

Fototriangulação com parâmetros adicionais de um bloco de imagens coletadas com uma câmara digital de médio formato e dados de georreferenciamento direto

Roberto da Silva Ruy¹
Antonio Maria Garcia Tommaselli¹
José Marcato Junior¹
Thiago Tiedtke dos Reis¹

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia FCT - Unesp/SP
Caixa Postal 468 - 19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil
tomaseli@fct.unesp.br
roberto@engemap.com.br
{jrmarcato, tiedtke}@gmail.com

Abstract. The aim of this paper is to present the results of a block triangulation with additional parameters using direct orientation data that enables on-the-job highly accurate estimation of the interior orientation of the camera that composes the SA-API acquisition system. SA-API system is a joint project between Unesp and Engemap aiming at the development of an airborne image acquisition system using medium format digital cameras and direct georeferencing sensors (GPS and INS). A set of images collected over a highway in Sao Paulo state was used. It was verified that the proper use of additional parameters related to inner orientation parameters and lens distortion, with direct orientation data obtained with a double frequency GPS receiver, allowed significant reduction in the number of control points while the accuracy in the coordinates of check points increased about 30-40%. As a result of the practical experiments it was verified that the use of medium format digital cameras for air surveying projects allows high geometric quality if rigorous photogrammetric process including on-the-job calibration are used.

Palavras-chave: photogrammetry, image acquisition system, on-the-job calibration, inner orientation parameters, fotogrametria, sistema de aquisição de imagens, calibração em serviço, parâmetros de orientação interior.

1. Introdução

As câmaras digitais de pequeno e médio formato, embora não tenham sido projetadas para fins específicos de mapeamento, têm sido utilizadas como alternativa aos sistemas comerciais de aquisição de grande formato, proporcionando vantagens em termos de custo, portabilidade e processamento. Em outros países, como no Canadá e nos EUA, modelos profissionais de câmaras de médio formato estão sendo rotineiramente utilizadas, existindo normas e orientações específicas para o uso e calibração destes sensores (ILMB, 2007).

Como estas câmaras digitais não foram desenvolvidas com finalidades métricas, a estabilidade dos Parâmetros de Orientação Interior (POI) não é garantida e, por esta razão, estes parâmetros devem ser pré-calibrados ou determinados como parte da solução na fototriangulação, método classicamente conhecido como Fototriangulação com Parâmetros Adicionais (FPA).

Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo experimental de FPA para a câmara digital de médio formato Hasselblad H3D (39 Megapixels), que integra o sistema SA-API (RUY et al, 2007), da empresa Engemap.

2. Fototriangulação com Parâmetros Adicionais

A calibração de câmaras pode ser definida como o procedimento para a determinação dos parâmetros de orientação interior, o qual, em geral, é realizado antes da execução dos projetos fotogramétricos, que requerem o ajustamento em bloco por feixes de raios. Os parâmetros de

orientação interior podem ser determinados tanto por métodos de laboratório quanto por métodos de campo, e então, considerados constantes na fototriangulação por feixes de raios.

No entanto, as condições do ambiente em que se realiza a coleta de imagens para a calibração, considerando temperatura, pressão, vibrações, orientação do sensor, dentre outras, podem ser diferentes das condições existentes no período de execução do projeto de mapeamento, o que implica em admitir que os parâmetros de orientação interior também possam ser afetados. Segundo Mikhail et al. (2001), para dar solução a este problema, pode-se determinar os parâmetros de calibração como parte da solução durante o ajustamento do bloco por feixes de raios, introduzindo-se parâmetros adicionais às Equações de Colinearidade, dadas por:

$$\begin{aligned} x - \Delta x + f \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{12} \cdot (Y - Y_0) + r_{13} \cdot (Z - Z_0)}{r_{31} \cdot (X - X_0) + r_{32} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} &= 0 \\ y - \Delta y + f \cdot \frac{r_{21} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{23} \cdot (Z - Z_0)}{r_{31} \cdot (X - X_0) + r_{32} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

nas quais:

- x, y são as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas fotogramétrico;
- $\Delta x, \Delta y$: correções calculadas a partir dos parâmetros de distorção, que compensam os desvios da geometria perspectiva. Trata-se de polinômios que expressam de forma implícita ou explícita os parâmetros de orientação interior e efeitos sistemáticos;
- (X, Y, Z) são as coordenadas do mesmo ponto num referencial cartesiano local do espaço objeto;
- (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas do centro perspectivo no referencial cartesiano do espaço objeto;
- f é a distância focal da câmara;
- r_{ij} são os elementos da matriz de rotação (MIKHAIL et al., 2001).

Algumas formulações de Fototriangulação com parâmetros adicionais foram propostas por diversos autores, geralmente baseadas em polinômios escritos em função das coordenadas observadas na imagem (x,y) , e coeficientes que expressam, de forma implícita, os parâmetros de orientação interior e outros erros sistemáticos inerentes às câmaras de filme. Dentre os diversos métodos de Fototriangulação com parâmetros adicionais, cabe destacar os modelos de Bauer, Ebner, Jacobsen e Brown, além de modelos explícitos em função dos parâmetros de distorção das lentes, os quais são descritos em Murai et al (1984). Estes modelos foram desenvolvidos na década de 1970, visando compensar vários erros sistemáticos dos sistemas de aquisição e medição presentes nos sistemas analógicos baseados em filmes fotográficos.

Torna-se relevante estudar a adequação destes modelos para câmaras digitais, uma vez que vários dos erros presentes em sistemas de filme não terão influência em sensores digitais. Neste sentido, o Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da FCT/Unesp realizou uma avaliação experimental comparativa entre estes modelos utilizando o software LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), e verificou que o uso dos coeficientes de primeira e segunda ordem da distorção radial simétrica (modelo explícito em função dos parâmetros K_1 e K_2 da distorção radial simétrica) foi o mais adequado para a câmara digital Hasselblad, conforme apresentado em Ruy et al. (2008).

A partir destes resultados foi desenvolvido um software de Fototriangulação com parâmetros adicionais que permite o cálculo da calibração de até três câmaras simultaneamente. Este programa, denominado CMC (Calibração Multi-Câmaras), permite fazer a seleção dos parâmetros adicionais e ponderar valores conhecidos a priori. Utiliza como método de estimação o Modelo Combinado com injunções, que trata com rigor as propriedades estocásticas das observações e parâmetros envolvidos no processo de ajuste em

bloco por feixes de raios. Destaca-se ainda que foram implementados recursos de injunção de orientação relativa entre câmaras e modelagem de erros de trajetória de sensores de georreferenciamento direto. Os testes apresentados neste trabalho foram desenvolvidos com o programa CMC.

3. Metodologia

Neste trabalho, apresentam-se análises experimentais de FPA com um bloco de imagens coletado sobre um trecho da rodovia BR-153 com o sistema SAAPI em Maio de 2008. Este bloco, denominado BRVIAS, compreende 86 imagens distribuídas em 3 faixas de vôo, sendo duas faixas paralelas e uma cruzada. Para este vôo foi utilizada a câmara Hasselblad H3D (39 Megapixels) na configuração nadiral. A altura média de vôo de coleta das imagens foi de 1400 m, proporcionando um elemento de resolução no terreno (GSD) na ordem de 19,5 cm.

Para este projeto integrou-se também o sistema de georreferenciamento direto com o receptor GPS DL4-Plus do sistema SPAN-Novatel, que proporciona uma sincronização de dados altamente precisa, na ordem do milissegundo. Os dados GPS foram processados no software Waypoint-Grafnav, usando como base a estação da RBMC OURI, em Ourinhos. Para este bloco de imagens foram utilizados 22 pontos de controle no terreno cujas coordenadas foram levantadas com receptor GPS de dupla frequência e pós-processados com o método de posicionamento diferencial, resultando numa precisão na ordem do centímetro. Estes pontos foram utilizados como controle e verificação de campo nos testes realizados.

Neste trabalho, estuda-se também a proposta de se utilizar um pequeno sub-bloco de imagens, conforme mostra a Figura 1, com maior quantidade de pontos de apoio, para a realização da FPA e, com isso, determinar o conjunto de POI compatíveis com o ambiente de coleta das imagens. Estes parâmetros podem então ser aplicados sobre o bloco completo, reduzindo-se a necessidade de pontos de apoio, conforme é apresentado nos testes realizados.

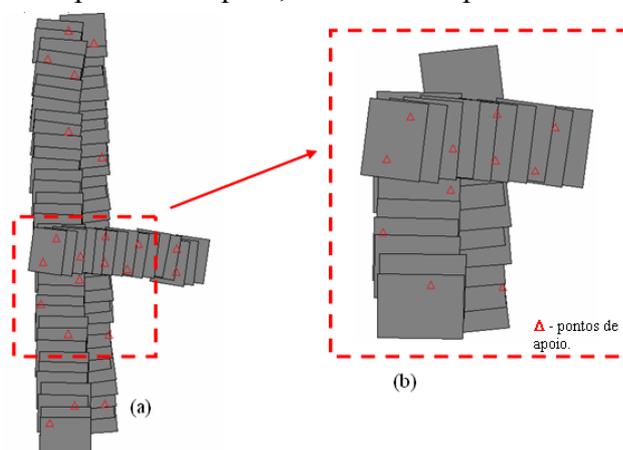


Figura 1: Bloco BRVIAS: (a) bloco completo (86 imagens) com a distribuição dos pontos de terreno; (b) Sub-bloco de 32 imagens selecionado sobre o bloco completo.

4. Experimentos e Resultados

A câmara Hasselblad H3D, utilizada na coleta das imagens, foi previamente calibrada (em Março de 2008) no campo de calibração terrestre da FCT-UNESP de Presidente Prudente, o qual dispõe de 54 alvos, cujas coordenadas foram precisamente determinadas por intersecção a vante ($\sigma = 1-3$ mm). Os parâmetros de calibração (Tabela 1) foram determinados utilizando o aplicativo científico CC (GALO, 1993).

Tabela 1: Dados da pré-calibração da câmara Hasselblad H3D.

f (mm)	$49,813 \pm 0,008$
x_0 (mm)	$-0,264 \pm 0,003$
y_0 (mm)	$0,012 \pm 0,002$
K_1 (mm ⁻²)	$-5,546 \times 10^{-07} \pm 1,321 \times 10^{-07}$
K_2 (mm ⁻⁴)	$8,535 \times 10^{-10} \pm 1,562 \times 10^{-10}$

Com o objetivo de estudar a idéia em se utilizar um pequeno sub-bloco de imagens, com maior quantidade de pontos de apoio, para a realização da FPA e, com isso, determinar o conjunto de POI compatíveis com o ambiente de coleta das imagens, apresenta-se a seguir os POI estimados na FPA utilizando o sub-bloco de 32 imagens (Figura 1). Para este processamento foram utilizados 11 pontos de apoio.

Tabela 2: POI da câmara Hasselblad H3D obtidos em FPA com 32 imagens.

f (mm)	$49,830 \pm 0,003$
x_0 (mm)	$-0,223 \pm 0,003$
y_0 (mm)	$0,011 \pm 0,002$
K_1 (mm ⁻²)	$-1,19 \times 10^{-06} \pm 1,30 \times 10^{-07}$
K_2 (mm ⁻⁴)	$1,71 \times 10^{-9} \pm 1,46 \times 10^{-10}$

Para sintetizar os experimentos realizados com o bloco completo da BRVIAS, a Tabela 3 apresenta as principais características estabelecidas, no que se refere às injunções aplicadas e a quantidade dos pontos de terreno (pontos de apoio e de verificação). Nesta tabela POI se refere à maneira como foram tratados os Parâmetros de Orientação Interior (POI), se considerados fixos ou calculados como parte da solução no ajuste por feixes de raios. O mesmo se refere aos Parâmetros de Orientação Exterior (POE) que podem ser tratados como livres ou terem seus valores fixados por meio de injunções, desde que tenham sido determinados diretamente. As colunas PA e PV indicam o número de Pontos de Apoio e Pontos de Verificação, respectivamente.

Tabela 3: Descrição dos experimentos com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).

TES	POI	POE	PA	PV
A	Fixo com valores pré-calibrados	Livre	16	6
B	Fixo com valores pré-calibrados	1,0 m	16	6
C	Fixo com valores pré-calibrados	0,2 m	16	6
D	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Livre	16	6
E	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	16	6
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	8	6
G	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	3	6
H	Fixo com valores determinados no bloco de 32 imagens	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	16	6
I	Fixo com valores determinados no bloco de 32 imagens	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	8	6
J	Fixo com valores determinados no bloco de 32 imagens	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	4	6
K	Fixo com valores determinados no bloco de 32 imagens	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	3	6
L	Fixo com valores determinados no bloco de 32 imagens	Injunção de 0,2 m nas coord. do CP	1	6

PA: Pontos de apoio; PV: Pontos de verificação; CP: Centro Perspectivo.

No primeiro experimento realizou-se uma Fototriangulação convencional sem o conhecimento prévio das coordenadas dos CPs (Centros Perspectivos) e com os POI pré-fixados com os valores da pré-calibração (Tabela 1). Nos dois experimentos seguintes (B e C) foram realizados processos de fototriangulação fixando-se as coordenadas dos CPs (determinadas por GPS) com diferentes pesos, e considerando ainda os POI pré-calibrados.

Nos experimentos D ao G foram aplicadas soluções de FPA com e sem restrições nos POE obtidos por georreferenciamento direto, sendo que os experimentos F e G foram realizados com um número inferior de pontos de apoio.

Já os experimentos H ao L foram realizados considerando o conjunto de POI determinados no bloco de 32 imagens (Tabela 2). Isso porque na metodologia deste trabalho estuda-se a idéia de se utilizar um pequeno sub-bloco de imagens, com maior quantidade de pontos de apoio, para a realização da FPA e, com isso, se determinar o conjunto de POI compatíveis com o ambiente de coleta das imagens. Estes POI, mais compatíveis com o ambiente de coleta do projeto, podem então ser aplicados ao bloco completo de imagens e se realizar a fototriangulação com um número muito reduzido de pontos de apoio, conforme se estuda nestes experimentos (H ao L).

A Tabela 4 traz os POI estimados nos experimentos com FPA. A Tabela 5 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CPs estimadas e as obtidas por GPS, enquanto que a Figura 2 mostra o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação.

Tabela 4: POI estimados nos experimentos com FPA.

	POI				
	f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
D	49,964 +/- 0,150	-0,220 +/- 0,014	0,093 +/- 0,012	-1,05 E-06 +/- 8,74 E-08	1,54 E-09 +/- 9,93 E-11
E	49,828 +/- 0,002	-0,223 +/- 0,003	0,108 +/- 0,001	-1,00 E-06 +/- 8,27 E-08	1,51 E-09 +/- 9,33 E-11
F	49,828 +/- 0,003	-0,223 +/- 0,003	0,109 +/- 0,001	-9,90 E-07 +/- 8,18 E-08	1,50 E-09 +/- 9,23 E-11
G	49,805 +/- 0,007	-0,224 +/- 0,003	0,108 +/- 0,001	-9,89 E-07 +/- 8,13 E-08	1,49 E-09 +/- 9,18 E-11

Tabela 5: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CPs estimadas e as coletadas pelo GPS.

	EMQ		
	X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (mm)
A	1,699	2,778	0,491
B	0,991	2,205	0,403
C	0,380	0,838	0,388
D	0,748	0,803	3,877
E	0,095	0,101	0,096
F	0,096	0,097	0,093
G	0,095	0,098	0,086
H	0,096	0,102	0,095
I	0,096	0,098	0,092
J	0,095	0,097	0,088
K	0,096	0,098	0,089
L	0,096	0,100	0,081

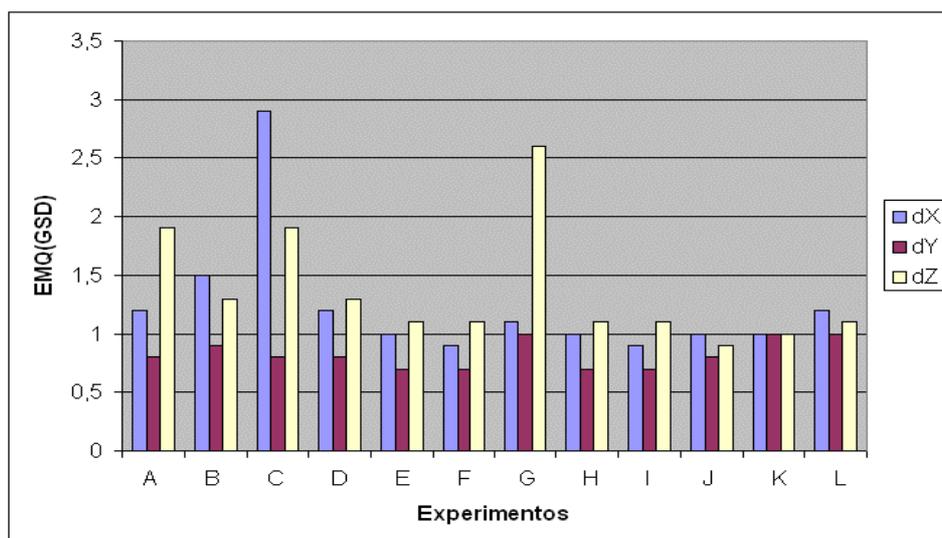


Figura 2: EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação.

Pelos resultados apresentados na Tabela 4 verificou-se que as discrepâncias entre os POI estimados (Experimentos E a G) e pré-calibrados ficou na ordem de 0,019 mm para a distância focal, 0,042mm (6 pixels) para a coordenada x_0 e 0,097 mm (14 pixels) para a coordenada y_0 . Estas discrepâncias podem estar associadas às variações das condições ambientais entre a calibração terrestre da câmara e a coleta das imagens. Além disso, somam-se a este fato os procedimentos de montagem e desmontagem do sistema na fase decorrente de testes, que pode perturbar a geometria interna da câmara. Verifica-se também que os parâmetros adicionais calculados para o sub-bloco de imagens (32 imagens) são compatíveis aos POI estimados (Experimentos E a G) e podem ser aplicados como valores pré-fixados (experimentos H ao L).

Ao se realizar o processo de FPA sem considerar injunções aos POE, não se tem uma solução com confiabilidade para os POI e POE, conforme mostram os resultados para o experimento D, nas Tabelas 4 e 5. Isso ocorre devido à correlação entre estes conjuntos de parâmetros (OI e OE), de forma que não se consegue estimar separadamente os POI e POE sem uma configuração de coleta adequada. Esta correlação é maior e mais crítica entre a distância focal e a componente altimétrica do CP, uma vez que nos blocos estudados não há variação significativa da altura de vôo (cerca de 6%). Por outro lado, como se tem faixas em sentidos opostos e cruzadas entre si, foi possível se estimar com melhor qualidade as coordenadas do ponto principal, cujas correlações com as componentes planimétricas do CP ficaram em torno de 50-60% (experimento D).

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 5 pôde-se constatar que à medida que as injunções impostas sobre os POE são menos precisas, tem-se conseqüentemente um aumento nas discrepâncias entre os valores dos POE estimados e os determinados com GPS. Da mesma forma, ao se fixar os POE com maior precisão nos experimentos com POI pré-calibrados (experimentos B e C), há um aumento dos erros nas coordenadas dos pontos no espaço objeto pelo uso impreciso dos POI que sofreram variação para o ambiente de coleta, em relação aos valores pré-calibrados. Deste modo, ao se fixar os parâmetros de OI com os valores incorretos, o erro se propaga aos parâmetros de OE nas situações em que não se considera injunções sobre estes parâmetros (Experimento A – Tabela 5) e, para os casos em que se considera o uso de georreferenciamento direto, o erro se propaga ao espaço objeto (Experimentos B e C – Figura 2). Neste cenário verifica-se a importância de realizar a

estimação destes parâmetros em serviço, por meio da Fototriangulação com Parâmetros Adicionais (FPA).

Nos experimentos E, F e G foram realizados processos de FPA variando-se a quantidade de pontos de apoio considerados. Verificou-se, pelos resultados obtidos no experimento G, quando se utilizou apenas 3 pontos de apoio, que houve uma tendência na componente altimétrica dos pontos de verificação, e com isso, a solução no espaço objeto não teve o resultado esperado, quando comparado aos resultados dos experimentos E e F. No experimento F foi utilizada a metade do número de pontos de apoio (8), e os resultados foram totalmente compatíveis com o experimento E, no qual foram utilizados todos os pontos de apoio.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 5 e Figura 2, verificou-se que ao se reduzir pela metade a quantidade de pontos de apoio (experimento I), não houve perda de precisão e a solução foi totalmente compatível com os resultados obtidos para o experimento H, no qual foram considerados todos os pontos de apoio. Da mesma forma, no experimento J, quando foram considerados 4 pontos de apoio (nas extremidades das faixas e outro no meio do bloco), a qualidade da solução final foi mantida, com erros nos pontos de verificação abaixo de 1 pixel.

No experimento K considerou-se apenas um ponto na extremidade de cada faixa, e houve uma perda de precisão de aproximadamente 6 cm na componente y, contudo o erro no espaço objeto ficou na ordem de 1 pixel tanto em planimetria quanto em altimetria. Por fim, ao se considerar apenas 1 ponto de apoio (experimento L) houve uma perda de precisão nas componentes planimétricas, em relação aos experimentos H e I, mas, mesmo assim, erro no espaço objeto ficou na ordem de 1 a 1,2 pixel. Deste modo, para esta escala de mapeamento, os resultados mostraram-se compatíveis com o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) para a escala 1:2000, ou até mesmo 1:1000.

5. Considerações Finais

Pelos resultados apresentados verificou-se que ao considerar os parâmetros adicionais que modelam os POI e a distorção das lentes, em conjunto com injunções impostas sobre as coordenadas dos CPs, obteve-se um aumento de acurácia significativo no espaço objeto, em torno de 20% em planimetria e 40% em altimetria, em relação à um processo de fototriangulação convencional.

O teste de FPA sem considerar injunções nas coordenadas dos CPs não apresentou resultados satisfatórios, com discrepâncias mais significativas entre os CPs estimados e os obtidos de forma direta por GPS e erros acentuados na determinação de coordenadas no espaço objeto, em relação aos testes com injunção no CP, uma vez que não é possível estimar separadamente os parâmetros de OI e OE sem restrições impostas ao processo.

Conforme apresentado nos experimentos, a FPA pode ser realizada inicialmente em sub-blocos de imagens da área imageada do projeto, que permita uma distribuição maior de pontos de apoio. Os POI determinados para este bloco menor mostraram-se adequados ao bloco completo, que pôde ser fototriangulado com dados de georreferenciamento direto e um conjunto mínimo de pontos de apoio, fundamentalmente nas extremidades das faixas. Isso tem grande impacto na operação do sistema em produção, pois minimiza o controle de campo, sem abdicar da precisão e da modelagem dos erros na orientação interior, agregando confiabilidade e qualidade.

Por fim, destaca-se que nestas categorias de sistemas pode-se integrar uma câmara digital infravermelha, como ocorre no sistema SAAPI, o que permite o desenvolvimento com grande flexibilidade de projetos temáticos em aplicações em Sensoriamento Remoto.

Agradecimentos

Os autores desejam externar os sinceros agradecimentos à empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevante Ltda. pela cessão dos dados que foram analisados neste trabalho e à Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento concedido ao projeto SAAPI na modalidade PIPE.

Referências

ILMB - Integrated Land Management Bureau / Base Mapping and Geomatic Services Branch. **Small & Medium Format Digital Camera Specifications**, Version 0.11, Canadá, 2007. Disponível em: <<http://ilmbwww.gov.bc.ca/bmgs/pba/trim/specs/#digitalcam>>. Acesso em: 27 Jan. 2008.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MURAY, S; MATSUOKA, R; OKUDA T. A study on Analytical Calibration for non Metric Camera and Accuracy of Three Dimensional Measurement. In: In: **XVth ISPRS Congress – Comission 5**, 1984, Rio de Janeiro. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 1984**. Rio de Janeiro: ISPRS, 1984. Vol.25, Part V p. 570-579.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O. SAAPI – A lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. In: **7th Geomatic Week**, 2007, Barcelona. Proceedings of 7th Geomatic Week, Barcelona: Institut de Geomatica, February 2007.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. HASEGAWA, J. K. MENOSSE, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas** (artigo submetido e aceito para publicação), Curitiba, 2008.