

Orientação de imagens CBERS: Metodologia semi-automática baseada em feições rodoviárias

Aluir Porfírio Dal Poz¹
Júlio Cesar Scalco²

Universidade Estadual Paulista – UNESP

¹Departamento de Cartografia

²Mestrando em Ciências Cartográficas - UNESP

R. Roberto Simonsen, 305 - 19060-900 - Presidente Prudente - SP

aluir@fct.unesp.br; juscalco@pos.prudente.unesp.br

Abstract. In this paper a methodology is proposed for semiautomatic CBERS image orientation using roads as ground control. It is based on an iterative strategy involving three steps. In the first step, the dynamic programming (DP) algorithm is used to extract ground control roads from the image. This step needs the interference of an operator, who supplies a few seed points to initialize the DP optimization. In the second step, it is established the correspondences between points describing the ground control roads and the corresponding ones extracted from the image. In the last step, the corresponding points are used to orient the CBERS image by using the DLT (Direct Linear Transformation). The two last steps are iterated until the convergence of the orientation process is verified. Experimental results showed that the proposed methodology was efficient with several test images. In all cases the orientation process converged. Moreover, the estimated orientation parameters allowed the registration of check roads at the pixel level or better.

Palavras-chave: CBERS image, ground control road, image orientation, imagem CBERS, rodovia de controle de campo, orientação de imagem.

1. Introdução

Nos últimos anos vários modelos matemáticos têm sido propostos para eficientemente realizar a orientação de imagens adquiridas por diferentes sensores de varredura eletrônica (*pushbroom*), como as imagens SPOT e CBERS (Fritsch e Stallmann, 2000, Hattori et al., 2000; Dowman e Michalis, 2003; Poli, 2004). Estes modelos matemáticos variam quanto à complexidade, ao rigor e à precisão, podendo ser classificados genericamente como modelos físicos e não físicos. Os modelos físicos levam em conta o processo físico de formação da imagem, valendo-se então da geometria interna e externa do sensor, podendo-se basear tanto em feições pontuais como lineares (Habib et al., 2004). Os modelos físicos normalmente se baseiam no conceito fotogramétrico de colinearidade e os parâmetros inerentes se referem à atitude e à posição do sensor ao longo da formação da imagem. Os modelos não físicos não modelam explicitamente a geometria da imagem e, conseqüentemente, os parâmetros envolvidos não possuem significado físico. Estes modelos vão desde uma simples transformação afim ou função polinomial (Okamoto et al., 1999) até os mais elaborados envolvendo as funções racionais (Tao e Hu, 2002) e a DLT (*Direct Linear Transformation*) (Karara, 1989).

Neste trabalho é proposta uma metodologia de orientação semi-automática de imagens CBERS usando a DLT e feições rodoviárias como controle de campo. A principal motivação para o desenvolvimento desta metodologia está diretamente ligada à dificuldade de se identificar pontos de apoio em imagens de baixa-resolução. Ao contrário, a identificação e a extração de rodovias nestas imagens são relativamente fáceis. Este trabalho está organizado em 5 seções. Os princípios da metodologia de orientação proposta são apresentados na Seção 2. A Seção 3 apresenta detalhadamente a metodologia desenvolvida para a geração automática

de pontos de apoio a partir de rodovias homólogas. Os resultados obtidos e as principais conclusões são apresentados nas Seções 4 e 5, respectivamente.

2. Princípios da Metodologia de Orientação

A metodologia proposta para orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo é apresentada na **Figura 1**. Os dados de entrada são a própria imagem, as rodovias de controle de campo e os pontos sementes necessários para a extração semi-automática das rodovias usando programação dinâmica (PD). O método trabalha com quatro passos básicos, além de um laço de realimentação que controla a convergência do processo.

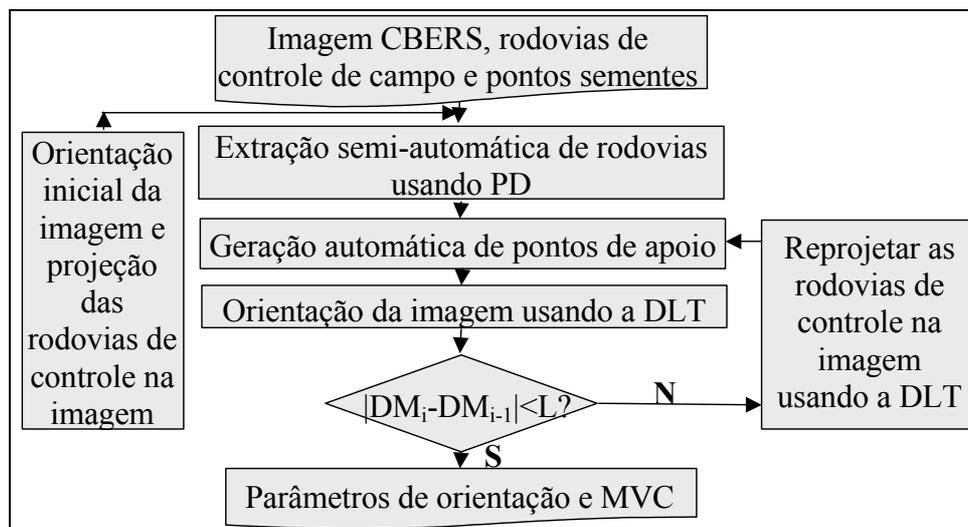


Figura 1 – Metodologia de orientação.

A orientação inicial ou aproximada da imagem e a extração automática de rodovias usando PD são realizadas primeiramente. A orientação inicial da imagem é realizada com um modelo matemático simples, como por exemplo uma transformação Afim bidimensional. Como uma orientação inicial grosseira é suficiente, os pontos comuns no espaço-imagem e no espaço-objeto podem ser selecionados de forma também grosseira. Para a orientação usando a transformação Afim, são necessários pelo menos três pontos de apoio selecionados próximo ou sobre detalhes notáveis das rodovias, como em cruzamentos de rodovias. A orientação inicial da imagem permite a projeção das rodovias de controle de campo sobre a imagem, facilitando ao operador identificar as rodovias homólogas que serão utilizadas no processo de orientação. O operador fornece, sobre ou próximo às rodovias selecionadas na imagem, alguns pontos sementes esparsa e grosseiramente distribuídos, necessários para inicializar a extração semi-automática das rodovias via PD.

Os dois passos seguintes são totalmente automáticos e são controlados por um laço de realimentação. A geração automática de pontos de controle consiste no estabelecimento de correspondência entre pontos das rodovias de controle e das correspondentes extraídas na imagem. A orientação da imagem usando a DLT utiliza os pontos gerados no passo anterior. Sejam DM_i e DM_{i-1} as distâncias médias entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas, em duas iterações sucessivas, respectivamente. O processo de orientação converge quando $|DM_i - DM_{i-1}| < L$, sendo L um limiar preestabelecido. Caso a convergência não seja verificada, os parâmetros estimados da DLT são utilizados para reprojetar as rodovias de controle de campo sobre a imagem, e assim por diante. À medida

que as iterações vão sendo realizadas, os parâmetros de orientação da DLT vão sendo refinados e, conseqüentemente, as rodovias de controle de campo reprojetadas tornam-se cada vez mais similares e próximas das correspondentes rodovias extraídas, possibilitando então a geração de pontos de apoio com qualidade crescente. Quando não é mais possível melhorar esse processo iterativo, o que é objetivamente verificado pelo teste de convergência acima descrito ($|DM_i - DM_{i-1}| < L$), finaliza-se o laço de realimentação.

Como mostra a **Figura 1**, os resultados do processo de orientação são os parâmetros de orientação da DLT e a matriz de variância-covariância (MVC) desses parâmetros.

A metodologia desenvolvida para a geração automática de pontos de apoio é detalhada na Seção 3. Detalhes sobre a metodologia semi-automática de extração de rodovias via PD podem ser encontrados, por exemplo, em Dal Poz e Agouris (2001). Processos de orientação de imagens de satélite usando a DLT são encontrados com relativa facilidade na literatura. Karara (1989) descreve detalhadamente a DLT, inclusive sua solução pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados).

3. Geração Automática de Pontos de Apoio

A **Figura 2** mostra o princípio do método para a geração automática de pontos de apoio considerando apenas um par de rodovias homólogas, isto é, P^O e E. A rodovia de controle P^O é determinada através de algum método de levantamento de campo ou é obtida de uma base de dados preexistente. A feição P^O é descrita por uma lista de pontos no referencial tridimensional Oxyz do espaço-objeto (**Figura 2(b)**). A correspondente rodovia no espaço-imagem (E) (**Figura 2(a)**) é descrita por uma lista de pontos no referencial LC da imagem, podendo ser extraída eficientemente pelo algoritmo de PD.

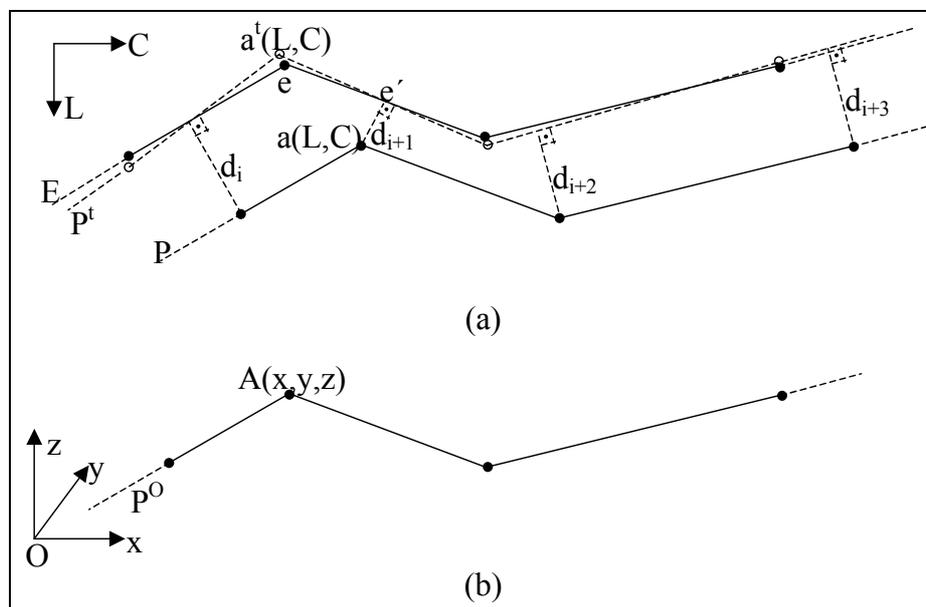


Figura 2 – Geração automática de pontos de apoio. (a) Rodovias no espaço-imagem; (b) Rodovia de controle (P^O).

O problema de geração de pontos de apoio, dadas as rodovias homólogas E e P^O , consiste em determinar os vértices de P^O em E. Em outras palavras, tem-se um problema de determinação de correspondência pontual entre duas feições lineares em espaços de dimensões diferentes, valendo destacar que não existe correspondência entre os vértices das feições envolvidas (P^O e E). Na solução proposta esse problema é resolvido indiretamente

através da redução do problema original num outro no espaço bidimensional da imagem. Esta redução é realizada através da projeção da rodovia de controle P^0 na imagem, resultando na rodovia projetada P (**Figura 2(a)**). Bastaria agora determinar as correspondências pontuais entre P e E utilizando o critério de distância mínima, consistindo em projetar ortogonalmente cada vértice de P em E (Maia e Dal Poz, 2004). Entretanto, como mostra o exemplo da **Figura 2(a)**, este critério é ineficiente quando ambas as feições envolvidas possuem diferenças sistemáticas. No exemplo ilustrativo da **Figura 2(a)**, a diferença sistemática facilmente notada é uma translação bidimensional. Nestas condições, a determinação de pontos homólogos pelo critério de distância mínima produziria resultados com grandes erros sistemáticos. Por exemplo, o ponto $A(x,y,z) \in P^0$, cuja projeção na imagem se dá em $a(L,C) \in P$, tem seu ponto homólogo em $e' \in E$. Notar na **Figura 2(a)** que e' é a projeção ortogonal de $a(L,C)$ em E . Notar também que existe um grande erro sistemático na determinação de e' , visto que sua localização correta seria próxima do vértice $e \in E$. Esse erro seria evitado se existisse um modelo matemático que, aplicado à feição P , produziria uma outra feição P^t (**Figura 2(a)**) com diferenças apenas randômicas em relação à rodovia extraída E . Após a aplicação de um modelo matemático com esta característica, o critério de distância mínima poderia ser aplicado para determinar eficientemente o ponto correspondente de $A(x,y,z)$ em E , resultando num ponto bem próximo de $e \in E$. Este ponto seria obtido através da projeção ortogonal do ponto $a^t(L,C) \in P^t$ em E . Pares de pontos obtidos dessa forma seriam correspondências válidas para resolver o problema de orientação de imagem.

Na **Figura 2(a)**, d_i é a distância entre um vértice qualquer de P e sua projeção ortogonal sobre E . Sendo n o número de vértices em P , a distância média (D) entre P e E é dada por:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1)$$

O problema a ser resolvido consiste em aplicar uma transformação geométrica adequada em P , tal que D seja mínima. Após a aplicação da transformação geométrica à feição P , o resultado seria uma linha poligonal transformada (P^t), identificada pela linha tracejada na **Figura 2(a)**. Por hipótese, a linha poligonal P^t possuiria apenas diferenças randômicas em relação à linha poligonal E . Sendo $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ uma seqüência de vértices que define a linha poligonal P e $p_i^t = T(u_1, \dots, u_k, p_i)$ uma transformação geométrica com k parâmetros u_i , então a seqüência P pode ser transformada em $P^t = \{T(u_1, \dots, u_k, p_1), \dots, T(u_1, \dots, u_k, p_n)\} = \{p_1^t, \dots, p_n^t\}$. Assim, como os pontos p_i^t dependem dos parâmetros u_1, \dots, u_k , a equação 1 pode ser reescrita na forma:

$$D(u_1, \dots, u_k) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i(u_1, \dots, u_k)}{n} \quad (2)$$

cuja solução ($U = [u_1 \dots u_k]^T$) desejada é obtida impondo a condição:

$$D(u_1, \dots, u_k) \rightarrow \text{mínimo} \quad (3)$$

A formulação acima pode ser entendida para incluir simultaneamente todos os pares do tipo (E, P^t) presentes na imagem. Isso garantiria a robustez para a solução, mesmo quando somente rodovias retas, não paralelas, estivessem disponíveis.

A solução da condição dada pela expressão 3 é obtida através de uma técnica de

otimização. Vários testes realizados mostraram que a função 2 é côncava, isto é, o mínimo global é o único mínimo da função custo em questão. A **Figura 3** mostra um exemplo de plotagem 3D da equação 2 parametrizada apenas pelos parâmetros de translação X_0 e Y_0 , onde tanto estes parâmetros quanto a distância média D estão expressos em pixels. As curvas de nível estão sobrepostas na superfície gerada. O gráfico foi gerado com dados reais, a partir de vários segmentos de rodovias presentes num recorte de uma imagem CBERS 1A. O mínimo global está identificado no gráfico da **Figura 3** como um ponto claro.

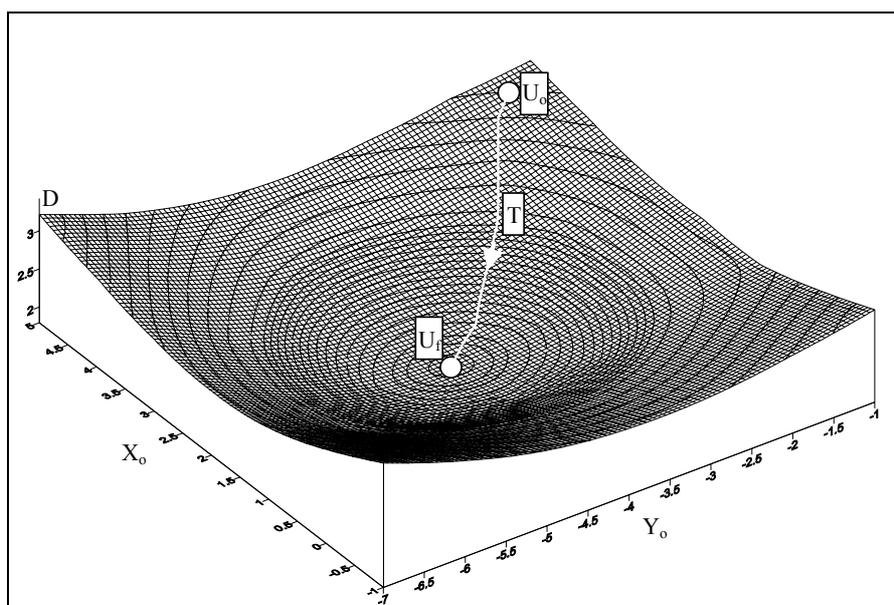


Figura 3 – Visualização da equação 2 com dois parâmetros (X_0 , Y_0).

Quando a função custo (métrica D , equação 2) for côncava, pode-se resolver eficientemente o problema de otimização através do algoritmo do gradiente descendente, que se baseia na seguinte equação de atualização (Krishnamachari e Chellapa, 1996):

$$U_{i+1} = U_i - \varepsilon \cdot \nabla D \quad (4)$$

onde, U_i é o vetor dos parâmetros com seus valores atuais; U_{i+1} é o vetor dos parâmetros a ser atualizado no passo $i+1$; ε é o vetor que dá a amplitude de atualização do vetor U_i ; e ∇D é o vetor gradiente da função custo $D(X_0, Y_0)$.

O vetor ε deve ser composto por valores reais positivos e suficientemente pequenos. Em geral, seus valores podem ser maiores em áreas de menor curvatura e menores em regiões de curvaturas mais acentuadas. Como o vetor ∇D corresponde a direção local de maior variação da função D num ponto (X_0, Y_0) e, por isso, é normal à curva de nível que passa por este mesmo ponto, a solução obtida através da equação 4 corresponde a uma trajetória que parte de uma posição inicial (U_0) e vai até a posição final (U_f), sempre cortando ortogonalmente as curvas de nível. A **Figura 3** ilustra uma trajetória (T) deste tipo.

O exemplo ilustrado pelo gráfico da **Figura 3** serviu para mostrar de forma mais simples a determinação dos parâmetros (X_0, Y_0) que permitem uma sobreposição ótima entre as rodovias extraídas e projetadas. Outros parâmetros podem ser adotados, como por exemplo os seis parâmetros da transformação Afim. Nesse caso, a transformação de registro (ou de superposição) seria a transformação Afim.

Nesse trabalho os dados básicos de entrada são imagens CBERS 1A, que, na ausência de movimentação excessiva do relevo, possuem boa geometria interna. Assim, as diferenças

sistemáticas entre as rodovias extraídas e projetadas podem ser eliminadas através de translações e rotações, combinadas com refinamentos sucessivos dos parâmetros da DLT, conforme metodologia proposta (**Figura 1**).

4. Resultados Experimentais

De forma a avaliar a potencialidade da metodologia proposta, cinco experimentos foram realizados com uma imagem CBERS 1A que envolve a região de Presidente Prudente-SP e outras regiões vizinhas. Esta imagem possui resolução de 20 m e foi obtida gratuitamente junto ao sítio http://www.cbears.inpe.br/pt/index_pt.htm. Os dados planimétricos das rodovias de controle de campo foram obtidos junto a empresa Engemap - Engenharia e Mapeamento Ltda. Os vértices das linhas poligonais que descrevem as rodovias possuem precisão planimétrica de 1 m. As informações altimétricas destes vértices foram obtidas junto ao modelo global de dados altimétricos SRTM (*The Shuttle Radar Topography Mission*), que pode ser acessado no sítio do sistema SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Conforme se pode verificar no sítio http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/error_abs.jpg, o erro vertical (para 90% de probabilidade) dos dados SRTM para a mesma região da imagem está em torno de 10 m.

A metodologia proposta foi aplicada nos quatro quadrantes da imagem e na imagem toda. A avaliação foi realizada tanto de forma qualitativa quanto quantitativa. A avaliação qualitativa foi realizada com base na interpretação visual das rodovias projetadas na imagem no início do processo de orientação e no final do processo de orientação. A avaliação quantitativa foi realizada de duas formas. Uma delas baseia-se na distância média global entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas no final do processo iterativo de orientação. Essa distância permite avaliar numericamente a qualidade do ajuste global na imagem das rodovias envolvidas no processo de orientação. Trata-se então de uma avaliação interna do processo de orientação. Uma avaliação externa do processo de orientação usando rodovias de verificação foi também realizada. Baseia-se também numa medida de distância média, só que agora é calculada entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de verificação projetadas na imagem via DLT após a convergência do processo de orientação. A seguir apresenta-se um exemplo baseado num recorte da imagem contendo as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas no início e no final do processo de orientação. No final é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos 5 experimentos.

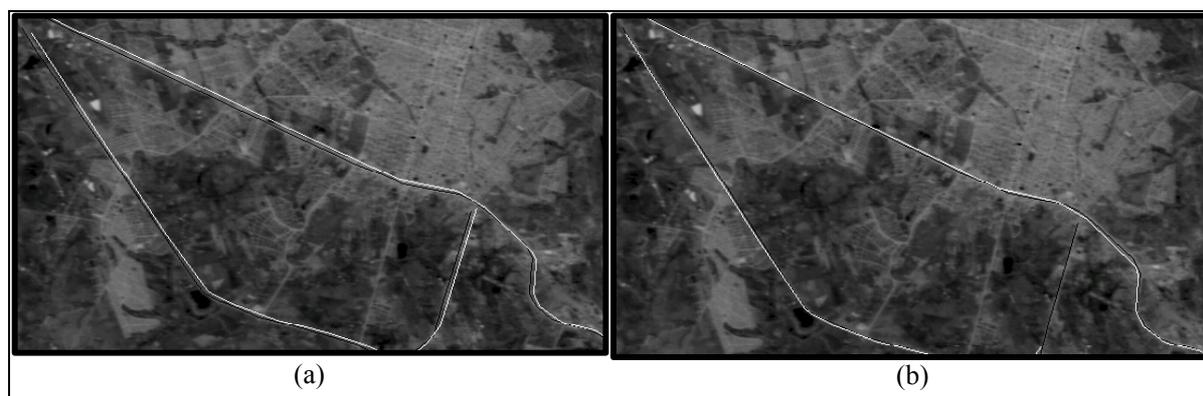


Figura 4 - Recorte da imagem com alguns trechos de rodovias de controle. (a) no início do processo de orientação; (b) após a convergência do processo de orientação.

A **Figura 4** mostra um recorte extraído do quadrante superior esquerdo da imagem com alguns segmentos de rodovias. A **Figura 4(a)** mostra o resultado da projeção dos segmentos de rodovias de controle após a orientação aproximada usando a transformação Afim e três

pontos selecionados de forma aproximada. As rodovias extraídas são mostradas como linhas escuras e as correspondentes projetadas como linhas claras. Pode-se notar claramente que existe um deslocamento sistemático entre as rodovias extraídas e projetadas. A **Figura 4(b)** mostra o resultado final após a convergência do processo de orientação, obtida após a realização de três iterações. Nesse caso, e desde a primeira iteração, a projeção das rodovias de controle é realizada através da DLT, tendo por base os parâmetros estimados na última iteração. A **Figura 4(b)** mostra que um bom resultado final foi obtido pela metodologia, visto que o registro entre as rodovias extraídas e as correspondentes projetadas foi eficiente em quase todos os trechos.

A **Figura 5** mostra as avaliações interna e externa dos resultados obtidos nos 5 experimentos realizados, conforme áreas testes selecionadas na imagem. Estas áreas testes correspondem aos quadrantes da imagem e a imagem toda. Na base do gráfico estão identificadas as áreas a que se referem os experimentos realizados. Por exemplo, as duas últimas barras da direita se referem área 5, isto é, a imagem CBERS completa.

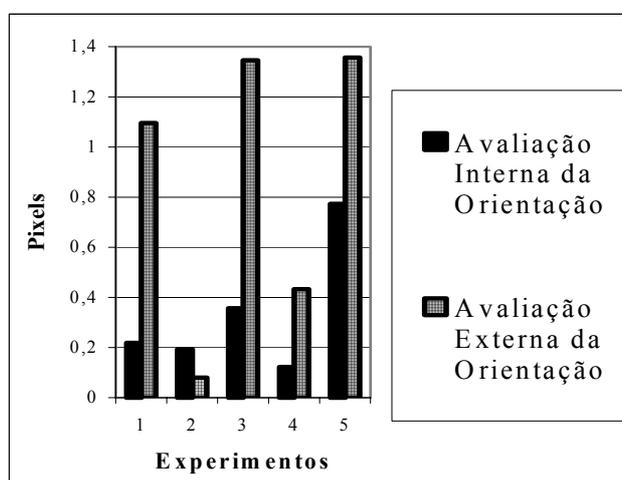


Figura 5 - Avaliações interna e externa dos resultados obtidos nos experimentos realizados.

A **Figura 5** mostra que as discrepâncias internas são geralmente bem menores que as externas, com exceção dos resultados obtidos para o segundo experimento, onde ambas as discrepâncias se situaram num nível de significância parecido. O resultado obtido era esperado face ao critério adotado para avaliação interna do processo de orientação, visto que a própria estratégia de orientação força um ajuste global entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias de controle projetadas. Com exceção da discrepância interna obtida no quinto experimento, que ficou ligeiramente abaixo de 0,8 pixel, todas as outras ficaram abaixo de 0,5 pixel. Isso mostra que a estratégia de orientação proposta possibilitou um bom encaixe global das rodovias extraídas com as correspondentes rodovias de controle projetadas. Mostra também que, como esperado, devido principalmente ao uso da DLT para modelar a geometria da imagem, os resultados do processo de orientação da imagem são melhores para os recortes da imagem do que para a imagem toda. A discrepâncias obtidas com uso de trechos de rodovias de verificação se situaram no nível do pixel, com exceção da discrepância obtida no segundo experimento.

5. Conclusões

Neste artigo foi proposta uma metodologia para orientação de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. Baseia-se em três etapas principais: extração das rodovias

de controle na imagem através do algoritmo de PD; geração automática de pontos de apoio; e orientação da imagem usando a DLT. As duas últimas etapas do processo de orientação são iteradas até que se verifique a estabilização do processo de orientação.

A metodologia proposta foi avaliada com base em cinco experimentos, sendo que um deles foi realizado com toda a imagem CBERS e os outros quatro com recortes dessa imagem. De uma forma geral, verificou-se que a estratégia de orientação proposta possibilitou um bom encaixe global das rodovias extraídas com as correspondentes rodovias de controle projetadas, fato evidenciado pelas pequenas discrepâncias internas obtidas, sempre abaixo de 0,8 pixels. Dentre as vantagens, pode-se destacar a necessidade de pouca interferência de um operador e a possibilidade de determinação de uma grande quantidade de pontos de apoio. Esta última vantagem é relevante principalmente quando a imagem de entrada for de baixa-resolução, onde é normalmente difícil a identificação visual de pontos de apoio.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pela concessão de auxílios para a aquisição de recursos computacionais usados nesta pesquisa, a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, a Engemap - Engenharia e Mapeamento Ltda de Assis-SP pela concessão dos dados planimétricos das rodovias de controle e o INPE pela concessão da imagem CBERS 1A. Vale lembrar também que os dados altimétricos utilizados foram obtidos junto ao sistema SRTM na site <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

Referências

- Dal Poz, A. P.; Agouris, P. Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias de imagens digitais, **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 53, n.2, p. 65-72, 2001.
- Dowman, I. J.; Michalis, P. Generic Rigorous Model for along Track Stereo Satellite Sensors. In: In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Istambul, v. 34, 2003.
- Fritsch, D.; Stallmann, D. Rigorous Photogrammetric Modelling Processing of High-Resolution Satellite Imagery. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Amsterdã, v. 33, 2000, p.313-321.
- Habib, A.; Ghanma, M.; Mitishita, E. A. Co-registration of photogrammetric and LIDAR data: Methodology and case study. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 1, p. 1-13, 2004.
- Hattori, S.; Ono, T.; Fraser, C.S.; Hasegawa, H. Orientation of High-Resolution Satellite Images based on Affine Projection. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Amsterdã, v. 33, 2000, p. 359-366.
- Karara, H. M. **Non-Topographic Photogrammetry**. Falls Church, Virginia, USA, 1989, 445 p.
- Krishnamachari, S.; Chellapa, R. Delineating Buildings by grouping lines with MRFs. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 5, n. 1, p. 164-168, 1996.
- Maia, J. L.; Dal Poz, A. P. Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 1, p. 29-38, 2004.
- Okamoto, A.; Ono, T.; Akamatsu, S.; Fraser, C.; Hattori, S.; Hasegawa, S. Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery. In: ASPRS 1999 Annual Conference, **Proceedings...** Portland, 1999, CD-ROM.
- Poli, D. Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Istambul, v. 34, 2004, p. 130-136.
- Tao, C. V.; Hu, Y. 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 7, p. 705-714, 2002.