
UTILIZAÇÃO DE PERFIS RADIOMÉTRICOS DE IMAGENS TERRESTRES PARA A ORIENTAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS

RAQUEL ALVES DE OLIVEIRA²

ANTONIO M. GARCIA TOMMASELLI¹

MARIANA BATISTA CAMPOS³

JOSÉ MARCATO JUNIOR²

Universidade Estadual Paulista - UNESP

¹Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, SP

²PPGCC – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas

³Graduanda em Engenharia Cartográfica – Bolsista PIBIC-CNPq

{raquel88, mariana.bcampos, jrmarcato}@gmail.com, tomaseli@fct.unesp.br

RESUMO – A localização e medição precisa de feições de modo automático em imagens orbitais são problemas ainda em estudo. Em alguns casos a qualidade radiométrica da imagem dificulta o processo de medição interativa afetando os resultados da orientação da imagem, independentemente da qualidade das coordenadas dos pontos de controle medidas em campo ser alta. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do uso de cenas terrestres nadirais de alta resolução, adquiridas usando uma câmara com lente *fish eye*, como fonte de informação para a localização e medição precisa de linhas de controle em uma imagem orbital. A técnica desenvolvida baseia-se na comparação entre perfis radiométricos extraídos na imagem terrestre retificada e na imagem orbital, possibilitando a determinação com maior exatidão (subpixel) da posição de determinada feição dentro de uma cena de menor resolução, através da técnica de correspondência (*matching*) por mínimos quadrados. Os resultados mostram que esta técnica permite maior automação na localização das entidades de controle.

ABSTRACT – The automatic location and measurement of features in orbital images are problems still under investigation. In some cases the radiometric quality of the image affects the process of interactive measurement, reducing the quality of the results of indirect image orientation, regardless the quality of the coordinates of ground control points. In this context, the objective of this work is to study the feasibility of using high-resolution terrestrial scenes acquired by a digital camera with fish eye lens, as a source of information for the location and precise measurement of control lines in an orbital image. The technique is based on the comparison between radiometric profiles extracted both from the rectified terrestrial image and the orbital image. This technique allows the determination of more accurate (sub pixel) position of a specific feature in a lower resolution scene using the method of least squares matching. The results show that this technique improves automation in the location of the control entities, achieving accuracies comparable to the conventional procedure.

1 INTRODUÇÃO

A orientação de imagens de sensores remotos, tanto aéreos quanto orbitais, ainda é um problema que requer desenvolvimentos. A orientação das imagens pode ser feita diretamente, quando são medidas a posição e a atitude do sensor em relação a um sistema de referência do espaço objeto ou indiretamente, quando estes elementos são calculados por meio de pontos ou feições de controle. Pode-se, ainda, adotar um processo integrado, no qual as entidades de controle são usadas para calcular correções aos parâmetros determinados diretamente.

No caso de orientação indireta, é necessário determinar as coordenadas de pontos ou de vértices de linhas no espaço objeto e, posteriormente, identificar e medir as entidades correspondentes na imagem. A identificação na imagem do ponto, ou de um ponto pertencente a uma linha, é limitada pela resolução espacial e radiométrica da imagem, além do eventual borramento da imagem causado por fatores atmosféricos, tempo de integração ou arrastamento, dependendo do tipo de sensor.

Com o crescente uso de satélites artificiais cada vez mais sofisticados, têm-se procurado aumentar a precisão na determinação da posição e atitude, por técnicas nas quais todas as informações disponíveis sejam utilizadas. Imagens como as dos sensores HRC do satélite CBERS ou do sensor PRISM do satélite ALOS, apresentam elemento de resolução espacial nominal em torno de 2,5 metros o que as torna interessantes para o mapeamento na escala 1:50.000 e mesmo para cartas planimétricas na escala 1:25.000. No entanto, o elemento de resolução espacial não é o único parâmetro a ser analisado. Estas imagens apresentam um intervalo dinâmico pequeno, o que dificulta a medição de pontos realizada por um operador, com impacto na precisão destas medidas.

Mesmo com a utilização de ferramentas de contraste e ampliação na imagem, o erro de medida pode apresentar uma grandeza de 2 ou 3 pixels. Em contraposição, a medida de pontos correspondentes entre duas imagens similares, pode ser feita com precisão subpixel, quando são usados algoritmos de correspondência por mínimos quadrados. Os pontos de controle em campo, também podem ser determinados com precisão centimétrica, dependendo da técnica de posicionamento escolhida, o que sugere que a grande questão para o aumento na precisão das técnicas de orientação indireta seja, no momento, a medição precisa de elementos de controle na imagem.

Neste sentido, este trabalho estuda a viabilidade da determinação automática de correspondência, com precisão subpixel, entre perfis radiométricos de imagens terrestres de alta resolução com perfis correspondentes de imagens orbitais (de menor resolução), como fonte de informação para a localização e medição precisa de linhas de controle em imagens orbitais e a posterior orientação indireta destas imagens.

2 MODELOS DE ORIENTAÇÃO PARA IMAGENS *PUSHBROOM*

As imagens orbitais, em sua maioria, são adquiridas com sensores de varredura linear (*pushbroom*) nos quais cada linha da imagem é tomada a partir de uma posição e orientação diferentes, tendo portanto, seis parâmetros de orientação exterior (POE) a determinar para cada linha. Estes parâmetros podem ser modelados por polinômios, no caso de imagens orbitais. O modelo de colinearidade utilizado em imagens de quadro, para estabelecer a relação entre as coordenadas no sistema de referência da imagem e as coordenadas no sistema de referência de terreno, pode ser adaptado para a geometria de imagens *pushbroom* (Equações 1 e 2) incorporando os polinômios que descrevem a trajetória e atitude da plataforma. Como a direção do movimento da plataforma é ao longo do eixo x, esta coordenada é igualada a zero. A Equação 3 apresenta os polinômios de segunda ordem, contendo 18 parâmetros (KIM e DOWMAN, 2006). Os coeficientes destes polinômios podem ser estimados indiretamente, através das coordenadas de pontos ou linhas de controle, medidos em campo e na imagem.

$$x = 0 = -f \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_S) + r_{12} \cdot (Y - Y_S) + r_{13} \cdot (Z - Z_S)}{r_{31} \cdot (X - X_S) + r_{32} \cdot (Y - Y_S) + r_{33} \cdot (Z - Z_S)} \quad (1)$$

$$y = -f \cdot \frac{r_{21} \cdot (X - X_S) + r_{22} \cdot (Y - Y_S) + r_{23} \cdot (Z - Z_S)}{r_{31} \cdot (X - X_S) + r_{32} \cdot (Y - Y_S) + r_{33} \cdot (Z - Z_S)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \omega_S &= \omega_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\ \varphi_S &= \varphi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\ \kappa_S &= \kappa_0 + a_6 t + b_6 t^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Métodos alternativos sugerem o uso de feições retas como controle de campo. A relação entre os espaços imagem e objeto é estabelecida com um modelo de orientação que utiliza a condição de coplanaridade entre o vetor que contém um ponto em uma dada reta no espaço imagem (vetor de visada) e o plano de projecção no espaço objeto. Como consequência, o vetor normal a este plano, uma vez rotacionado, deve ser ortogonal ao vetor de visada (MULAWA e MIKHAIL, 1988; TOMMASELLI e MEDEIROS, 2010).

$$\vec{N} \cdot R \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ -f \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

Considerando a geometria de imagens de varredura linear e o eixo x na direção do movimento da plataforma, tem-se para um instante t (Equação 5):

$$\vec{N}(t) \cdot R(t) \begin{pmatrix} 0 \\ y_s^t \\ -f \end{pmatrix} = 0 \quad (5)$$

Com o modelo de Colinearidade utilizando pontos são geradas duas equações para cada ponto observado, porém, com o modelo de Coplanaridade com retas apenas uma equação é gerada para cada ponto (pertencente à reta) observado. Assim, é possível ajustar simultaneamente a imagem considerando pontos e retas como elementos de controle utilizando, para a estimação de parâmetros, o método combinado com injunções de peso. A partir dos desvios-padrão é possível aplicar injunções relativas (com peso inversamente proporcional à variância da injunção) nas observações e nos parâmetros. Este método foi implementado no programa TMS (Triangulação Multissensor) (MARCATO et al, 2010) utilizado neste trabalho para a orientação da imagem.

3 CORRESPONDÊNCIA UNIDIMENSIONAL POR SINAL - REFINAMENTO POR MÍNIMOS QUADRADOS

A correspondência (*matching*) de imagens é fundamental em diversas aplicações, como em navegação, vigilância automática, visão robótica e em Fotogrametria, principalmente, na determinação de pontos homólogos.

Mesmo no caso de uso de linhas, há ainda a dificuldade de determinar a posição de um ponto pertencente a esta linha, com precisão subpixel. A Figura 1 apresenta em (a) um recorte de uma área extraída da imagem orbital PRISM/ALOS e em (b) uma imagem terrestre nadiral, após ser retificada, coletada utilizando uma câmara com lente *fish eye* da área correspondente à área da imagem orbital. Nota-se, por este exemplo, a dificuldade de medir pontos na imagem orbital devido a sua baixa resolução e qualidade.



Figura 1- (a) Imagem PRISM/ALOS; (b) imagem terrestre retificada da área correspondente na imagem PRISM/ALOS.

A proposta deste trabalho é extrair perfis radiométricos em imagens terrestres nadirais e compará-los com os perfis correspondentes na imagem orbital. Para isto, são usadas técnicas de correspondência unidimensional. Inicialmente, determina-se o deslocamento entre os dois sinais, sendo utilizada uma função de correspondência, para o cálculo da posição de maior similaridade entre os dois perfis. A técnica baseia-se na comparação dos tons de cinza de uma janela de referência, com a de uma janela de busca. Escolhe-se então, a região que apresentar melhor similaridade com a janela de referência. Para determinar esta similaridade foi utilizado o coeficiente de correlação r (Equação 6) que varia entre -1 e +1. O valor zero significa ausência de correlação; o valor +1 significa correlação total positiva e o valor -1 significa correlação negativa (KRAUS, 1993).

$$r = \frac{\sigma_{R,B}}{\sigma_R \sigma_B} = \frac{\sum (g_R - \bar{g}_R)(g_B - \bar{g}_B)}{\sqrt{\sum (g_R - \bar{g}_R)^2 (g_B - \bar{g}_B)^2}} \quad (6)$$

Na Equação 6 $\sigma_{R,B}$ é a covariância entre o perfil da imagem de referência e o perfil da imagem de busca; σ_R é o desvio-padrão do perfil da imagem de referência; σ_B é o desvio-padrão do perfil da imagem de busca; g_R são os tons de cinza do perfil da imagem de referência e g_B os tons de cinza do perfil da imagem de busca.

Posteriormente, utiliza-se a técnica de correspondência por mínimos quadrados unidimensional (*Least Squares Matching*), para calcular os parâmetros de transformação entre os perfis com precisão subpixel (FORSTNER, 1993).

A correspondência de imagens parte de duas imagens digitais ou digitalizadas (I_1 e I_2). Considerando dois pontos na imagem I_1 e I_2 respectivamente com coordenadas (l_1, c_1) e (l_2, c_2) e que são pontos correspondentes, suas coordenadas podem ser relacionadas por uma função T_G de mapeamento que fornece a relação geométrica entre as imagens e p_G é um conjunto ou vetor de parâmetros desconhecidos (Equação 7):

$$(l_1, c_1) = T_G(l_2, c_2; p_G) \quad (7)$$

As intensidades em uma imagem podem ser relacionadas com as intensidades da outra imagem por (Equação 8):

$$g_1 = T_r(g_2; p_r) \quad (8)$$

onde T_r é a função de mapeamento das intensidades, ou seja, relaciona a intensidade entre as imagens e p_r é o vetor dos parâmetros incógnitos (transformação radiométrica).

O problema da correspondência de imagens consiste, basicamente, em encontrar todos os pontos correspondentes e determinar os parâmetros p_G e p_r das funções de mapeamento T_G e T_r , respectivamente.

Assumindo que existam um deslocamento (u) e um fator de escala (s) entre os pixels das duas imagens, pode-se estabelecer as relações geométricas entre os pontos nos dois perfis como (Equação 9):

$$y(x_i) = s x_i - u(x_i) \quad (9)$$

onde $u(x_i)$ é o modelo de deformação que representa o deslocamento necessário para aplicar em x_i e produzir a correspondência entre o ponto de interesse.

O modelo não linearizado, que estabelece a relação geométrica e de intensidade entre os perfis pode ser estabelecido como (Equação 10):

$$g(x_i) = f[s x_i - u(x_i)] + n(x_i) \quad i = 1, \dots, m \quad (10)$$

na qual $g(x_i)$ e $n(x_i)$ é um ruído aditivo na posição x_i .

Forstner (1993) demonstra que os parâmetros desta transformação podem ser determinados pelo método dos mínimos quadrados. A solução, ao considerar uma translação Δu e um fator de escala Δs entre os perfis (sinal unidimensional), pode ser obtida pela resolução do sistema apresentado na Equação 11:

$$\begin{pmatrix} \sum f_i'^2 & -\sum f_i'^2 \bar{x}_i \\ -\sum f_i'^2 \bar{x}_i & \sum f_i'^2 \bar{x}_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum f_i' \Delta g_i \\ \sum f_i' \bar{x}_i \Delta g_i \end{pmatrix} \quad (11)$$

no qual f_i' é o gradiente do sinal no pixel i ; Δg_i é a diferença entre os tons de cinza dos perfis de referência e de busca.

4 METODOLOGIA

O objetivo principal desta pesquisa foi mostrar a viabilidade da técnica proposta e os resultados obtidos na determinação de correspondência entre perfis radiométricos de uma imagem terrestre de alta resolução e uma imagem orbital, bem como sua aplicação na orientação da imagem orbital. Para isto, utilizou-se apenas uma faixa longitudinal de uma imagem nadiral com resolução espacial de 2,5m do sensor PRISM do satélite ALOS (ALPSMN130334050), coletada no dia 05/07/2008, com nível de processamento 1B1 (apenas correção radiométrica), que envolve a região de Presidente Prudente. Além desta imagem, foram coletadas várias imagens terrestres nadirais em determinados locais desta região.

Ao considerar apenas uma faixa da imagem, significa que os pontos de apoio foram levantados apenas nesta área. A Figura 2 mostra em destaque a área selecionada dentro da imagem completa. Após isso, o planejamento de

campo para a aquisição das imagens terrestres georreferenciadas foi feito, analisando possíveis eixos de rodovias com perfis radiométricos bem definidos na imagem PRISM/ALOS e bem distribuídos na região de estudo.

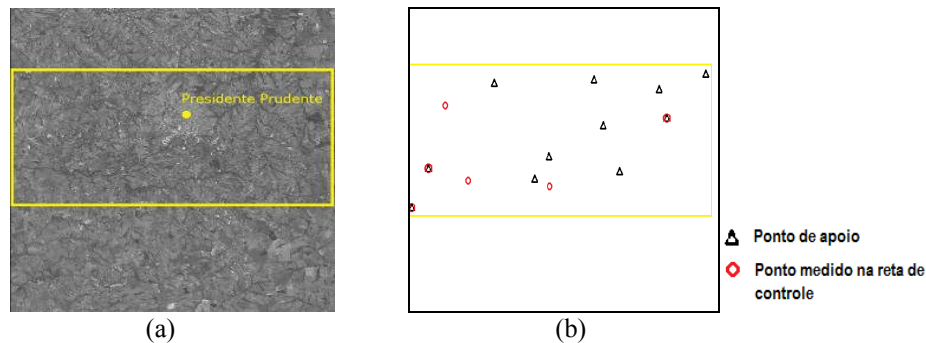


Figura 2 - (a) Área selecionada na imagem PRISM/ALOS; (b) Disposição dos pontos de apoio (triângulos em preto) e dos pontos pertencentes às retas (círculos vermelho).

Para a aquisição das imagens terrestres foi utilizada uma câmera digital *Fuji Finepix S3pro* e uma lente do tipo “olho de peixe” (*fish-eye*), com distância focal de 5,2mm, acoplada a um suporte instalado em um bastão de 4,6 metros de altura, apoiado por um tripé (Figura 3). As coordenadas dos pontos de apoio foram coletadas com um par de receptores de dupla frequência *HiperLite*. O processamento dos dados coletados foi realizado no serviço *online* de posicionamento por ponto preciso (PPP) disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A Figura 2(b) mostra a disposição dos pontos de apoio coletados e medidos na imagem e dos pontos que pertencem às retas.



Figura 3 - Dispositivo para aquisição das imagens terrestre e receptor GPS ao fundo.

A câmera com lente *fish-eye* foi calibrada no campo terrestre de calibração situado na FCT-UNESP Campus de Presidente Prudente. Para o processamento da calibração foi utilizado o software CMC (RUY e TOMMASELLI, 2008), estudando-se a melhor combinação dos parâmetros do modelo de Conrady-Brown, para modelar as distorções provocadas por este tipo de lente (CAMPOS et. al. 2011).

A partir dos parâmetros de orientação interior (POI) provenientes da calibração da câmera e a orientação exterior (POE) aproximada, as imagens foram retificadas utilizando o programa *P_retif* (RUY e TOMMASELLI, 2004). Verificou-se a presença de sombras e distorções residuais das lentes nas imagens de alta resolução, que influenciam na correspondência dos perfis radiométricos. Por esse motivo foram aplicados filtros para melhoramento das imagens, utilizando o software GIMP 2.6. Estas imagens foram convertidas para tons de cinza, reamostradas para um GSD de 0,07m e novamente realçadas para apresentar um histograma similar ao da cena correspondente na imagem PRISM/ALOS. A extração de perfis radiométricos perpendiculares à linha medida em campo foi realizada no *software* ERDAS IMAGE 2011, com a ferramenta *Spatial Profile*. Esta ferramenta obtém os níveis de cinza de uma linha definida na imagem, podendo-se salvar esta informação em um arquivo texto.

A técnica de *matching* por mínimos quadrados (MMQ), entre perfis radiométricos de imagens com diferentes resoluções, descrita anteriormente, foi implementada em C++, sendo calculados, o deslocamento subpixel entre os perfis e a diferença de escala espacial (Equações 11). O algoritmo realiza um ajuste preliminar de brilho e contraste entre as linhas coletadas, seguido da busca da área de maior correlação entre os perfis e, finalmente, o ajustamento pelo MMQ para determinar os parâmetros de deslocamento e escala.

Em seguida, fez-se a soma de um deslocamento entre a origem do perfil terrestre e a posição do ponto rastreado no perfil da imagem orbital. A identificação do ponto rastreado é feita visualmente pelo operador na imagem terrestre após o levantamento de campo. Após a determinação da distância entre a origem do perfil orbital e a posição do ponto rastreado na linha, calculam-se as coordenadas do ponto na imagem orbital, pela transformação de coordenadas polares

para retangulares. A orientação do perfil na imagem pode ser calculada pela diferença de coordenadas do ponto inicial e ponto final. A Figura 4 apresenta um perfil radiométrico extraído na imagem terrestre e o perfil radiométrico, da região correspondente, extraído na imagem PRISM/ALOS e reamostrado para a mesma resolução. Nota-se que há uma diferença de escala e de deslocamento entre os perfis.

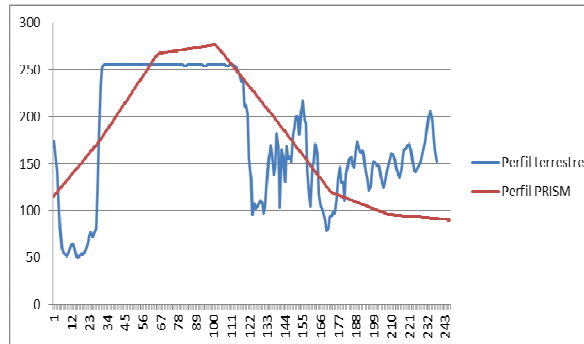


Figura 4 - Perfil da imagem terrestre e da imagem PRISM/ALOS.

O procedimento para extração e correspondência de perfis foi realizado em oito perfis radiométricos, obtendo-se, ao final, oito coordenadas (coluna, linha), ou seja, oito pontos, pertencentes a seis retas (em duas delas foram extraídos dois perfis). As coordenadas no sistema imagem (coluna, linha) dos pontos de controle foram medidas interativamente em tela no programa LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), e exportadas para um arquivo texto para serem utilizadas no programa TMS.

A informação das coordenadas imagem subpixel destes pontos foi inserida no processo de orientação da imagem (subimagem destacada em amarelo na Figura 2) PRISM/ALOS.

A orientação da faixa da imagem foi realizada no programa TMS (MARCATO JUNIOR et al, 2010), que possibilita utilizar pontos e retas de controle e diferentes configurações de POEs para imagens *pushbrom*. Esta etapa foi dividida em uma série de experimentos, nos quais foram consideradas quantidades diferentes de pontos de apoio, utilizando e não utilizando as retas de controle, para, posteriormente, analisar a contribuição da inserção da informação de coordenadas no sistema imagem, obtidas a partir de correspondência entre perfis radiométricos no processo de orientação de imagens.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A câmara foi utilizada para coletar a imagem simultaneamente ao rastreamento de pontos e linhas de controle, obtendo-se uma vista superior do ponto, mas com a distorção característica das lentes *fish-eye*.

A Figura 5(a) mostra a imagem terrestre nadiral adquirida utilizando a câmara com a lente *fish-eye*. A mesma imagem, após a retificação e realce é apresentada na Figura 5(b), e a área equivalente na imagem PRISM/ALOS é apresentada na Figura 5(c).

Os perfis radiométricos foram extraídos perpendicularmente à linha rastreada, sendo mostrados nas Figuras 6(a) (perfil da imagem PRISM/ALOS, reamostrada para um GSD de 7 cm) e 6(b) (perfil da imagem terrestre, retificada e também reamostrada para um GSD de 7 cm) um exemplo de um dos pares de perfis extraídos. As setas vermelhas nas Figuras 6(a) e Figura 6(b) indicam, respectivamente, a posição da linha de controle no perfil terrestre e a posição correspondente aproximada no perfil da imagem PRISM/ALOS.

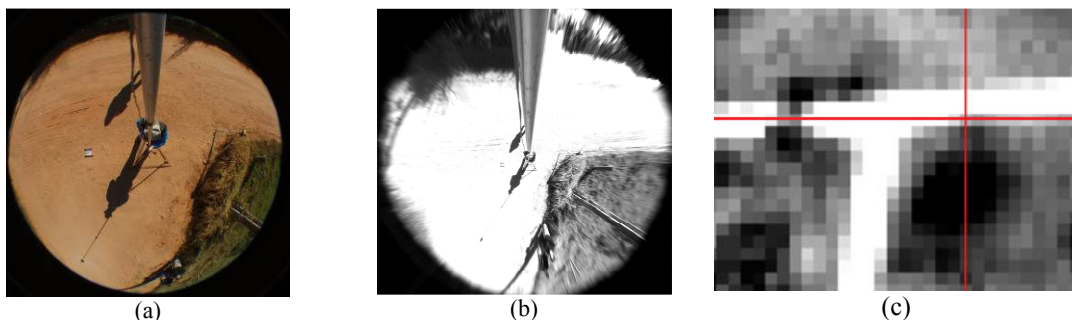


Figura 5 - (a) Imagem adquirida pela câmara *fish-eye*; (b) imagem (a) retificada e realçada e em (c) recorte da área correspondente na imagem PRISM/ALOS.

A localização do pixel obtido após a correspondência dos perfis e aplicação do deslocamento entre os perfis e o deslocamento calculado pelo processo de correspondência, e pode ser visto em destaque (cruz amarela) na Figura 5(c).

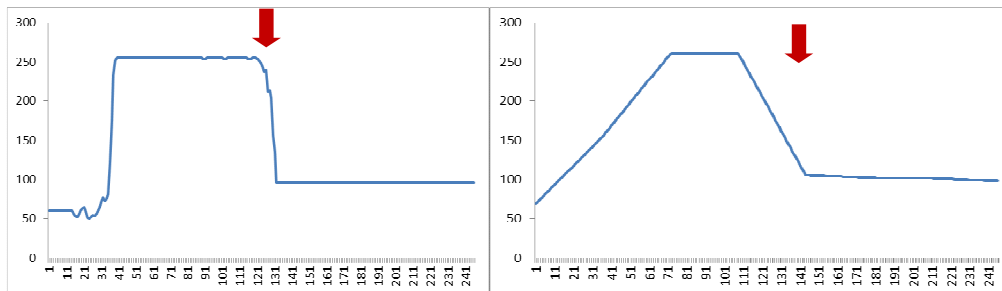


Figura 6 - (a) perfil radiométrico extraído da imagem de curta distância realçada e (b) perfil radiométrico extraído da imagem PRISM/ALOS e reamostrado.

A orientação da imagem foi feita considerando 12 parâmetros incógnitos ($X_0, Y_0, Z_0, k_0, a_1, a_2, a_3, a_6, b_1, b_2, b_3$ e b_6). Em todos os testes os valores de ω_0 e φ_0 foram considerados como fixos (injunção absoluta) e sem variação ao longo do movimento da plataforma (constantes), devido à alta correlação com os parâmetros X_0 e Y_0 . Inicialmente, foi feita a orientação com a maior quantidade possível de pontos de apoio (PA) disponíveis na área selecionada, neste caso 13 pontos. Então, esta quantidade foi reduzida para 8, 5 e 4 pontos de apoio, respectivamente. Foram realizados experimentos com 13 e 8 PAs. Foram, então, introduzidos pontos pertencentes às linhas de controle, pontos estes extraídos pelo processo de correspondência entre perfis radiométricos. Para os dois últimos casos o cálculo dos elementos de orientação só foi possível utilizando em conjunto as retas de apoio, uma vez que, com apenas 5 ou 4 pontos o número de observações é menor que o número de incógnitas. O Quadro 1 descreve a configuração dos experimentos realizados.

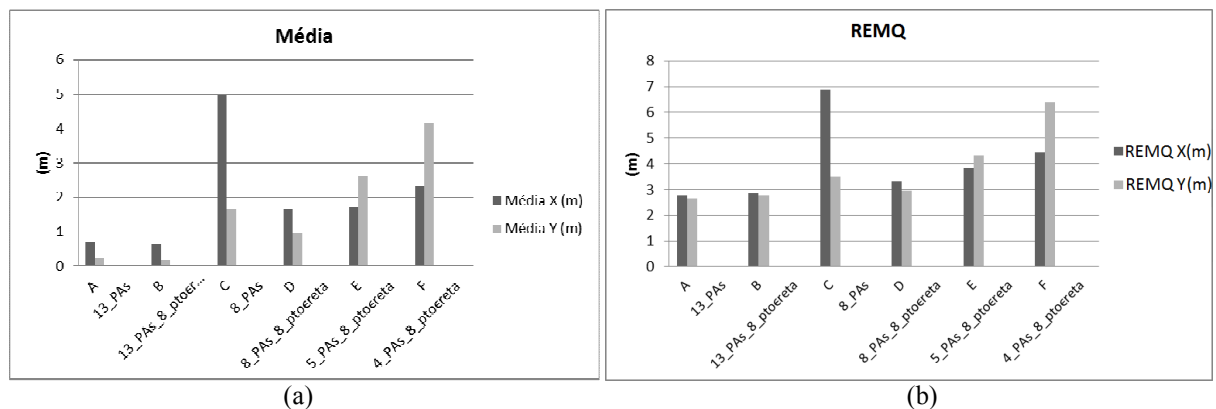
<i>Experimento</i>	<i>Descrição</i>
A 13_PAs	Utiliza 13 pontos de apoio (PAs).
B 13_PAs_8_pto□reta	Utiliza 13 pontos de apoio e 8 pontos pertencentes às retas, obtidos a partir da correspondência dos perfis radiométricos entre as imagens terrestre e PRISM/ALOS.
C 8_PAs	Similar ao experimento A, mas com 8 pontos de apoio.
D 8_PAs_8_pto□reta	Similar ao experimento B, mas com 8 pontos de apoio.
E 5_PAs_8_pto□reta	Similar ao experimento B, mas com 5 pontos de apoio.
F 4_PAs_8_pto□reta	Similar ao experimento B, mas com 4 pontos de apoio.

Quadro 1 - Descrição dos experimentos realizados.

Para a verificação da qualidade do processo de orientação da imagem foram utilizados os POEs obtidos em cada experimento apresentado no Quadro 1 e as equações de colinearidade na sua forma inversa para fazer a projeção das observações na imagem em 5 pontos de verificação independentes, considerando a coordenada Z de terreno conhecida. Devido às dificuldades para levantamento de campo de mais pontos, as coordenadas de terreno destes pontos de verificação foram estimadas no processo de fototriangulação de um tripleto PRISM/ALOS como pontos fotogramétricos, usando o software LPS. Sendo assim, pode-se afirmar que as coordenadas destes pontos já possuem um erro de aproximadamente um GSD (Ground Sample Distance), no caso 2,5m. Foram calculadas as discrepâncias entre os valores considerados como referência e os valores calculados com as equações de colinearidade inversas, as médias destas discrepâncias e a raiz do erro médio quadrático (REM), em cada teste (Tabela 1 e Figura 8).

Tabela 1 - REMQs e médias dos experimentos A, B, C, D, E e F.

	REM _Q E(m)	REM _Q N(m)	Média E(m)	Média N(m)
A 13_PAs	2,76	2,64	0,70	0,24
B 13_PAs_8_pto_reta	2,84	2,77	0,65	0,16
C 8_PAs	6,89	3,51	4,98	1,66
D 8_PAs_8_pto_reta	3,32	2,94	1,64	0,95
E 5_PAs_8_pto_reta	3,84	4,32	1,72	2,62
F 4_PAs_8_pto_reta	4,44	6,37	2,32	4,17



Nota-se, pela análise da Tabela 1 e dos gráficos da Figura 8. que os melhores resultados foram obtidos nos experimentos A e B. Neste caso, a introdução de retas de controle (experimento B) não implicou em uma melhora nos resultados, o que pode ser justificado pela quantidade de pontos de apoio (13 pontos), em número suficiente. Com apenas 8 pontos de apoio disponíveis, é possível observar uma melhoria na qualidade nos resultados ao introduzir linhas retas de controle (experimento C), o que mostra que a inserção de coordenadas imagem, neste caso obtidas a partir de correspondência de perfis radiométricos, contribuiu positivamente para a melhoria do resultado. Nos experimentos E e F foi usado um número de pontos que é insuficiente para a estimação dos parâmetros, sendo necessária a introdução das observações nas linhas de controle. Embora os resultados obtidos nos experimentos E e F não possam ser comparados com os resultados da orientação da faixa da imagem utilizando apenas pontos, devido ao pequeno número, eles mostram que foi possível orientar a imagem reduzindo-se consideravelmente a quantidade de pontos de apoio e ainda obter erros nos pontos de verificação em torno de 2 GSDs da imagem. Verifica-se também, que as médias nos testes B e D em comparação com seus correspondentes A e C, são menores quando consideram as retas, o que significa que uma possível tendência nos dados foi reduzida.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica proposta e avaliada neste trabalho para a localização precisa de linhas de controle em imagens orbitais, a partir de imagens terrestres nadirais de alta resolução, pode ser considerada original. A metodologia para a aquisição das imagens e cálculo da correspondência mostrou-se funcional e possibilita uma automação na determinação da posição de pontos na imagem utilizando perfis radiométricos. O procedimento pode também ser aplicado para imagens aéreas.

Os resultados alcançados neste trabalho não mostraram um significativo aumento na precisão no processo de orientação de imagens ao utilizar as coordenadas de pontos determinadas com precisão subpixel, pelo processo de correspondência por MQ, quando comparado ao método de medida convencional, onde o usuário localiza os pontos

interativamente. No entanto, é válido ressaltar que este é um trabalho com resultados preliminares e que estão em desenvolvimento vários processos para melhoria da técnica aqui apresentada. Outros fatores a serem considerados são: o baixo contraste da imagem orbital utilizada; a diferença de resolução entre esta imagem e as imagens de controle, de aproximadamente 35 vezes, não percebendo-se grande influência da medida com precisão subpixel; a fraca geometria ao considerar apenas uma faixa estreita na imagem, o que também contribui para diminuir a qualidade dos resultados.

Os resultados mostraram que a técnica de aquisição de imagens e as informações subpixel possuem potencial para melhorar o processo de estimação da orientação das imagens, sendo ainda mais relevante quando são utilizados poucos pontos de apoio. Neste sentido, o trabalho foi importante para se definir uma estratégia futura para a orientação de imagens orbitais e aéreas a partir de cenas terrestres de controle.

Em trabalhos futuros, espera-se aumentar a precisão do processo de orientação indireta de imagens com menor resolução utilizando imagens terrestres com uma nova lente *fish-eye* de melhor qualidade, que proporciona imagens com menores distorções e aberração cromática. Pretende-se, ainda, utilizar a técnica que utiliza vários perfis extraídos em uma mesma linha e aplicá-la para orientação de imagens orbitais de maior resolução que as imagens PRISM/ALOS, bem como para imagens aéreas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de externar seus agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio a esta pesquisa na forma de uma bolsa PIBIC e auxílio à pesquisa (Edital Universal, proc. 477738/2009-5). Agradecem, ainda, ao aluno Marcus V. A. Moraes pela inestimável ajuda na montagem do dispositivo de aquisição de imagens terrestres e nos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, M. B.; OLVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; MARCATO JUNIOR, J. Análise da viabilidade de calibração de uma câmara *fish-eye* utilizando os modelos de colinearidade e conrady-brown. In: IIV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2011, Curitiba, Pr. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2011.

ERDAS IMAGE 2011[®]. Licença de Uso - Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT- UNESP – Presidente Prudente.

FORSTNER, W. Image Matching. In: HARALICK, R.; SHAPIRO, L. G. **Computer and Robot Vision**. Addison-Wesley Publishing Company, 1993. v. 2, cap. 16, p. 289-378.

GIMP 2.6 , Image manipulation program .Disponível em: <<http://www.gimp.org/download> > Acesso em: 20 de março de 2011.

KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **Photogrammetric Record**, v.21, n. 114, p. 110-123, 2006.

KRAUS, K. Photogrammetry: Fundamental and Standard Processes. Bonn: Dümmlers Verlag, 1993, v. 1, p. 397, (ISBN 3-427-78684-6).

MARCATO JUNIOR, J., TOMMASELLI, A. M. G, MEDEIROS, N. G., OLIVEIRA, R. A. Bundle block adjustment of CBERS 2B HRC images using control lines. In: Canadian Geomatics Conference 2010 and the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing Commission I, 2010, Calgary. **Proceedings...** Calgary: Canadian Institute of Geomatics and ISPRS, 2010.

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, PR, v. 10, n. 1, p. 65-82, 2004.

TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the Indirect Orientation of Orbital pushbroom Images Using Control Straight Lines. **Photogrammetric Record**, v.25, p.159 - 179, 2010.