

# **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA METODOLOGIA AUTOMÁTICA PARA A GERAÇÃO DE ESTEREOMODELOS A PARTIR DE DADOS DE ORIENTAÇÃO DIRETA**

*Experimental Assessment of an Automatic Approach for Stereo Models Generation using Directly Measured Orientation Parameters*

**Antonio Maria Garcia Tommaselli  
Roberto da Silva Ruy**

**Universidade Estadual Paulista  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Cartografia**

Rua Roberto Simonsen 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil  
{rroy, tomaseli}@prudente.unesp.br

## **RESUMO**

A evolução dos dispositivos de aquisição de imagens, do posicionamento por satélites (GPS) e da orientação espacial por sensores inerciais (INS), possibilitou o surgimento de aplicações que envolvem a obtenção de produtos cartográficos com requisitos de resposta rápida, como gerenciamento de desastres e monitoramento do meio ambiente. Tais aplicações necessitam de informações georreferenciadas periódicas com características de rapidez e confiabilidade, que podem ser obtidas pela técnica fotogramétrica digital, apoiada pelos sensores que fornecem a orientação direta da câmara. Contudo, a acurácia dos parâmetros de orientação exterior (OE) fornecidos por estes sensores não é suficiente para eliminar a paralaxe vertical ( $py$ ) do modelo formado, prejudicando a visualização estereoscópica da cena e os processos de correlação automática. Neste sentido, este trabalho apresenta a avaliação experimental de uma metodologia para a eliminação da paralaxe vertical do modelo. Esta abordagem é baseada na compatibilização dos parâmetros de OE fornecidos pelos sensores de orientação direta, a partir de um modelo de coplanaridade adaptado. O presente trabalho apresenta experimentos com dados simulados e com dados reais. Os experimentos com dados simulados foram realizados com o objetivo de avaliar a confiabilidade necessária para que os sistemas de determinação direta dos parâmetros de orientação exterior permitam a eliminação dos pontos de apoio, mantendo o produto final dentro as especificações cartográficas. Os experimentos com dados reais foram realizados para verificar a eficácia da metodologia na eliminação da paralaxe vertical do modelo, com consequente análise da exatidão das coordenadas no espaço objeto calculadas por intersecção.

**Palavras chaves:** Fotogrametria Digital, Georreferenciamento Direto (GPS+INS), Correlação, Coplanaridade.

## **ABSTRACT**

With the evolution of digital image acquisition devices, satellite positioning systems (GPS) and space orientation by the inertial navigation systems (INS), new applications of fast cartography, became feasible, as disaster management and environment monitoring. Such applications require periodic georeferenced information with characteristics of speed and reliability that can be obtained by digital photogrammetry, using additional data from sensors of direct orientation. However, the exterior orientation parameters (EO) provided by these sensors are under the required accuracy to remove the vertical parallax in the model. This paper presents an experimental evaluation of an approach for removing the vertical parallax of the model. This approach is based on the reprocessing of the EO parameters provided by the sensors, using a modified coplanarity model. Some experiments with simulated and real data are presented. The experiments with simulated data were performed in order to assess the acceptable errors in the exterior orientation parameters. The experiments with real data were carried out to evaluate the vertical parallax effect, before and after the reprocessing of the EO parameters, and to access the accuracy of check points calculated by photogrammetric intersection.

**Key words:** Digital Photogrammetry, Direct-Georeferencing (GPS+INS), Matching, Coplanarity.

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução dos dispositivos de aquisição de imagens (câmaras digitais), de posicionamento por satélites (GPS) e de orientação espacial por sensores inerciais (INS), possibilitou o surgimento de aplicações que envolvem a obtenção de produtos cartográficos com requisitos de resposta rápida, como gerenciamento de catástrofes e monitoramento do meio ambiente. Estas aplicações requerem informações georreferenciadas periódicas com características de rapidez e confiabilidade, que podem ser obtidas pela técnica fotogramétrica digital, apoiada pelos sensores que fornecem a orientação direta da câmara.

Um dos problemas mais sérios das câmaras digitais matriciais é a resolução do CCD, quando comparadas às câmaras aéreas convencionais. Nestas condições, são necessárias muitas imagens para recobrir uma determinada área com resolução adequada. Isto implica em aumentar a complexidade dos processos envolvidos, principalmente a determinação dos parâmetros de orientação exterior (OE) por aerotriangulação. Há um aumento excessivo do número de pontos de controle e de passagem, tornando o processo antieconômico.

Uma das maneiras de contornar este problema é determinar de forma direta os parâmetros de OE, por meio do uso de sensores adicionais: GPS + INS. Todavia, o custo destes equipamentos é consideravelmente elevado e deve-se discutir quais os níveis de exatidão necessários para realizar um adequado tratamento das imagens (COLOMINA, 1999).

Vale ressaltar que a qualidade dos parâmetros de OE determinados pelos sensores de orientação direta, utilizados para mapeamento, não é suficiente para eliminar completamente a paralaxe vertical ( $\rho_y$ ) do modelo (MOSTAFA e SCHWARZ, 2001; COLOMINA, 1999 e BRZEZINSKA, 1999), prejudicando a visualização estereoscópica da cena e os processos automáticos de correlação.

Neste sentido, este trabalho apresenta a avaliação de uma abordagem para a eliminação da paralaxe ( $\rho_y$ ) do modelo. Esta abordagem é baseada no "refinamento" dos parâmetros de OE por meio de um modelo de coplanaridade modificado, mediante um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados. Os valores observados correspondem às fotocoordenadas de pontos de passagem medidos automaticamente no modelo. Por fim, as imagens digitais são normalizadas pelo processo de Reamostragem Epipolar para eliminar visualmente o efeito da paralaxe e facilitar o processo de correlação (busca unidimensional).

Neste artigo apresenta-se ainda um estudo do efeito dos erros nos parâmetros de OE sobre as coordenadas dos pontos no espaço objeto, visando avaliar qual a exatidão dos parâmetros de OE compatível com a resolução da câmara. Além disto, serão apresentados a metodologia e experimentos com dados reais para a eliminação da paralaxe do modelo.

## 2. CÂMARAS DIGITAIS

Em geral, a captura de imagens em Aerofotogrametria é feita com filmes, posteriormente digitalizados em *scanners* fotogramétricos. Isto porque as câmaras digitais que equivalem em resolução à uma câmara fotogramétrica, ainda apresentam custos elevados. Além disto, a massa de dados a ser armazenada em tempo real é muito grande e o seu gerenciamento torna-se complexo.

De acordo com Hinz (1999), o usuário somente estará preparado para aceitar a tecnologia digital se esta oferecer vantagens sobre as câmaras convencionais, de um ponto de vista econômico e produtivo. Apesar das limitações de resolução, as câmaras digitais oferecem vantagens sobre as câmaras baseadas em filme (TOMMASELLI, 2001):

- As câmaras digitais possuem poucas partes móveis e o sensor CCD, de estado sólido, sofre deformações muito pequenas em razão da variação de temperatura, ao contrário dos filmes;
- Reutilização da mídia de gravação;
- Não é necessário digitalizar a fotografia em *scanner*;
- Maior resolução radiométrica, pois conseguem registrar intensidades com até 12 bits por pixel, ou seja, é possível distinguir até 4096 níveis de cinza, contra os atuais 256 em uma imagem pancromática convencional;
- Possibilidade de cobertura multiespectral com as imagens já registradas;

Devido ao problema de limitação da resolução em sensores digitais, nos últimos anos foram lançados sistemas digitais de alta resolução, baseados principalmente em duas abordagens: os sensores trilinear e a configuração modular de câmaras digitais matriciais.

O uso de um arranjo de sensores lineares foi adotado pela empresa *Leica GeoSystems*. O sistema trilinear, desenvolvido no DLR da Alemanha originalmente para missões orbitais, caracteriza-se por integrar três ou mais sensores CCD lineares com configuração de varredura "pushbroom" para imagear de forma contínua o terreno. O sistema consiste de três sensores lineares posicionados no plano focal (anterior, nadir e posterior) que garantem a geometria e a cobertura estereoscópica da superfície, além de sensores multiespectrais adicionais localizados próximos ao nadir. O modelo comercial da câmara ADS, lançado no ano de 2000, incorporou vários pares de CCDs lineares de 12.000 pixels, combinando-os de modo a fornecer uma resolução de 24.000 pixels, com pixel de 6,5 $\mu$ m e resolução radiométrica de 4096 níveis de cinza (12 bits) para as imagens pancromáticas. A retificação destas imagens é realizada em duas etapas. Na primeira, cada linha é retificada a partir dos dados de orientação providos da integração entre os sensores GPS e INS. Na segunda etapa, uma fototriangulação usando as três faixas pancromáticas refina os resultados, permitindo a restituição estereoscópica (SANDAU et al, 2000).

Os sistemas baseados no arranjo tri-linear têm como vantagens a utilização de um único sistema de lentes, um único plano focal (mesmo com vários sensores CCD lineares), a capacidade de obter imagens multiespectrais registradas e a alta resolução dos sensores. Contudo, devido à sua configuração geométrica, este tipo de sistema requer softwares específicos para o processamento dos dados e não há uma imagem com a usual perspectiva central, mais aceita pelos fotogrametristas.

A abordagem do sistema modular de câmaras digitais matriciais é baseada numa configuração de câmaras integradas sobre uma plataforma estabilizada, de tal forma que seja possível ter uma cobertura fotográfica mais extensa do terreno a partir da integração das imagens capturadas por várias câmaras digitais matriciais. O sistema proposto pela empresa *ZI Imaging*, a *DMC (Digital Modular Camera)*, consiste de quatro câmaras digitais inclinadas que produzem imagens pancromáticas. Outras três câmaras posicionadas verticalmente próximas ao nadir produzem imagens multiespectrais (vermelho, azul e verde) com metade da resolução das imagens pancromáticas, cobrindo a área equivalente às quatro câmaras. O sistema pode ser estendido para canais espectrais adicionais (Infravermelho, por exemplo), em aplicações na área de Sensoriamento Remoto. As imagens são retificadas relativamente e mosaicadas, formando uma única imagem com uma distância focal e um centro perspectivo virtuais.

Apesar do alto custo e do problema de fusão das imagens no processo de mosaicagem, a abordagem matricial tem algumas vantagens sobre os sistemas tri-lineares (TOMMASELLI, 2001):

- Geometria convencional, com a usual perspectiva central;
- Eliminação do efeito do arrastamento através da tecnologia TDI (Time Delay Integration);
- O uso dos sensores GPS e INS é opcional;
- As imagens podem ser diretamente utilizadas nas estações fotogramétricas digitais;
- Formato aproximadamente quadrado da imagem.

Como estes sistemas métricos possuem custos elevados e softwares específicos para a formação das imagens, há no mercado câmaras digitais matriciais de médio formato, como a *KODAK PRO 14n* (14 Megapixels) e a *Emerge* (16 Megapixels), que podem ser usadas em certas aplicações com relação custo/benefício bastante favorável.

Neste trabalho apresentam-se estudos e experimentos realizados com imagens obtidas por câmaras digitais de pequeno e médio formato, considerando as vantagens oferecidas por este tipo de sensor.

### 3. GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

O georreferenciamento direto, ou orientação direta do sensor, consiste na determinação dos

parâmetros de orientação exterior da câmara no instante de cada exposição fotográfica, durante a trajetória de voo. Isso é possível por meio da integração entre os sistemas de posicionamento por satélites (GPS – “*Global Positioning System*”) e os sistemas de navegação inercial (INS – “*Inertial Navigation System*”). Fundamentalmente, o GPS é usado a bordo da aeronave para a determinação das coordenadas dos CP’s (Centros Perspectivos) da câmara durante as exposições fotográficas. No caso dos sistemas inerciais, a Unidade de Medida Inercial (IMU), composta por acelerômetros, giroscópios e sensores auxiliares de calibração, é responsável por fornecer continuamente a atitude do sensor ao longo da trajetória de voo.

Neste contexto, a integração GPS/INS pode ser uma ferramenta poderosa. O sistema inercial pode complementar o GPS, fornecendo as informações de posição inicial e de velocidade após a perda de sinal do receptor. Mesmo quando a visibilidade dos satélites é insuficiente, o INS pode fornecer informações contínuas de trajetória. Por outro lado, a boa performance do sistema GPS pode suplementar o sistema de navegação inercial por meio da estimação acurada do comportamento de seus erros ao longo do tempo. Estes erros estão relacionados ao problema de deriva das informações de trajetória inerente aos sistemas inerciais usados para mapeamento. Os erros internos do INS são modelados como desvios nos giros e deslocamentos nos acelerômetros, e são corrigidos pelo método de filtragem Kalman, a partir das informações de posição provenientes do GPS (CRAMER & STALLMANN, 2002).

A função da integração de sensores é orientar de forma direta as imagens. Esta abordagem tem vantagens claras sobre o método indireto de orientação de imagens, baseado na aerotriangulação. O método convencional (indireto) necessita de uma infra-estrutura para a coleta de pontos de apoio em campo, além de tempo hábil para o processamento destes pontos e para o cálculo da orientação das imagens no processo de aerotriangulação. Além disso, dependendo da área a ser imageada, a coleta de pontos de apoio torna-se inviável.

Um fato importante na orientação direta é a necessidade de calibração acurada e recente da câmara, pois quaisquer discrepâncias entre o modelo matemático adotado e a realidade física durante a formação da imagem causam erros na determinação das coordenadas de pontos no espaço objeto. Sendo assim, o modelo de geometria interna da câmara é fundamental, visto que o sistema GPS/INS fornece medidas diretas da posição e orientação física da câmara durante a exposição.

Embora os sistemas GPS e INS tenham custos elevados, o georreferenciamento direto da imagem, durante a coleta, pode ser vantajoso, por inúmeras razões:

- Possibilidade de orientação precisa das imagens, a partir de dados pós-processados;
- Permite observar fenômenos variantes no tempo, que necessitam uma avaliação imediata (Inundações, vestígios de petróleo, desmatamento, etc);

- Elimina as limitações de trajetória do vôo, não sendo obrigatória a montagem de um bloco, o que permite aplicações como monitoramento de linhas de transmissão, projetos de estradas e outros;
- Permite o controle automático dos disparos da câmara;
- Mesmo se for empregada a Aerotriangulação, os algoritmos de correlação certamente funcionarão com melhor rendimento.

Um ponto crítico na utilização do georeferenciamento direto é a exatidão final do produto, pois se sabe que o sistema inercial está sujeito à deriva dependente do tempo. Para avaliar o potencial de exatidão do georeferenciamento direto, vários experimentos têm sido realizados e diversas organizações já usam o GPS e o sistema inercial para o georeferenciamento direto das imagens.

A acurácia dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação direta (GPS+INS) depende dos sistemas utilizados, conforme mostram alguns experimentos realizados:

- A partir de experimentos realizados com o modelo *310 GPS/INS*, da *APPLANIX*, chegou-se a acurácia aproximada de: 0,1-0,3m para as coordenadas do CP e 1-2' para os ângulos de atitude do sensor (SEARA, 2002);
- Experimentos realizados por Cramer e Schade (1995) com o sensor inercial de baixo custo *Motionpak*, fabricado pela empresa *BEI/Systron Donner*, integrado a um receptor GPS *Ashtech 3DF*, resultaram em dados com qualidade de: 20' para o ângulo  $\omega$ , 3' para  $\phi$  e 2' para  $\kappa$ ;
- Em experimentos realizados com o sistema *APPLANIX POS/DG310*, composto por um GPS de dupla frequência Novatel Millennium e um sistema inercial IMU Litton LR 86, além de um software para processamento dos dados baseado na filtragem Kalman, os parâmetros de orientação exterior obtidos apresentaram acurácia na ordem de 0,1-0,2m para posição ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e 7"-15" para os ângulos de rotação (CRAMER et al, 1999);
- Segundo Mostafa e Hutton (2001), em experimentos realizados com o sistema de navegação *POS/AC<sup>TM</sup>*, da *APPLANIX*, foram obtidos dados com qualidade em torno de 0,3m para posição (CP) e 2-4' para os parâmetros de atitude da câmara.

#### 4. METODOLOGIA

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para eliminar a paralaxe vertical do modelo, baseada na compatibilização dos parâmetros de orientação exterior fornecidos pelos sensores de orientação direta (GPS+INS). Tal paralaxe permanece porque os parâmetros providos da integração entre os sensores GPS e INS não têm a acurácia necessária para a completa formação do modelo.

Para sintetizar a metodologia desenvolvida o fluxograma a seguir apresenta as etapas envolvidas no processo de geração automática de estereomodelos.

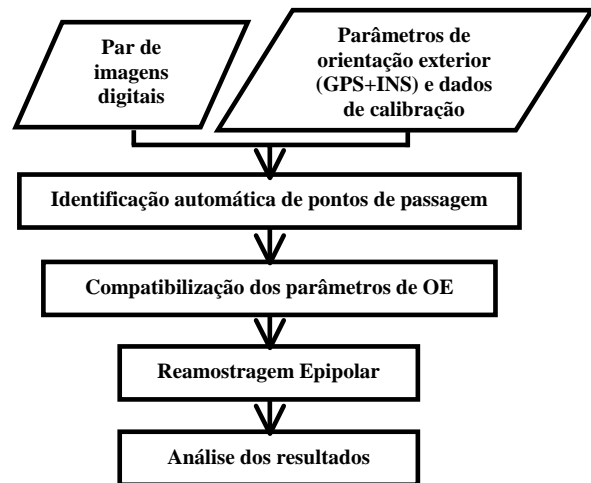


Fig. 1 - Processos envolvidos na geração automática de estereomodelos.

#### 4.1 Identificação automática de pontos homólogos

Para a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior num ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, alguns pontos de passagem devem ser medidos no modelo. Nesta abordagem é necessário medir apenas um ponto para ajustar os parâmetros, uma vez que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso, relativas à qualidade da determinação pelos sensores de orientação direta. Todavia um número mais significativo de pontos traz mais confiabilidade ao processo, uma vez que pontos identificados incorretamente podem ser eliminados por meio de uma análise dos resíduos das observações ao final do ajustamento.

Foi desenvolvida uma abordagem para a medição automática dos pontos de passagem, com funções de pré-análise da janela de referência, redução do espaço de busca e estimação das posições homólogas.

##### 4.1.1 Definição das janelas de referência

As janelas de referência são definidas de forma automática e, para isso, a área de superposição do modelo deve ser delimitada. Isto é realizado projetando-se os extremos da imagem da direita para a imagem da esquerda por meio das equações de colinearidade, usando os parâmetros de orientação exterior (GPS+INS) das imagens. O processo é auxiliado pela técnica de Busca em Linhas Epipolares, (Seção 4.1.2) que limita a área de busca na imagem da esquerda. Com a janela de busca definida, é aplicado o método de correlação por área (seção 4.1.3) para determinar as posições homólogas dos extremos projetados. Com estas posições estimadas define-se a área de superposição na imagem da esquerda.

Nesta área, as janelas de referência são estabelecidas de forma adaptativa (espaçadas por todo o modelo). O tamanho da janela de referência é definido a priori por um arquivo de configuração. Neste arquivo é

definido ainda o número de pontos de passagem a serem medidos automaticamente no modelo.

Ao estabelecer a posição da janela de referência sobre o modelo é realizada uma pré-análise da região de correlação, com o intuito de aumentar a robustez do processo, evitando regiões problemáticas (homogêneas). Esta análise *a priori* é realizada pelo cálculo da matriz variância-covariância (MVC) das componentes de translação radiométrica das áreas de correlação, a partir de uma medida de correlação teoricamente correta. Como se trata de uma abordagem automática este coeficiente foi experimentalmente definido como 0,8. Detalhes sobre este processo podem ser encontrados em Costa et al (2003).

De acordo com Costa et al (2003), a matriz variância-covariância das componentes de translação, e conseqüentemente, os desvios-padrão das translações, dependem dos seguintes fatores:

- *Variância do ruído*, calculado a partir da variância da janela de referência e do máximo coeficiente de correlação;
- *O número m de pixels*: o tamanho da janela de referência é importante, uma vez que o desvio-padrão diminui linearmente com o aumento da janela;
- *O gradiente médio quadrático na janela*, que indica a presença de bordas, o que é decisivo para a precisão da correlação.

Dessa forma, assumindo-se a variância do ruído constante em toda a imagem, é possível determinar as regiões onde se pode esperar alta precisão na correlação. Isto é possível porque as equações dependem somente do conteúdo da janela de referência.

Os critérios de rejeição para as regiões problemáticas foram estabelecidos por meio de experimentos práticos com imagens digitais aéreas coletadas pelas câmaras KODAK Pro14n e KODAK DCS 420. Estes experimentos foram realizados com janelas de referência de características diversas, desde áreas homogêneas até áreas com alta variância. Os valores estatísticos obtidos nestes experimentos podem ser vistos na Tabela 1.

TABELA 1 – VALORES ESTATÍSTICOS DAS ÁREAS DE CORRELAÇÃO, CALCULADOS EM EXPERIMENTOS SIMULADOS.

Tamanho da janela	Característica da área da janela	Variância do sinal	Variância do ruído	Traço da MVC
9 x 9	<i>em branco</i>	10,2811	3,0801	0
	<i>homogênea</i>	12,5420	3,7630	0,0088
	<i>canto</i>	1397,1347	419,1404	0,0116
	<i>borda</i>	1601,7739	480,5321	0,1028
	<i>heterogênea</i>	1274,6100	82,3802	0,0127
15 x 15	<i>em branco</i>	1,3017	0,3905	0
	<i>homogênea</i>	8,9119	2,6735	0,0023
	<i>canto</i>	847,5804	254,2741	0,0076
	<i>borda</i>	641,3723	192,4117	0,2450
	<i>heterogênea</i>	1051,9357	315,5807	0,0047

A partir destes experimentos realizados verificou-se que a janela de referência é rejeitada se:

$$\text{Variância do sinal} < 400 \text{ ou Traço da MVC} > 0,05$$

Caso a região amostrada pela janela de referência seja considerada problemática, a janela é deslocada em três pixels na direção horizontal. Este processo é repetido até que a área de correlação seja considerada adequada, de acordo com os critérios definidos. Este processo minimiza a ocorrência de falsas correlações ou de correlações redundantes.

#### 4.1.2 Redução do espaço de busca

Nesta abordagem foi adotada a busca em linhas epipolares, para reduzir o espaço de busca no processo de correspondência de imagens. Este método evita que a correlação seja calculada em toda a imagem, reduzindo o tempo de processamento e a ocorrência de falsas correlações. A busca das feições correlatas é feita nas linhas epipolares, usando as equações de colinearidade, os parâmetros de orientação exterior das imagens e um conhecimento aproximado da altimetria da região (Ex: MDT global). Como os parâmetros de OE foram estimados pelos sensores de bordo e, sendo assim, consistem de parâmetros “aproximados”, este método foi adaptado de tal modo a gerar uma área de busca em torno da linha epipolar.

Maiores detalhes sobre o método de busca em linhas epipolares podem ser encontrados em Schenk (1999).

#### 4.1.3 Estimação das posições homólogas

Considerando os pontos de correlação (passagem) definidos no modelo, a etapa seguinte consiste em determinar suas posições homólogas na imagem da direita, a partir dos algoritmos de correlação ao nível de pixel e refinamento por correlação pelos Mínimos Quadrados, auxiliados pela técnica de busca em linhas epipolares.

Na correlação ao nível de pixel (KRAUS, 1993) é realizada a convolução da janela de referência sobre a janela de busca, calculando-se o coeficiente de correlação (variante da covariância cruzada) para todas as posições. O maior coeficiente indica a posição de melhor correlação do centro da janela de referência na imagem da direita.

Para a estimação da posição do ponto homólogo ao nível subpixel foi adotado o Método de correlação por Mínimos Quadrados. Este método visa minimizar a diferença dos níveis de cinza entre as janelas de referência e de pesquisa, onde as diferenças geométricas e radiométricas entre as janelas são os parâmetros a serem determinados num processo de ajustamento (Método Paramétrico). A posição e a forma da janela de pesquisa são ajustadas de tal modo que a diferença dos níveis de cinza entre as janelas seja mínima (GRUEN, 1996).

## 4.2. Compatibilização dos parâmetros de orientação exterior

Para a compatibilização dos parâmetros de OE foi adotado um modelo de coplanaridade adaptado (eq. 1). Este modelo se torna adaptado no sentido em que a equação de coplanaridade é reescrita em função dos doze parâmetros de OE, uma vez que tais parâmetros foram previamente determinados pelos sensores de orientação direta (GPS+INS). Neste contexto, os parâmetros de OE são tratados como injunções de peso com qualidade relativa às suas determinações, num ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados. Como no modelo de coplanaridade apresentado na equação 1, tanto os parâmetros como os valores observados são ligados por uma função não explícita e não linear, o método usado para refinar os parâmetros de orientação exterior foi o Método Combinado iterativo com injunções.

$$\begin{pmatrix} X_D^{CP} - X_E^{CP} \\ Y_D^{CP} - Y_E^{CP} \\ Z_D^{CP} - Z_E^{CP} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} v_E \cdot w_D - v_D \cdot w_E \\ u_D \cdot w_E - u_E \cdot w_D \\ u_E \cdot v_D - u_D \cdot v_E \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

com:

$$\begin{bmatrix} u_E \\ v_E \\ w_E \end{bmatrix} = M_E^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_E \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_D \\ v_D \\ w_D \end{bmatrix} = M_D^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_D \quad (3)$$

onde:

$(X_E^{CP}, Y_E^{CP}, Z_E^{CP})$ : coordenadas do centro perspectivo da imagem da esquerda no referencial de terreno;

$(X_D^{CP}, Y_D^{CP}, Z_D^{CP})$ : coordenadas do centro perspectivo da imagem da direita no referencial de terreno;

$M_E$ : matriz de rotação da foto da esquerda;

$M_D$ : matriz de rotação da foto da direita;

$(x, y, -f)_E$ : coordenadas do ponto da imagem da esquerda no sistema fotogramétrico;

$(x, y, -f)_D$ : coordenadas do ponto da imagem da direita no sistema fotogramétrico.

Sendo o modelo representado por uma equação para cada ponto medido nas imagens, tem-se:

- Número de equações ( $r$ ) = número de pontos medidos no modelo ( $n_p$ );
- Número de observações ( $n$ ) = 4 \* número de pontos medidos no modelo ( $n_p$ );
- Número de injunções ( $s$ ) = número de parâmetros ( $u$ ) = 12.

Tendo  $S = r + s - u$  graus de liberdade, é necessária uma equação para a estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados, tendo em vista que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso.

Detalhes desta abordagem são encontrados em Ruy (2004) e Ruy e Tommaselli (2004).

## 4.3. Reamostragem Epipolar

A normalização do par de imagens, ou Reamostragem Epipolar, visa reamostrar as imagens de acordo com a geometria epipolar, de tal forma que os eixos óticos se tornem paralelos e as feições correlatas confinadas em linhas equivalentes nas imagens reamostradas. Para isso, os parâmetros de orientação exterior das imagens devem ser conhecidos e com exatidão suficiente para eliminar a paralaxe vertical ( $py$ ) do modelo. Como os parâmetros de orientação foram “refinados” no processo de ajustamento, a partir do modelo de coplanaridade modificado, as imagens são normalizadas para eliminar o efeito da paralaxe vertical do modelo e auxiliar o processo de correspondência de imagens, reduzindo o espaço de busca (busca unidimensional).

A transformação das imagens originais para as imagens normalizadas pode ser conduzida em duas etapas (MIKHAIL et al, 2001):

- As imagens são transformadas para suas posições verticais, calculando-se as matrizes de rotação;
- A partir das imagens verticais, conduz-se a transformação para as posições normalizadas, a partir do cálculo da matriz de rotação da base.

Na Reamostragem Epipolar estão envolvidos interpolações de valores de brilhos dos pixels transformados. Na abordagem desenvolvida foi utilizado o método de interpolação bilinear, por proporcionar bons resultados a um custo computacional relativamente baixo.

Maiores detalhes sobre o processo de Reamostragem Epipolar podem ser encontrados em Schenk (1999) e Mikhail et al (2001).

## 5. EXPERIMENTOS

### 5.1 Experimentos com dados simulados

O objetivo destes experimentos foi avaliar os requisitos de exatidão dos parâmetros de orientação exterior para mapeamento usando câmaras digitais.

Para avaliar numericamente os erros nas coordenadas de pontos no espaço objeto, causados por erros nos parâmetros de orientação exterior e interior, foram realizados alguns experimentos com dados simulados ideais, considerando-se uma altura de vôo de 1175m, escala da imagem de 1:25.000, distância focal da câmara de 47mm e tamanho do pixel de 33  $\mu$ m. Para calcular as coordenadas dos pontos no espaço objeto, foi desenvolvido um programa computacional em

linguagem C de intersecção fotogramétrica, descrito em Tommaselli (2001). Foram considerados 6 pontos no espaço objeto, em uma configuração geométrica equivalente aos pontos de Grüber. Neste programa, foram introduzidas opções para adicionar erros randômicos nas fotocoordenadas, com desvio padrão de 1 pixel, para simular o erro observacional, além de erros randômicos aos parâmetros de orientação exterior, com o objetivo de simular as incertezas na determinação destes parâmetros, tanto por métodos diretos quanto indiretos. Para cada experimento foram calculados os erros verdadeiros nas coordenadas de terreno obtidas por intersecção e o Erro Médio Quadrático para os seis pontos considerados. O programa faz uma simulação do tipo Monte Carlo, repetindo o experimento 100 vezes e, finalmente, calculando o erro médio para cada coordenada. Este erro médio para cada situação é apresentado nos gráficos e tabelas a seguir.

Foram realizados 3 conjuntos de experimentos, cada um deles com 6 diferentes níveis de exatidão para os parâmetros de orientação exterior. A Tabela 2 apresenta os desvios padrão dos erros nos parâmetros de orientação exterior usados nas simulações.

TABELA 2 - MAGNITUDE DOS ERROS INTRODUZIDOS NOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR EM CADA EXPERIMENTO.

Experimento	Erros em atitude	Erros nas coordenadas do C.P. (m)
1	1°	0,3
2	0°20'	0,3
3	0°01'	0,3
4	0°00'20"	0,3
5	0°00'10"	0,3
6	0°00'10"	0,1

Em cada conjunto de experimentos foram consideradas 2 câmaras: uma com formato aproximado de 35 mm e outra com formato 3 vezes maior (105mm), ambas com distância focal de 47mm. Seria equivalente a considerar a primeira câmara com uma resolução de 1060x1060 pixels e a segunda com resolução de 3200x3200 pixels. O ângulo de cobertura da câmara 35mm é de 56°, o que a classifica como uma câmara normal ao passo que a segunda câmara, com ângulo de cobertura de 115°, seria classificada como uma câmara super grande angular. As coordenadas ideais no sistema de imagem dos 6 pontos usados nos experimentos foram calculadas considerando-se uma superposição longitudinal de 60% para o modelo.

Nos gráficos apresentados a seguir, os erros médios nas coordenadas dos pontos no espaço objeto são apresentados nas ordenadas em escala logarítmica, para facilitar a representação.

### 5.1.1 Primeiro conjunto de experimentos: sem erros nos parâmetros de orientação interior.

As Figuras 2 e 3 trazem os resultados obtidos na determinação de pontos no espaço objeto considerando-se os parâmetros de orientação interior livres de erros. Uma importante constatação é que não ocorre melhoria significativa da precisão nas coordenadas dos pontos reconstruídos com a melhoria na qualidade dos parâmetros de orientação exterior após o experimento 3, o que significa que, para as câmaras simuladas, os parâmetros podem ser determinados com exatidão de 1' para as rotações e 0,3m para a posição do C.P. Isto permite a utilização de sensores de custo menor do que aqueles necessários para câmaras convencionais de formato 230x230mm, ainda preservando a exatidão do processo. Outra observação importante diz respeito ao significativo aumento da exatidão nos pontos reconstruídos com a mudança de resolução e geometria da câmara, particularmente na coordenada Z. Os resultados obtidos para a câmara de 105mm são compatíveis com o PEC na escala de

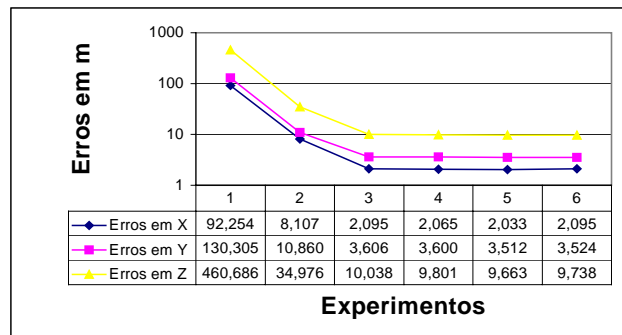


Fig. 2 - Resultados para a câmara de formato 35 mm e distância focal de 47mm (câmara normal).

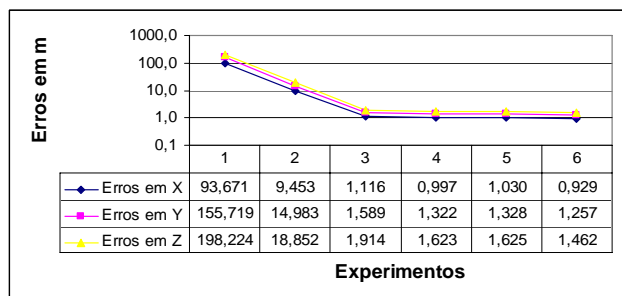


Fig. 3 - Resultados para a câmara de formato 105 mm e distância focal de 47mm (câmara super grande angular).

1:5.000, o que permite uma ampliação foto-restituição de 5 vezes, parâmetro este usado pelas empresas nos aerolevantamentos convencionais.

### 5.1.2 Segundo conjunto de experimentos: com erro de 0.06mm na distância focal.

No segundo conjunto de experimentos, foi utilizada a mesma metodologia para a geração de dados, com a introdução de erros randômicos nas fotocoordenadas e nos parâmetros de orientação

exterior, apenas acrescentando-se um erro sistemático não modelado na distância focal da câmara, da ordem de 0.06 mm (aproximadamente 2 pixels), que é o erro que tem sido verificado nas calibrações já realizadas no Laboratório de Fotogrametria (TOMMASELLI e NOBREGA, 1997; SANTOS et al, 2000).

Os resultados obtidos para a câmara 35mm, apresentados na Figura 4, mostram que o erro sistemático não corrigido de 0,06mm na distância focal não afeta as coordenadas reconstruídas, principalmente porque é de ordem de grandeza comparável ao erro observacional. Observam-se erros nas coordenadas dos pontos no espaço objeto de magnitude inferior aos obtidos no experimento anterior, embora as diferenças não sejam significativas. Para a câmara 105mm, entretanto (Figura 5), há uma degradação na qualidade das coordenadas, mas em especial da coordenada Z, devido a um efeito sistemático causado pelo erro na distância focal. Mesmo com este erro, os resultados ainda são compatíveis com a escala 1:5.000.

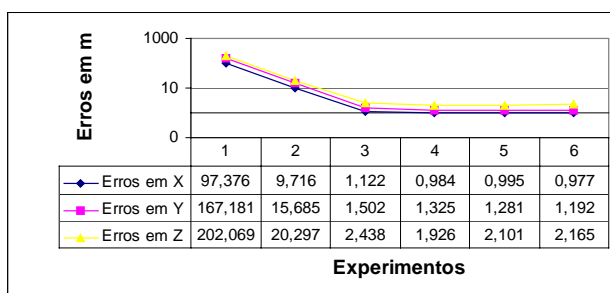


Fig. 4 – Resultados para a câmara de 35mm, com erro não modelado na distância focal de 0,06mm.

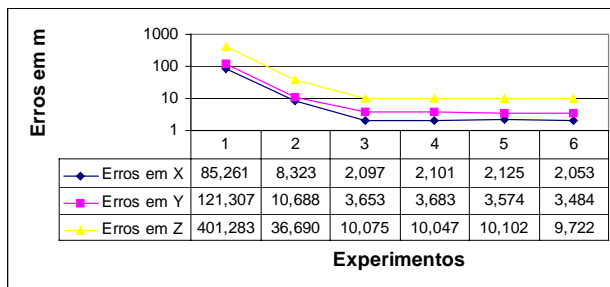


Fig. 5 – Resultados para a câmara de 105mm, com erro não modelado na distância focal de 0,06mm.

### 5.1.3 Terceiro conjunto de experimentos: com erro de 0.06mm na distância focal e de 0.066 nas coordenadas do ponto principal.

Neste terceiro conjunto de experimentos, procurou-se simular a situação mais comum, que envolve erros nos parâmetros de orientação interior mais significativos (coordenadas do ponto principal e distância focal). Os demais parâmetros de O.I., particularmente as distorções óticas, são bastante estáveis e bem comportados e seu efeito residual é sempre menor do que 1 pixel.

Foi introduzido um erro não modelado de 0,066 mm (2 pixels) nas coordenadas do ponto principal

e de 0,06mm na distância focal e os resultados obtidos para os diferentes experimentos são apresentados nos gráficos a seguir (Figuras 6 e 7). Os valores usados referem-se aos desvios padrões tipicamente obtidos em calibrações realizadas previamente.

Dos resultados obtidos, pode-se inferir que o efeito dos erros nas coordenadas do ponto principal é mais severo nas componentes planimétricas e pouca influência exerce sobre a altimetria. Por outro lado, comparando-se com os dois conjuntos de experimentos anteriores, verifica-se que os erros não modelados na distância focal afetam mais significativamente a componente altimétrica das coordenadas dos pontos no espaço objeto. Estes efeitos são mais nítidos nos experimentos com a câmara de 105mm, mas o efeito de deterioração planimétrica em função da não correção das coordenadas do ponto principal, também aparece nos experimentos com a câmara 35mm (Figura 6).

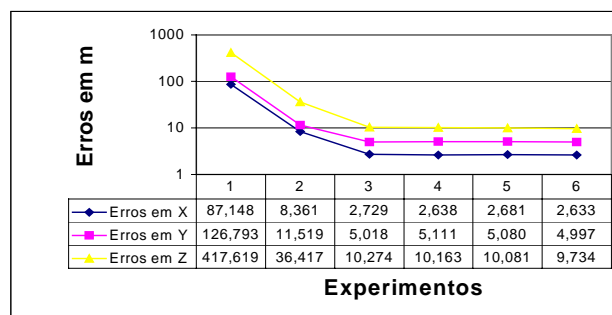


Fig. 6 - Resultados para a câmara de 35mm, com erro não modelado na distância focal e nas coordenadas do ponto principal.

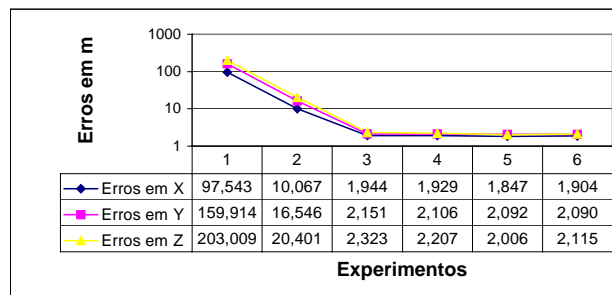


Fig. 7 - Resultados para a câmara de 105mm, com erro não modelado na distância focal e nas coordenadas do ponto principal.

### 5.2 Experimentos com dados reais

Verificado o efeito dos erros dos parâmetros de OI e OE sobre as coordenadas de pontos no espaço objeto, os experimentos com dados reais foram realizados para verificar o comportamento e eliminar a paralaxe vertical (py) do modelo, remanescente do processo de orientação direta. Para eliminar o efeito da paralaxe vertical do modelo foram desenvolvidos programas computacionais em linguagem C/C++, com base na metodologia descrita na Seção 4. Estes



programas foram integrados ao projeto UPTK -*Unesp Photogrammetric Tool Kit* (UPTK, 2004), do Departamento de Cartografia da UNESP, que visa o desenvolvimento de uma biblioteca de classes e funções para Fotogrametria.

Foram realizados dois conjuntos de experimentos, a partir de duas fontes de dados:

- Da degradação simulada dos parâmetros de orientação exterior de imagens digitais, trianguladas no sistema fotogramétrico digital;
- Dos sensores de orientação direta (GPS + INS).

### 5.2.1 Primeiro conjunto de experimentos

Neste conjunto de experimentos foi utilizado um par de imagens coletadas pela câmara digital KODAK PRO 14n. Este modelo foi obtido de um vôo fotogramétrico da área da Unesp-Presidente Prudente, realizado em Outubro de 2003, pela empresa Multispectral, sendo a câmara de propriedade da empresa Photon. O bloco de oito imagens foi coletado na escala 1:30000, com uma altura de vôo de 1550m, distância focal nominal de 50mm, resolução da imagem 4500 x 3000 pixels e tamanho do pixel de 8µm, o que equivale a um filme de 36mm.

Como este vôo foi realizado sem os sensores de orientação direta, os parâmetros de OE foram calculados numa aerotriangulação realizada no sistema fotogramétrico digital *Socet Set* (LH-System), com pontos de passagem medidos automaticamente no modelo e oito pontos de controle com acurácia centimétrica. Para simular a orientação direta por sensores embarcados (GPS+INS), os parâmetros de OE resultantes da aerotriangulação foram degradados randomicamente, com desvios-padrão de 0,5m para as coordenadas do CP ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e 10' para os ângulos de atitude ( $\omega, \phi, \kappa$ ). Estes valores de desvio-padrão foram adotados para simular a orientação direta por sensores de médio custo (Ver Seção 3).

Os valores observados, ou seja, as fotocoordenadas dos pontos de passagem, foram medidos automaticamente no modelo, com base na abordagem apresentada na seção 4.1. Foram medidos nove pontos no modelo, sendo dois eliminados na análise de resíduos após o ajustamento, por serem superiores a 0,5 pixel. Este limiar foi empiricamente adotado tendo em vista a utilização do refinamento subpixel pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Vale ressaltar que os pontos eliminados possuíam resíduos na ordem de 0,6 pixel, o que provavelmente não constitui um erro no processo de correspondência de imagens. Estes pontos, localizados em partes extremas do modelo, podem ter sido afetados pelos parâmetros de distorção das lentes não modelados, já que a câmara não foi previamente calibrada.

Um conjunto de sete experimentos com este nível de exatidão foi conduzido, e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 3, que apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) para cinco pontos de verificação (medidos manualmente nas imagens) e da

paralaxe vertical do modelo ( $py$ ) em três situações: 1) após a aerotriangulação; 2) com os parâmetros de orientação exterior degradados (antes do ajustamento) e; 3) após a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior.

TABELA 3. ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (EMQ) DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO E VALORES DA PARALAXE VERTICAL DO MODELO.

Situações	EMQX(m)	EMQY(m)	EMQZ(m)	$py$ (mm)
1	0,68	0,63	1,67	0,0223
2	1,32	1,55	9,47	0,0834
3	1,60	3,30	4,27	0,0026

A partir dos valores apresentados na Tabela 3 pôde-se verificar que a paralaxe do modelo foi reduzida de 0,0834mm (10,43 pixels) para 0,0026mm (0,33 pixel), que é bem inferior à paralaxe do modelo após a aerotriangulação (0,0223 – 2,79 pixels). Vale ressaltar que a aerotriangulação é uma solução global para o bloco de imagens e, conseqüentemente, o modelo em particular apresentou um valor de paralaxe considerável (2,79 pixels). Se o modelo fosse fototriangulado individualmente, o valor de paralaxe seria provavelmente inferior a um pixel.

Na análise de qualidade da determinação das coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto, foi constatado que houve somente uma redução do erro na componente altimétrica. Já as componentes planimétricas das coordenadas apresentaram erros maiores que os fototriangulados (Tabela 2). Isso pode estar relacionado à calibração da câmara, já que foi usado o valor nominal da distância focal e não foram considerados os parâmetros de distorção das lentes e as componentes de deslocamento do ponto principal, uma vez que a câmara não foi previamente calibrada.

Além disto, foi verificada uma sistematicidade no comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação. O modelo resultante apresentou translações e rotações no espaço, em relação ao referencial de terreno, definido pelos pontos de controle (Figura 8). Tomando-se como base os resultados obtidos nestes experimentos, a Figura 8 mostra o comportamento médio das discrepâncias no modelo, com suas componentes planimétricas (Figura 8a) e altimétricas (Figura 8b).

Com base na Figura 8a, pôde-se verificar que os pontos apresentaram uma tendência nas componentes planimétricas, e com relação às discrepâncias altimétricas (Figura 8b), verificou-se que o modelo resultante apresentou translações e uma rotação no espaço. Neste sentido, se alguns pontos de controle (no mínimo três) estiverem disponíveis, uma transformação de similaridade 3D pode ser aplicada e corrigir as coordenadas dos pontos no espaço objeto, o que corresponderia a uma orientação absoluta, embora isto esteja fora dos objetivos da orientação direta de imagens.

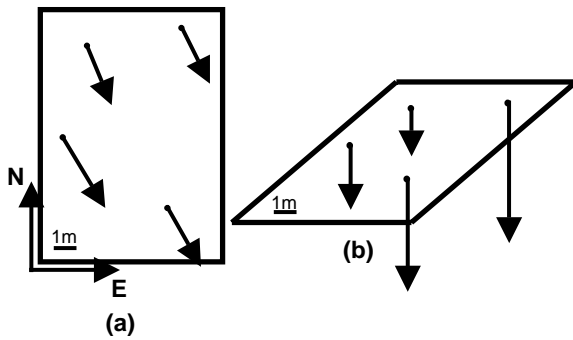


Fig. 8 - Comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação no modelo: (a) componentes planimétricas, (b) componente altimétrica.

O efeito visual da paralaxe vertical do modelo pode ser visto na Figura 9, que apresenta uma porção do terreno imageado antes do ajustamento (Figura 9a), ou seja, com os parâmetros de orientação exterior degradados (para simular a orientação direta), e depois do ajustamento (Figura 9b), com as imagens normalizadas (Reamostragem Epipolar).

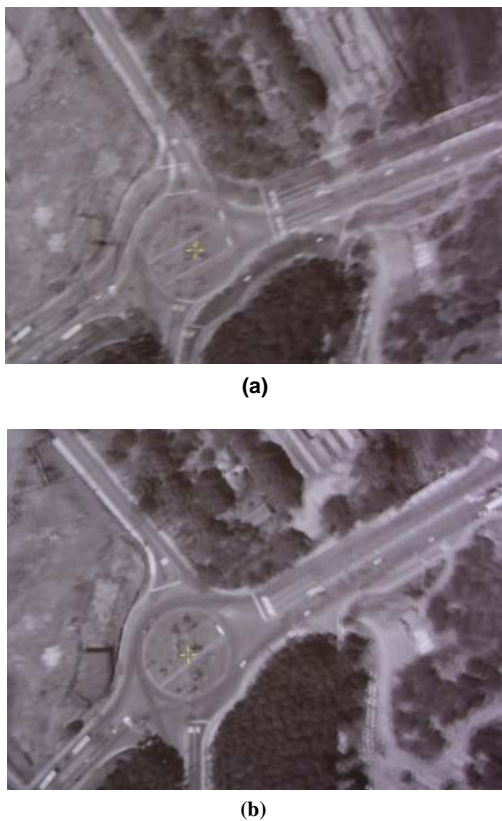


Fig. 9 - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes da compatibilização dos parâmetros de orientação exterior, (b) após a compatibilização e normalização do par de imagens.

### 5.2.2 Segundo conjunto de experimentos

Para estes experimentos foi utilizado um par de imagens digitais aéreas com dados de orientação direta

do sensor (GPS+INS). Estes dados foram cedidos pelo *Center for Mapping*, a serviço do Departamento de Transportes (DOT) do estado de Ohio, nos Estados Unidos. O voo foi realizado com uma câmara digital fabricada pela *Lockheed Martin Fairchild Semiconductors* e os parâmetros de orientação exterior foram determinados a partir da integração entre os sensores GPS *Trimble 4000SSI GPS* (dupla-frequência) e inercial *Litton LN-100*, com acurácia de 0,3m para  $(X_0, Y_0, Z_0)$  e 1' para  $(\omega, \varphi, \kappa)$ .

As imagens foram coletadas a uma altura de voo de aproximadamente 650m, escala 1:12000, resolução de 4096 x 4096 pixels, tamanho do pixel de 0,015mm e distância focal calibrada de 51,569mm, considerando uma área de imageamento equivalente a um filme de 61mm.

A partir dos valores observados (seis pontos considerados dos nove medidos no modelo), estes parâmetros de orientação exterior foram ajustados com base na abordagem desenvolvida. A Tabela 4 mostra os parâmetros de orientação exterior iniciais, gerados a partir do processamento dos dados fornecidos pelos sensores GPS e INS, e os parâmetros ajustados. Além disso, são apresentados os valores da paralaxe vertical ( $py$ ) do modelo nestas situações.

TABELA 4: PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR E PARALAXES VERTICAIS DO MODELO, ANTES E DEPOIS DO AJUSTAMENTO.

Parâmetros OE	(GPS+INS)	Ajustados
$X_0^{Esq} (m)$	138670,655	138670,649
$Y_0^{Esq} (m)$	137211,441	137211,369
$Z_0^{Esq} (m)$	1355,515	1355,297
$\omega^{Esq} (^\circ)$	2,93061190	2,96582343
$\varphi^{Esq} (^\circ)$	-1,27860300	-1,30260697
$\kappa^{Esq} (^\circ)$	177,45700910	177,48079091
$X_0^{Dir} (m)$	138472,650	138472,656
$Y_0^{Dir} (m)$	137216,778	137216,850
$Z_0^{Dir} (m)$	1358,557	1358,774
$\omega^{Dir} (^\circ)$	5,60728800	5,57025040
$\varphi^{Dir} (^\circ)$	-3,93530190	-3,97882988
$\kappa^{Dir} (^\circ)$	177,48427930	177,49709949
$py$ inicial (mm)		0,0583
$py$ depois do ajustamento (mm)		0,00022

Com base nos valores apresentados na Tabela 4, nota-se que os parâmetros de orientação exterior ajustados não diferem significativamente dos parâmetros iniciais (Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre os parâmetros iniciais e ajustados: EMQCP = 0,1323m e EMQAng = 0,0321°), devido à boa qualidade na determinação pelos sensores de

orientação direta utilizados. Mesmo assim, a paralaxe vertical do modelo foi reduzida de 0,0583mm (aproximadamente 4 pixels) para 0,00022mm (0,015 pixel), mostrando a eficácia da abordagem desenvolvida.

Neste experimento não foi possível realizar a análise da qualidade na determinação de coordenadas de pontos no espaço objeto, pois não foram disponibilizados pontos de controle da área.

Após o “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior foi aplicado o processo de reamostragem epipolar sobre as imagens. Na Figura 10a mostra-se uma porção do modelo nas condições iniciais, ou seja, com os parâmetros de orientação exterior fornecidos pelos sensores GPS e INS. Já a Figura 10b, apresenta a mesma porção do modelo com os parâmetros compatibilizados e as imagens normalizadas.



(a)



(b)

Fig. 10 - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes da compatibilização dos parâmetros de orientação exterior, (b) após a compatibilização e normalização do par de imagens.

A partir das imagens apresentadas na Figura 10 pôde-se verificar que a visualização estereoscópica da cena, que antes era prejudicada pelo efeito paralaxe de aproximadamente 4 pixels (Figura 10a), foi melhorada pelo “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior e conseqüente normalização do par de imagens, como pôde ser visto na Figura 10b (paralaxe igual a 0,015 pixel).

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou abordar problemas para a utilização das câmaras digitais em mapeamento. Devido à pequena área de imageamento das câmaras comerciais mais comuns, são necessárias muitas imagens para cobrir uma área, o que torna importante a integração de sensores para a determinação direta dos parâmetros de orientação exterior. Estes sensores, particularmente o inercial, possuem custo elevado, e devem ser estudados quais os requisitos de precisão adequados para um determinado tipo de câmara.

Procurou-se discutir, através de simulações, os níveis de precisão a serem atingidos com determinados erros nos parâmetros de orientação exterior e interior. Verificou-se que, para as câmaras estudadas, uma exatidão de 1' para a atitude e de 0,3m para a posição do CP são suficientes para estabilizar a solução de terreno, não se produzindo resultados substancialmente superiores com o aumento da exatidão dos parâmetros de orientação exterior. Entretanto, verificou-se nos experimentos com dados reais que mesmo com este nível de exatidão o modelo apresentou uma paralaxe vertical de aproximadamente 4 pixels. Nesta situação, notou-se a importância da metodologia desenvolvida, que mesmo com um nível de exatidão adequado dos parâmetros de OE fornecidos pelos sensores de orientação direta, minimizou a paralaxe vertical do modelo a um valor insignificante para efeito de visualização. Isto facilita o processo de correspondência de imagens em etapas seguintes, como na geração de Modelos Digitais de Terreno.

Mesmo com a ausência dos parâmetros de calibração da câmara KODAK Pro 14n, foram obtidos resultados satisfatórios. Os pontos de passagem excluídos após a análise dos resíduos podem ter sido influenciados pelas componentes de distorção das lentes não modeladas. Isto porque os pontos encontravam-se localizados nas extremidades do modelo, onde o efeito da distorção é maior, e com resíduos inferiores a um pixel (em torno de 0,6 pixel), o que não caracteriza um erro no processo de correlação.

É importante mencionar que a metodologia desenvolvida não trata da correção de coordenadas no espaço objeto, uma vez que o modelo independe de pontos de apoio.

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os sinceros agradecimentos à:

- CAPES, pelo financiamento e apoio à pesquisa desenvolvida e; à FAPESP, pelos equipamentos e softwares financiados;
- Dr. Charles Toth, do *Center for Mapping* (CFM) da universidade de Ohio, pelos dados e imagens cedidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRZEZINSKA, D. A. G. Direct Exterior Orientation Of Airborne Imagery with GPS/INS System: Performance Analysis. **Navigation**, Vol. 46, No. 4, p. 261-270, 1999.
- COLOMINA, I. GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the Best Way for Operation Determination of Photogrammetric Image Orientation. **IAPRS**, vol. 32, Part. 3 – 2W5. p.121-130, München. September 8-10, 1999.
- COSTA, E. R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Incorporação da Pré-Análise no Processo de Correspondência de Pontos em Fotogrametria Digital. In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 2003.
- CRAMER, M.; SCHADE, H. Orientation of Photogrammetric Sensors with an Integrated Multi-Antena GPS/Low-cost INS System. In: COLOMINA, I.; NAVARRO, J. **Integrated Sensor Orientation: theory, algorithms and systems**. Heidelberg: Wichmann, p.101-111, 1995.
- CRAMER, M.; STALLMANN, D. On the use of GPS/inertial Exterior Orientation Parameters in Airborne Photogrammetry. **OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings**. Frankfurt, Kartographie und Geodasie, 2002.
- CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Using GPS/Inertial Exterior Orientation Measurements for Photogrammetric Point Determination. **ISPRS Workshop Com III.1: “Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation”**. Barcelona, nov. 1999.
- GRUEN, A. Least Squares Matching: a fundamental measurement algorithm. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.
- HINZ, O. A. The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System. **Photogrammetric Week**, p. 109 – 115, 1999.
- KRAUS, K. **Photogrammetry – Fundamentals and Standard Processes**. UMMLER/BONN, 1993. v.1.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Inc. New York : John Wiley & Sons, 2001, 479p.
- MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. Digital Image Georeferencing from a Multiple Camera System by GPS/INS. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** 56, p. 1-12, 2001.
- MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct Positioning and Orientation Systems How do They Work? What is the Attainable Accuracy? **ASPRS**, 2001.
- RUY, R. S. **Geração Automática de Estereomodelos a partir de Imagens Digitais Georreferenciadas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.
- RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G. Reconstrução Automática de Estereomodelos a partir de Parâmetros de Orientação Direta do Sensor. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 10, nº 1, 2004.
- SANDAU, R. et al. Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, pp. 258-2265, 2000.
- SANTOS, D. R. et al. Aplicação de Câmaras Digitais na produção de Ortofotocarta. In: COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, v.1, 2000, Florianópolis. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. The Ohio State University: TerraScience, volume 1, 1999.
- SEARA, A. Comparison Between Direct Camera Orientation Measurement and Bundle Block Adjustment Determination. **OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings**. **Kartographie und Geodasie**. Frankfurt, 2002.
- TOMMASELLI, A. M. G.; NÓBREGA, R. A. A. Qualidade Geométrica de Camaras Digitais. In: GISBRASIL, 1997, CURITIBA PR. **Anais em CD-ROM**. Curitiba: FatorGis., v.1. pp.1-10, 1997.

TOMMASELLI, A. M. G. Mapeamento com Câmaras Digitais: Análise de Requisitos e Experimentos. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia. 2001, Porto Alegre. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 2001.

UPTK – **Unesp Photogrammetric Tool kit online**, 2004. Apresenta documentações e programas computacionais da área de Fotogrametria. Disponível em: <<http://www.prudente.unesp.br/dcartog/uptk>>. Acesso em: 05 mar. 2004.

**Recebido em 05 de abril de 2004 – Aceito para publicação em 09 de novembro de 2004.**