

# Controle de Qualidade de Pontos de Controle na Fototriangulação para Imagens digitais

Fabricio dos Santos Prol<sup>1</sup>  
Ariane de Oliveira Pedro Bom<sup>1</sup>  
Mariana Dias Chaves<sup>1</sup>  
Júlio Kiyoshi Hasegawa<sup>2</sup>

Universidade Estadual Paulista – Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas,

<sup>2</sup> Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP

fabricioprol@hotmail.com, arianeopbom@hotmail.com, mariana.unesp@hotmail.com  
hasegawa@fct.unesp.br

**Resumo:** Os sistemas de posicionamento por satélite permitem a aquisição de pontos de controle que são amplamente utilizados em processos de levantamentos aerofotogramétricos. Além da determinação de pontos no espaço objeto e imagem, os pontos de controle proporcionam análises de qualidade dos processos fotogramétricos. O controle de qualidade da fototriangulação é feito através da análise dos resíduos estimados nas medidas dos pontos homólogos, cujas coordenadas no espaço objeto são conhecidas. Este artigo tem como objetivo apresentar uma abordagem para o processamento da fototriangulação de imagens digitais, bem como uma estratégia de análise de qualidade de pontos de controles na triangulação de um bloco fotogramétrico. Onde os pontos de controle serão utilizados como pontos de verificação a fim de uma melhor estimação dos resíduos.

**Palavras chave:** Fototriangulação, Qualidade da fototriangulação, Bloco fotogramétrico.

**Abstract:** The satellite positioning systems allows the acquisition of control points that are widely used in aerophotogrammetric surveys processes. Beside the determination of points in object space and image space, control points provide quality analysis on photogrammetric process. Quality control of phototriangulation is done through the analysis of estimated residues in the measurements of homologous points, whose coordinates are known in the object space. Thus this paper presents an approach for phototriangulation processes from digital images, as well as a strategy for analysis the quality of control points in the triangulation of a photogrammetric block. Where control points will be used as check in order to a better estimate of the residues.

**Key words:** Phototriangulation, Phototriangulation quality, Photogrammetric block.

## 1 INTRODUÇÃO

A determinação da posição e orientação espacial da câmara fotogramétrica é o problema mais crítico em Fotogrametria. No caso de imagens aéreas, até recentemente, a única alternativa existente era a determinação indireta destes parâmetros, usando o processo conhecido como Fototriangulação. O advento e maturidade da tecnologia de posicionamento por satélites, em particular do sistema GPS (*Global Position System*), e dos sistemas inerciais trouxeram a expectativa de determinação direta destes parâmetros, evitando-se a Fototriangulação. Nos primeiros anos de desenvolvimento dos processos de orientação direta, havia a crença de que a Fototriangulação estava fadada ao desaparecimento, verificando-se, posteriormente, que o ideal seria a combinação de ambos os procedimentos (CRAMER, 1999).

O advento dos sistemas de georreferenciamento direto, que integram um ou mais receptores GPS com unidades de medida inercial, trouxe a expectativa de eliminação da fototriangulação e dos pontos de controle levantados em campo. Verificou-se, entretanto, que a correção de erros nestes sistemas exige, de

algum modo, pontos de controle e um ajuste em bloco por feixes de raios. (TOMMASELLI et al., 2007).

O controle de qualidade da fototriangulação dá-se através da análise dos resíduos encontrados nas medidas dos pontos homólogos. Juntamente com a análise dos resíduos das fotocoordenadas, é necessário observar a posição dos pontos nas fotografias, para que a busca de um resultado com menor resíduo não resulte numa distorção da posição dos pontos homólogos.

Deste modo, o propósito deste trabalho é apresentar os métodos de processamento de dados que proporcionaram uma boa qualidade no bloco fotogramétrico, gerado a partir de imagens digitais. Além de propor uma estratégia de verificação de qualidade dos pontos de controle a partir da fototriangulação do bloco. Onde os pontos de controle são trocados para pontos de verificação (*check*) a fim de analisar diferenças nos resíduos.

## 2 SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE DADOS

As atividades de processamento de dados de observações do mundo real são realizadas com o auxílio de programas computacionais de cálculo geodésico, restituição fotogramétrica, processamento de imagens digitais, processamento de dados de observação a laser, modelagem digital de terrenos, processamento de sinais obtidos por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), etc.

### 2.1 Posicionamento GNSS

O GNSS, ao integrar os vários sistemas de posicionamento por satélite existente, tem como principal objetivo viabilizar a navegação de alta precisão. É uma iniciativa que permite disponibilizar as técnicas de navegação por satélite como um método alternativo à navegação aérea comercial (SAPUCCI et al., 2003).

Quando as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por uma ou mais estações de coordenadas conhecidas utilizando  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ , este é denominado de posicionamento relativo. Neste método há necessidade de dispor de dois ou mais receptores coletando dados simultaneamente, sendo que um receptor rastreia os dados nos pontos que se deseja determinar as coordenadas e o outro receptor (denominado de base) permanece fixo sobre a estação de coordenadas conhecidas. Atualmente, com a disponibilização das redes ativas (RBMC/RIBAC e a GNSS-SP) é possível utilizar as estações de referência pertencentes a estas redes (MONICO, 2008).

Em fotogrametria a aplicação mais comum do GPS é o estabelecimento de pontos de apoio para a fototriangulação. No entanto, o potencial de aplicação vai muito além; compreendendo fases desde a execução do voo, determinação dos centros perspectivos, até a determinação de atitude da câmara (DAL POZ E CAMARGO, 1998).

O processamento de dados no método relativo pode ser realizado após a coleta (pós-processado) ou durante a coleta (tempo real). No caso do pós-processamento podem-se utilizar estações homologadas a redes de referência, tais como as estações ativas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), possibilitando melhor precisão em levantamentos com um único receptor.

### 2.2 Aerofotogrametria

A aerofotogrametria é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias são tomadas por uma câmara precisa montada em uma aeronave. É uma tecnologia amplamente utilizada nos mapeamentos, tanto nas escalas grandes quanto pequenas e vem sofrendo aperfeiçoamento contínuo, melhorando a produtividade e gerando produtos como ortofotocartas e Modelo Digital do Terreno (MDT).

A utilização de fotografias na extração de medidas e de informações sobre a área estudada tem sido amplamente empregada devido ao rápido desenvolvimento tecnológico. Com o surgimento da fotogrametria digital, fez-se possível aprimorar os procedimentos de correção de imagens, a partir do processamento digital de imagens, bem como viabilizar a orientação absoluta do conjunto de imagens em relação ao terreno.

### 2.3 Fototriangulação com dados GNSS

Fototriangulação é o método fotogramétrico de determinação de coordenadas de pontos do espaço objeto através de:

- i. Relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas;
- ii. Espaço controle de campo dado, e;
- iii. Um conjunto de valores aproximados de parâmetros. (LUGNANI, 1987).

Na solução da fototriangulação determinam-se, simultaneamente, além das coordenadas dos pontos no espaço objeto, os parâmetros de orientação exterior de todas as fotografias envolvidas no processo, para tanto, ela depende das coordenadas de alguns pontos de apoio. O processamento é realizado através do ajustamento de todos os feixes (imagens) num bloco de fotografias envolvendo rotações e translações de cada feixe. As equações desenvolvidas no ajustamento são as de colinearidade (LUGNANI, 1987 e WOLF, 1988).

$$\begin{aligned} x_p &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X^c) + m_{12}(Y - Y^c) + m_{13}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \\ y_p &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X^c) + m_{22}(Y - Y^c) + m_{23}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \end{aligned} \quad (1)$$

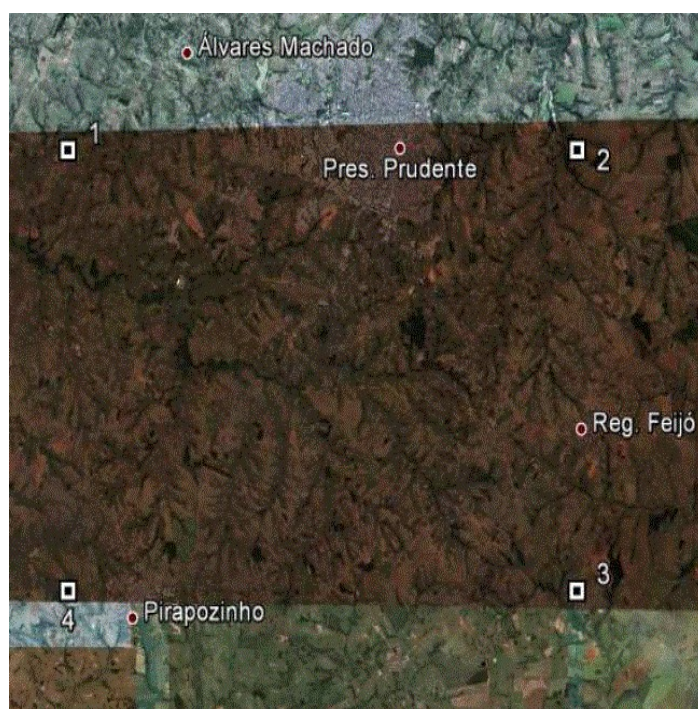
Onde:

$x_p$  e  $y_p$  – coordenadas do ponto  $p$  no sistema fotogramétrico;  
 $X, Y, Z$  – coordenadas cartesianas do ponto  $P$  no espaço objeto;  
 $X^c, Y^c$  e  $Z^c$  – coordenadas do centro perspectivo no sistema de coordenadas do espaço objeto, e;  
 $m_{ij}$  – elementos da matriz de rotação.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PROJETO CARTOGRÁFICO

A localização espacial da área de estudo corresponde a um trecho do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Anastácio, no município de Presidente Prudente-SP (Figura 1). Os pontos 1, 2, 3, 4 representam, aproximadamente, os pontos limites da região.



**Figura 1** : Região de estudo.

Com base nos projetos realizados na FCT/UNESP sobre a mesma região, optou-se pela escolha de imagens com escala 1:40000 disponibilizadas pela empresa Engemap.

### 3.2 LEVANTAMENTO DE PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO

O planejamento de campo foi realizado antes do levantamento, com o intuito de selecionar pontos de apoio e de verificação, dentro do bloco fotogramétrico (com pelo menos dois pontos fotoidentificáveis), localizados no Google Earth®, para facilitar o deslocamento até os mesmos.

Como o bloco de imagens utilizado era composto por 576 fotos e o trabalho foi realizado por todos os alunos matriculados na disciplina Trabalho de Graduação, cada grupo se responsabilizou por aproximadamente 15 pontos de apoio, distribuídos em uma faixa transversal às linhas de voo.

Então, no levantamento, a taxa de coleta foi de 1 Hz com máscara de elevação de 15° e com taxa de coleta com aproximadamente 40 minutos em cada ponto, visando uma melhor solução das ambigüidades.

O processamento dos pontos foi realizado no *software* Topcon Tools®, tendo como estação de referência a PPTE, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do sistema de referência SIRGAS2000. Como resultado do processamento, os pontos foram utilizados na fototriangulação do bloco.

### 3.3 FOTOTRIANGULAÇÃO

Na fototriangulação, 60 pontos de apoio foram utilizados, distribuídos em quatro faixas transversais às linhas de voo. As imagens e a posição dos Centros Perspectivos foram disponibilizadas a partir do voo realizado pela empresa Engemap, que utilizou um sistema integrado acoplado a uma aeronave, formado por uma antena GNSS, um sistema inercial de navegação (IMU) e a câmara digital de alta resolução modelo Hasselblad, com distância focal de 50,19mm e sensor CCD (*Charge Couple Device*) com 49x36mm, previamente calibrada.

No *software* Leica Photogrammetry Suite (LPS) v.2011 foi realizada a orientação do bloco e os pontos de enlace foram gerados automaticamente, com distribuição de 25 em cada modelo. Estes pontos (de controle e verificação) foram editados sistematicamente no modo estéreo, de maneira a corrigir posição de cada um dentro do bloco.

### 3.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DA FOTOTRIANGULAÇÃO

Depois do levantamento de campo e da fototriangulação devidamente realizados, desenvolveu-se a análise da mesma, a partir do resultado obtido para os pontos de verificação demarcados na área de estudo. O número mínimo de pontos adotado para realizá-la, foi 10, sendo eles bem distribuídos na região fototriangulada.

As coordenadas dos pontos de verificação são conhecidas, mas não fixadas no processo de fototriangulação, de modo que as mesmas são determinadas, pois têm a função de controlar a qualidade da fototriangulação a partir de testes estatísticos, que comparam as coordenadas calculadas com as coordenadas conhecidas.

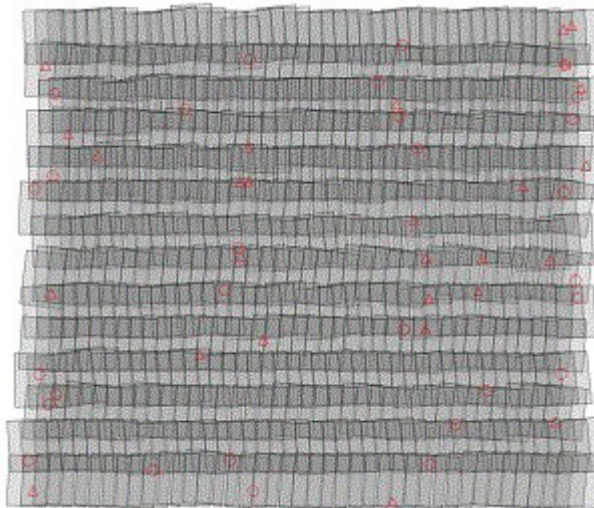
Os valores utilizados para avaliar a qualidade da aerotriangulação foram provenientes no relatório gerado pelo LPS. Estes só foram aceitos após realizar a fototriangulação do bloco e corrigir os pontos que extrapolaram a precisão exigida pelo decreto nº 89817/84 na análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), na classe A.

Ainda na análise de qualidade da aerotriangulação, os pontos usados como controle foram trocados por pontos de verificação um a um, onde para cada qual, rodou-se a fototriangulação novamente. Desta forma pode-se analisar individualmente os resíduos de cada ponto de controle e determinar os que mais sofreram variações ao deixá-los livres no ajustamento.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 RESULTADOS

O bloco de imagens aerotriangulado com respectivos pontos de controle ( $\Delta$ ) e verificação (O) são ilustrados na figura 2.



**Figura 2** : Bloco aerotriangulado.

Os 27 pontos de controle são mostrados na Tabela 1, bem como seus respectivos resíduos nas componentes horizontal e vertical.

**Tabela 1** – Resíduos dos pontos de controle.

ID do Ponto	rX (m)	rY(m)	rZ(m)
56	0,0186	0,2998	0,2706
2009648	0,0161	0,1005	-0,0482
33	0,1894	0,0868	0
35	-0,1265	-0,4526	0
41	0,2624	-0,4862	0
46	-0,1377	0,006	0
48	0,1476	-0,1629	0
50	-0,1422	0,1366	0
59	0,0473	0,1046	0
1	-0,253	0,1521	0
2	-0,056	-0,0012	0
6	-0,3139	0,6384	0
2009608	-0,1086	0,1844	0
2009609	-0,0644	0,0588	0
2009610	0,0566	-0,0332	0
2009626	-0,0098	0,6577	0
2009632	0,064	0,0637	0
2009639	0,0426	-0,0515	0
2009646	-0,0767	0,1145	0
8	0	0	0,0694
39	0	0	0,396
57	0	0	0,2766
34	0	0	0,5964
63	0	0	0,3605
27	0	0	-0,2569
2009650	0	0	-0,386
2009656	0	0	0,4742



Dentre os valores apresentados na tabela, os zeros são referentes aos pontos que não foram utilizados como controle horizontal e vertical, ou seja, zero nas componentes X e Y indica que o ponto foi utilizado apenas como controle vertical.

#### 4.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA FOTOTRIANGULAÇÃO

Utilizando os testes estatísticos t-Student e Qui-quadrado, pode-se avaliar se a fototriangulação foi tendenciosa e se os valores obtidos permitiriam alcançar a precisão exigida no PEC, ficando menor que 0,30m (componentes horizontais) e que 0,40m (componente vertical). As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores calculados.

**Tabela 2** – Análise da tendência dos pontos

Valor	$Z_E$	$Z_N$	$Z_h$
Tabelado	1,734064	1,734064	1,75305
Calculado	1,705464	0,30341	0,657662

**Tabela 3** – Análise da qualidade da fototriangulação

Valor	$\chi_E^2$	$\chi_N^2$	$\chi_h^2$
Tabelado	24,76904	24,76904	21,06414
Calculado	1,131634	22,66454	13,45252

De acordo com o resultado obtido nas análises estatísticas, pode-se afirmar que os pontos de verificação não são tendenciosos e que a fototriangulação se enquadra na Classe A, mesmo a componente E apresentando um valor elevado na tendência, a qualidade da fototriangulação se apresentou boa em E.

Para cada ponto de controle, foi rodada uma nova triangulação, utilizando-os como pontos de verificação. A Tabela 4 mostra os pontos de controle, bem como os resíduos em cada uma das componentes, vertical e horizontal.

**Tabela 4** – Qualidade dos pontos de controle

ID do Ponto	rX(m)	rY(m)	rZ(m)
56	0,0237	0,3418	0,3585
2009648	0,0287	0,1302	-0,081
33	0,2008	0,0934	0
35	-0,1353	-0,4893	0
41	0,2971	-0,5412	0
46	-0,1498	0,0065	0
48	-0,1595	-0,1758	0
50	-0,1519	0,1471	0
59	0,0512	0,1137	0
1	-0,3549	0,1999	0
2	-0,0679	-0,0017	0
6	-0,3958	0,7676	0
2009608	-0,1245	0,2171	0
2009609	-0,0721	0,0668	0
2009610	0,0605	-0,0358	0
2009626	-0,009	0,7037	0
2009632	0,101	0,0954	0
2009639	0,0525	-0,0617	0
2009646	-0,0994	0,152	0
8	0	0	0,108

39	0	0	1,0823
57	0	0	0,3504
34	0	0	0,7644
63	0	0	0,67
27	0	0	-0,7308
2009650	0	0	-0,7004
2009656	0	0	0.6429

Analisando as tabelas 1 e 4, percebem-se diferenças nos resíduos estimados a partir das fototriangulações geradas. O ponto 6 mostrou a maior discrepância (diferença dos módulos) entre os resíduos nas componentes da horizontal, tendo um acréscimo de aproximadamente 10 cm, comprovando ser o pior ponto de controle horizontal da amostra.

Observa-se que o ponto 39 possui um resíduo ( $r_Z$ ) relativamente baixo como ponto de controle, em comparação aos outros de controle horizontal. Porém quando livre no ajustamento, mostra-se com o maior resíduo dentre os pontos analisados. Sendo que a diferença (controle-verificação) é um acréscimo de aproximadamente 70 cm.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os valores encontrados na qualidade da fototriangulação do bloco, conclui-se que a estratégia proposta de controle da qualidade dos pontos de controle se mostrou eficaz, mostrando que realizar a fototriangulação trocando alguns pontos de controle por pontos de *check* possibilita uma análise mais detalhada sobre o resíduo em cada ponto.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRAMER, M. Direct Geocoding - is aerial triangulation obsolete. **47 th Photogrammetric Week**, Stuttgart, 1999.
- DAL POZ, A. P.; CAMARGO, P. O.. Aplicações do GPS em fotogrametria. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.1, p.20-25, 1998.
- DECRETO n° 89817, de 20 de junho de 1984. **Instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional**. Diário oficial da União.
- ENGEMAP. **Produto cartográfico na escala 1:2.000 – Carta de Valinhos, SP**. Assis, 2008.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Último acesso em: 04/05/2012.
- LUGNANI, J. B.; **Introdução à fototriangulação**. Universidade Federal do Paraná, 1987. 134p.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, Editora UNESP, 2008.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOSA, E. S.; Machado, L. A. T.. **Predições do atraso zenital troposférico na América do Sul para posicionamento GNSS em tempo real**. III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba, 2003.
- TOMMASELLI, A. M. G; LOPES, R. F; MARQUES, A. P. S. **Desenvolvimento de uma Estratégia para a Medição Automática de Pontos Homólogos em Fototriangulação**. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática, 2007, Presidente Prudente. Anais.... Presidente Prudente, SP: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 646-654.

**Agradecimentos** : Os autores deste trabalho agradecem a empresa Engemap por fornecer as imagens utilizadas na fototriangulação, ao Departamento de Cartografia pela infraestrutura disponibilizada, aos orientadores: Maurício Galo, Mônica Modesta Santos Decanini e Otávio Yassuo Itame, pela confiança e orientação na realização das tarefas e aos alunos da turma de Engenharia Cartográfica 2011, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.