

Detecção Automática de Alvos no Processo de Calibração pelo Método das Fotos Convergentes

Glauber Acunha Gonçalves¹
Edson Aparecido Mitishita²

¹UFPR - Universidade Federal do Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
FURG – Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Departamento de Física
glauberac@ufpr.br

²UFPR - Universidade Federal do Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
mitishita@ufpr.br

RESUMO

A calibração de câmaras digitais de pequeno formato tem sido alvo de muitos experimentos nos últimos anos. A utilização de campos de calibração com as mais diversas configurações traz o interessante problema da identificação automática dos alvos, no sentido de tornar o processo mais eficiente e de evitar erros grosseiros nas observações necessárias ao ajustamento que determina os parâmetros geométricos. Esse artigo trata do desenvolvimento de uma metodologia para esse fim, aplicado ao campo de calibração do Laboratório de Fotogrametria da UFPR. Explora-se o fato de que os pontos a serem identificados nas imagens têm, em geral, sua posição absoluta conhecida e de, na maior parte das vezes, ser possível obter valores aproximados, relativamente precisos, da orientação exterior da câmara. Após efetuar uma projeção perspectiva dos alvos e, assim, construir uma imagem sintética aproximada de sua conformação real, o algoritmo da máxima correlação cruzada é utilizado para determinar a coordenada de imagem do objeto de interesse. O sistema resulta uma estrutura de dados suficiente para que o processo de ajustamento seja aplicado de imediato. Um experimento de ajustamento é efetuado no objetivo de testar a metodologia e bons resultados são apresentados.

Palavras-chave: calibração de câmaras digitais, método das fotos convergentes, máxima correlação cruzada.

Automatic Target Detection in the Calibration Process by the Convergent Pictures Method

ABSTRACT

The calibration of common digital cameras is the objective of numerous experiments published in the last years. In general, calibration fields are used with the most several configurations. The process produces the interesting problem of the automatic identification of the targets in order to turn this process more efficient and avoiding blunders in the observations. This article treats of the development of a methodology for that goal, applied to the UFPR Photogrammetry Lab's Calibration Field. The fact of knowing the absolute position of the targets and of approximated values for external orientation of the camera it will be explored. The mcc algorithm (maximum crossed correlation) will be used to determine the position of better match between a synthetic image of the target and the image area where it should be found. For construction of the target's synthetic image a perspective real projection will be made. The result will be a data structure so that the adjustment process could be immediately applied. An adjustment experiment is performed for to test the methodology and good results are presented.

Keywords: digital camera calibration, convergent pictures method, maximum crossed correlation

1. INTRODUÇÃO

As câmaras fotográficas digitais estão no mercado há pelo menos dez anos. Porém, somente nos últimos dois percebe-se sua popularização e, hoje, é artigo de utilidade comum a um grande número de usuários: fotógrafos profissionais, leigos nas suas atividades de lazer ou hobby, artistas e técnicos. Evoluíram tecnologicamente, foram miniaturizadas, tiveram sua capacidade expandida e seu valor de mercado é atualmente acessível à maioria das famílias de classe média do Brasil. Não seria exagero, ainda, afirmar que seu uso no auxílio às diversas atividades profissionais de engenharia está bastante difundido, especialmente nos registros pictóricos, onde a precisão geométrica não é fundamental.

Em relação a levantamentos cartográficos e a técnicas metrológicas, até a pouco, ainda havia certo ceticismo em seu uso. Fartos estudos desenvolvidos e publicados nos últimos anos, no entanto, alteram decisivamente essa visão e tornam as câmaras digitais um instrumento passível de produzir resultados de alta precisão a baixo custo, graças a manipulação digital das imagens por elas geradas, passíveis de serem retificadas em modestos sistemas computacionais pessoais.

Fundamental nesse processo de retificação são os modelos matemáticos de correção de erros sistemáticos, que consideram os efeitos produzidos pela conformação do sistema de lentes e seu posicionamento em relação ao plano fotosensível, onde a cena real será projetada e a imagem, em primeira instância, será gerada. O conhecimento com alta precisão dos parâmetros de tais modelos é fundamental para obtenção de resultados confiáveis e a melhor forma de assim obtê-los é, classicamente, o processo de calibração.

No Laboratório de Fotogrametria, do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, tem se consagrado o uso de uma metodologia de calibração com base em fotos convergentes de um campo de alvos devidamente dimensionado para o caso dessas câmaras de pequeno formato. Nesse processo recomenda-se, para garantia da qualidade dos parâmetros calibrados, a tomada de 12 imagens do campo (que possui 60 alvos dispersos estrategicamente por toda a sua área) em variadas condições de orientação exterior. Isso torna a tarefa de identificação manual de todos os alvos em todas as imagens um processo repetitivo e demorado, por isso mesmo, sujeito a erros humanos, além de dependente da acuidade visual de cada usuário.

A proposta do estudo desenvolvido, ora registrado, é implementar um sistema computacional que identifique e determine precisamente a posição de cada alvo nas imagens, permitindo o ajustamento e a determinação dos parâmetros de calibração com o mínimo de interação com o operador. A solução encontrada integra elementos de síntese e processamento digital de imagens com a fotogrametria digital. Um protótipo para teste foi inicialmente implementado no ambiente gráfico do MatLab®.

2. CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS DIGITAIS

Uma imagem fotográfica é sempre resultado da projeção de objetos tridimensionais do mundo real em um plano. O mecanismo de sua geração pode ser entendido, sumariamente, considerando a trajetória de um fóton, que parte de uma fonte de luz, é refletido nos objetos do meio, atravessa a atmosfera e um conjunto de lentes, vindo a encontrar o elemento cuja fotosensibilidade permite o seu registro. Esse elemento é, nos casos das câmaras digitais, o sensor CCD (Charge-Coupled Devices). Idealizada a geometria dessa trajetória como uma linha reta, para simplicidade matemática, chega-se à condição de colinearidade (MOFFITT/MIKHAIL, 1980) e em decorrência, a transformação projetiva. Os processos que separam a condição real dessa, matematicamente ideal, passam por considerar efeitos devidos a distorções provocadas por aspectos óptico-mecânicos das lentes que também são passíveis de modelagem. Tanto melhor esses modelos conformam a realidade quanto seus parâmetros possam ser estimado. A estimativa desses parâmetros é a base do processo de calibração de câmaras.

O auge do desenvolvimento da calibração de câmaras deu-se entre 1950 e 1970. Uma revisão bastante útil dos avanços científicos obtidos nesse período pode ser encontrada em CLARKE/FRYER [1998]. É consenso que o maior destaque nessa matéria deve ser atribuído aos resultados das experiências apresentados por Brown na Convenção Anual da Sociedade Americana de Fotogrametria, em 1965, publicados no ano seguinte (BROWN, 1966). Além de revisar mais de 40 anos de estudos, Brown comprovou que era possível modelar as distorções descentradas das lentes com base na teoria ray-tracing, de Conrady, 1919.

Também BROWN [1971] é um artigo fartamente referenciado. Nele foi proposto o uso de um campo de calibração com linhas retas para determinar os parâmetros dos modelos de distorção, até então somente obtidos em laboratórios através de colimadores. Ainda hoje a maioria dos processos de calibração fundamenta-se na obtenção de fotos de campos de calibração e no modelo de Conrady-Brown.

É importante considerar que todo esse desenvolvimento teve por objeto câmaras fotogramétricas utilizadas em aerolevantamentos. No caso das câmaras digitais de pequeno formato, porém, as lentes de decímetros de raio, passam a possuir milímetros. Da mesma forma as distâncias focais. O filme fotográfico flexível, considerado um meio contínuo, comumente ocupando área de 230x230 mm, é substituído por um dispositivo rígido discretizado em pixels, com ordem de grandeza de poucos mm. O processo de calibração tem sido alvo, assim, de adaptações, porém, ainda sem profundas mudanças em relação ao método consagrado. Publicações como as de HEIKKILÄ/SILVÉN [1997], STURM/MAYBANK [1999], ZHANG [1998] e HABIB/MORGAN [2003], são amostras de experimentos que buscam aprimorar o processo de calibração de câmaras digitais de pequeno formato.

Em face disso, ainda é tema de pesquisa a calibração dessas câmaras, especialmente em relação a questões como:

- o a estabilidade dos parâmetros com a variação de temperatura e com o uso contínuo do equipamento;

- o a estabilidade da distância focal em função da possibilidade de zoom que as câmaras invariavelmente possuem;
- o a não perpendicularidade entre o plano do CCD e o eixo focal;
- o a parametrização das distorções radial simétrica e descentrada;
- o a consideração do tamanho dos pixels;
- o aspectos relacionados a super-parametrização, o mau condicionamento dos sistemas no ajustamento, a otimização de algoritmos e, mesmo, sua robustez.

Alguns desses estudos vêm sendo empreendidos no Laboratório de Fotogrametria da UFPR, como em MACHADO et al. [2004] e WANDRESEN [2003]. O campo de calibração desses experimentos é mostrado na figura 1, com o arranjo dos alvos representado na figura 3. Na parede externa do Bloco VI do Centro Politécnico estão marcados 60 alvos, segundo os três padrões geométricos mostrados na figura 2. As coordenadas desses alvos, num sistema de referência arbitrado com origem num dos próprios alvos, foi determinada por múltiplos levantamentos utilizando estação total e teodolitos. As dimensões do campo foram determinadas levando em conta a área visada por uma câmara modelo, situada a uma distância que garanta boas imagens com foco no infinito e permita a projeção de alvos em toda área do CCD, a cada tomada. O tamanho dos alvos é função da resolução média obtida.

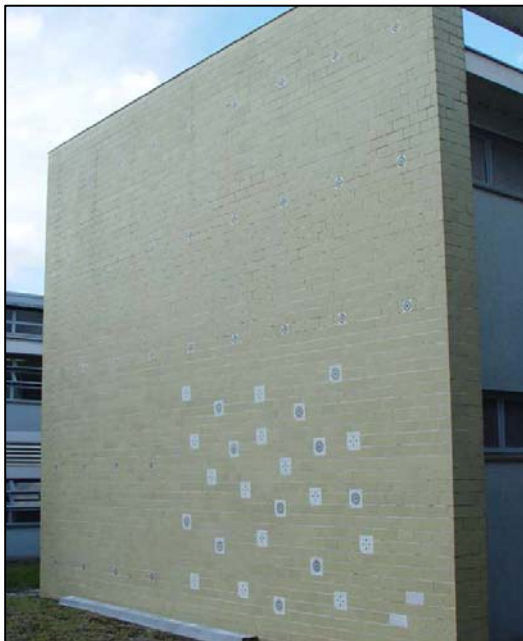


Figura 1 – Campo de Calibração

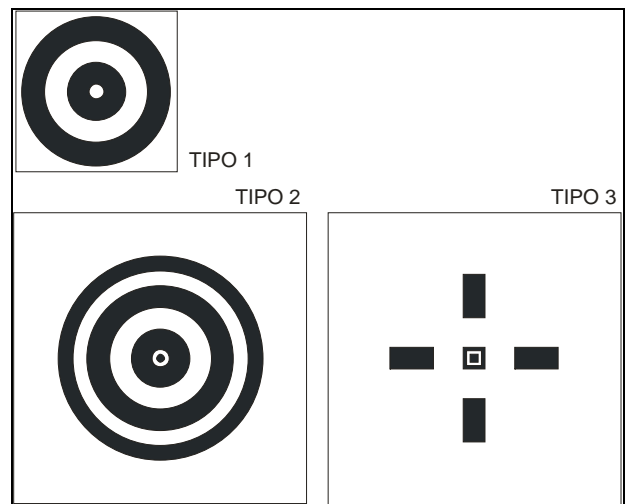


Figura 2 – Tipos de alvos

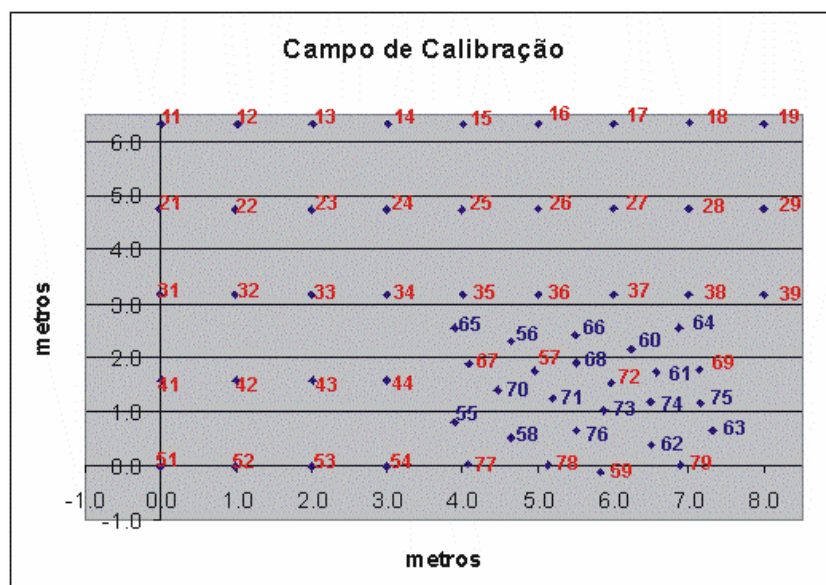


Figura 3 – Posição de todos os alvos. Em vermelho os utilizados no experimento.

Adquirido um conjunto de imagens, efetua-se a leitura das coordenadas de imagem de cada alvo. Estarão conhecidas, pois, as coordenadas dos alvos no espaço objeto e no espaço imagem, para cada

tomada. Resta executar um ajustamento por mínimos quadrados para determinação dos parâmetros de um modelo como o proposto nas equações 1 e 2.

$$x = \delta x - f \frac{(X - X_o)(\cos \Phi \cos K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \quad (1)$$

$$y = \delta y - f \frac{-(X - X_o)(\cos \Phi \sin K) + (Y - Y_o)(\cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K) + (Z - Z_o)(\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K)}{(X - X_o)(\sin \Phi) - (Y - Y_o)(\sin \Omega \cos \Phi) + (Z - Z_o)(\cos \Omega \cos \Phi)} \quad (2)$$

onde,

- x, y são as coordenadas dos alvos no espaço imagem;
- X, Y, Z são as coordenadas dos alvos no espaço objeto;
- X_o, Y_o, Z_o são as coordenadas do centro perspectivo, posição da câmara, no espaço objeto;
- K, Φ, Ω são os ângulos de orientação do eixo óptico;
- $\delta x, \delta y$ são as correções dos erros sistemáticos, segundo modelos como os das equações 3 e 4.

$$\delta x = x_o + \left\{ (x - x_o) (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \right\} + \left\{ p_1 [r^2 + 2(x - x_o)^2] + 2p_2 (x - x_o)(y - y_o) \right\} \quad (3)$$

$$\delta y = y_o + \left\{ (y - y_o) (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \right\} + \left\{ p_2 [r^2 + 2(y - y_o)^2] + 2p_1 (x - x_o)(y - y_o) \right\} \quad (4)$$

onde,

- x_o, y_o é o deslocamento do ponto principal;
- k_1, k_2, k_3 são os coeficientes do polinômio que modela a distorção radial simétrica;
- p_1, p_2 são os coeficientes do polinômio que modela a distorção descentrada;
- r é a distância ao ponto principal dada por $[(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2]^{1/2}$.

Com relação ao conjunto de imagens, cabe uma importante observação. BROWN [1971] chama a atenção para a correlação entre os parâmetros de calibração e a localização e orientação da câmara. ANDRADE [1998] também apresenta uma análise detalhada sobre essa correlação no caso da calibração de câmaras aerofotogramétricas pelo método dos campos misturados. Para minimizar esse problema na determinação dos parâmetros é recomendado utilizar um conjunto de imagens obtidas segundo a configuração mostrada na figura 3. Ou seja, são executadas 12 tomadas fotográficas. São escolhidas 3 posições sobre o nível do terreno, uma aproximadamente centrada, uma à esquerda e outra à direita do campo. De cada posição são feitas 4 fotos, efetuando rotações de 90° em relação ao eixo óptico da câmara.

Perceba-se que assim serão centenas de pontos a serem identificados nas imagens a cada experimento, donde, automatizar esse processo é passo fundamental no sentido da eficiência da calibração.

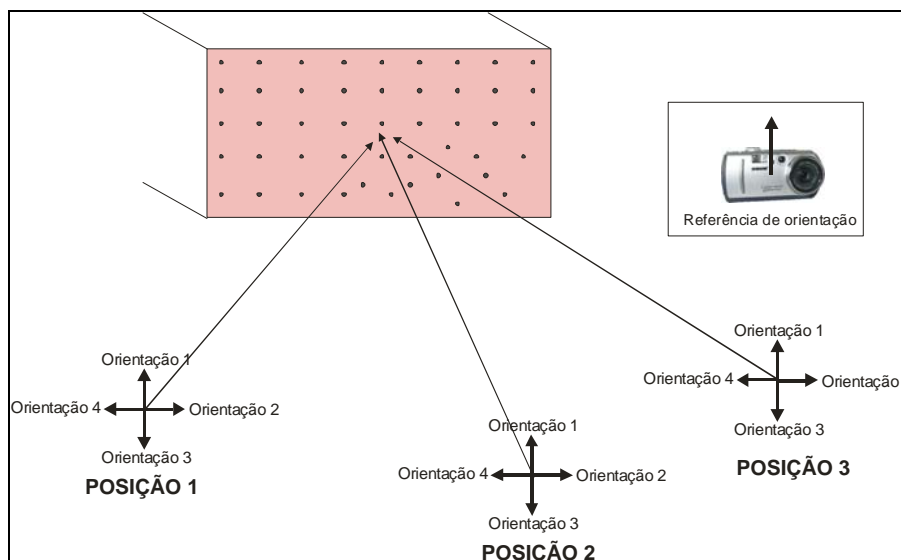


Figura 4 – Posição e orientação das imagens para calibração

3. RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DOS ALVOS

São diversas as técnicas conhecidas para identificação automática de feições nas imagens, normalmente baseadas na busca de áreas similares e na distribuição de feições mapeadas por pontos e linhas notáveis, delimitados por detectores de borda. SCHENK [1996] explora várias dessas técnicas no caso da geração automática de modelos numéricos de elevações, identificando pontos homólogos em um par estereoscópico.

No caso aqui estudado, trata-se de identificar um padrão conhecido *a priori*, composto de um conjunto de primitivas geométricas simétricas e de alto contraste que marcam a posição de interesse. No entanto, não basta reconhecer a presença desse elemento sobre a imagem, ou contar o número de elementos similares, mas de determinar precisamente o centro desse alvo. O problema torna-se ainda mais complexo uma vez que seja considerado o fato da forma do objeto padrão, a ser encontrado, variar significativamente em função da projeção perspectiva e, evidentemente, dos diversos parâmetros de orientação e posição da câmara, conforme pode ser visto na figura 5, onde está registrada a mesma forma geométrica, presente numa imagem, em recortes nas posições 51, 35 e 28, respectivamente, conforme figura 3.



Figura 5 – Efeito perspectivo sobre alvo do tipo 1 numa imagem exemplo

Na solução aqui discutida, optou-se por utilizar uma metodologia que efetua a busca da posição onde ocorre o melhor casamento, com base no critério da máxima correlação cruzada, entre uma dada região da imagem e uma imagem sintética do alvo, geometricamente projetado segundo parâmetros de orientação aproximados.

O diagrama da figura 6 detalha a metodologia aplicada.

A interação do operador com o sistema restringe-se, inicialmente, a apresentar as imagens e os dados do campo de calibração. Em seguida é necessário que se determine, com alguma precisão, os parâmetros de orientação exterior de cada foto. Para tanto o processo 1 disponibiliza duas alternativas:

- aplicar uma recessão espacial simplificada. Nesse caso, o operador deverá identificar em cada imagem pelo menos 4 dos alvos do campo, de maneira aproximada. O ajustamento pelo modelo paramétrico da equação da colinearidade, sem os elementos de correção dos erros sistemáticos, fornecerá então estimativas dos valores da posição da câmara e dos ângulos de orientação.

- Informando coordenadas aproximadas do ponto onde estava a câmara no momento de cada tomada e do centro de cada imagem. Marcam-se as três posições onde o fotógrafo efetuou a aquisição e medem-se as distâncias ao ponto zero, no sistema de coordenadas do espaço objeto. Essa medida pode ser efetuada mesmo com a trena, uma vez que somente indica valores aproximado para os parâmetros X_o, Y_o, Z_o . Quanto à coordenada do ponto que está projetado no centro da imagem, indica-se simplesmente o número do alvo mais próximo ao centro geométrico da foto. Uma janela de interação, onde são apresentadas a figura com seu centro geométrico em realce e um esquema do conjunto de alvos, auxilia nessa indicação. Observe-se que, dadas essas coordenadas, pode-se determinar facilmente os ângulos de orientação Φ e Ω pelo conjunto de equações abaixo apresentadas (Eq. 5 e 6). A figura 7 apresenta a geometria utilizada na dedução dessas equações. Quanto a K , consideram-se as posições normais $0, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° , dado que o CCD está comumente orientado segundo o próprio corpo da câmara e o operador procura manter esse corpo nas posições referidas, em relação ao campo.

$$\Phi = \arctan\left(\frac{X_o - X_c}{Z_o}\right) \quad (5)$$

$$\Omega = \arctan\left(\frac{Y_o - Y_c}{\sqrt{(X_o - X_c)^2 + Z_o^2}}\right) \quad (6)$$

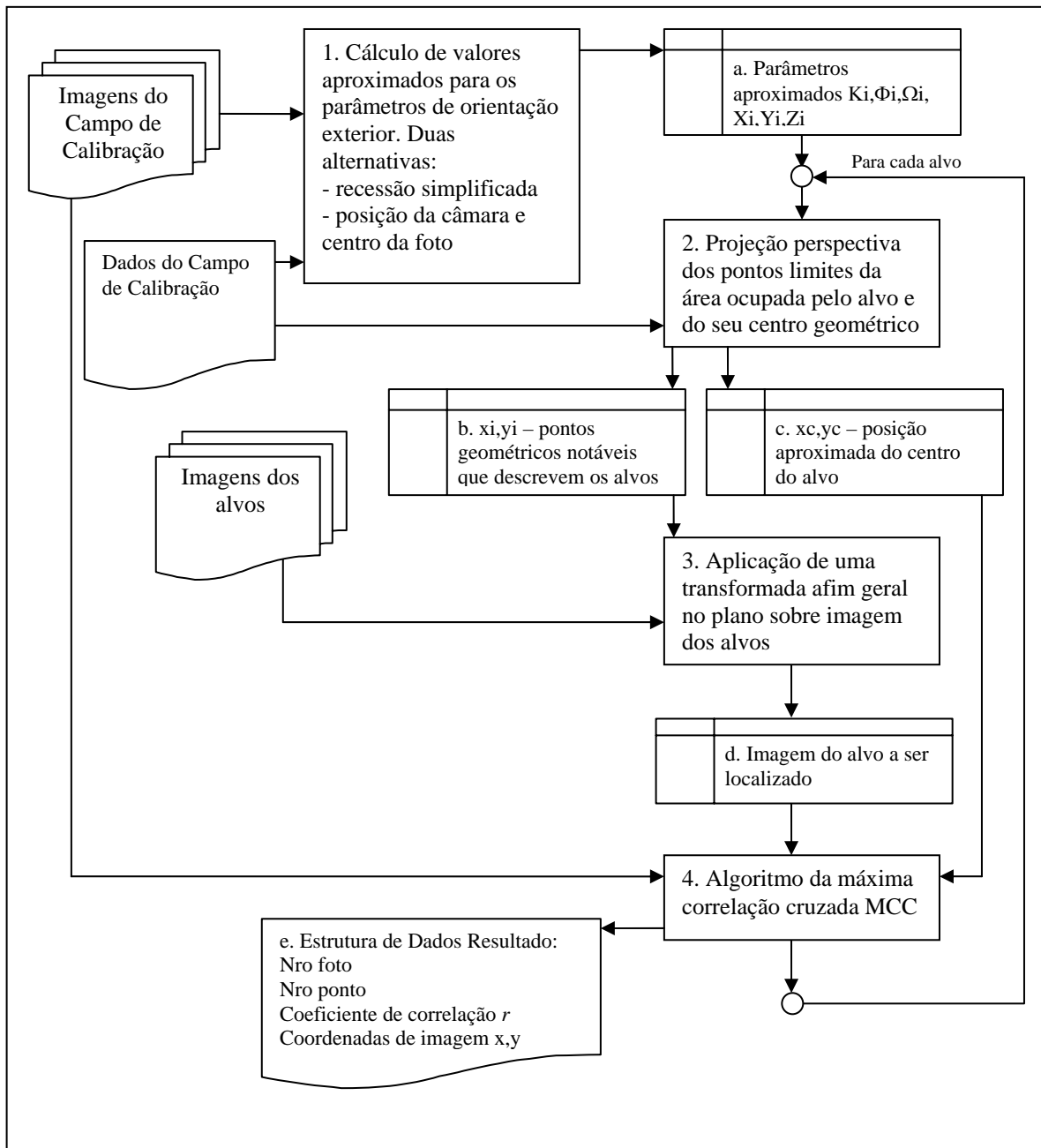


Figura 6 – Diagrama lógico do sistema

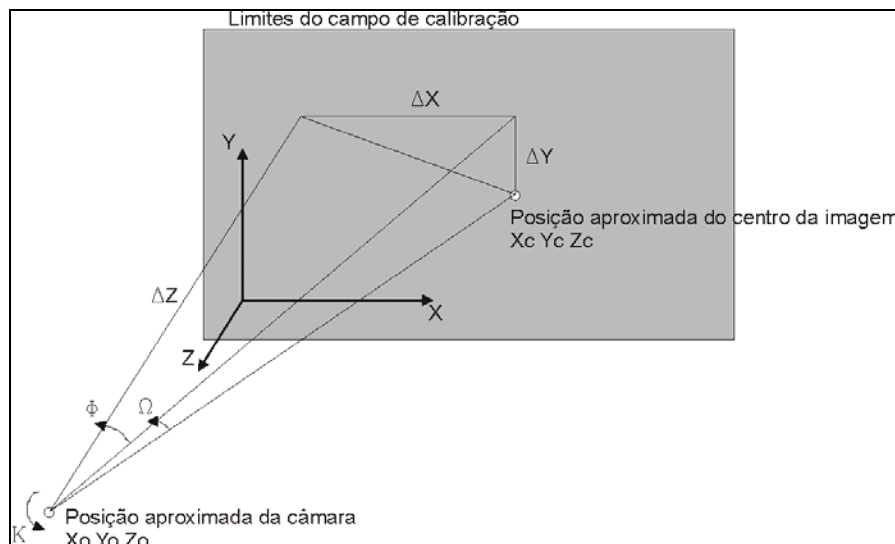


Figura 7 – Determinação aproximada dos valores Φ e Ω

A saída da rotina 1 é uma estrutura de dados com estimativas dos 6 parâmetros de orientação externa para cada imagem. Essa estrutura é a entrada de dados para a rotina 2, que efetua a projeção perspectiva da figura contorno do alvo. A base dessa transformação é a forma matricial da projeção perspectiva real em coordenadas homogêneas, conforme FOLLEY [1982](Eq. 7, 8 e 9).

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & T_1 \\ R_4 & R_5 & R_6 & T_2 \\ R_7 & R_8 & R_9 & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$x_i = \left(\frac{x_p}{z_p} \right) \cdot f \quad (9)$$

$$y_i = \left(\frac{y_p}{z_p} \right) \cdot f \quad (10)$$

Os elementos da submatriz R estão associados à orientação do referencial de mundo real no referencial de dispositivo e, os do vetor T, à translação da origem do referencial do sistema de mundo real para o centro perspectivo.

Observe-se que os elementos de orientação da direção do eixo de visão são os mesmos da orientação exterior do modelo fotogramétrico. Assim os termos da submatriz R possuem correspondência com os coeficientes da equação da colinearidade. Os termos do vetor T, de translação, correspondem aos valores X_0, Y_0, Z_0 da referida equação. O valor f , utilizado na conversão das coordenadas homogêneas para as coordenadas de imagem (x_i, y_i) , é a própria distância focal, cujo valor inicial é considerado aquele informado pelo fabricante da câmara.

Em relação aos referenciais aqui citados, é importante lembrar que na síntese de imagens, os objetos, modelados no conhecido sistema de coordenadas de mundo real, são, inicialmente, projetados no sistema de coordenadas projetivas e, finalmente, descritos em coordenadas de dispositivo, para serem visualizados segundo primitivas geométricas na imagem. Na fotogrametria, os pontos lidos inicialmente na imagem, estão num referencial próprio desse espaço, denominado sistema de coordenadas de imagem. Consideradas as dimensões físicas do sensor e seu centro geométrico como origem e estaremos diante de um novo sistema, dito "fiducial". Aplicadas, sobre as coordenadas no sistema "fiducial", as correções de erros sistemáticos e projetados os raios em direção ao espaço objeto e estarão computadas as coordenadas dos objetos, normalmente, sob um referencial geodésico local. O paralelo existente entre os descritos sistema referenciais, utilizados na computação gráfica e na fotogrametria, é muito útil na implementação dos algoritmos.

As coordenadas obtidas pelo conjunto de Eq. 4 estarão em unidades métricas, dado que f é fornecida em mm nas especificações técnicas do fabricante das câmaras. É, pois, necessário converter esses valores para o efetivo sistema de imagem, computando o número de pixels a partir do canto superior esquerdo da mesma. Essa é uma operação trivial, dado que se conhece o tamanho do CCD e o número de pixels que possui, distribuídos em linhas e colunas.

O resultado desse processamento são duas estruturas de dados com coordenadas de imagem da posição aproximada do centro dos alvos e de pontos que permitem determinar a área que ele ocupa e sua forma. Uma transformada afim geral no plano é então aplicada, na rotina 3, para reamostrar uma imagem padrão do alvo e obter uma estimativa da real aparência do mesmo, numa dada posição sobre o campo de calibração. A figura 8 apresenta alguns resultados dessa reamostragem e a área sobre a imagem original onde será feita a busca da máxima correlação.

A rotina 4, finalmente, determina a posição do centro do alvo procurado na imagem. Como já se mencionou, será computada a máxima correlação cruzada para uma janela de busca (com o padrão procurado) que contém a figura do alvo projetado, numa janela de procura, centrada na posição estimada do referido alvo, com dimensões iguais a três vezes o tamanho da primeira janela. Os métodos de obtenção de valores iniciais para os parâmetros de orientação externa, se cuidadosamente aplicados, devem garantir que o ponto procurado esteja dentro dessa janela. O cálculo do coeficiente de correlação é efetuado conforme a Eq. 11, apresentada a seguir. Os valores dos tons de cinza das imagens fotográficas utilizados nos cálculos são os da componente intensidade (I), obtida por uma transformação do sistema de cores RGB, na qual a imagem é adquirida, para o sistema IHS.

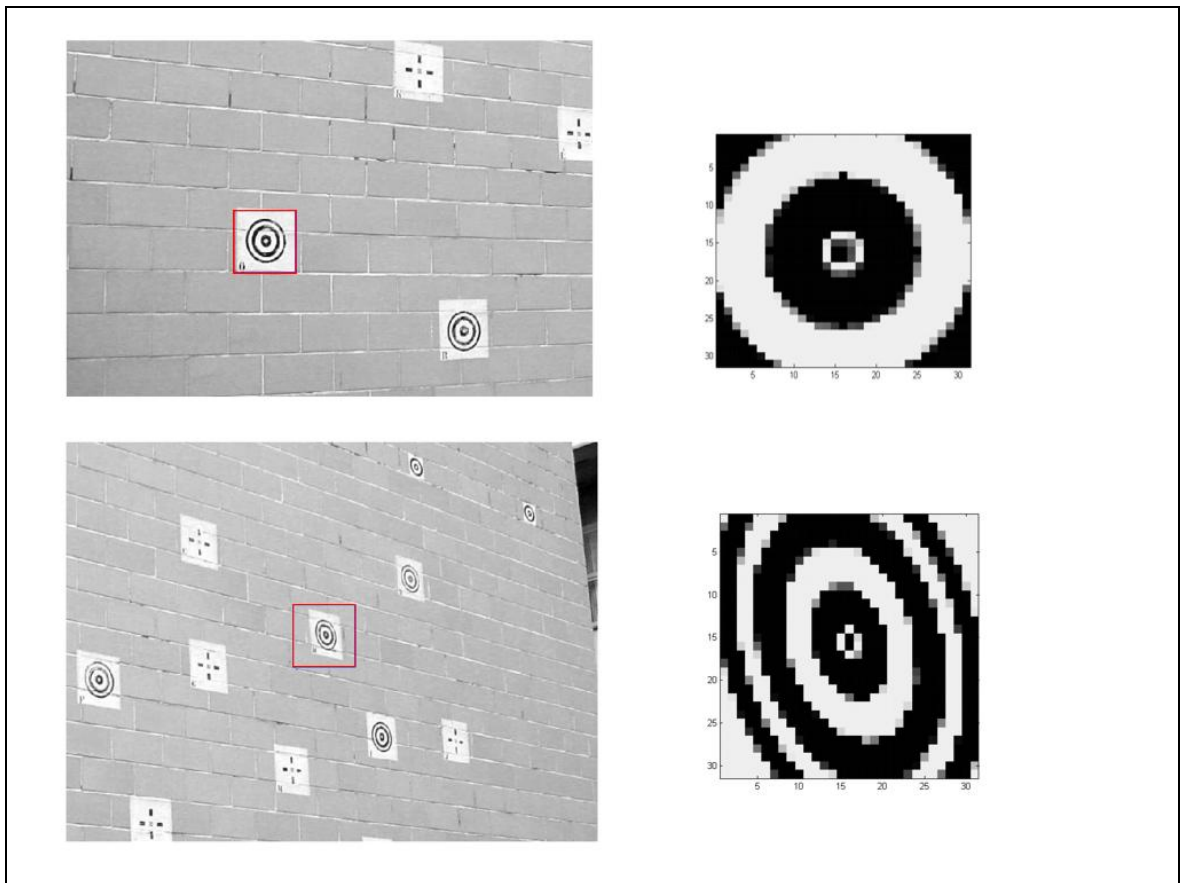


Figura 8 – Dois exemplos com o alvo projetado/reamostrado para a busca e, destacado sobre a imagem a área, onde será feita a busca

$$r = \frac{\sum_{i,j} [g_i(c_i, l_i) - \bar{g}_i][g_a(c_a, l_a) - \bar{g}_a]}{\sqrt{\sum_{i,j} [g_i(c_i, l_i) - \bar{g}_i]^2 \sum_{i,j} [g_a(c_a, l_a) - \bar{g}_a]^2}} \quad (11)$$

Na equação acima g é o tom de cinza das imagens, c_i, l_i são coordenadas dos pixels na janela de procura, c_a, l_a são coordenadas de pixels na janela de busca e \bar{g} o valor médio dos tons de cinza de todos os pixels da respectivas janelas.

O resultado final do processamento é uma estrutura de dados com índices para a imagem processada e o alvo localizado, o máximo coeficiente de correlação encontrado e as coordenadas do ponto de interesse, em pixels.

4. RESULTADO DE UM TESTE DE VALIDAÇÃO E CONSIDERAÇÕES

Um conjunto de imagens obtidas por uma câmara digital compacta SONY© DSC P50, de 2 Mpixels (matriz de 1600x1200 pontos), como a da figura 9, foi utilizada para o teste. A figura 10 exemplifica uma dessas imagens. No experimento optou-se por estimar os parâmetros de orientação medindo a posição aproximada da câmara e o centro das imagens.



Figura 9 – Câmara digital Sony DSC P50



Figura 10 – Uma das imagens utilizadas na calibração

Observou-se que nem todos os alvos estavam presentes em todas as imagens. Um teste para verificação dessa inconsistência foi incluído no algoritmo, tornando-o tolerante a essa condição. Ainda, se ao final, um dado alvo não aparece em pelo menos metade do número de imagens, ele é automaticamente retirado do ajustamento.

A tabela 1 apresenta o resultado da localização do centro do alvo pelo sistema automático para a foto 1 (da figura 10) comparado com o resultado obtido pelo processamento manual, efetuado no ambiente gráfico do sistema Autodesk Map 5.0©. Nesse caso houve a preocupação de que a imagem ocupasse, na área gráfica do ambiente interativo do sistema, a região compreendida entre os pontos (-0.5,-0.5) e (1600.5,1200.5). Assim, a leitura da posição do cursor sempre indica valores em unidades CAD absolutamente compatíveis com a escala em pixels da imagem, exceto o fato de, nessa última, os valores pertencerem ao conjunto dos números naturais.

Analisando as colunas Dif. X e Dif. Y percebe-se que em nenhum dos pontos detectados nessa imagem a diferença ultrapassou o valor de um pixel. Da mesma forma para todos os pontos em todas as imagens, num total de 421 pontos comparados. A Tabela 2 apresenta um resumo dessas diferenças totais.

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos pelo processo automático e manual

FOTO	PTO	X auto (pixel)	X auto (pixel)	X CAD (un. cad)	Y CAD (un. cad)	Dif. X (pixel)	Dif. Y (pixel)
1	9	1448	39	1447.751	39.255	-0.249	0.255
1	12	642	15	641.905	15.187	-0.095	0.187
1	13	816	66	816.384	66.288	0.384	0.288
1	14	974	113	973.885	113.300	-0.115	0.300
1	15	1115	156	1114.993	156.137	-0.007	0.137
1	16	1242	196	1241.655	195.541	-0.345	-0.459
1	17	1356	233	1356.169	232.670	0.169	-0.330
1	18	1458	266	1457.907	265.816	-0.093	-0.184
1	19	198	252	198.194	252.478	0.194	0.478
1	20	424	295	424.103	294.942	0.103	-0.058
1	21	627	333	626.582	333.436	-0.418	0.436
1	22	810	369	809.599	369.110	-0.401	0.110
1	23	972	402	972.108	402.093	0.108	0.093
1	24	1117	433	1117.625	432.559	0.625	-0.441
1	25	1247	460	1246.994	459.601	-0.006	-0.399
1	26	1363	485	1362.734	484.234	-0.266	-0.766
1	27	1467	507	1466.761	506.587	-0.239	-0.413

FOTO	PTO	X auto (pixel)	X auto (pixel)	X CAD (un. cad)	Y CAD (un. cad)	Dif. X (pixel)	Dif. Y (pixel)
1	28	170	635	169.696	634.581	-0.304	-0.419
1	29	403	657	403.255	657.162	0.255	0.162
1	30	614	677	614.302	676.994	0.302	-0.006
1	31	800	695	799.752	694.547	-0.248	-0.453
1	32	143	1041	143.127	1040.890	0.127	-0.110
1	33	383	1040	383.199	1039.951	0.199	-0.049
1	34	599	1040	598.933	1040.052	-0.067	0.052
1	35	791	1037	791.220	1036.950	0.220	-0.050
1	36	982	651	982.017	651.477	0.017	0.477
1	37	1111	691	1110.884	690.552	-0.116	-0.448
1	38	1245	747	1245.727	747.105	0.727	0.105
1	39	1382	716	1381.857	715.725	-0.143	-0.275
1	40	973	1028	973.196	1028.071	0.196	0.071
1	41	1131	1028	1131.225	1027.713	0.225	-0.287
1	42	1225	1049	1224.348	1049.209	-0.652	0.209
1	43	1355	1017	1354.785	1017.226	-0.215	0.226

Tabela 2 – Resumo das diferenças para todos os pontos

	x	y
ERRO MÉDIO	0.02	0.10
ERRO MÉDIO ²	0.26	0.27
MAX ERRO	0.99	0.94

Uma análise mais profunda do fato de o sistema considerar as unidades inteiras de medida da posição deve ser alvo de uma pesquisa mais apurada. Apenas numa primeira iniciativa procedeu-se o ajustamento dos parâmetros de calibração para um modelo que considera a distância focal f , os deslocamentos do ponto principal x_0 y_0 , k_1 , k_2 e k_3 para modelar as distorções centradas e p_1 p_2 para as distorções descentradas. A tabela 3 apresenta os resultados desse experimento.

Tabela 3 – Comparação do resultado dos ajustamentos efetuados

	Valores inteiros	Valores reais
f	6.76435	6.75633
x_0	0.00932	0.01051
y_0	0.01981	0.01581
k_1	-0.00539	-0.00554
k_2	-0.00012	-0.00006
k_3	2.07417 e-05	1.66618 e-05
p_1	-0.00029	-0.00032
p_2	-0.00067	-0.00066

5. CONCLUSÕES

Os valores apresentados como lidos manualmente foram obtidos a partir da média de duas leituras efetuadas por dois operadores no ambiente de um sistema CAD. Nesse processo, em quatro pontos, houve discordância maior do que um píxel e em um ponto ocorreu erro grosseiro. A comparação da média depurada com os dados obtidos automaticamente pode ser, portanto, considerada muito boa e pode-se garantir o sucesso da metodologia.

A metodologia permite obter precisamente a posição do píxel de interesse para qualquer forma geométrica de alvo. Mesmo padrões já consagrados como o de tabuleiros de xadrez e linhas cruzadas podem ser utilizados.

SCHENK [1996], como outros autores que recomendam a utilização da correlação cruzada para identificação automática de feições, sustenta que dados ao nível de subpíxel podem ser obtidos pelo ajuste de uma cúbica aos valores dos coeficientes de correlação e determinação da posição de máximo dessa superfície. Essa implementação pode ser feita, no entanto cabe, experimentalmente, determinar se é física e estatisticamente necessária.

Um sistema computacional definitivo, independente do ambiente da suíte gráfica e matemática MatLab, vem sendo implementado e será disponibilizado para permitir calibração de câmaras utilizando o campo apresentado com maior eficiência.

Finalmente, pode-se perceber, com base nos dados do ajustamento dos parâmetros geométricos, que o fato de se trabalhar com valores inteiros das posições implica em pequenas diferenças nos resultados esperados para a calibração.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, J.B., 1998. **Fotogrametria**. SBEE, Curitiba, PR.

BROWN, D., 1966. **Decentric distortion of Lens**. Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 32, n. 3, pp. 444-462.

BROWN, D., 1971. **Close Range Camera Calibration**. Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 37, n. 8, pp. 855-866.

MOFFITT, F. e MIKHAIL, E.M., 1980. **Photogrammetry**. Harper and Row, New York.

CLARKE, T.A. e FRYER, J.F., 1998. **The development of camera calibration methods and models**. Photogrammetric Record, 16(91): pp 51-66.

FOLLEY, J.D., 1982. **Fundamentals of Interactive Computer Graphics**. John Wiley & Sons, New York.

HABIB, A.F. e MORGAN, M.F., 2004. **Small Format Digital Câmeras for Mapping Applications: Calibration and Stability Analysis**. Séries em Ciências Geodésicas, v. 3, pp. 2-25.

HEIKKILÄL, J. e SILVÉN O., 1997. **A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction**. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), Puerto Rico, pp. 1106-1112.

MACHADO, A.M.L.; MITISHITA, E.A.; SANTOS JR., R. DE L. e BARBOSA, F.P., 2004. **Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato Sony DSC-F717**. Séries em Ciências Geodésicas, v. 3, pp. 2-25.

SCHENK, A.F., 1996. **Automatic Generation of DEM's. In Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. pp. 145-150. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland.

STURM, P. F. e MAYBANK, S. J., 1999. **On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications**. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, USA pp 432-437.

WANDRESEN, R.; MITISHITA, E.A. e ANDRADE, J.B., 2003. **Identificação de Pontos de Apoio Pré-Sinalizados com o Uso de Redes Neurais Artificiais e Correlação**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 9, n. 2, pp179-198. Curitiba, PR.

ZHANG Z., 1998. **A Flexible New Technique for Camera Calibration**. Technical Report MSRTR-98-71, Microsoft Research. <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>

7. AGRADECIMENTOS

Os autores registram seu agradecimento às pessoas e instituições abaixo relacionadas, em face da importância de sua colaboração, direta ou indireta, na realização dessa pesquisa:

- à CAPES, pela bolsa de estudos concedida;
- aos colegas professores do Departamento de Física da FURG, pelo incentivo e pela cobertura de atividades do Prof. Glauber junto àquela instituição;
- aos colegas do Laboratório de Fotogrametria, Álvaro Muriel Lima Machado, Roosevelt de Lara Santos Jr., Daniel Rodrigues dos Santos, Fernando César Silveira Abreu e ao Prof. Quintino Dalmolin pelas fundamentais discussões, que propiciaram o avanço da pesquisa aqui registrada.