de um mesmo modelo, com a peculiaridade de pertencerem a um mesmo lote de fabricação, permitiu analisar as estabilidades construtivas e dos parâmetros internos destas câmaras, considerando que as calibrações consecutivas foram intervaladas de um ano (calibrações realizadas em 14/05/2003 e 14/05/2004). O objetivo principal do presente artigo é a verificação da variação quantitativa e qualitativa dos parâmetros internos destas câmaras obtidos com suas respectivas calibrações em épocas distintas e metodologias idênticas. A estabilidade das câmaras não métricas e de pequeno formato é assunto de destacado interesse seja no meio científico, seja no ambiente profissional, considerando sua grande aplicabilidade nas diversas atividades fotogramétricas. No presente estudo não se utilizou uma unidade métrica convencional pertencente ao Sistema Internacional de Unidades (SI ex. milímetro ou micrômetros) como unidade de medida no espaço imagem, aqui substituída pela unidade de resolução da imagem: o pixel (*Picture Element*). Tomando-se em conta que câmaras digitais não possuem marcas fiduciais, e a conseqüente necessidade de um sistema de referência para imagem, substituiu-se o referencial fiducial (clássico e associado à unidades do SI) por um referencial de imagem baseado sobre o sensor de área (CCD). Isto permite proceder a calibração de qualquer câmara digital sem a necessidade do conhecimento das dimensões métricas de seu sensor de área. Conseqüentemente, não se mencionará termos como sistema de coordenadas fiducial, correção do trabalho do filme, coordenadas das marcas fiduciais.

## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### 2.1 CÂMARAS DIGITAIS DE PEQUENO FORMATO

Câmara (fotográfica) digital, pode ser descrita como um equipamento para aquisição de imagens digitais, doravante, simplesmente imagem, desejando-se ressaltar a diferença entre uma imagem adquirida digitalmente, das analógicas (fotografias) convencionais que posteriormente são digitalizadas.



Figura 1 – Câmara Digital (Sony dsc-f717)  
Fonte: www.sony.com

O termo imagem refere-se a uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por  $F(x,y)$ , em que o valor ou amplitude de  $F$  nas coordenadas espaciais  $(x,y)$  representa a intensidade (brilho) da imagem naquele ponto. Como a luz é uma forma de energia,  $F(x,y)$  deve ser positiva e finita, isto é,

$$0 \leq F(x,y) \leq \infty \quad (1)$$

As imagens que as pessoas percebem em atividades visuais corriqueiras consistem de luz refletida dos objetos. A natureza básica de  $F(x,y)$  pode ser caracterizada por dois componentes, *iluminação* ou a quantidade de luz incidindo na cena observada e a *reflectância* ou quantidade de luz refletida pelos objetos dispostos na cena. Representadas respectivamente por  $i(x,y)$  e  $r(x,y)$  O produto destas funções resulta  $F(x,y)$ :

$$F(x,y) = i(x,y) r(x,y) \quad (2)$$

$$0 \leq i(x,y) \leq \infty \quad (3)$$

$$0 \leq r(x,y) \leq 1 \quad (4)$$

A equação (4) indica que a reflectância é limitada entre 0 (absorção total) e 1 (reflectância total), a natureza de  $i(x,y)$  é determinada pela fonte de luz e  $r(x,y)$  é determinada pelas características dos objetos na cena. Dois elementos são necessários para aquisição de imagens digitais. O primeiro é o dispositivo físico sensível a banda do espectro de energia eletromagnética e que produza um sinal elétrico de saída proporcional a um nível de energia percebida. O segundo chamado digitalizador, é um dispositivo para a conversão da saída elétrica de um dispositivo físico para a forma digital (realiza a conversão analógica/digital). A tecnologia usada em sensores de imageamento do estado sólido (tanto nos sensores por varredura linear e quanto nos sensores de área), são baseados principalmente em dispositivos de carga acoplada (CCD). Um sensor típico de CCD por varredura de linha contém uma linha de "fotossítios", dois portos de transferência usados para transportar os conteúdos dos elementos de imageamento para os denominados registradores de transporte e um porto de saída usado para transferir os conteúdos dos registradores de transporte para um amplificador, que produz um sinal de tensão proporcional ao conteúdo da linha de fotossítios. Os sensores de área por carga acoplada (matrizes) são similares aos sensores de varredura por linha, exceto que os fotossítios são arranjados em forma matricial e uma combinação de porta / registrador de transporte separa as colunas de fotossítios (Gonzalez e Woods, 1993).

Considerando o esquema da figura a seguir, têm-se as seguintes fases de formação da imagem digital (Galo 1993, Atkinson 1996, Reiss 2002):

- A formação da imagem inicia-se no momento em que a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos atravessa o sistema óptico de uma câmara digital e é exposta a um sensor;
- A partir deste instante o feixe luminoso é desviado e projetado sobre os elementos sensores, que produzem um sinal proporcional à intensidade luminosa;
- Os sinais são recebidos pelos circuitos eletrônicos que convertem em voltagens;
- Em seguida, o sinal analógico é discretizado por um conversor A/D (analógico / digital);

- Por fim, o sinal analógico é discretizado em tons de cinza é armazenado em uma memória de alta velocidade (*frame buffer*), para posteriores processamentos digitais.

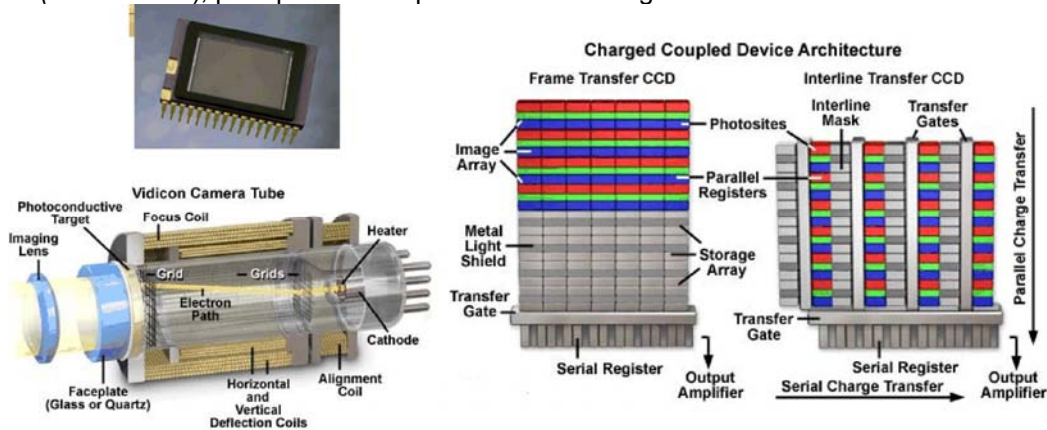


Figura 2 – CCD.

Fonte: <http://homepages.ihug.com.au/~parsog/Guy/sensors.html> acessado em 24/03/2003

Por câmaras digitais de pequeno formato, consideram-se as câmaras portáteis (as conhecidas como *câmaras fotográficas de mão*, equivalentes as câmaras convencionais de 35mm), da mesma maneira, por não métrica se adotará as que não possuem marcas fiduciais (Oliveira, 1987).

## 2.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS – MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES

O método de calibração de câmaras, ou seja, para determinação dos parâmetros internos da câmara (constante da câmara, coordenadas do ponto principal e os coeficientes de correção de erros sistemáticos, que no presente trabalho dizem respeito à distorção radial simétrica, distorção descentrada e não ortogonalidade ou afinidade), utilizando imagens convergentes desenvolvido por Duane Brown propõe que as condições mínimas para se calibrar uma câmara são a tomada de pelo menos três imagens, duas convergentes entre si de 90° e uma terceira rotacionada em torno do eixo Z de 90°, tal exigência se faz necessário com vistas a separação dos coeficientes da distorção radial simétrica daqueles da distorção descentrada. O método exige ainda, a fixação de um referencial no espaço objeto, o que pode ser obtido através de injunções de posição durante o processo de ajustamento (detalhes em Andrade, 1998).

## 2.3 SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO ESPAÇO IMAGEM

No presente trabalho, optou-se pelos seguintes sistemas de referência para o espaço imagem (Figura 3):

- SISTEMA DE IMAGEM DIGITAL (Matricial)  $(x'', y'')$ , definido como um sistema cartesiano plano retangular, levógiro, com origem no canto superior esquerdo da imagem, sendo  $x''$  coincidente com a primeira linha e  $y''$  coincidente com a primeira coluna.

- SISTEMA DE IMAGEM  $(x, y)$ , é paralelo ao sistema de imagem digital, sua origem localiza-se (arbitrariamente) no centro geométrico da imagem, sua orientação é dextrógiro, com  $x$  positivo no sentido das abcissas (da esquerda para direita) e  $y$  positivo ao longo do eixo das ordenadas (de baixo para cima);

A transformação entre os sistemas de imagem digital e de imagem pode ser realizada através das equações a seguir:

$$x = x'' - \frac{Col + 1}{2} \quad (5)$$

$$y = \frac{Lin + 1}{2} - y'' \quad (6)$$

$x'', y''$ , coordenadas no sistema de imagem digital;

$x, y$ , coordenadas no sistema de imagem;

$Col$ , número de colunas da imagem;

$Lin$ , número de linhas da imagem;

- SISTEMA DE COORDENADAS FOTOGRAMÉTRICAS  $(x', y')$ , o referencial fotogramétrico é por definição paralelo ao referencial de imagem, resumindo a transformação de um sistema para o outro,

numa translação no plano a partir do conhecimento das coordenadas do ponto principal no referencial de imagem  $(x_0, y_0)$ .

A transformação entre coordenadas no sistema de imagem e sistema de coordenadas fotogramétricas pode ser realizado com as equações a seguir:

$$\begin{aligned}x' &= x - x_0 \\y' &= y - y_0\end{aligned}\tag{7}$$

$x', y'$ , coordenadas fotogramétricas ;

$x_0, y_0$ , coordenadas do ponto principal no sistema de imagem.

## 2.4 SISTEMA DE REFERÊNCIA NO ESPAÇO OBJETO

O sistema de referência para o espaço objeto adotado foi um sistema cartesiano tridimensional local (X, Y, Z), dextrógiro, conforme apresentado na figura a seguir.

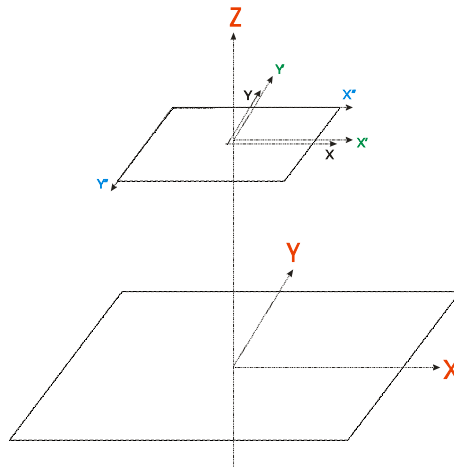


Figura 3 – Sistemas de Referência.

## 2.6 EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE

$$x' = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}\tag{8}$$

$$y' = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}\tag{9}$$

$c$ , constante da câmara (espaço imagem);

$x, y, z$ , coordenadas dos pontos (espaço objeto);

$x_0, y_0, z_0$ , coordenadas do centro perspectivo (espaço objeto);

$m_{ij}$ , elementos da matriz de rotação ( $M = R_z(\kappa).R_y(\varphi).R_x(\omega)$ ).

As equações (8) e (9) são denominadas equações de colinearidade. Estas possibilitam o relacionamento matemático (geometria projetiva) de coordenadas fotogramétricas de pontos no espaço imagem com suas correspondentes coordenadas de pontos no espaço objeto (ASP, 1980; ASPRS, 1989; Lugnani, 1987; Merchant, 1988; Novak, 1991; Mitishita, 1997; Schenk, 1999).

## 2.7 DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

A distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes (detalhes em Andrade e Olivas, 1981). O modelo empregado para corrigir as observações fotogramétricas da distorção radial simétrica, foi desenvolvido a partir do modelo apresentado por Conrady (1929), (detalhes em Merchant, 1988).

$$\delta r_x = (k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6).(x - x_0)\tag{10}$$

$$\delta r_y = (k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6).(y - y_0)\tag{11}$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\tag{12}$$

$\delta r_x$  e  $\delta r_y$ , correção devida à distorção radial simétrica;

$k_1, k_2, k_3$ , coeficientes da distorção radial simétrica;

$r$ , distância do ponto considerado ao ponto principal;

## 2.8 DISTORÇÃO DESCENTRADA

A distorção descentrada responsável por deslocamentos na imagem é oriunda da impossibilidade do fabricante alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva. Esta distorção é composta pelas distorções tangencial e radial assimétrica, conforme demonstrado por Conrady (1919), detalhes em (Andrade e Olivas, 1981). A distorção descentrada não era considerada nos trabalhos iniciais de fotogrametria. A magnitude do erro era bem inferior ao da distorção simétrica, isto se devia a existência de sistemas de lentes mais simples nas câmaras convencionais (antigas), com a fabricação de câmaras modernas com elaborados sistemas de lentes e a exigência de trabalhos fotogramétricos mais precisos, verificou-se a necessidade de modelar esta distorção nos trabalhos fotogramétricos. O modelo matemático utilizado para a correção desta distorção foi desenvolvido por Duane Brown em 1966, baseado no modelo de Conrady (1919), denominado então de Conrady e Brown (Merchant, 1988).

$$\delta d_x = P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] \cdot 2 \cdot P_2 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) \quad (13)$$

$$\delta d_y = P_2[r^2 + 2(y - y_0)^2] \cdot 2 \cdot P_1 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) \quad (14)$$

$\delta d_x$  e  $\delta d_y$ , parcela de correção devida à distorção descentrada;

$P_1$  e  $P_2$ , coeficientes da distorção descentrada;

## 2.9 COEFICIENTES DE AFINIDADE (NÃO ORTOGONALIDADE)

Os parâmetros de afinidade modelam a possibilidade de não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos x e y do sistema de coordenadas de imagem. Em câmaras digitais, este efeito ocorre quando: - o pixel possui dimensões diferentes em x e y, ou seja, não é perfeitamente quadrado;

- o sensor CCD não é perfeitamente perpendicular ao eixo óptico (Galó, 1993; Reiss, 2002).

As equações a seguir desenvolvidas por Moniwa (1977), a partir da Transformação Afim Geral no Plano (TAGP) oferecem correção aos elementos descritos no parágrafo anterior.

$$\delta a_x = A' \cdot (x - x_0) \quad (15)$$

$$\delta a_y = B' \cdot (x - x_0) \quad (16)$$

$A'$ ,  $B'$ , parâmetros de afinidade.

## 2.10 MMQ – PARAMÉTRICO COM INJUNÇÕES DE PESO OU POSIÇÃO

$$La = F(Xa) \quad (17)$$

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{x_0} \quad (18)$$

$$AX + V + L = 0 \quad (19)$$

$$L = L_b - L_0 \quad (20)$$

$La$ , vetor dos valores observados ajustados;

$Xa$ , vetor dos parâmetros ajustados;

$A$ , matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros ajustados;

$X$ , vetor de correção aos parâmetros ajustados;

$V$ , vetor dos resíduos das observações;

$Lb$ , vetor dos valores observados;

$L_0$ , vetor dos resultados da função matemática usando parâmetros aproximados;

A (17), forma geral do MMQ Paramétrico, nos diz que os valores observados ajustados podem ser expressos como uma função explícita dos parâmetros ajustados. Para modelos matemáticos não lineares (como é o caso do modelo de calibração ver as equações), e que demandam o processo iterativo, tem-se inicialmente:

$$L_0 = F(X_0) \quad (21)$$

$$X = -(A^T PA)^{-1}(A^T PL) = -N^{-1}U \quad (22)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (23)$$

$$P_i = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{xi}^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{yi}^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$P_i$ , é uma submatriz da matriz (diagonal) dos pesos das observações no espaço imagem;

$\sigma_{xi}^2, \sigma_{yi}^2$ , são as variâncias das coordenadas dos pontos observadas no espaço imagem;

$i$ , na presente pesquisa, número de pontos observados no espaço imagem;

Considerando que  $N$  seja singular, será necessário a aplicação de injunções de maneira a eliminar sua deficiência de característica. No presente trabalho optou-se pelo uso de Injunções de Peso ou Posição, o modelo de injunção é o que se segue: (Andrade e Olivas 1981)

$G$ , função de injunção (no presente caso coordenadas  $X, Y, Z$  medidas no espaço objeto dos respectivos pontos de apoio);

$$C = \frac{\partial G}{\partial X, Y, Z} \quad (25)$$

$C$ , é a matriz das derivadas parciais da função de injunção em relação aos parâmetros de injunção;

A matriz  $C$ , no presente estudo, será composta de dois blocos: o primeiro composto de zeros, diz respeito ao bloco dos parâmetros (portanto derivadas parciais nulas); o segundo composto de submatrizes com dimensão  $3 \times 3$ , diagonal nula ou unitária conforme o tipo de injunção – planialtimétrica ( $X, Y, Z$ ), planimétrica ( $X, Y$ ) ou altimétrica ( $Z$ )), resultando genericamente em:

$${}_{3j}C = \begin{matrix} & \leftarrow XYZ \rightarrow \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ .0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (26)$$

$j$ , número de pontos injuncionados;

O cálculo dos parâmetros ajustados será dado por:

$$X = -(N_1 + N_2)^{-1}(U_1 + U_2) \quad (27)$$

$$N_1 = A^T PA \quad (28)$$

$$N_2 = C^T P^C C \quad (29)$$

$$U_1 = A^T PL \quad (30)$$

$$U_2 = C^T P^C \varepsilon \quad (31)$$

$$\varepsilon = X_c^a - X_{obs} \quad (32)$$

$\varepsilon$ , vetor erro de fechamento das injunções, ou resíduos nos pontos do espaço objeto;

$X_c^a$ , vetor das coordenadas  $X, Y, Z$  no espaço objeto, calculadas pelo ajustamento;

$X_{obs}$ , neste trabalho, vetor das coordenadas  $X, Y, Z$  no espaço objeto, observadas;

$P^C$ , matriz de pesos das observações no espaço objeto;

$np$ , totaliza os parâmetros de orientação exterior das imagens envolvidas e os parâmetros de calibração;

$N_2$ , será uma matriz bloco diagonal de  $(np + 3j)$  linhas por  $(np + 3j)$  colunas, com submatrizes de peso  $P_j^C$ , dadas por:

$$P_j^C = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{xj}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{yj}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{zj}^2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$U_2$ , será um vetor  $(np + 3j, 1)$ , com subvetores  $U_j$  dados por:

$$U_j = \begin{bmatrix} (1/\sigma_{xj}^2) \cdot \varepsilon_x \\ (1/\sigma_{yj}^2) \cdot \varepsilon_y \\ (1/\sigma_{zj}^2) \cdot \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (34)$$

$\sigma_{xj}^2, \sigma_{yj}^2, \sigma_{zj}^2$ , variância das coordenadas dos pontos no espaço objeto;

A verificação da qualidade na determinação dos parâmetros, pode ser realizada através da análise dos resíduos nas observações no espaço imagem ( $V$ ), resíduos nas injunções ( $\varepsilon$ ) e matriz variância e covariância dos pontos ajustados ( $\sum_{Xa}$ ), dada por:

$$\sum_{Xa} = \hat{\sigma}_0^2 (N_1 + N_2)^{-1} \quad (35)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + \varepsilon^T P^C \varepsilon}{gl} \quad (36)$$

$\hat{\sigma}_0^2$ , variância das observações de peso unitário *a posteriori*;

$gl$ , grau de liberdade (igual ao do n° total de equações do modelo mais o n° de equações de injunção menos o n° de parâmetros).

## 2.11 ANÁLISE DO AJUSTAMENTO

A comparação entre a variância *a priori* ( $\sigma_0^2$ ) e a variância *a posteriori* ( $\hat{\sigma}_0^2$ ), pode ser tomada como indicativo da qualidade do ajustamento (teste global), para tanto, aplica-se um teste de hipótese baseado na distribuição qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para constatar se a discrepância entre os valores comparados é significativa a um certo nível de confiança (Gemael, 1994). O teste global é indicado quando se conhece a precisão das observações utilizadas no ajustamento, bem como a decisão de se empregar o teste na forma unilateral ou bilateral (Kavouras, 1987). No presente trabalho optou-se pela forma unilateral para o teste global, no qual são avaliadas as seguintes hipóteses: (Gemael, 1994; Reiss, 2002)

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \text{ contra } H_1 : \sigma_0^2 > \hat{\sigma}_0^2$$

$$\chi_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot gl \quad (37)$$

$\chi_a^2$ , representa o qui-quadrado amostral;

$\sigma_0^2$ , variância da observação de peso *a priori*;

A hipótese básica não será rejeitada ao nível de significância ( $\alpha$ ) se:

$$\chi_a^2 \leq \chi_{(gl, \alpha)}^2 \quad (38)$$

$\chi_{(gl, \alpha)}^2$ , representa o qui-quadrado tabelado para o nível de significância  $\alpha$  e  $gl$  grau de liberdade.

Caso contrário tem-se um indicativo de erro no ajustamento devendo-se proceder análise cuidadosa da matriz variância covariância (MVC) dos valores observados, possibilidade de falha grosseira ou presença de erros sistemáticos, ou que o modelo matemático não é consistente para os valores observados ou ainda um possível mal condicionamento do sistema (Gemael, 1994).

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 MATERIAL

- Laboratório de Fotogrametria do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná - CPGCG/UFPR;
- 1 microcomputador Pentium 4 – 2,0 GHz;
- 2 câmaras digitais Sony DSC-F717 (Figura 1) com resolução de 5,2 megapixels – CCD 2560x1920 pixels; (Sony, 2002) pertencentes à Carolina Machado Michelotto ns.1396050 – 03/03 – câmara (1) - e Michele Muller ns.1396063 - 03/03 – câmara (2);

- softwares MATLAB 6.5, ENVI 3.4, Microsoft OFFICE, SURFER 8.0;
- campo de calibração de câmaras – CPGCG/UFPR (Figura 4).

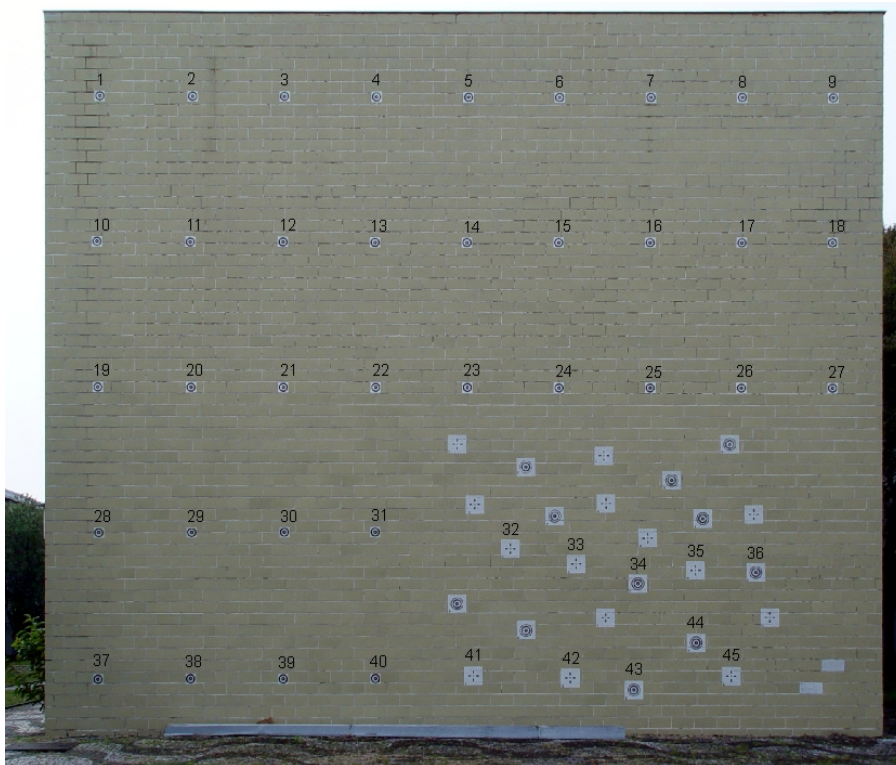


Figura 4 – Campo de calibração da UFPR.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Calibração das Câmaras Digitais

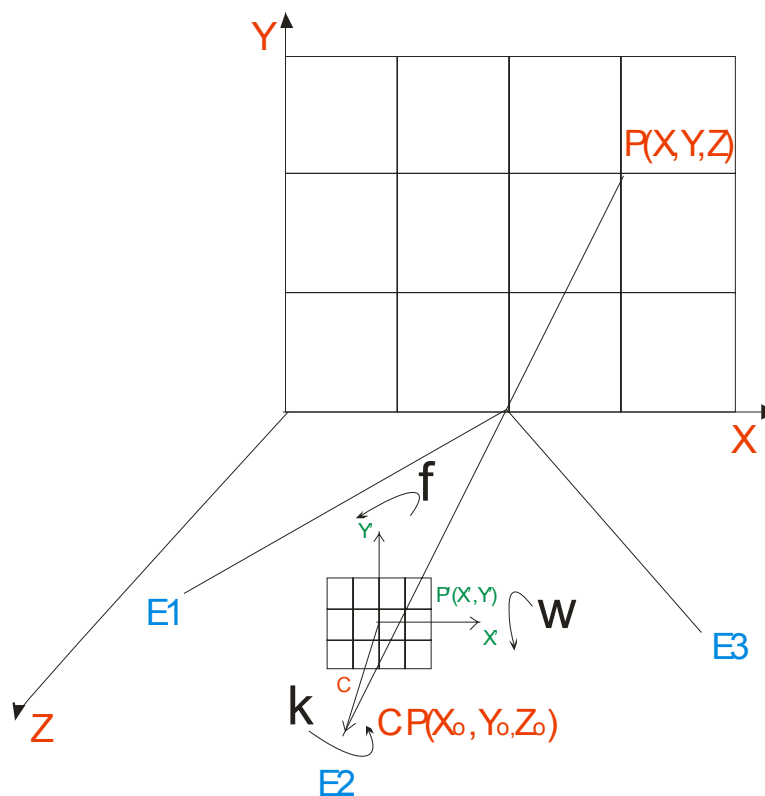


Figura 5 – Sistemas de Referência Aplicados.



As calibrações das câmaras digitais foram realizadas utilizando o Método das Câmaras Convergentes adaptado as seguintes condições, conforme Figura 5:

- tomada de 12 imagens no total, ou 4 imagens em três posições convergentes com ângulos de aproximadamente 0°, 45° e 90°, respectivamente denotadas estações E1, E2 e E3;
- as quatro imagens tomadas em cada estação foram rotacionadas entre si, de cerca de 90°, no sentido anti-horário, perfazendo  $K$ 's respectivamente iguais a 0°, 90°, 180° e 270°;
- foram utilizados 45 pontos de apoio de campo, e todos estes considerados como inunção de peso ou posição, durante o processo de ajustamento por mínimos quadrados na forma paramétrica;
- o desvio padrão na medida dos pontos de apoio é de 3,0 mm (previamente levantados por topografia convencional);
- o desvio padrão das medidas de imagem é de 0,1 pixel (realizadas pelo menos duas séries de leituras de todos os 45 pontos de apoio nas 12 imagens).

### 3.2.2 Modelo Matemático de Calibração

O modelo matemático de calibração é dado por:

$$x = x_0 + x' + \delta r_x + \delta d_x + \delta a_x \quad (39)$$

$$y = y_0 + y' + \delta r_y + \delta d_y + \delta a_y \quad (40)$$

Uma vez que  $(x, y)$ , são coordenadas observadas (ambiente ENVI 3.4) superabundantes, e os demais elementos das equações (39 e 40), parâmetros, naturalmente induz-se ao modelo de ajustamento por MMQ, no caso, paramétrico. Em função do método de calibração ser o das Câmaras Convergentes, exige a fixação de um referencial no espaço objeto, o que pode ser obtido através de inunções de peso ou posição durante este processo de ajustamento, conforme apresentado no item 2.10, resultando para o presente estudo o seguinte dimensionamento matricial:

- número de equações =  $2 \times 45 \times 12 = 1080$ ;
- número de incógnitas =  $6 \times 12 + 10 + (3 \times 45) = 217$ ;
- número de equações de inunção =  $(3 \times 45) = 135$ .

O processo descrito nos itens 2.10 e 2.11, foram implementados computacionalmente no ambiente MATLAB 6.5, através do programa CALIBRA10P.m.

## 4 RESULTADOS

As calibrações realizadas possuem números semelhantes para ambas as câmaras nas duas épocas de suas respectivas realizações. Os Quadros 1 e 2, referem-se às câmaras (1) e (2) respectivamente, da mesma forma os Quadros 3 e 4, porém, estes representam as calibrações realizadas utilizando unidades do Sistema Internacional de Unidades (no caso milímetros / micrometros), possibilitando ao leitor a obtenção das mesmas informações através de sistemas de unidades distintos (pixels e SI).

Quadro 1 – Calibrações Câmara (1) – pixel

DSC F717 - 1	2003	Des.Pad.	2004	Des.Pad.	Di(f04-03)	unid.
Iterações	10		9			
Convergência	9,056E-05		2,828E-05			
SigmaPosteriori	0,141		0,160			
Graus de Liberdade	998		998			
Q2amostral	140,954		159,343			
Q2tabela	169,660		189,799			
c	2904,877	1,331	2907,354	1,310	2,477	pixel
x0	-25,343	2,085	-24,154	2,380	1,189	pixel
y0	-11,635	2,090	-12,856	2,377	-1,222	pixel
k1	-2,738E-08	1,007E-09	-2,614E-08	1,213E-09	1,243E-09	pixel <sup>2</sup>
k2	3,210E-15	1,624E-15	1,121E-15	2,116E-15	-2,089E-15	pixel <sup>4</sup>
k3	2,988E-22	7,840E-22	1,535E-21	1,098E-21	1,236E-21	pixel <sup>6</sup>
P1	2,803E-07	5,257E-08	2,998E-07	5,994E-08	1,958E-08	pixel <sup>-1</sup>
P2	7,704E-07	5,232E-08	8,308E-07	5,972E-08	6,035E-08	pixel <sup>-1</sup>
A'	-9,354E-05	7,681E-05	-1,018E-04	8,978E-05	-8,273E-06	pixel
B'	-2,244E-05	7,754E-05	-1,803E-04	9,213E-05	-1,579E-04	pixel

Quadro 2 – Calibrações Câmara (2) - pixel

DSC F717 - 2	2003	Des.Pad.	2004	Des.Pad.	Di(f04-03)	unid.
Iterações	11		10			
Convergência	8,953E-05		7,760E-05			
SigmaPosteriori	0,145		0,169			
Graus de Liberdade	998		998			
Q2amostral	144,362		169,031			
Q2tabela	173,401		200,367			
c	2901,030	1,298	2900,852	1,301	-0,179	pixel
x0	-23,639	2,029	-22,093	2,227	1,546	pixel
y0	-12,332	2,042	-17,899	2,237	-5,567	pixel
k1	-2,918E-08	9,362E-10	-2,877E-08	7,364E-10	4,172E-10	pixel <sup>2</sup>
k2	3,055E-15	1,409E-15	3,339E-15	9,443E-16	2,839E-16	pixel <sup>4</sup>
k3	9,340E-22	6,340E-22	4,960E-22	3,629E-22	-4,381E-22	pixel <sup>6</sup>
P1	2,193E-07	5,201E-08	9,214E-08	5,594E-08	-1,271E-07	pixel <sup>-1</sup>
P2	1,184E-06	5,184E-08	1,030E-06	5,527E-08	-1,541E-07	pixel <sup>-1</sup>
A'	-3,472E-04	7,475E-05	-2,664E-04	7,683E-05	8,073E-05	pixel
B'	-3,127E-05	7,601E-05	-2,422E-05	7,737E-05	7,047E-06	pixel

Quadro 3 – Calibrações Câmara (1) - SI

DSC F717 - 1	2003	Des.Pad.	2004	Des.Pad.	Di(f04-03)	unid.
Iterações	7		6			
Convergência	3,919E-05		7,459E-05			
SigmaPosteriori	0,141		0,160			
Graus de Liberdade	998		998			
Q2amostral	140,952		159,343			
Q2tabela	169,659		189,799			
c	9,986	0,005	9,994	0,005	0,009	mm
x0	-0,087	0,007	-0,083	0,008	0,004	mm
y0	-0,040	0,007	-0,044	0,008	-0,004	mm
k1	-2,317E-03	8,526E-05	-2,212E-03	1,027E-04	1,052E-04	mm <sup>2</sup>
k2	2,300E-05	1,163E-05	8,054E-06	1,515E-05	-1,495E-05	mm <sup>4</sup>
k3	1,804E-07	4,751E-07	9,290E-07	6,658E-07	7,485E-07	mm <sup>6</sup>
P1	8,153E-05	1,529E-05	8,725E-05	1,744E-05	5,721E-06	mm <sup>-1</sup>
P2	2,241E-04	1,522E-05	2,417E-04	1,737E-05	1,756E-05	mm <sup>-1</sup>
A'	-9,353E-05	7,681E-05	-1,017E-04	8,978E-05	-8,190E-06	mm
B'	-2,242E-05	7,754E-05	-1,802E-04	9,213E-05	-1,578E-04	mm

Quadro 4 – Calibrações Câmara (2) - SI

DSC F717 - 2	2003	Des.Pad.	2004	Des.Pad.	Di(f04-03)	unid.
Iterações	7		6			
Convergência	3,879E-05		2,396E-05			
SigmaPosteriori	0,145		0,169			
Graus de Liberdade	998		998			
Q2amostral	144,365		169,039			
Q2tabela	173,404		200,377			
c	9,972	0,004	9,972	0,004	-0,001	mm
x0	-0,081	0,007	-0,076	0,008	0,005	mm
y0	-0,042	0,007	-0,061	0,008	-0,019	mm
k1	-2,470E-03	7,924E-05	-2,435E-03	6,232E-05	3,512E-05	mm <sup>2</sup>
k2	2,185E-05	1,009E-05	2,392E-05	6,763E-06	2,065E-06	mm <sup>4</sup>
k3	5,678E-07	3,843E-07	3,009E-07	2,200E-07	-2,669E-07	mm <sup>6</sup>
P1	6,377E-05	1,513E-05	2,682E-05	1,627E-05	-3,696E-05	mm <sup>-1</sup>
P2	3,443E-04	1,508E-05	2,994E-04	1,608E-05	-4,488E-05	mm <sup>-1</sup>

A'	-3,472E-04	7,475E-05	-2,665E-04	7,683E-05	8,069E-05	mm
B'	-3,125E-05	7,601E-05	-2,400E-05	7,737E-05	7,256E-06	mm

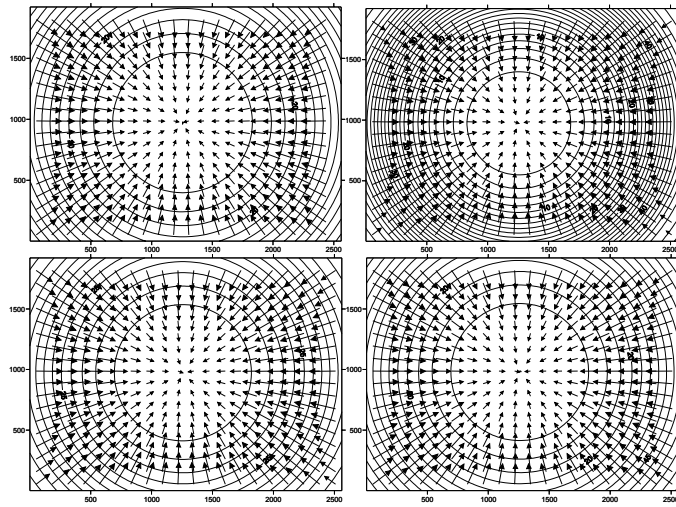


Figura 6 – Distorção Radial Simétrica - Câmaras Sony DSC-F717 Superior (1), Inferior (2) – Esquerda (2003), Direita (2004) - Unidade = Pixel

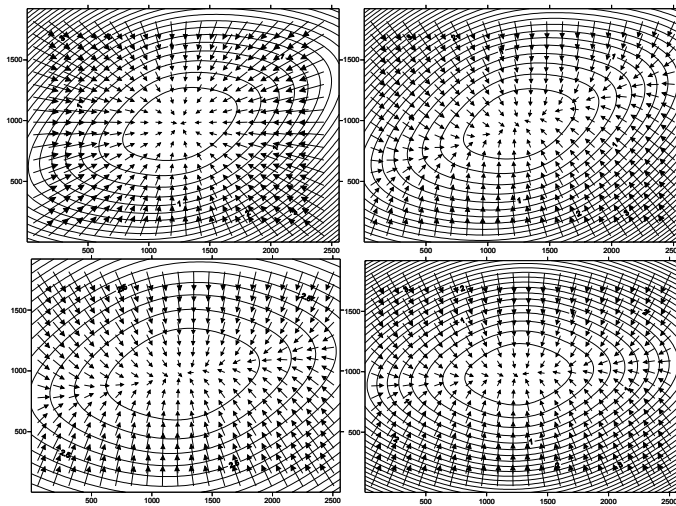


Figura 7 – Distorção Descentrada - Câmaras Sony DSC-F717 Superior (1), Inferior (2) – Esquerda (2003), Direita (2004) - Unidade = Pixel

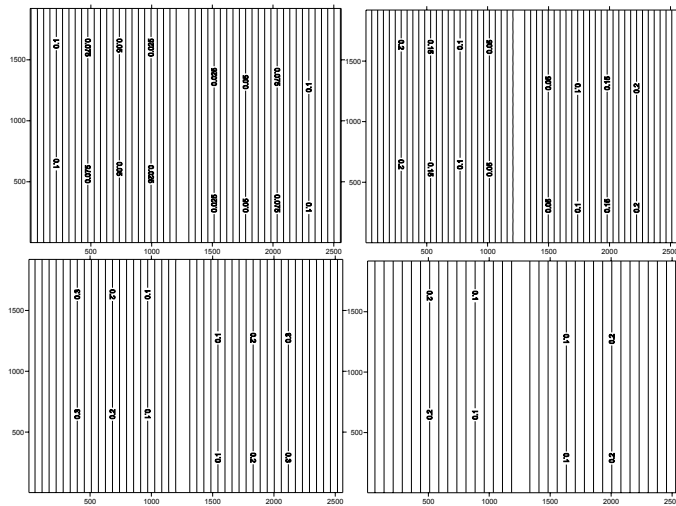


Figura 8 – Distorção de Afinidade - Câmaras Sony DSC-F717 Superior (1), Inferior (2) – Esquerda (2003), Direita (2004) - Unidade = Pixel

#### 4.1 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Para melhor identificar o real efeito da variação temporal dos parâmetros calibrados idealizou-se o seguinte teste, que foi realizado para todos os pixels da imagem, e para ambas as câmaras:

- ) Partindo-se do referencial de imagem (coluna e linha) com suas distorções, vai-se até o referencial fotogramétrico com todos os erros sistemáticos corrigidos. Usa-se nesta operação os parâmetros da primeira calibração;
- ) Retornando-se do referencial fotogramétrico com todos os erros sistemáticos corrigidos, chega-se de volta ao referencial de imagem com suas distorções. Usa-se nesta operação os parâmetros da segunda calibração. Mais ainda, para não incorrer em erros devidos aos altos valores de distorção radial presente, utiliza-se a metodologia iterativa de Newton-Raphson, conforme justificada em MACHADO et al. (2004).

Através deste procedimento pode-se observar o efeito global da parametrização definida pela calibração, estabelecendo-se, de forma prática, a diferença entre ambas as calibrações de uma mesma câmara. As Figuras 9 e 10 apresentam, para as câmaras (1) e (2), os erros que seriam gerados caso não se fizesse a segunda calibração, justificando a necessidade de calibração de forma regular no tempo. O Quadro 5 ilustra em termos estatísticos a mesma diferença que se vê nas Figuras 9 e 10.

Quadro 5: Análise Estatística das Diferenças entre Calibrações de uma mesma Câmara.

Estatística	Câmara Digital (1)	Câmara Digital (2)
0,0 pixel <= Erro < 0,5 pixel	1,298%	0,000%
0,5 pixel <= Erro < 1,5 pixel	24,978%	0,000%
1,5 pixel <= Erro < 2,5 pixel	59,881%	0,000%
2,5 pixel <= Erro < 3,5 pixel	5,551%	0,000%
3,5 pixel <= Erro < 4,5 pixel	3,008%	0,627%
4,5 pixel <= Erro < 5,5 pixel	1,614%	2,498%
5,5 pixel <= Erro	3,669%	96,875%
Erro médio em Coluna	-1,300	-1,189
Erro médio em Linha	-1,055	-5,748
Desvio-padrão em Coluna	0,137	0,265
Desvio-padrão em Linha	0,108	0,223
Erro mínimo/máximo em Coluna	-17/+11	-6/+6
Erro mínimo/máximo em Linha	-12/+11	-11/0

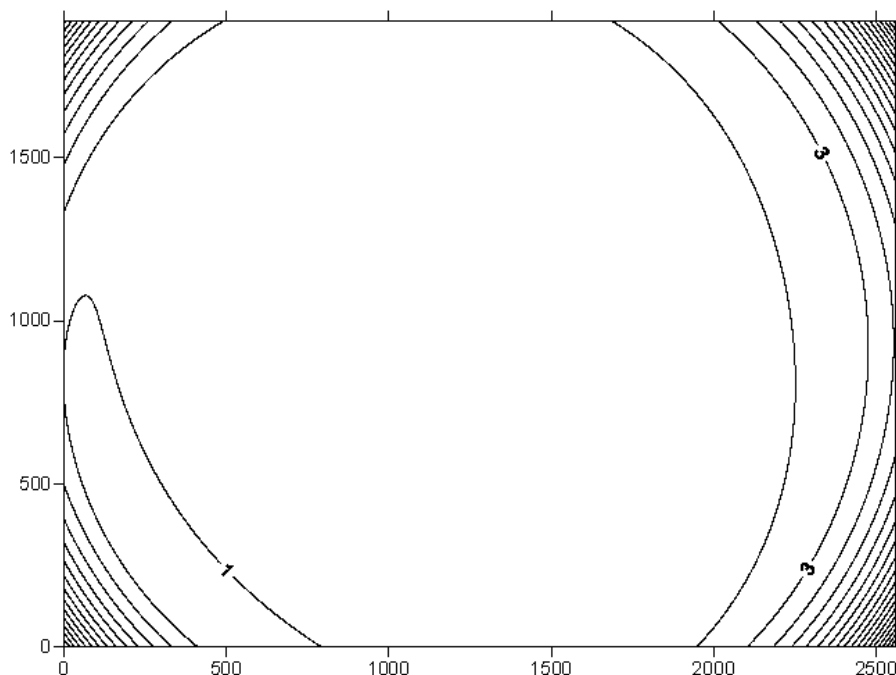


Figura 9 – Variação Temporal da Calibração - Câmaras Sony DSC-F717 – (1) – Unidade = Pixel

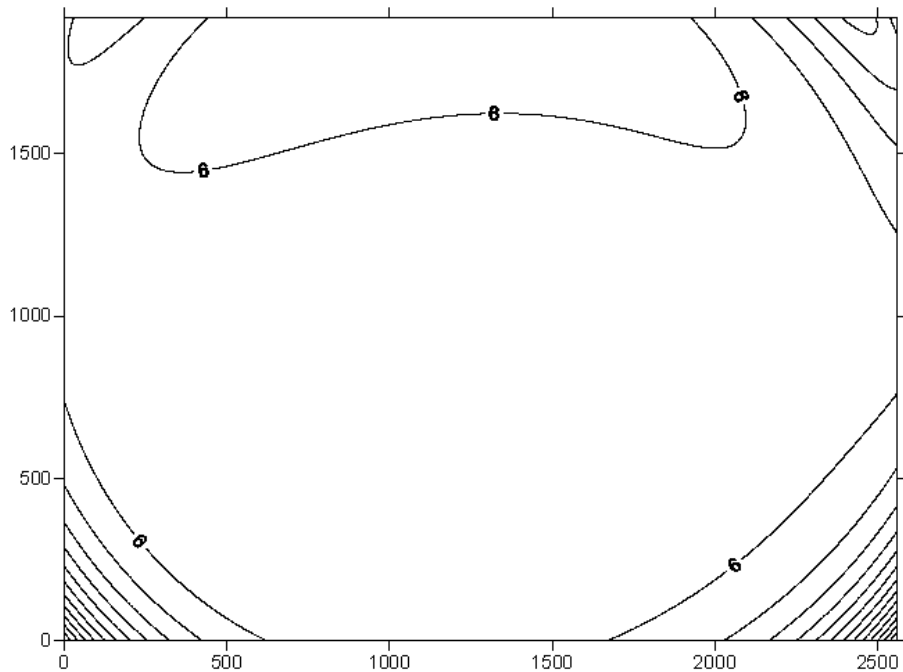


Figura 10 – Variação Temporal da Calibração - Câmaras Sony DSC-F717 – (2) – Unidade = Pixel

## 4.2 COMENTÁRIOS

Ainda que se possa alegar a não significância física para os elementos calculados em *pixels*, é inegável sua praticidade e independência, pois necessita-se tão somente da informação da resolução com que se obteve as imagens para calibração. Haverá para cada câmara uma dimensão de *pixel* diferente (a rigor, ainda que sejam do mesmo modelo) o que pode representar uma melhoria de precisão, pois se levamos em conta que as dimensões dos sensores de área (CCD) são fornecidas normalmente até o décimo ou centésimo de milímetro e que esta medida ou parte dela representa vários *pixels*, este fato já é por si relevante, principalmente se considerarmos o crescente aumento na resolução dos sensores nas câmaras de baixo custo (em novembro de 2003 a empresa Sony colocou no mercado o modelo DSC-F828 de 8,2 megapixels de resolução – CCD 3264x2448 pixels e dimensões 8,8x6,6mm - ao custo FOB US\$ 1200,00), e prevê, que até 2007 essa resolução deve dobrar para as câmaras desta categoria.

Lembrando que as câmaras (1) e (2) foram produzidas num mesmo lote de fabricação (números de série 1396050 – 03/03 e 1396063 - 03/03), e tomando em conta as semelhanças em seus parâmetros de calibração, consideramos que tais semelhanças podem demonstrar a qualidade de montagem e dos componentes construtivos das mesmas.

Embora neste momento a utilização do *pixel* como unidade no espaço imagem passe para obriedade, a grande maioria dos autores reluta em seu uso, tal como Mills et al. (1996).

O modelo de calibração com 10 parâmetros ( $c, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, A', B'$ ), tem sido o mais freqüente Elaksher et al. (2002); Berberam (2002); Alharthy, Bethel (2002); Wiggenhagen (2002) e Habib (2002) (embora este último considere significativos apenas  $c, x_0, y_0, k_1$ ).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### Conclusões:

- as câmaras digitais não métricas (de baixo custo) e de pequeno formato testadas no presente trabalho podem ser consideradas estáveis, porém, tal qual as câmaras convencionais necessitam de calibração periódica;
- é possível a calibração de qualquer câmara digital a partir do conhecimento da resolução de seu sensor de área;

- o *pixel* pode ser utilizado como unidade no sistema imagem;
- a distorção descentrada nas câmaras empregadas alcançaram valores de até 7 pixels, indicando ser necessário sua consideração em trabalhos fotogramétricos;
- os valores para distorção devido à não ortogonalidade para as quatro calibrações realizadas sempre estiveram abaixo de meio pixel, indicando consistência e rigidez dos sensores de área testados;
- as câmaras digitais não métricas (de baixo custo) e de pequeno formato têm real potencial para uso em Fotogrametria;
- o uso do *pixel* como unidade no sistema imagem indica melhoria da precisão dos procedimentos Fotogramétricos.

#### **Recomendações:**

- aprofundamento na análise de significância dos parâmetros de calibração;
- automação do processo de calibração;
- utilização de câmaras com sensores de área CMOS, uma vez que os fabricantes apontam para este como preferencial no futuro próximo;
- desenvolvimento de modelos de calibração específicos às câmaras digitais (de pequeno formato, baixo custo...).

## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALHARTHY, A., BETHEL J. **Laboratory Self-Calibration of a Multi-Band Sensor**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002. Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Photogrammetry**. Falls Church: ASP, 4ed, 1980, 1056p.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Non Topographic Photogrammetry**. Falls Church: ASPRS, 2ed, 1989, 445p.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998, 243p.

ANDRADE, J.B., OLIVAS, M.A. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas**. Boletim de Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, nº 26, 39p, Curitiba, 1981.

ATKINSON, K.B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Department of Photogrammetry and Surveying – University College London, Whittles Publishing, 1996, 371p.

BERBERAM, A.L. **Semi-Automatic Correction of Digital Images of Flat Objects**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002, Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

BORNAZ, L. et al. **Engineering and Environmental Applications of Laser Scanner Techniques**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002, Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

ELAKSHER, A. et al. **Assessment of two cheap Close-Range Feature Extraction Systems**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002, Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. Curitiba, 1993, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994,319p.

GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. **Digital Image Processing**. Addison Wesley, 1993, 509p.

HABIB, A.F. et al. **New Approach for Calibrating off-the-shelf Digital Cameras**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002, Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

KAVOURAS, M. **On the detection of outliers and the determination of reability in geodetic networks**. Department of Surveying Engineering - University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, 1987, 120p.

LUGNANI, João Bosco. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba: ed UFPR, 1987, 134p.

MERCHANT, D.C. **Analytical Photogrammetry: Theory and Practice. Part I**, Columbus, Ohio, 1988, Department of Geodetic Science, The Ohio State University.

MACHADO, A.M.; MITISHITA, E.A.; SANTOS R.L; BARBOSA, F.P. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato Sony DSC-F717**. Série em Ciências Geodésicas Vol. 3, 292-309p, Curitiba, 2003.

MILLS, J.P. et al. **Aerial Photography for Survey Purposes with a High Resolution, Small Format, Digital Camera**. Photogrammetric Record, 15(88): 575-587 Outubro, 1996.

MITISHITA, E.A. **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na área Florestal**. Curitiba, 1997, Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 253p.

MONIWA, H. **Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications**. Fredericton, N.B., 1977, Tese (Doctor of Philosophy) – Department of Surveying Engineering – University of New Brunswick, 107p.

NOVAK, K. **Analytical Photogrammetry (GS 628)**. Columbus, Ohio, 1991, Department of Geodetic Science and Surveying.

OLIVEIRA, C. **Dicionário Cartográfico**. IBGE: Rio de Janeiro, 3ed, 1987, 645p.

REISS, M.L.L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Métodos e Desenvolvimento de Protótipo**. Dissertação de Mestrado, Presidente Prudente, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, 2002.

ROSIER, F.A. **Aerotriangulação Semi-Analítica: Ajustamento Simultâneo com Injunções Posicionais**. Curitiba, 1983, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry - Volume I**. TerraScience, Laurelville, Ohio, 1999, 428p.

SONY. **Digital Still Camera Cybershot DSC-F717**. Sony Corporation, 2002,121p.

WIGGENHAGEN, M. **Calibration of Digital Consumer Cameras for Photogrammetric Applications**. Photogrammetric Computer Vision – PCV02, September 9-13, 2002, Graz, Austria, Proceedings: Anais CD-ROM, Part A.

#### **Sites Consultados:**

<http://homepages.ihug.com.au/~parsog/Guy/sensors.html> acessado em 24/03/2003

[www.sony.com](http://www.sony.com) acessado em 24/03/2003