

INTERSEÇÃO FOTOGRAMÉTRICA EM UM BANCO DE IMAGENS GEORREFERENCIADAS

Elivagner Barros de Oliveira¹
Ricardo Luís Barbosa¹
Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis¹
João Fernando Custódio da Silva²

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia
¹Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
ebarros,rodrigo,ricardo@prudente.unesp.Br

²Departamento de Cartografia
jfcsilva@prudente.unesp.br
Rua Roberto Simonsen, 305 – Centro Educacional, 19060-900 – Presidente Prudente – SP

RESUMO

A crescente necessidade de produção e atualização de informações geoespaciais impulsionou o avanço das técnicas de coleta de dados. Os sistemas móveis de mapeamento digital, particularmente os terrestres, oferecem a oportunidade de levantar dados das vias de transporte com rapidez e eficiência. Estes sistemas proporcionam uma seqüência de pares de imagens, que permitem a análise e medição de pontos para fins de levantamento e mapeamento fotogramétrico ou simples observação para avaliação das condições de ruas, rodovias e ferrovias. A implementação de um sistema móvel de mapeamento digital é caracterizada por um segmento móvel, denominado de Unidade Móvel de Mapeamento Digital, e um segmento fixo, o Laboratório de Mapeamento Móvel. O segmento móvel é constituído de um veículo, sobre cujo teto são montadas duas câmaras digitais de vídeo (Sony DSR200A), tipo camcorder, e receptores GPS. No laboratório, os vídeos são transformados em imagens estáticas, que são armazenadas em um banco de imagens georreferenciadas, que as gerencia. Apresenta-se nesse trabalho a versão atual do banco de imagens, que possibilita a visualização de um par de imagens e inclui um módulo de interseção fotogramétrica, que permite a execução de três métodos de interseção (por escala, por agrupamento de parâmetros e ajustamento rigoroso). O teste realizado possibilitou a construção de uma carta na escala 1:2000, e verificou-se que, dentre os três métodos de interseção, apenas o método de ajustamento rigoroso atende ao PEC na classe A. Os outros dois métodos são úteis para aproximar as coordenadas geoespaciais dos pontos do terreno necessárias à solução rigorosa.

Palavras-chave: Sistemas Móveis de Mapeamento, Interseção Fotogramétrica, Banco de imagens.

ABSTRACT

Mobile mapping systems (MMS) provide a sequence of image pairs that allow the measurement and analysis of photogrammetric point and features for topographic mapping purposes and also for a visual evaluation of some specific conditions of the roads. A project of MMS generates a large number of images that are stored in magnetic tapes (DVCAM) at 30 fps (frames per second) in the camera and then downloaded to a computer hard disk. Even selecting only one image per second, the number of images related to the traveled roads is still expressive. A georeferenced road image pair database was built in order to store and manage image data obtained by the MMS. A module of photogrammetric intersection was added to the database in order to measure the image pairs and to compute the spatial coordinates of the selected points of the roads and their vicinities. The results obtained from different methods of intersection are presented and discussed including an urban road map at scale 1:2000. As expected, the rigorous model of the collinearity equations provided the best results after using the estimates of the photogrammetric intersection by parameter grouping as approximate values for the three cartesian coordinates of the object points.

Key words: Mobile Mapping Systems, Photogrammetric Intersection, Image Database

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de produção e atualização de informações geoespaciais impulsionou o avanço das técnicas de coleta de dados. Os sistemas móveis de mapeamento digital (SMMD), particularmente os terrestres, oferecem a oportunidade de levantar dados das vias de transporte com rapidez e eficiência. Estes sistemas proporcionam uma seqüência de pares de imagens, que permitem a análise e medição de pontos para fins de levantamento e mapeamento fotogramétrico ou simples observação para avaliação das condições de ruas, rodovias e ferrovias.

O pioneiro na atividade de mapeamento móvel de vias de locomoção terrestres foi o sistema GPSVan (BOSSLER et al., 1991), composto de um par de câmaras digitais, um receptor GPS e um sistema de armazenamento de imagens. Seguiram-se outros protótipos desta modalidade, compostos por câmaras digitais, câmaras VHS, sistemas de navegação e medida inercial, GPS, odômetros e sistemas de armazenamento de dados. Silva et al. (2003) contaram 23 sistemas em quase todos os continentes.

No Brasil, Silva (1997) propôs a montagem de um sistema móvel de mapeamento digital caracterizado por um segmento móvel, denominado de Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD), e um segmento fixo, o Laboratório de Mapeamento Móvel (LMM). A UMMD é constituída de um veículo, sobre cujo teto são montadas duas câmaras digitais de vídeo (Sony DSR200A), tipo camcorder, e receptores GPS. No laboratório, são baixadas as imagens de vídeo e os dados GPS, que são processados e editados com o uso de programas comerciais e científicos, estes desenvolvidos especificamente para o mapeamento fotogramétrico terrestre móvel. Os resultados da aplicação desse sistema têm sido expressos na forma de mapas de arruamentos urbanos e de rodovias. Estes trabalhos, que inclusive apresentam toda a fundamentação teórica do processo, podem ser encontrados em Guardia et al. (1999), Delgado et al. (2000), Silva et al. (2000, 2001a) e Gallis et al. (2002).

A implementação de um sistema móvel de mapeamento digital objetiva fundamentalmente: auxiliar administrações municipais para a localização, visualização e gerenciamento das informações referentes a um determinado arruamento, um lote ou a uma construção; auxiliar as organizações responsáveis pela prestação de serviços de utilidade pública, tais como, água, esgoto, energia elétrica, telecomunicações, coleta de lixo, engenharia de transporte, tráfego, segurança pública etc.; e o mapeamento topográfico de ruas e rodovias.

Um projeto de mapeamento utilizando tal sistema móvel gera um grande número de imagens que são armazenadas em fitas magnéticas (DVCAM), em formato AVI, a 30 qps (quadros por segundo). Essas imagens são posteriormente transferidas para o disco rígido de um computador no laboratório. Selecionando apenas uma imagem por segundo – a mesma taxa do

sinal GPS sincronizado com as vídeo-câmaras –, a quantidade delas referente às vias percorridas ainda assim é expressiva. Por exemplo, um levantamento que grave 20 minutos de vídeo, produz 36000 imagens estáticas (*still images*) por câmara (20*60*30); tomando uma imagem por segundo, tem-se então 20*60=1200 imagens por câmara e 2400 imagens no par. Com isso, o total de espaço necessário para o armazenamento é grande, visto que cada imagem têm resolução geométrica de 740 x 480 e 3bytes de resolução radiométrica (cor), resultando em aproximadamente 1MB por imagem.

Buscando melhor gerenciamento na utilização das imagens e das informações relacionadas com os dados obtidos, elaborou-se o denominado Banco de Imagens Georreferenciadas (BIG), cujos princípios, modelagem conceitual e implementação computacional podem ser vistos em Oliveira (2001), Oliveira & Silva (2001) e Silva et al. (2001b). Essa primeira versão do BIG permitia tão somente visualizar uma imagem com várias informações associadas ao arruamento ou rodovia, como, por exemplo, a orientação interior e exterior da imagem e o tipo e as condições da rodovia.

A versão 2 do BIG (OLIVEIRA, 2003) – alcunhada de BIG2 – ampliou a sua funcionalidade objetivando a visualização de um par de imagens e recebeu a implementação de um módulo de interseção fotogramétrica, a fim de medir os pares de imagens e estimar as coordenadas espaciais dos pontos homólogos selecionados correspondentes aos pormenores das vias de transporte e seus arredores. A presente versão beneficiou-se da anterior em alguns aspectos, mas no geral foi reformulada e reprogramada, de modo que é possível visualizar, observar e medir um par de imagens de uma via de locomoção.

Apresentam-se neste artigo os elementos fundamentais do banco de pares de imagens georreferenciadas e o módulo de interseção fotogramétrica que integra o BIG2. Três modelos de interseção foram implementados e testados com dados extraídos de um dos levantamentos realizados (GUARDIA et al., 1999; SILVA et al., 2000; SILVA et al., 2001a) e os resultados são apresentados e discutidos. A melhor solução, sem surpresa, foi obtida com o modelo rigoroso de ajustamento das equações de colinearidade, calculado na seqüência do resultado do modelo de agrupamento de parâmetros, que lhe fornece os valores aproximados das coordenadas dos pontos-objeto, calculadas a partir dos dados armazenados no BIG2 e das observações dos pares de imagens. Em concordância, três cartas topográficas foram construídas com base nos pontos-objeto estimados pelos métodos de interseção fotogramétrica. Com base em uma amostra de pontos homólogos extraídos dessas cartas, o resultado quantitativo referente à análise do padrão de exatidão cartográfica (PEC) é discutido, demonstrando o potencial e a limitação dos sistemas móveis de mapeamento.

2 METODOLOGIA

2.1 O banco de imagens georreferenciadas

Ambas as versões do BIG foram implementadas com o objetivo de gerenciar as imagens e as informações coletadas com a UMMD. As duas primeiras fases do processamento fotogramétrico produzem informações que serão armazenadas no banco de imagens. São elas a calibração das vídeo câmaras para a determinação dos parâmetros de orientação interior (OLIVEIRA & SILVA, 1999) e a fototriangulação para obtenção dos parâmetros de orientação exterior das imagens (OLIVEIRA & SILVA, 1998; SILVA, 1997; SILVA & OLIVEIRA, 1998).

O BIG2 foi implementado no ambiente Borland C++ Builder 5.0, usando como sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) o BDE (*Borland Database Engine*). Ele usa os conceitos de banco de dados relacional, através de tabelas do *Paradox*, e é monousuário. Estas tabelas contêm os campos com as informações necessárias para o gerenciamento das imagens, as quais são armazenadas sob uma nomenclatura apropriada para cada par em cada levantamento (OLIVEIRA, 2001; OLIVEIRA & SILVA, 2001; SILVA et al., 2001b; OLIVEIRA, 2003). Devido ao caráter acadêmico do sistema, não foi levada em conta a questão da integridade e a segurança dos dados. Por isso foi utilizado um SGBD simples como o BDE.

2.2 Modelos de interseção fotogramétrica

Foram implementados três modelos de interseção fotogramétrica, cada um deles com um rigor computacional diferente. O modelo mais simples consiste na determinação dos fatores de escala entre os segmentos do raio óptico referentes aos espaços imagem (interior) e objeto (exterior), implícitos, portanto nas equações de colinearidade; o modelo seguinte agrupa os parâmetros das equações de colinearidade, mediante uma manipulação algébrica, e por último o ajustamento rigoroso do modelo de colinearidade, que se utiliza do terno de coordenadas cartesianas, obtido com o método do agrupamento dos parâmetros, como valores aproximados.

A figura 1 ilustra os sistemas referenciais dos espaços imagem e objeto. Guardia et al. (1999), Delgado et al. (2000), Silva et al. (2000, 2001a) apresentam as transformações das coordenadas do sistema WGS84 para as do UTM e também para a altitude ortométrica dos centros perspectivos das câmaras que tomaram as imagens. Os demais pontos-

objeto, triangulados ou interseccionados, são então determinados no sistema híbrido UTM e altitude ortométrica (E,N,H). Portanto, as coordenadas cartesianas locais (X,Y,Z), vistas adiante na dedução das expressões matemáticas utilizadas nos métodos de interseção fotogramétrica, são também transformadas para o sistema híbrido ENH.

2.2.1 Interseção fotogramétrica por relação da escala

A interseção fotogramétrica por meio do fator de escala consiste em determinar a posição espacial de qualquer ponto de uma área de sobreposição em duas etapas (SILVA, 2001). Na primeira, calculam-se os dois fatores de escala correspondentes aos dois vetores; na segunda etapa, o terno de coordenadas do ponto-objeto correspondente é dado pela equação (1) e verificado pela (2) ou vice-versa.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda' R' \begin{bmatrix} (x' - x'_0) \\ (y' - y'_0) \\ -f'_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_c \\ Y'_c \\ Z'_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda'' R'' \begin{bmatrix} (x'' - x''_0) \\ (y'' - y''_0) \\ -f''_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X''_c \\ Y''_c \\ Z''_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Os parâmetros de orientação interior e exterior são conhecidos e estão armazenados nas tabelas do BIG2, e as fotocoordenadas são determinadas mediante uma interface desenvolvida dentro do BIG2 para esta finalidade. Sendo $\{X'_c, Y'_c, Z'_c, \omega', \phi', \kappa'\}$ o conjunto dos parâmetros de orientação exterior da fotografia da esquerda e $\{X''_c, Y''_c, Z''_c, \omega'', \phi'', \kappa''\}$ os da fotografia da direita, calculam-se as matrizes de rotação R' e R'' , respectivamente, definidas na Eq. (3) a seguir.

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos\phi\cos\kappa \\ r_{12} &= \cos\omega\sen\kappa + \sen\omega\sen\phi\cos\kappa \\ r_{13} &= \sen\omega\sen\kappa - \cos\omega\sen\phi\cos\kappa \\ r_{21} &= -\cos\phi\sen\kappa \\ r_{22} &= \cos\omega\cos\kappa - \sen\omega\sen\phi\sen\kappa \\ r_{23} &= \sen\omega\cos\kappa + \cos\omega\sen\phi\sen\kappa \\ r_{31} &= \sen\phi \\ r_{32} &= -\sen\omega\cos\phi \\ r_{33} &= \cos\omega\cos\phi \end{aligned} \quad (3)$$

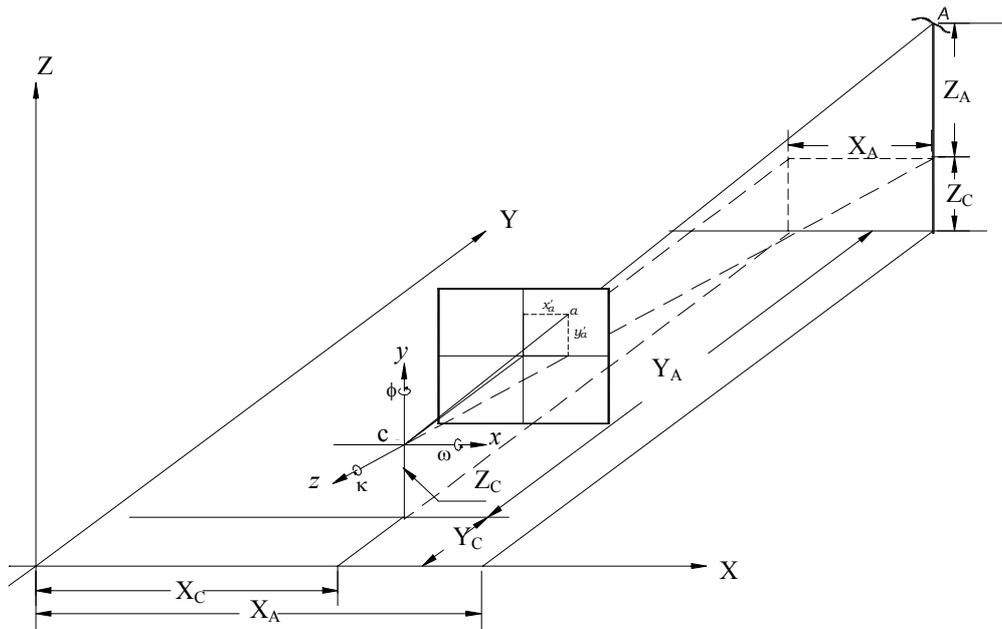


Fig. 1 – Geometria da condição de colinearidade terrestre e os referenciais cartesianos da imagem e do objeto (local)

Efetuada o produto das matrizes de rotação com o vetor das observações presentes nas equações (1) e (2), obtém-se:

$$\begin{aligned} u' &= r'_{11}(x' - x'_0) + r'_{21}(y' - y'_0) - r'_{31}f'_c \\ v' &= r'_{12}(x' - x'_0) + r'_{22}(y' - y'_0) - r'_{32}f'_c \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} w' &= r'_{13}(x' - x'_0) + r'_{23}(y' - y'_0) - r'_{33}f'_c \\ u'' &= r''_{11}(x'' - x''_0) + r''_{21}(y'' - y''_0) - r''_{31}f''_c \\ v'' &= r''_{12}(x'' - x''_0) + r''_{22}(y'' - y''_0) - r''_{32}f''_c \\ w'' &= r''_{13}(x'' - x''_0) + r''_{23}(y'' - y''_0) - r''_{33}f''_c \end{aligned} \quad (5)$$

onde r'_{ij} e r''_{ij} são os elementos das matrizes de rotação das fotografias esquerda e direita respectivamente.

As variáveis de interesse para esse caso são então λ' e λ'' . Substituindo as equações (4) e (5) nas equações (1) e (2) e igualando-as, obtém-se:

$$\begin{aligned} \lambda'u' + X'_C &= \lambda''u'' + X''_C \\ \lambda'v' + Y'_C &= \lambda''v'' + Y''_C \\ \lambda'w' + Z'_C &= \lambda''w'' + Z''_C \end{aligned} \quad (6)$$

Reescrevendo as equações (6) em função das componentes da base (coordenadas dos centros perspectivos das câmaras nas duas posições) chega-se a:

$$\begin{aligned} B_X &= X''_C - X'_C = \lambda'u' - \lambda''u'' \\ B_Y &= Y''_C - Y'_C = \lambda'v' - \lambda''v'' \\ B_Z &= Z''_C - Z'_C = \lambda'w' - \lambda''w'' \end{aligned} \quad (7)$$

As equações (7) formam um sistema linear de três equações a duas incógnitas (os dois fatores de escala), que pode ser representado na forma matricial por

$$B = M\lambda \quad (8)$$

onde B é o vetor das três componentes da base, M é uma matriz 3 x 2 contendo os produtos das matrizes R' e R'' pelos respectivos vetores das fotocoordenadas da primeira e segunda imagens e λ é o vetor dos dois fatores de escala, cuja solução é dada por:

$$\lambda = (M^t M)^{-1} M^t B \quad (9)$$

Os valores calculados para os fatores de escalas, obtidos na equação (9), são então substituídos nas equações (1) e (2), calculando-se os ternos de coordenadas dos pontos no espaço-objeto.

2.2.2 Interseção fotogramétrica por agrupamento dos parâmetros

Este método consiste em realizar manipulações algébricas no modelo de colinearidade (10), simplificando-o a ponto de se chegar a um sistema de equações lineares de dimensões 4 x 3, evitando-se a necessidade de valores aproximados para as coordenadas tridimensionais do ponto no terreno.

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f_c \cdot \frac{r_{11}(X - X_C) + r_{12}(Y - Y_C) + r_{13}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)} \\ y - y_0 &= -f_c \cdot \frac{r_{21}(X - X_C) + r_{22}(Y - Y_C) + r_{23}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)} \end{aligned} \quad (10)$$

Reescrevendo as equações (10), obtém-se:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f_c \cdot \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z - (r_{11}X_c + r_{12}Y_c + r_{13}Z_c)}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c)} \\ y - y_0 &= -f_c \cdot \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z - (r_{21}X_c + r_{22}Y_c + r_{23}Z_c)}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c)} \end{aligned} \quad (11)$$

Fazendo-se em (11):

$$\begin{aligned} I &= (r_{11}X_c + r_{12}Y_c + r_{13}Z_c) \\ J &= (r_{21}X_c + r_{22}Y_c + r_{23}Z_c) \\ K &= (r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c) \end{aligned} \quad (12)$$

Levando-se as (12) nas equações (11), obtém-se:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \cdot \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z - I}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K} \\ y - y_0 &= -f \cdot \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z - J}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z - K} \end{aligned} \quad (13)$$

Multiplicando-se ambos os lados das equações (13) pelo denominador comum e agrupando-se os termos semelhantes, chega-se às equações (14):

$$\begin{aligned} (x - x_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z) + f_c(r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z) &= \\ (x - x_0)K + f_c I & \\ (y - y_0)(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z) + f_c(r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z) &= \\ (y - y_0)K + f_c J & \end{aligned} \quad (14)$$

onde são pseudo-observações:

$$\begin{aligned} (x - x_0)'K' + f_c'I' \text{ e } (y - y_0)'K' + f_c'J' \\ \text{e} \\ (x - x_0)''K'' + f_c''I'' \text{ e } (y - y_0)''K'' + f_c''J'' \end{aligned}$$

Essas equações formam um sistema linearizado de quatro equações a três incógnitas para cada ponto-objeto. O terno de coordenadas é calculado por:

$$X = (A^t A)^{-1} (A^t L) \quad (15)$$

onde a matriz A é formada pelos coeficientes das incógnitas nas equações (14) e o vetor L é dado pelo segundo membro das mesmas equações.

2.2.3 Interseção fotogramétrica por ajustamento paramétrico rigoroso

A solução geral para interseção fotogramétrica é realizada aplicando-se um ajustamento rigoroso, sob o critério dos mínimos quadrados, tendo por base o modelo matemático da condição de colinearidade. O par de equações de colinearidade é escrito para cada raio de

luz da fotografia associada a ele, conforme as equações (10).

Para o problema em questão, considera-se n=4 observações (x',y') para a fotografia esquerda e (x'',y'') para a fotografia direita e u=3 incógnitas (X,Y,Z) do ponto no espaço-objeto.

As equações de colinearidade (10) formam o modelo matemático que, depois de linearizado, é representado por $AX+L=V$, onde L é dado por $L=L_0-L_b$, com L_b o vetor dos n=4 valores observados e V o vetor dos resíduos correspondentes. L_0 é o vetor dos valores das equações de colinearidade calculadas em função de X_0 e este é o vetor das três coordenadas-terreno com os seus respectivos valores aproximados, estimados inicialmente com a solução do método do agrupamento de parâmetros. As correções são estimadas por:

$$X = -(A^t P A)^{-1} (A^t P L) \quad (16)$$

O vetor dos parâmetros ajustados é então calculado por $X_a=X_0+X$, em um procedimento iterativo, até que as correções X sejam menores do que um dado valor arbitrário suficientemente pequeno para aceitar que a solução convirja.

A solução é finalizada calculando-se $L_a=F(X_a)$, $V=L_a-L_b$ e $\hat{\sigma}_0^2 = V^t P V$. A matriz de covariâncias do vetor solução é dada por $\sum_{x_i} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1}$, com $N=A^t P A$.

3 RESULTADOS

Três resultados de tipos diferentes, porém concatenados, são apresentados. O primeiro é o próprio BIG2, no qual as imagens armazenadas e selecionadas são visualizadas em pares estereoscópicos (fig. 2). O segundo é o módulo de interseção fotogramétrica com o propósito de estimar as coordenadas espaciais de pontos-objeto, com base nas orientações interior e exterior armazenadas e nas fotocoordenadas determinadas com a interface desenvolvida no módulo de interseção (fig. 3). Por último, a fig. 4 ilustra o mapa topográfico, em escala reduzida, construído a partir dos pormenores restituídos com o método rigoroso de interseção fotogramétrica.

Para cada um dos três métodos de interseção, uma carta topográfica, na escala 1:2000, foi construída, com base na técnica de restituição analítica discreta (GUARDIA et al., 1999; DELGADO et al., 2000). Os traçados não são apresentados porque não há diferença visual entre eles. Após a edição das bases vetoriais, foram feitas análises estatísticas sobre as cartas geradas, analisando-se a tendência e a precisão.

Com o propósito de verificar a acurácia do processo de mapeamento fotogramétrico terrestre móvel, 29 pontos foram determinados ao longo das ruas mapeadas com o método estático rápido do GPS, cujo processamento dos dados estimou precisão melhor do que 5 cm. Vinte e seis pontos foram identificados nos pares de imagens e tiveram suas fotocoordenadas determinadas mediante a pontaria do cursor. Em

seguida, foram calculadas as correspondentes coordenadas de terreno usando os três métodos de interseção fotogramétrica.

A tabela 1 mostra que a classificação dos produtos em classes A, B e C depende do erro-padrão (EP) e este, isoladamente, deve ser inferior a 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que por sua vez indica uma dispersão relativa a 90% de probabilidade. Em outras palavras, 90% dos pontos testados de uma carta topográfica devem diferir do padrão ou referência de controle de um montante inferior ao EP.

TABELA 1 – PEC E EP REFERENTES À ESCALA 1:2000 (DE: DENOMINADOR DA ESCALA)

Classe	PEC (mm x DE)	EP (mm x DE)
A	0,5 => 1,0 m	0,3 => 0,6 m
B	0,8 => 1,6 m	0,5 => 1,0 m
C	1,0 => 2,0 m	0,6 => 1,2 m



Fig. 2 – Interface para entrada de dados de imagens, parâmetros de orientação exterior e criação do relacionamento com a tabela de câmaras

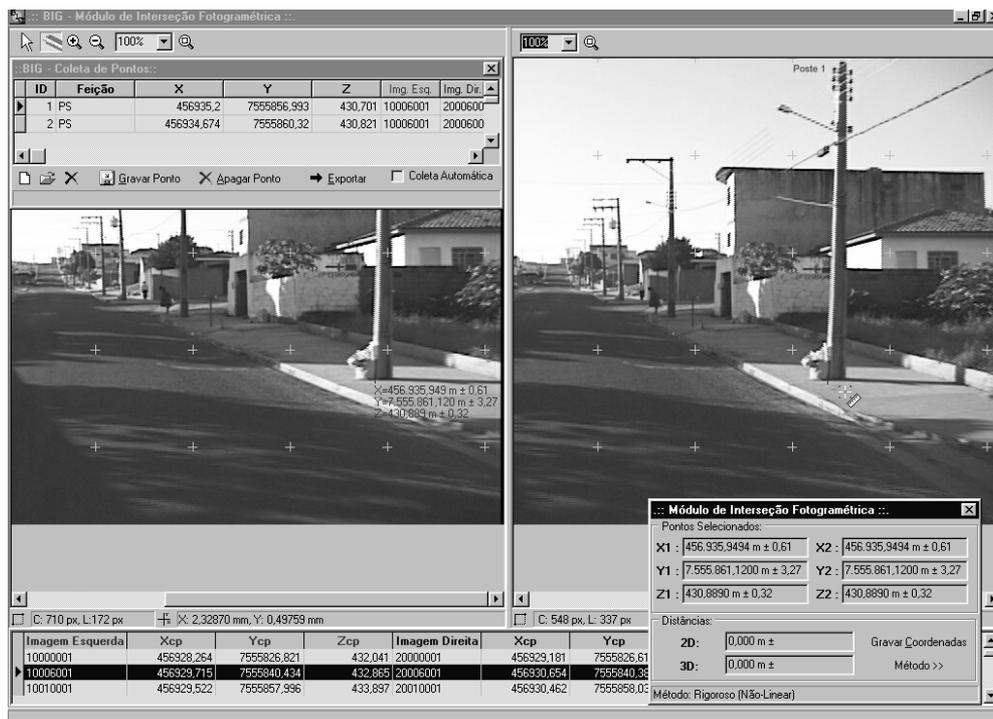


Fig. 3 – Interface do módulo de interseção fotogramétrica

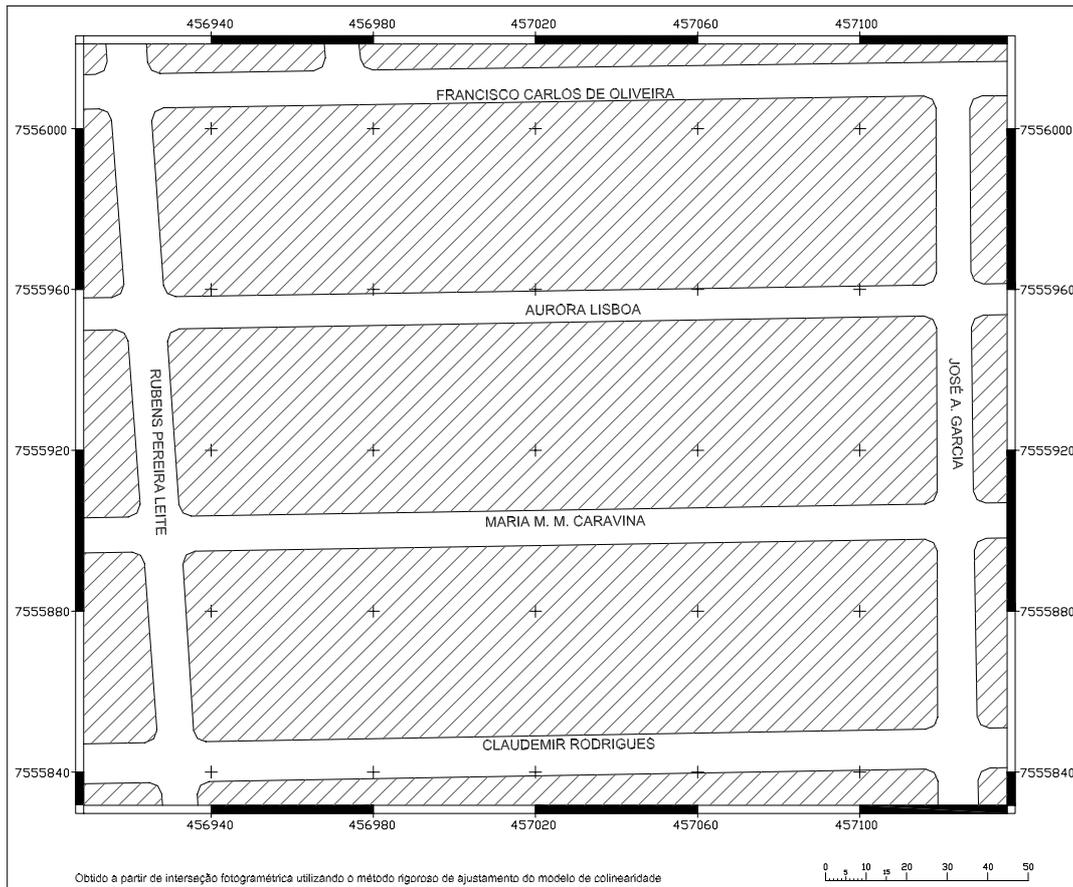


Fig. 4 – Mapa (reduzido) construído com interseções fotogramétricas calculadas pelo método rigoroso (equações de colinearidade)

A análise da exatidão cartográfica, via de regra, resume-se à análise de dois parâmetros: a média e o desvio-padrão amostrais. A média associa-se ao conceito de tendência e o desvio-padrão ao de precisão. A tabela 2 apresenta a síntese das discrepâncias dos três métodos de interseção fotogramétrica em relação às coordenadas dos 26 pontos de verificação determinadas pelo método GPS estático rápido.

3.1 Análise de tendência

A análise estatística de tendência de uma carta baseia-se nas diferenças (ΔX) entre as coordenadas de referência (terreno) e as coordenadas observadas na carta. Deve-se calcular a média aritmética simples das discrepâncias ($\overline{\Delta X}$) e formular a hipótese básica de que a média é estatisticamente igual a zero versus a hipótese alternativa de que a média é significativamente diferente de zero. Em seguida, calcula-se a estatística t da amostra e verifica-se se o valor de t amostral pertence ao intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de t amostral é obtido a partir de:

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} n^{1/2} \quad (17)$$

Nessa expressão, $S_{\Delta X}$ é o desvio-padrão amostral e n é a quantidade de pontos amostrados. O limite do intervalo de confiança relativo ao teste t é dado por

$$|t_X| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (18)$$

Uma vez que a estatística t da amostra não satisfaça a desigualdade acima, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, a carta não pode ser considerada como livre de tendências significativas na coordenada testada, para um determinado nível de confiança.

TABELA 2 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS CARTAS DIGITAIS 1:2000 (DP: DESVIO-PADRÃO)

Método	Valores Calculados	Discrepâncias	
		ΔE (m)	ΔN (m)
Determinação por escala	Média	-0,702	-0,105
	DP	0,855	0,847
	t amostral	-4,190	-0,630
Agrupamento dos parâmetros	Média	-0,456	0,231
	DP	0,802	0,746
	t amostral	-2,900	1,580
Ajustamento rigoroso	Média	-0,113	0,108
	DP	0,174	0,305
	t amostral	-3,310	1,810

O valor tabelado de $t_{(25;5\%)}$ é igual a 1,71. Portanto, conforme a tabela 2, pode-se afirmar que as coordenadas N não possuem tendência quando se usa os métodos por escala e por agrupamento dos parâmetros; no método de ajustamento rigoroso, o teste acusa uma tendência significativa. Nas coordenadas E, o teste sugere tendência nas cartas construídas com os três métodos.

3.2 Análise de precisão

A precisão é analisada mediante a comparação do desvio-padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) frente a classe que se deseja testar. No teste de precisão, considera-se as seguintes hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0 : S_{\Delta X}^2 &= \sigma_X^2 \\ H_1 : S_{\Delta X}^2 &> \sigma_X^2 \end{aligned} \quad (19)$$

O termo σ_X é o desvio padrão esperado para uma dada coordenada, ou seja, o EP esperado para a classe a ser analisada (conforme tabela 1). É importante ressaltar que o EP para as classes é fixado para a componente, sendo que para os testes planimétricos, considera-se:

$$\sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

Depois de calculada a variância da classe esperada, a estatística χ^2 é calculada:

$$\chi_X^2 = (n-1) \cdot \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (21)$$

e verifica-se se o valor do χ^2 está no intervalo de aceitação ou rejeição:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (22)$$

onde $\chi_{(n-1, \alpha)}^2$ é obtido da tabela qui-quadrado, com nível de significância α e $n-1$ graus de liberdade. Uma vez que a expressão (22) seja satisfeita, não se rejeita a hipótese nula, ou seja, a carta atende aos requisitos de precisão correspondente à classe analisada.

Calcula-se a variância das discrepâncias da amostra, utilizando a expressão:

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X_i})^2 \quad (23)$$

As tabelas 3, 4 e 5 apresentam a classificação das cartas de acordo com os valores obtidos pelas expressões (20, 21 e 23).

TABELA 3 – QUI-QUADRADO CALCULADO REFERENTE ÀS COMPONENTES (E,N) MEDIDAS NA CARTA DE ESCALA 1:2000 CONSTRUÍDA COM O MÉTODO DE INTERSEÇÃO POR ESCALA

Classe	EP (m)	χ_E^2	χ_N^2
A	0,6	101,53	99,64
B	1,0	36,55	35,87
C	1,2	25,38	24,91

TABELA 4 – QUI-QUADRADO CALCULADO REFERENTE ÀS COMPONENTES (E,N) MEDIDAS NA CARTA DE ESCALA 1:2000 CONSTRUÍDA COM O MÉTODO DE AGRUPAMENTO DOS PARÂMETROS

Classe	EP (m)	χ_E^2	χ_N^2
A	0,6	89,33	77,29
B	1,0	32,16	27,82
C	1,2	22,33	19,32

TABELA 5 – QUI-QUADRADO CALCULADO REFERENTE ÀS COMPONENTES (E,N) MEDIDAS NA CARTA DE ESCALA 1:2000 CONSTRUÍDA COM O MÉTODO RIGOROSO DE AJUSTAMENTO DO MODELO DE COLINEARIDADE

Classe	EP (m)	χ_E^2	χ_N^2
A	0,6	4,21	12,92
B	1,0	1,51	4,65
C	1,2	1,05	3,23

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados quantitativos são analisados em termos do padrão de exatidão cartográfico (PEC), conceituado em BRASIL (1986) e de acordo com a metodologia proposta por Galo & Camargo (1994).

Comparando-se os valores de χ^2 das tabelas 3, 4 e 5 com o obtido da tabela dos valores teóricos de χ^2 com significância de 0,10, ou probabilidade 0,90, que é de 34,38, verifica-se que somente a carta construída com o método rigoroso de ajustamento do modelo de colinearidade atende à classe A e, por extensão, às classes B e C do PEC. No método de agrupamento de parâmetros, a carta é classificada em B, e na interseção por escala, na classe C.

Ressalte-se, porém, que estatisticamente observou-se uma tendência na componente E das coordenadas observadas nas cartas construídas com os três métodos. Na componente N, a tendência aparece no ajustamento rigoroso. Uma possível explicação é que a componente E das coordenadas dos pontos selecionados ao longo dos quatro arruamentos alinhados com a direção E-W foi estimada paralelamente ao eixo óptico das vídeo câmaras em um trajeto de aproximadamente 800m (fig. 4). Similarmente, a componente N, quando alinhou-se ao eixo óptico, o fez por 320m. Sabe-se que as componentes das coordenadas paralelas ao eixo óptico recebem maior influência da propagação dos erros e daí menor acurácia (MOFFITT & MIKHAIL,

1980). O maior acúmulo de erros na direção E-W pode ter ocorrido, em princípio, devido a este percurso ter sido maior do que na direção N-S. Verificada a tendência, o procedimento é fazer a soma algébrica das médias das discrepâncias às suas respectivas componentes medidas na carta.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou o desenvolvimento e a inclusão de um módulo de interseção fotogramétrica, acessando as imagens digitais e seus parâmetros de orientação exterior armazenadas em tabelas de dados do Banco de Imagens Georreferenciadas para o Sistema Móvel de Mapeamento Digital da FCT/UNESP. O referido banco de imagens teve de ser reprojetoado em função de que a versão anterior permitia a visualização de uma imagem por vez. Atualmente, então, o BIG, além de ter melhorado a organização dos dados coletados com a UMMD e de possibilitar a visualização de um par de imagens, proporciona também as medidas e cálculos fotogramétricos, por meio do módulo de interseção, contribuindo para aumentar a eficiência do sistema de levantamento e mapeamento das vias de transporte.

Foram implementados três métodos de interseção fotogramétrica, sendo que os dois métodos mais simples (por escala e agrupamento de parâmetros) podem ser usados como aproximação inicial em um projeto de fototriangulação e de interseção com o método rigoroso. O uso do método rigoroso possibilita construir uma carta 1:2000 com classe A de acordo com o PEC.

Considerando que a metodologia de construção da carta topográfica usando a interseção fotogramétrica produz tendência, de acordo com o teste estatístico, é necessário corrigir as coordenadas de terreno estimadas da leitura da carta.

Novos projetos deverão ser realizados visando implementar melhorias no programa, como a inclusão de métodos de correlação para a automação da coleta de pontos homólogos nas imagens, ajustar a interseção fotogramétrica tomando dois pares consecutivos, testar a qualidade de pontos obtidos por interseção fotogramétrica e disponibilizar as imagens georreferenciadas na Internet.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSSLER, J. D.; GOAD, C. C.; JOHNSON, P. C. & NOVAK, K. GPS and GIS map the nation's highway. *Geo Info Systems*, 3:27-37. 1991.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão de Cartografia. Decreto nº 89.817 (20/06/84) - Instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia nacional. In: _____. **Cartografia e aerolevanteamento**: legislação. Brasília, 1986. p. 23-9.

DELGADO, F. F. X.; GALLIS, R. B. A. & MATSUOKA, M. T. **Mapeamento de rodovias usando a unidade móvel de mapeamento digital**. Presidente Prudente, 2000. Trabalho de Graduação, monografia. 72p. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Estadual Paulista.

GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O. & BARBOSA, R. L. Mapeamento móvel no Brasil: resultados obtidos com a utilização da unidade móvel de mapeamento digital. In: **SÉRIE EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 2002. v.2. p.248 – 266.

GALO, M. & CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1. **Anais**. Florianópolis: UFSC. t.2, p.41-8, 1994.

GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L. & SILVA, R. A. C. **Levantamento topográfico usando o sistema móvel de mapeamento digital**. Presidente Prudente, 1999. Trabalho de Graduação, monografia. 111p. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Estadual Paulista.

MOFFITT, F. H. & MIKHAIL, E. M. Special photogrammetric systems and applications. In: _____. **Photogrammetry**. 3. ed. New York: Harper & Row. 1980. p. 538-588.

OLIVEIRA, E. B. **Implementação do módulo de interseção fotogramétrica em um banco de imagens georreferenciadas**. Presidente Prudente, 2003. Mestrado de dissertação. 112p. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista.

OLIVEIRA, R. A. **Concepção, desenvolvimento e aplicação do banco de imagens georreferenciadas no contexto do mapeamento terrestre móvel**. Presidente Prudente, 2001. Mestrado, dissertação. 74p. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista.

OLIVEIRA, R. A. & SILVA, J. F. C. Triangulação de uma seqüência de imagens digitais terrestres. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 3. Florianópolis, 1998. 8p. **Anais...** (CD-ROM).

_____. Calibração de um par de vídeo câmaras digitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 19., Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Soc. Bras. Cartogr., Geodes., Fotogram., Sensor. Remoto. v.19, t.4. 4p. (CD-ROM), 1999.

_____. Banco de imagens georreferenciadas no mapeamento terrestre móvel. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 63-77. 2001.

SILVA, J. F. C. **Fototriangulação no caminhamento fotogramétrico**. Presidente Prudente, 1997. Tese (Livre Docência). 85p. Departamento de Cartografia. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista.

_____. **Fotogrametria analítica**. Presidente Prudente, 2001. Notas de aula. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista.

SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O. & GALLIS, R. B. A. 2003. Development of a low cost mobile mapping system: a South American experience. **Photogrammetric Record**, 18(101):5-26. London: The Photogrammetric Society.

SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O.; GALLIS, R. B. A.; GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L. & SILVA, R. A. C. Mapeamento de ruas com um sistema móvel de mapeamento digital. **Rev. Bras. Cartogr.** 53:83-92. 2001a.

SILVA, J. F. C., CAMARGO, P. O., OLIVEIRA, R. A., GALLIS, R. B. A., GUARDIA, M. C., REISS, M. L. L. & SILVA, R. A. C. A street map built by a mobile mapping system. In: INT'L CONGRESS OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 19. Amsterdam, 2000. **Proceedings...** CD-ROM 1, Book 2, p.506-13. (Int'l Society of Photogrammetry and Remote Sensing).

SILVA, J. F. C. & OLIVEIRA, R. A. Triangulation of a sequence of terrestrial digital images. In: ISPRS COMMISSION II. SYMPOSIUM ON DATA INTEGRATION: SYSTEMS AND TECHNIQUES. Cambridge, UK, **Proceedings...** 1998. ISPRS Commission II. p.273-7.

SILVA, J. F. C., OLIVEIRA, R. & GALLIS, R. Georeferenced road image database. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, 3. Cairo, Egypt. **Proceedings...** ISPRS 3(11):8p. (CD-ROM). 2001b.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, UNESP e a empresa Avanti Prima Engenharia Ltda.

Recebido em 31 de outubro de 2003 – Aceito para publicação em 05 de janeiro de 2004.