

Estudos de caso em Fototriangulação com Parâmetros Adicionais para Câmaras Digitais

José Marcato Junior¹
Antonio Maria Garcia Tommaselli²
Roberto da Silva Ruy³
Maurício Galo⁴

¹ UNESP - Curso de Engenharia Cartográfica
Bolsista PIBIC - CNPq
Presidente Prudente SP
jmarcato@gmail.com

² UNESP - Depto. de Cartografia
Presidente Prudente SP
tomaseli@fct.unesp.br

³ UNESP - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Presidente Prudente SP
rroy@pos.prudente.unesp.br

⁴ UNESP - Depto. de Cartografia
Presidente Prudente SP
galo@fct.unesp.br

Resumo: O crescente uso de câmaras digitais em projetos fotogramétricos, especialmente em levantamentos aéreos, motivou o presente trabalho, que apresenta um estudo experimental com grupos de parâmetros de orientação interior (POI) a serem considerados na fototriangulação de imagens aéreas tomadas com câmara digital de médio formato. Foram realizados experimentos com dados simulados e reais, considerando diversas situações: determinação direta de posição e atitude da câmara (com GPS/INS), somente a posição da câmara (GPS) e, determinação indireta dos parâmetros de orientação exterior (POE). Nos experimentos com dados simulados, verificou-se que a determinação dos parâmetros de orientação interior (POI) em serviço pode ser feita usando somente as coordenadas do Centro Perspectivo (CP) fornecidas pelo GPS. Nos experimentos com dados reais verificou-se que os POI podem ser estimados com confiabilidade no processo de fototriangulação em serviço, mesmo quando a câmara não é pré-calibrada.

Palavras chaves: Câmaras Digitais, Fototriangulação com Parâmetros Adicionais.

Abstract: The growing use of digital cameras in photogrammetric projects, mainly in aerial survey, motivated this paper that presents an experimental study of inner orientation parameters (IOP) groups to be considered in the fototriangulation of aerial images collected with medium format digital camera. Some experiments using simulated and real data were accomplished. Several situations were considered: direct determination of camera position and attitude (GPS/INS); PC position only (GPS) and, indirect determination of the exterior orientation parameters (EOP). Experiments with simulated data showed that the inner orientation parameters (IOP) were precisely estimated using only the coordinates of the Perspective Center (PC) provided by GPS. Tests with real data showed that the IOP can be determined with accuracy in the triangulation with additional parameter process even when the camera is not previously calibrated.

Keywords: Digital Cameras, bundle block adjustment with additional parameters.

1 Introdução

O uso de câmaras digitais de pequeno e médio formato emergiu como uma alternativa aos sensores digitais de grande formato, com vantagens de flexibilidade e custo, em aplicações como monitoramento ambiental, projetos de rodovias, mapeamento topográfico, temático e cadastral, dentre outros. As câmaras digitais de pequeno e médio formato, embora não sejam projetadas fins específicos de mapeamento, podem ser usadas nestas atividades desde que submetidas ao processo de calibração (HABIB e MORGAN, 2003).

Em geral, a calibração de câmaras é um procedimento realizado previamente ao ajustamento em bloco. Assim, os POI são determinados e então fixados durante a fototriangulação. Entretanto, o ambiente em que se coleta as imagens para a calibração é, em geral, diferente do ambiente de coleta das imagens para o mapeamento, havendo diferenças em termos de pressão e temperatura, o que pode resultar em diferenças nos POI.

Uma alternativa a este problema é a determinação dos POI como parte da solução durante o ajustamento do bloco, introduzindo parâmetros adicionais às equações de colinearidade (MIKHAIL et al, 2001). Contudo, ao adotar esta solução deve-se considerar que alguns parâmetros são altamente correlacionados, particularmente para o caso de fotografias verticais.

Segundo Wolf e Dewitt (2000), uma das maneiras de eliminar, ou pelo menos minimizar, o problema de correlação entre os parâmetros, seria utilizar sensores GPS/INS na determinação acurada da posição e orientação da câmara nas exposições fotográficas. Deste modo, as coordenadas tridimensionais do CP da câmara e os ângulos de rotação seriam conhecidos a priori, eliminando o problema de correlação da altura de vôo com a distância focal e das coordenadas do CP com as coordenadas do ponto principal (PP).

A partir desta discussão, o presente trabalho apresenta um estudo experimental de grupos de POI a serem considerados na fototriangulação em três situações, em que há: determinação direta de posição e atitude da câmara (GPS/INS); somente da posição (GPS) e determinação indireta dos POE. Neste estudo, foram utilizados tanto dados simulados quanto dados reais. Nos experimentos com dados reais utilizou-se um bloco de imagens aéreas digitais, coletadas com a câmara de médio formato Hasselblad H1D (22 Megapixels), que integra o sistema SA-API - Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais (Ruy et al, 2007), da empresa Engemap.

2 Calibração de câmaras e Fototriangulação com parâmetros adicionais

2.1 Calibração de câmaras

A calibração de câmaras pode ser entendida como um procedimento para a determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmara (POI), os quais permitem a reconstrução do feixe perspectivo que originou a imagem. Segundo Andrade (1998), os métodos de calibração de câmaras podem ser subdivididos em métodos de laboratório e de campo. Dentre os diversos métodos de laboratório, cabe destacar o método do goniômetro e do multicolimador. Existem diversos métodos de campo, dentre eles, pode-se citar os métodos: estelar, campos mistos e câmaras convergentes (ANDRADE, 1998; WOLF e DEWITT, 2000; FRYER, 1996). Nestes métodos os POI são determinados a partir de um conjunto de imagens coletadas sobre um campo de calibração.

Os métodos de campo, mencionados anteriormente, podem ser adaptados de forma a determinar os parâmetros de calibração durante o ajustamento do bloco (Fototriangulação) referente a um projeto específico de aerolevantamento. Assim, surgem os termos calibração em serviço (*on-the-job*) e autocalibração (*self-calibration*).

Na calibração em serviço, o modelo matemático normalmente utilizado se baseia nas equações de colinearidade com parâmetros adicionais. No entanto, são utilizados pontos de apoio na região imageada (CLARKE e FRYER, 1998).

A autocalibração pode ser definida como um procedimento destinado à determinação dos POI no qual não são necessárias informações do espaço objeto. O modelo matemático normalmente utilizado se baseia nas equações de colinearidade com parâmetros adicionais. Assim, tanto os parâmetros de orientação (interior e exterior) quanto as coordenadas dos pontos no espaço objeto, são estimados simultaneamente em um referencial local arbitrário. No entanto, para eliminar a singularidade causada pelo não uso de informações do espaço objeto, utiliza-se o mínimo de injunções, para estabelecer um referencial e definir a escala do bloco (ATKINSON, 1996).

2.2 Fototriangulação com parâmetros adicionais

Em geral, a calibração de câmaras é um procedimento realizado separadamente do ajustamento em bloco. Os POI são determinados e então fixados durante a fototriangulação. Assim, as coordenadas dos pontos, medidas na imagem, são pré-corrigidas dos erros sistemáticos - deslocamento do PP, distorção das lentes, refração atmosférica - antes de se realizar a fototriangulação.

Como já foi mencionado, o ambiente em que se realiza a coleta de imagens para a calibração é diferente do ambiente de coleta das imagens, o que implica em admitir que os POI 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, introduzindo parâmetros adicionais às equações de colinearidade.

Segundo Mikhail et al (2001), algumas formulações de fototriangulação com parâmetros adicionais (FPA) têm sido propostas por diversos autores, geralmente baseadas em polinômios escritos em função das coordenadas de imagem (x,y) , e coeficientes que expressam, de forma implícita, os POI e outros erros sistemáticos inerentes às câmaras de filme.

Dentre os diversos métodos de FPA, 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 medida, cabendo destacar os erros presentes nos sistemas de filme.

Assim, para câmaras digitais, torna-se relevante estudar estes modelos, uma vez que vários dos erros presentes em sistemas de filme não existirão em sistemas inteiramente digitais. Neste sentido, Ruy et al (2008) realizaram uma avaliação experimental comparativa entre estes modelos utilizando o software LPS, na qual verificou-se que o uso dos coeficientes de primeira e segunda ordem da distorção radial simétrica (modelo *Lens Distortion* no software LPS) foi o mais adequado para câmara digital considerada. Pelos experimentos descritos em Ruy et al (2008) verificou-se que somente estes parâmetros de distorção óptica absorveram os erros residuais do processo, possibilitando melhores resultados que os outros modelos polinomiais com maior número de parâmetros. Isso porque nas câmaras digitais os sensores são planos e não apresentam deformações temporais e deste modo, os modelos com parâmetros adicionais podem ser simplificados. Além disso, Jabobsen (2003) destaca que modelos com grande número de problemas podem trazer problemas de correlação entre as variáveis (Superparametrização).

3 Metodologia

O presente trabalho objetiva a realização de experimentos de FPA, considerando distintos grupos de parâmetros. Para isto, foram utilizados dados simulados e dados reais. Na geração dos dados simulados foi utilizado o programa SMC - *Simulação Multi-Câmaras*. O programa SMC, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da FCT/UNESP, tem por característica realizar a simulação de várias câmaras simultaneamente, de forma a determinar as coordenadas imagem (x,y) , referenciadas ao sistema fotogramétrico, de pontos no espaço objeto, a partir de suas coordenadas referenciadas ao espaço objeto (X,Y,Z) , dos valores dos parâmetros de orientação interior e exterior, além de parâmetros de orientação relativa entre as câmaras. O modelo de colinearidade é usado para projetar as coordenadas do espaço objeto para o espaço imagem. São introduzidos, então, os efeitos dos erros sistemáticos (distorção das lentes e refração) usando os modelos de Conrady-Brown e RADK (SCHENK, 1999). A partir de então são geradas perturbações randômicas que são somadas às coordenadas imagem geradas. O desvio padrão destas perturbações pode ser modificado, dependendo da situação a ser avaliada.

Os dados simulados foram processados no programa de Fototriangulação CMC (Calibração Multi-Câmaras). Este programa permite usar grupos variáveis de parâmetros adicionais e ponderar valores conhecidos a priori. Além disto, utiliza como método de estimação o Modelo Combinado com injunções, que trata com rigor as propriedades estocásticas das observações e parâmetros envolvidos no processo (MIKHAIL e AKCERMAN, 1976).

Para os experimentos com dados reais foi utilizado um bloco com 76 imagens, formando 5 faixas, com GSD (*Ground Sample distance – elemento de resolução no terreno*) de 40 cm, altura de vôo de 2250 metros, referentes à área urbana do município de Catanduva. Nestes experimentos, além do programa CMC, foi utilizado o software LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), que é uma plataforma comercial usada em várias empresas de aerolevamento.

A câmara Hasselblad H1D, utilizada na coleta das imagens do bloco da cidade de Catanduva, foi previamente calibrada no campo de calibração da FCT-UNESP de Presidente Prudente, o qual dispõe de 54 alvos, cujas coordenadas foram precisamente determinadas por procedimentos topográficos (precisão: $\sigma = 1\text{-}3\text{ mm}$). Os parâmetros de calibração, determinados por Bazan et al. (2007) utilizando o aplicativo científico CC (GALO, 1993), são apresentados na Tabela 1. Cabe ressaltar que na geração dos dados simulados foram utilizados estes mesmos parâmetros.

Tabela 1 : Dados de calibração da câmara Hasselblad H1D (Março/2007).

f (mm)	$50,1705 \pm 0,0051$
x_0 (mm)	$-0,0816 \pm 0,0030$
y_0 (mm)	$-0,7294 \pm 0,0021$
K_1 (mm ²)	$-2,8480 \times 10^{-05} \pm 0,6909 \times 10^{-07}$
K_2 (mm ⁴)	$1,3186 \times 10^{-08} \pm 0,4029 \times 10^{-09}$

A metodologia usada neste trabalho enfoca o estudo experimental de diferentes configurações de parâmetros, bem como de valores a priori, para estabelecer as condições de uso prático mais apropriadas. Serão usados pontos independentes de verificação para inferir sobre os resultados de cada experimento.

4 Experimentos e Resultados

O objetivo geral dos experimentos foi avaliar diferentes cenários operacionais ao usar câmaras digitais de médio formato. Estas câmaras profissionais são estáveis, contam com ótica de elevada qualidade e com valores nominais para a distância focal e uma curva padrão de distorção das lentes. Entretanto, não são calibradas individualmente e não são conhecidas as coordenadas do PP.

Para resolver este problema pode-se pré-calibrar a câmara em ambiente terrestre ou aéreo, ou mesmo usar os valores nominais, sujeitando-se, neste caso, à propagação dos erros sistemáticos não corrigidos. A alternativa mais rigorosa, é o modelamento dos erros sistemáticos residuais em serviço, num processo de FPA, que absorverão estes erros residuais. A seguir, por meio da Tabela 2, apresenta-se uma síntese dos experimentos que foram realizados neste trabalho. Nas seções 4.1 e 4.2 apresenta-se uma descrição detalhada de cada um destes experimentos (simulados e com dados reais).

Tabela 2 : Síntese dos experimentos realizados neste trabalho.

Experimentos	POI considerados incógnitas			GPS	INS	Correção de refração	Pontos de apoio	Pontos fotogramétricos	GSD (cm)	
	f	x_0 e y_0	K_1 e k_2							
Dados simulados	1	*-	-	X	-	-	X	22	372	20
	2	X	-	-	X	-	X	22	372	20
	3	X	X	X	X	-	X	22	372	20
	4	X	X	X	X	X	X	22	372	20
	5	X	X	X	X	X	X	22	372	20
Dados reais	1	-	-	X	-	-	X	24	1890	40
	2	**-	**-	X	-	-	X	24	1890	40
	3	**X	**X	X	-	-	X	24	1890	40

*Distância focal fixada com erro de 0,1 mm.

** POI nominais fornecidos pelo fabricante.

4.1 Experimentos com dados simulados

Nestes experimentos foram utilizadas 30 imagens simuladas, formando um bloco com 4 faixas. Foram utilizadas observações referentes a 394 pontos no espaço objeto (22 pontos de apoio e 372 pontos fotogramétricos), totalizando 3344 observações. Considerou-se como desvio-padrão das fotocoordenadas o valor de 0,5 pixel, ou seja, 0,0045 mm, considerando-se que a medição de pontos na imagem foi realizada com precisão sub-pixel. Os dados foram simulados a partir dos elementos de um vôo realizado sobre a cidade de Taramã com o sistema SAAPI – câmara H1D 22 megapixels.

Por se tratar de dados simulados, tanto os POI e os POE, quanto as coordenadas dos pontos no espaço

objeto são conhecidos a priori. A seguir, as características e os resultados de cinco experimentos com dados simulados são apresentados. Na Seção 4.1.1, são realizadas as análises no espaço objeto com os pontos de verificação.

Experimento 1:

Na fototriangulação, em geral, os POI são fixados no ajustamento. Como já mencionado, o ambiente em que se realiza a calibração, é diferente do ambiente de coleta das imagens, podendo resultar em diferenças relevantes nos POI, principalmente na distância focal. Neste sentido, objetivou-se neste experimento verificar a influência, na fototriangulação, em fixar a distância focal com um valor impreciso.

Conforme a Tabela 1, o valor da distância focal utilizada na geração dos dados simulados foi de 50,1705 mm. Simulando uma situação no qual existe um erro de 0,1 mm na distância focal, utilizou-se no processamento o valor de 50,2705 mm. Foram fixadas a distância focal e as coordenadas do PP (conhecidas da simulação), ao passo que os parâmetros, K_1 e K_2 , da distorção radial simétrica e os POE foram calculados no ajustamento. O objetivo é verificar se os parâmetros adicionais de distorção das lentes absorvem parte deste erro de orientação interior. Na Tabela 3, apresentam-se os POI estimados, bem como as discrepâncias destes com relação aos valores verdadeiros.

Tabela 3: POI estimados fixando a distância focal com um erro de 0,1mm.

Parâmetros de OI	Verdadeiro	Estimado	Discrepância
$K_1(\text{mm}^{-2})$	-2,848E-05	-2,8911E-05	-4,31E-07
$K_2(\text{mm}^{-4})$	-1,319E-08	-1,3042E-08	1,44E-10

Ao analisar a Tabela 3 nota-se uma discrepância pequena entre os parâmetros K_1 e K_2 estimados e verdadeiros. Portanto, verifica-se que o modelo absorveu somente o erro sistemático gerado pelas distorções, não se podendo afirmar se houve alguma correção do erro provocado pela distância focal. Deste modo, torna-se necessário realizar uma análise detalhada (apresentada na Seção 4.1.1), tanto dos POE quanto das coordenadas dos pontos de verificação estimados.

Experimento 2:

Este experimento foi realizado de modo a simular um vôo com georreferenciamento direto, no qual se utiliza o GPS para determinar as coordenadas dos CPs no instante da tomada das imagens. O desvio-padrão considerado para as coordenadas dos CPs foi de 1 metro. Cabe ressaltar que foram aplicados erros aleatórios nas coordenadas verdadeiras dos CPs, considerando o desvio-padrão adotado (1 metro). Dentre os POI, somente a distância focal foi considerada como incógnita no ajustamento.

Tabela 4 : Distância focal estimada com o programa CMC, conhecendo-se as coordenadas dos CPs com uma acurácia de 1 metro.

Parâmetros de OI	Verdadeiro	Estimado	Discrepância
$f(\text{mm})$	50,1705	50,1680	-0,0025

Ao analisar a Tabela 4, verifica-se uma discrepância pequena ($\sim 2 \mu\text{m}$ ou $\frac{1}{4}$ do pixel) entre a distância focal verdadeira e estimada. Portanto, para este caso, verifica-se que o uso de um sistema de georreferenciamento de baixo custo (GPS com acurácia de 1m) permitiu recuperar o valor da distância focal com um nível de precisão aceitável.

Experimento 3:

O experimento 3 foi realizado em condições similares às do experimento anterior, diferindo nos POI que foram considerados como incógnitas no ajustamento: f , x_0 , y_0 , K_1 e K_2 .

Verifica-se por meio da Tabela 5 que mesmo utilizando um sistema de georreferenciamento de baixo custo (GPS com acurácia de 1m), os POI foram recuperados com acurácia aceitável no processamento. A discrepância entre a distância focal calculada e verdadeira, assim como no experimento anterior, foi de aproximadamente $2,4 \mu\text{m}$, ao passo que as discrepâncias nas coordenadas do PP (Ponto Principal) foram em torno de 1 pixel.

Tabela 5 : POI estimados com o programa CMC, conhecendo-se as coordenadas dos CPs -acurácia de 1 metro.

Parâmetros de OI	Verdadeiro	Estimado	Discrepância
f(mm)	50,1705	50,1729	0,0024
x₀(mm)	-0,7294	-0,7170	0,0124
y₀(mm)	-0,0816	-0,0673	0,0143
K₁(mm⁻²)	-2,848E-05	-2,8860E-05	-3,8000E-07
K₂(mm⁻⁴)	-1,319E-08	-1,3050E-08	1,3600E-10

Experimento 4:

Neste experimento objetivou-se simular um vôo no qual se realizou o georreferenciamento direto a partir da integração do GPS com o sistema inercial. Neste sentido, tanto as coordenadas dos CPs quanto os ângulos de orientação receberam injunções no ajustamento. Assim como no experimento anterior, considerou-se como desvio-padrão das coordenadas dos CPs o valor de 1 metro. Já o desvio-padrão considerado para os ângulos de rotação foi de 0,2°. Estas precisões dos parâmetros de orientação exterior correspondem a qualidade de um sistema de georreferenciamento direto de categoria estratégica (baixo custo).

Tabela 6 : POI estimados com o programa CMC utilizando um sistema de georreferenciamento direto estratégico.

Parâmetros de OI	Verdadeiro	Estimado	Discrepância
f(mm)	50,1705	50,1730	0,0025
x₀(mm)	-0,7294	-0,7170	0,0124
y₀(mm)	-0,0816	-0,0674	0,0142
K₁(mm⁻²)	-2,848E-05	-2,8859E-05	-3,7900E-07
K₂(mm⁻⁴)	-1,319E-08	-1,3050E-08	1,3600E-10

Realizando uma análise comparativa entre os resultados obtidos neste experimento (simulando um sistema de georreferenciamento direto estratégico) e os resultados do experimento anterior (utilizando somente o GPS), verifica-se que os grupos de parâmetros obtidos em ambos os experimentos são bastante similares. Portanto, o uso de um sistema inercial com uma acurácia de 0,2° não proporcionou uma melhora significativa na estimação dos POI.

Experimento 5:

O experimento 5 foi realizado de forma similar ao experimento 4, contudo neste caso, ao invés de simular um sistema de georreferenciamento direto estratégico, foi simulado um sistema tático, considerando como desvio-padrão das coordenadas dos CPs o valor de 0,2 metros e para os ângulos de orientação o valor de 0,018° (~1').

Tabela 7 : POI estimados com o programa CMC utilizando um sistema de georreferenciamento direto tático.

Parâmetros de OI	Verdadeiro	Estimado	Discrepância
f(mm)	50,1705	50,1721	0,0016
x₀(mm)	-0,7294	-0,7255	0,0039
y₀(mm)	-0,0816	-0,0805	0,0011
K₁(mm⁻²)	-2,848E-05	-2,8791E-05	-3,1100E-07
K₂(mm⁻⁴)	-1,319E-08	-1,3037E-08	1,4900E-10

Comparando este experimento com os demais, verifica-se que há uma melhora discreta (cerca de 1,6 µm na distância focal e 4 µm pixels na abscissa do PP) na estimação dos POI quando se utiliza um sistema de georreferenciamento direto tático. No entanto, deve-se verificar o que esta pequena melhora contribui na estimação das coordenadas dos pontos no espaço objeto (ver seção 4.1.1). A seguir, apresenta-se uma discussão mais detalhada dos resultados obtidos nestes experimentos, considerando os erros na estimação dos POE e nos pontos de verificação no espaço objeto.

4.1.1 Discussão dos experimentos com dados simulados

Para realizar uma discussão acerca dos experimentos apresenta-se a seguir, por meio das Figuras 1, 2 e 3, respectivamente, o EMQ (Erro Médio Quadrático) das discrepâncias entre os ângulos de orientação estimados e verdadeiros, o EMQ das discrepâncias entre as coordenadas dos CPS estimadas e verdadeiras e o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação.

Marcatotrgf1.jpeg: EMQ das discrepâncias entre os ângulos de orientação estimados e verdadeiros.

Ao analisar a Figura 1, verifica-se que os ângulos de orientação foram mais precisamente estimados no experimento 5, no qual se utilizou dados de um sistema de georeferenciamento direto táctico (acurácia de 0,2 metros nas coordenadas dos CPs e de 0,018° nos ângulos de orientação). Verificou-se, por outro lado, que o conhecimento prévio dos ângulos de orientação com acurácia de 0,2° (experimento 4), não resultou em uma melhora na determinação da atitude da câmara, quando comparado com os resultados obtidos nos experimentos 2 e 3 que utilizam somente o GPS.

Já com relação ao EMQ das discrepâncias entre as coordenadas dos CPS estimadas e verdadeiras (Fig. 2), verifica-se no experimento 1 um erro médio quadrático com grande magnitude nas coordenadas Z dos CPs (cerca de 2,4 metros). Isto pode ser explicado pela forte correlação existente entre a distância focal e a altura de vôo, que propagou o erro atribuído a distância focal (0,1 mm) para o espaço objeto. A partir da Figura 2 verifica-se também que as coordenadas dos CPs foram estimadas com maior acurácia quando se utilizou o sistema de georeferenciamento táctico (experimento 5), uma vez que as coordenadas foram fixadas mais próximas do valor verdadeiro.

Marcatotrgf2.jpeg: EMQ das discrepâncias entre as coordenadas dos CPS estimadas e verdadeiras.

Ao analisar a figura 3, verifica-se que em todos os experimentos os erros nas coordenadas X e Y foram da ordem de 0,5 GSD. Nota-se também que há uma pequena redução no EMQ da coordenada Z (cerca de 5 cm) quando se utiliza dados de georeferenciamento direto (experimentos 3, 4 e 5).

Marcatotrgf3.jpeg: EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação.

Realizando uma análise comparativa entre os experimentos 3, 4 e 5, verifica-se que o conhecimento prévio dos ângulos de orientação (experimentos 4 e 5) não proporcionou uma melhora significativa na determinação das coordenadas dos pontos de verificação. Isto permite concluir que, para este caso estudado, somente o uso do GPS é suficiente para recuperar os POI no processo de fototriangulação com parâmetros adicionais. Estas conclusões valem para o bloco estudado com as configurações usadas. Vale ressaltar que foram considerados 22 pontos de apoio, o que pode ser considerado um bom número para um bloco com estas características. Caso o número e a distribuição de pontos sejam reduzidos, os resultados serão diferentes, sendo este estudo deixado para trabalhos futuros.

Cabe ressaltar que, ao utilizar dados simulados, as coordenadas dos pontos no espaço objeto são conhecidas a priori. Assim, para realizar esta análise, todos os pontos fotogramétricos foram considerados como pontos de verificação, o que proporciona maior quantidade de pontos e maior confiabilidade nas análises realizadas.

4.2 Experimentos com dados reais

Experimentos utilizando POI calibrados:

Inicialmente foi realizada uma fototriangulação com parâmetros adicionais utilizando o modelo da distorção radial simétrica com os softwares LPS e CMC. Em ambos os softwares foram considerados como dados de entrada da câmara os POI (f , x_0 , y_0), apresentados na Tabela 1. Assim, os parâmetros definidores da distorção radial simétrica (K_1 e K_2) foram introduzidos preliminarmente como nulos, sendo estimados no ajuste em bloco por feixes de raios implementado nos softwares usados. Na Tabela 8, são apresentados os POI estimados por ambos os programas.

Tabela 8: Parâmetros K_1 e K_2 estimados pelos programas LPS e CMC.

	K_1 (mm ⁻²)	K_2 (mm ⁻⁴)
LPS	-3,0967E-05	1,7976E-08
CMC	-3,1213E-05	1,8228E-08

Ao analisar a Tabela 8 verifica-se uma pequena discrepância entre os valores estimados por ambos os programas. Esta discrepância pode ter ocorrido devido ao uso de distintos modelos de ajustamento pelos

programas CMC e LPS. Para verificar o que esta diferença implica no espaço objeto, as Tabelas 9 e 10 apresentam as discrepâncias em cinco pontos de verificação distribuídos sobre o bloco de imagens

Tabela 9: Experimentos com dados reais: discrepâncias nos pontos de verificação - LPS.

Pontos	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
4	0,0503	0,1151	-0,1428
12	-0,3259	0,2149	0,0432
14	-0,1224	0,4650	-0,1880
22	-0,2480	-0,9590	-0,2494
26	0,6226	0,2716	-0,3062
Média(m)	-0,005	0,022	-0,169
DP(m)	0,378	0,563	0,134
EMQ(m)	0,378	0,563	0,231

Tabela 10: Experimentos com dados reais: discrepâncias nos pontos de verificação - CMC.

Pontos	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
4	0,028	0,101	0,114
12	-0,260	0,283	0,147
14	-0,102	0,450	-0,196
22	-0,152	-0,995	-0,446
26	0,625	0,302	-0,265
Média(m)	0,028	0,028	-0,129
DP (m)	0,350	0,585	0,254
EMQ(m)	0,351	0,586	0,292

A partir das Tabelas 9 e 10 verifica-se uma alta discrepância na coordenada Y do ponto 22, tanto na solução apresentada pelo LPS, quanto na solução do programa CMC. Este ponto pode ter sofrido a influência de uma medida equivocada de suas coordenadas imagens, propagando o erro para o espaço objeto. Caso este ponto fosse desconsiderado, os valores do EMQ para os demais pontos de verificação apresentariam os valores mostrados na Tabela 11.

Tabela 11: EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação desconsiderando o ponto 22.

EMQ(m)	dX	dY	dZ
LPS	0,413	0,341	0,225
CMC	0,396	0,358	0,219

A partir da Tabela 11, pode-se verificar que os programas LPS e CMC proporcionaram resultados similares no processo de FPA utilizando o modelo que corrige a distorção radial simétrica das lentes. O efeito no espaço objeto ficou abaixo de 1 GSD tanto nas componentes planimétricas quanto na componente altimétrica.

Experimentos utilizando POI nominais:

Nestes experimentos foram utilizados apenas os POI nominais da câmara, fornecidos pelo fabricante (distância focal igual a 50,3mm e coordenadas do ponto principal consideradas nulas).

Foram realizados dois experimentos utilizando o programa CMC. No primeiro experimento, foram fixados todos os POI, exceto as componentes da distorção radial simétrica K_1 e K_2 (ver resultados Tabela 12). No segundo experimento, todos os POI foram considerados como incógnitas no ajustamento em bloco (ver resultados Tabela 13).

Tabela 12: POI estimados pelo programa CMC considerando somente K_1 e K_2 como incógnitas.

Parâmetros de OI	Valor estimado	Desvio-padrão
$K_1(\text{mm}^{-2})$	-3,12E-05	1,09E-07
$K_2(\text{mm}^{-4})$	1,83E-08	1,29E-10

A partir da Tabela 13 verifica-se que os POI estimados pelo programa CMC se apresentaram bastante similares aos POI calibrados (Tabela 1). Esta recuperação dos POI pode ser justificada pela configuração das faixas (faixas em sentidos opostos), o que minimiza a correlação entre x_0 e X_0 e entre y_0 e Y_0 , e

também pelas discrepâncias entre as coordenadas Z dos pontos no terreno (cerca de 5% com relação à altura de vôo), o que reduz a correlação entre f e Z_0 . Sabe-se que a correlação entre f e a altura de vôo é perfeita apenas em condições ideais e que o valor recomendado de variação de Z no terreno é de 20% da altura de vôo. A seguir, apresenta-se as discrepâncias nos pontos de verificação para ambos os experimentos (Tabelas 14 e 15).

Tabela 13: POI estimados pelo programa CMC, considerando todos os POI como incógnitas.

Parâmetros de OI	Estimado CMC	Desvio-Padrão
$f(\text{mm})$	50,2284	0,1148
$x_0(\text{mm})$	-0,0472	0,0108
$y_0(\text{mm})$	-0,7387	0,0078
$K_1(\text{mm}^{-2})$	-3,12E-05	8,21E-08
$K_2(\text{mm}^{-4})$	1,82E-08	9,70E-11

Tabela 14: Média, Desvio-padrão e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, considerando apenas K_1 e K_2 como incógnitas no ajustamento.

	dX	dY	dZ
Média(m)	0,083	0,126	-0,396
DP(m)	0,509	0,526	0,279
EMQ(m)	0,517	0,545	0,523

Tabela 15: Média, Desvio-padrão e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, considerando os POI como incógnitas no ajustamento.

	dX	dY	dZ
Média(m)	0,024	0,028	-0,130
DP(m)	0,348	0,585	0,297
EMQ(m)	0,349	0,586	0,331

Ao realizar o processamento usando valores dos POI nominais fixados, e tentar modelar os erros sistemáticos somente com K_1 e K_2 , verifica-se que há um aumento no EMQ (cerca de 20 cm em X e em Z) das discrepâncias nos pontos de verificação (ver Tabela 14). Por outro lado, quando estes valores dos POI nominais não são fixados no ajustamento, tem-se como resultados EMQs das discrepâncias nos pontos de verificação próximos aos EMQs, destes mesmos pontos, obtidos no processamento com os POI pré-calibrados (ver Tabela 10). Isso porque, neste caso, as coordenadas do ponto principal foram recuperadas no ajustamento. Já no experimento anterior (Tabela 14), a magnitude do deslocamento do ponto principal foi desconsiderada e este erro foi propagado para as coordenadas no espaço objeto.

Com isso verificou-se que ao usar os POI nominais da câmara, seguida da fototriangulação em serviço, ou seja, sem a pré-calibração, os parâmetros são recuperados, resultando em EMQ com alta qualidade, equivalentes aos obtidos ao considerar a pré-calibração. É importante ressaltar que nos experimentos com dados reais não foram usadas informações de georeferenciamento direto, o que melhoraria ainda mais a precisão, como mostraram os experimentos com dados simulados. Estes cenários de fototriangulação com georeferenciamento direto e parâmetros adicionais será objeto de trabalhos futuros.

5 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho consistiu em realizar um estudo experimental sobre grupos de POI e as injunções nos POE que podem ser considerados na fototriangulação de imagens. Para tanto, foram utilizados dados simulados, gerados pelo programa SMC, e dados reais. Nos experimentos com dados reais utilizou-se um bloco de imagens aéreas digitais, coletadas com a câmara de médio formato Hasselblad H1D (22 Megapixels), que integra o sistema SA-API da empresa Engemap. O processamento dos dados simulados foi realizado com o programa CMC, ao passo que no processamento dos dados reais foram utilizados os programas CMC e LPS.

A partir do estudo experimental com dados simulados verificou-se que o conhecimento prévio dos ângulos de orientação fornecidos pelo sistema inercial (estratégico ou tático) não proporcionou uma melhora significativa na determinação das coordenadas no espaço objeto dos pontos de verificação. Assim, pode-se concluir que, para este caso estudado, somente o uso do GPS é suficiente para recuperar os POI no processo de fototriangulação com parâmetros adicionais.

É importante ressaltar que a simulação trata de um caso ideal, ou seja, no qual não há perda de sinal GPS

pelo receptor e não há erros sistemáticos na posição GPS e nas atitudes. No entanto, sabe-se que na prática isto nem sempre ocorre, devido a manobras da aeronave em vôo. Portanto, a integração das informações providas pelos sensores GPS e INS torna-se relevante, uma vez que se tratam de sistemas complementares e juntos proporcionam um aumento na confiabilidade e acurácia final do levantamento. Como a quantidade de pontos de apoio era grande, a informação adicional de atitude pouco acrescentou à geometria da rede. Seria relevante no futuro estudar o impacto da redução do número de pontos de apoio na precisão final do bloco ao se utilizar o método de calibração em serviço com georeferenciamento direto.

Nos experimentos com dados reais realizados verificou-se que os POI podem ser estimados num processo de fototriangulação com calibração em serviço com confiabilidade, mesmo quando a câmara não é pré-calibrada. Assim, verifica-se a grande relevância do desenvolvimento do programa CMC, como ocorre em outros programas de calibração desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da FCT/UNESP, pois estes permitem estimar diferentes grupos de parâmetros de POI durante o ajustamento em bloco, o que não ocorre com a maioria dos sistemas fotogramétricos digitais, como por exemplo, o LPS, utilizado neste trabalho. Vale ressaltar que estas conclusões valem para blocos com configurações mostradas.

Agradecimentos

Os autores desejam externar os sinceros agradecimentos ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio financeiro concedido ao projeto, por meio de uma bolsa de Iniciação Científica e pelo auxílio à pesquisa (Projeto ARMOD), à empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento 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.

6 Referências

Andrade, J. B.: *Fotogrametria*. SBEE. Curitiba PR, 1998.

Bazan, W. S.; Tommaselli, A. M. G.; Galo, M.: *Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes*. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 726-734

Clarke, T. A.; Fryer, J. G.: *The Development of Camera Calibration Methods and Models*. Photogrammetric Record, v. 16, n.1, p. 293-312, 1998.

Fryer, J. G. Camera Calibration. In: Atkinson, K. B. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.

Galo, M.: *Calibração e aplicação de câmaras digitais*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

Habib, A. F.; Morgan, M. F.: *Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis*. In: Série em Ciências Geodésicas. v. 3, Curitiba, 2003.

Jacobsen, K.: *Issues and method for in-flight and on-orbit calibration*. In: Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, 2003, Gulfport. Proceedings of Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, Gulfport, 2003.

Mikhail, E. M.; Ackermann, F.: *Observations and Least Squares*. Dun-Donnelley: New York, U.S.A., 1976.

Murai, S.; Matsuoka R.; Tsutomu O.: *A study on analytical calibration for non metric camera and accuracy of tree dimensional measurement*. In: XVth ISPRS Congress, Rio de Janeiro, 1984.

Ruy, R. da S.; Tommaselli, A. M. G.; 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 the 7th Geomatic Week - High resolution sensors and their applications, 2007. p. 1-8.

Ruy, R. S.; Tommaselli, A. M. G.; Galo, M.; Hasegawa, J. K.; Menossi, R. C.: *Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental*. Artigo submetido ao Boletim de Ciências Geodésicas, 2008.

Schenk, T.: *Digital Photogrammetry*. The Ohio state university, 1999.

Wolf, P. R.; Dewitt, B. A.: *Elements of Photogrammetry: with applications in GIS*, U.S.A, 2000.