

Ortorretificação de imagens SAR do R-99

Ricardo de Queiroz Veiga¹
Marcus Vinicius Teixeira Monteiro¹

¹ Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
{veiga, monteiro}@ieav.cta.br

Abstract. This paper describes the orthorectification algorithm of SAR images collected by the Brazilian Air Force R-99. It is based in the terrain backward reconstitution where the known topography is mapped to the SAR image coordinates. This method is used to remove image geometric distortions that prevent or difficult mosaic construction and generation of cartographic products. The proposed method is applied to the images generated by the R-99 Ground SAR Processor (GSP), collected in the year of 2006, and it uses either the relative digital elevation model (RDEM) generated by the GSP or the SRTM data. Results show that it is possible to generate mosaics with minimal error but the R-99 position information needs to be corrected.

Palavras-chave: ortorretificação, SAR/R-99, GSP, SRTM, sensoriamento remoto, cartografia.

1. Introdução

O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) está se tornando cada vez mais importante graças à sua habilidade de coleta de dados que quase independente das condições atmosféricas e da iluminação. Por essa razão, o SAR pode ter um papel importante em diversas aplicações, incluindo a produção de mapas.

Quando um modelo digital de elevação (DEM) da área geográfica observada é disponível, um processo ortorretificação pode ser aplicado Cossu et al (2007), permitindo a correção de algumas das distorções geométricas da imagem SAR. Essa correção torna-se importante quando há necessidade de se extrair informações dimensionais precisas das imagens ou quando se deseja produzir mosaicos de imagens coletadas em momentos distintos ou por outros sensores.

1.1 Sistema de projeção

O SAR utiliza uma visada lateral para o imageamento enquanto os sensores óticos costumam utilizar visada quase vertical (nadir). Cada tipo de visada e sensor, associados às variações de elevação do terreno, produzem distorções geométricas distintas nas imagens que devem ser corrigidas. Na figura 1, o diagrama da esquerda apresenta o posicionamento dos pontos do relevo segundo o plano de visada do SAR. No diagrama da direita, esses mesmos pontos são projetados ortogonalmente no plano equipotencial gravitacional, sem as distorções de georreferenciamento.

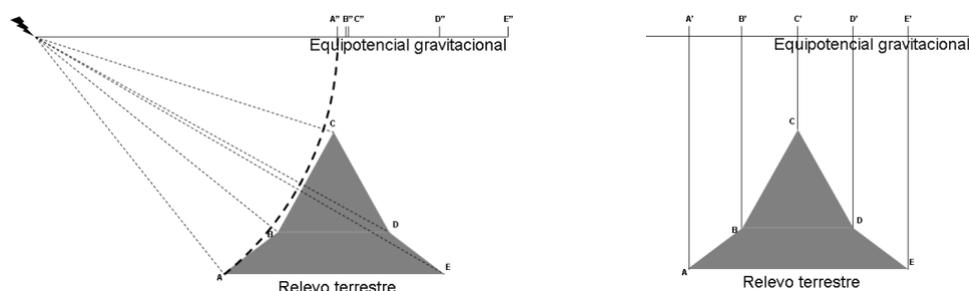


Figura 1- Geometria da imagem SAR (esq) e geometria da imagem ortorretificada (dir)

A ortorretificação SAR é normalmente realizada em três etapas: 1) uma imagem SAR é simulada a partir de um DEM disponível da área de interesse e com base nos parâmetros utilizados pelo sensor durante a coleta de dados; 2) a imagem simulada e a imagem original são registradas Cruz et al. (2005) (manualmente ou automaticamente); 3) cada um dos pixels

da imagem original (registrada) é associado a uma informação de altitude e a correção geométrica é aplicada.

A utilização dos modelos do terreno produzidos pelo SRTM para áreas com características de baixa variação de altitude Santos et al. (2005) e a utilização de DEM produzido a partir dos dados do próprio SAR foram investigados neste trabalho.

1.2 Dados SAR do R-99

Neste trabalho foram utilizados os produtos gerados pelo processador de solo do SAR (Ground SAR Processor – GSP) que contém informações sobre os parâmetros de operação do radar e sobre a trajetória de coleta, permitindo restituir a geometria de aquisição de dados necessária para o processo de ortorretificação.

O SAR possui um modo interferométrico Leung (2000) capaz de produzir imagens da banda L e banda X e modelos de elevação do terreno a partir de uma única coleta, facilitando o processo de registro das imagens com o modelo do terreno. As características dos produtos desse modo são apresentadas na tabela 1. O RDEM é o modelo digital de elevação do terreno e as informações de altura são relativas, pois o SAR, sozinho, não é capaz de determinar a altitude absoluta dos pontos do terreno. O R-99 possui duas antenas da banda X para produzir as imagens complexas SLC que são utilizadas no processamento interferométrico de geração do modelo digital de elevação. As imagens da banda L são produzidas a partir de uma das antenas instaladas na lateral da fuselagem da aeronave e podem corresponder a uma ou às quatro combinações de polarizações possíveis. Como essas imagens são coletadas simultaneamente, o processo de registro é facilitado já que a trajetória do radar é a mesma para todos os produtos.

Tabela 1. Produtos do R-99 para o modo interferométrico.

Produto	Pixel rg	Pixel az	Largura	Comprimento
RDEM	5 m	5 m	10,065 km	9,75 km
SLC	2,49 m	4,884 m	9,991 km	13,793 km
Banda L	1,5 m	1,5 m	10,185 km	10,185 km

O GSP assume para a síntese das imagens e do RDEM que a trajetória ideal da sua antena é realizada em um arco de elipse contido no plano definido pelo ponto inicial da trajetória, ponto final da trajetória e centro do elipsóide terrestre definido para o WGS 84.

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados em 2006 para a realização da avaliação da capacidade de geração de produtos cartográficos a partir de imagens SAR do R-99. Foram utilizadas duas áreas de estudo que incluíam regiões montanhosas, planas, urbanas e rurais. Uma área inclui o município de São José dos Campos – SP parte do Vale do Paraíba e da Serra da Mantiqueira. A outra área inclui o município de Formosa – GO e contém áreas relativamente planas da zona rural e umas poucas regiões acidentadas.

2. Metodologia

A metodologia de ortorretificação desenvolvida para este trabalho dispensa a utilização de pontos de controle para essa tarefa Mercer (2003), mas, ao invés de utilizar funções polinomiais, ela é baseada na geometria de aquisição de dados e na informação de elevação do terreno gerada pelo próprio SAR ou por uma outra fonte na ausência da primeira.

A correção geométrica aplicada às imagens do GSP depende do conhecimento da posição tridimensional de cada um dos pixels do terreno, na imagem ortorretificada, para que possa ser calculada a sua distância em relação à trajetória do radar e, a partir dela, determinar o pixel correspondente na imagem de origem. No caso dos produtos interferométricos, isso é facilitado porque o modelo de elevação é criado a partir da mesma geometria de aquisição da imagem SAR. Portanto, mesmo que haja algum erro planimétrico associado, ele não implica em um erro altimétrico, já que o RDEM apresenta o mesmo deslocamento. Entretanto, esse

método depende da qualidade do modelo produzido pelo GSP, que é deteriorada em regiões montanhosas com muitas sombras, em áreas urbanas ou em regiões alagadas.

2.1 Algoritmo

A ortorretificação desenvolvida neste trabalho inicia com a geração pelo GSP dos pares de imagens SLC utilizadas para a criação do modelo de elevação. Esse processamento dura cerca de 30 minutos e depende do operador apenas para definir os seus parâmetros iniciais. Ao seu término, o GSP apresenta uma interface gráfica para o operador identificar e corrigir grupos dentro da imagem cujo ajuste de fase (offset) não esteja de acordo com o esperado. Concluído esse ajuste, o GSP exporta duas imagens SLC da banda X e um RDEM. Para a geração das imagens amplitude da banda L, é necessário que o operador reutilize o GSP selecionando essa banda e a polarização desejada. Esses dados (fig. 2) são utilizados para a ortorretificação (OrtoSAR) com a possibilidade de emprego do DEM do SRTM para refinamento do RDEM ou para a sua substituição.

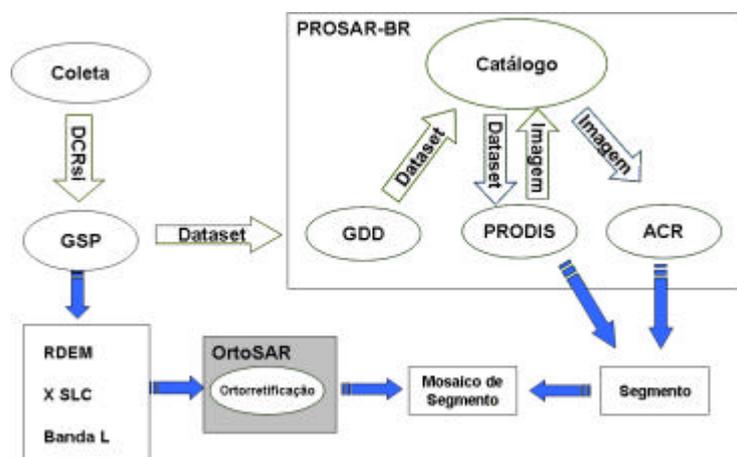


Figura 2. Fluxo de processamento

O algoritmo de ortorretificação (fig. 3) emprega o método backward de ortorretificação descrito por Okeke (2006) porque facilita a geração de uma imagem com espaçamento regular entre pixels. A imagem SAR produzida pelo GSP contém informações sobre as coordenadas geográficas (lat, lon) dos seus vértices e sobre os pontos iniciais e finais da trajetória do radar utilizados no seu processamento. Essas coordenadas dos quatro vértices da imagem são utilizadas para determinar a grade regular em coordenadas geográficas sobre a qual a ortoimagem é construída. O espaçamento entre os pontos dessa grade foi escolhido como sendo o menor espaçamento geográfico da imagem original para preservar a informação espacial. Como a posição geográfica desses pontos é conhecida, a altitude deles pode ser obtida de um RDEM ou de outro modelo, como o SRTM, para se determinar a coordenada cartesiana 3D da mesma. Com o conhecimento da posição espacial do ponto (x, y, z), é possível determinar a sua posição relativa à trajetória do SAR e, por consequência, a sua coordenada (i,j) relativa à imagem original. Essa coordenada de imagem é utilizada para recuperar o valor do pixel (σ) a ser atribuído ao ponto selecionado da ortoimagem.

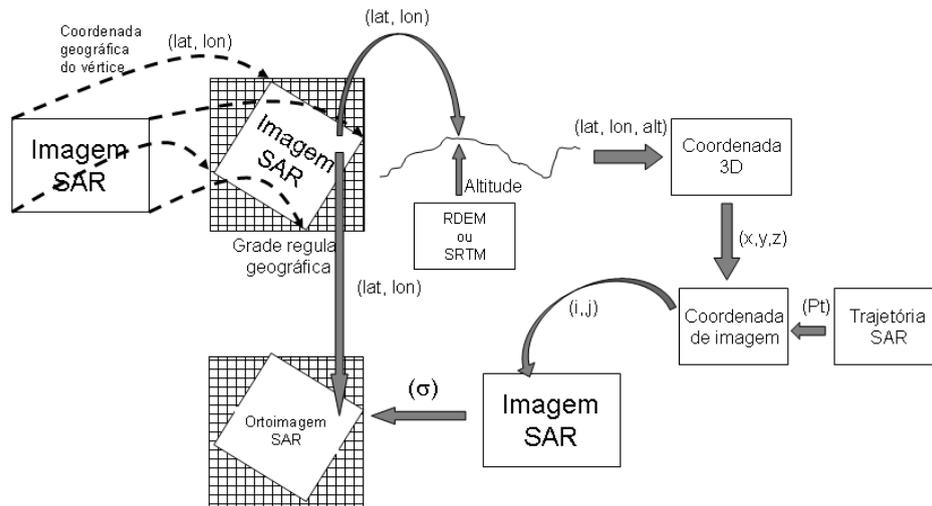


Figura 3. Ortorretificação SAR

O vetor posição (Pt) é definido a partir da perpendicular (un) ao plano (α) da trajetória de coleta e da vertical local (uh), conforme apresentado na figura 4. Por sua vez, a vertical local depende da posição do radar e a sua determinação pode ser realizada por processo iterativo de aproximação. Nesse cálculo surgem equações elípticas para as quais foram desenvolvidas algumas aproximações como a da equação 1. A determinação do ângulo (β) da vertical local com o plano equatorial é calculada por uma função trigonométrica simples a partir do ângulo (θ) do vetor posição (Pt) com esse mesmo plano. Os parâmetros (a) e (b) são os semi-eixos do elipsóide terrestre.

$$\tan \alpha \simeq \frac{a^2}{b^2} \tan \theta \quad (1)$$

O processamento do GSP produz imagens em um sistema de coordenadas que representa a posição do radar em sua trajetória e a distância do alvo em relação ao mesmo. Essas coordenadas representam, respectivamente, o azimute (i) e o alcance (j). No processo de síntese da imagem, a trajetória do radar é contida no plano α definido pelo ponto inicial e final da trajetória e pelo centro do elipsóide terrestre. Os pixels da imagem correspondem a uma posição perpendicular à trajetória a partir da posição Pt sobre a mesma. Ou seja, para cada posição Pt do radar, é gerada uma linha na imagem contendo os pontos da superfície terrestre contidos no plano perpendicular à trajetória em Pt. Dessa forma, conhecida a posição Pa da imagem ortorretificada, é possível determinar a posição Pt correspondente do radar e a distância r do terreno ao radar. Finalmente, conhecidas a posição do radar e a distância r, determina-se a coordenada (i, j) do pixel na imagem SAR original.

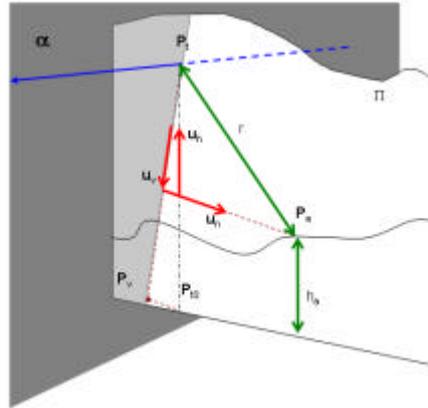


Figura 4. Geometria de aquisição.

A primeira aproximação para a determinação de P_t começa pela determinação do ponto P_{α} da projeção ortogonal de P_a sobre o plano α .

$$\vec{u}_t = \vec{P}_f - \vec{P}_i$$

$$r_i = |\vec{u}_t|$$

$$\vec{P}_{\alpha} = (\vec{u}_n \bullet (\vec{P}_i - \vec{P}_a)) \vec{u}_n + \vec{P}_a \quad (2)$$

Da posição P_{α} determina-se o ângulo θ e, aplicando na equação (1), determina-se o ângulo α da vertical local u_h que passa por esse ponto. Finalmente, a posição de P_t é obtida pela intersecção do plano definido pelos vetores u_h e u_n com a trajetória. O cálculo vetorial pode ser feito por aproximações sucessivas de rápida convergência utilizando a vertical local e o fato da trajetória possuir altitude constante.

$$\vec{P}_t = \delta_h \vec{u}_h - (\delta_h \vec{u}_h \bullet \vec{u}_n) \vec{u}_n + \vec{P}_{\alpha} \quad (3)$$

Finalmente, pode-se determinar a posição do pixel na imagem SAR através da distância r e da posição P_t . Para determinar a coordenada (i, j) , utiliza-se ainda a distância inicial de amostragem r_0 , a distância em alcance entre os pixels δ_r , a posição inicial da trajetória P_i e a distância azimutal entre pixels δ_a .

$$i \cong \frac{|P_t - P_i|}{\delta_a} \quad (4)$$

$$j \cong \frac{r - r_0}{\delta_r} \quad (5)$$

2.2 Avaliação

Como o escopo deste trabalho não inclui a avaliação cartográfica das ortoimagens, a verificação da qualidade dos resultados é realizada através da comparação do registro cruzado entre as ortoimagens que possuem superposição. O parâmetro utilizado é a distância obtida entre as coordenadas dos pixels de cada uma das imagens que representam a mesma feição no solo.

3. Resultados

A avaliação quantitativa da qualidade cartográfica não faz parte do escopo deste trabalho. Os resultados aqui apresentados referem-se apenas ao desempenho computacional e à capacidade de ortorretificação.

O erro máximo nas aproximações utilizadas para o cálculo de posição do radar ocorre para uma trajetória no eixo leste-oeste próxima ao paralelo de 45° (Figura 5). Para as coletas do R-99, realizadas a 10 km de altitude, esse erro não ultrapassa 5 mm na determinação da altura da trajetória para duas iterações, sendo considerado desprezível para a ortorretificação.

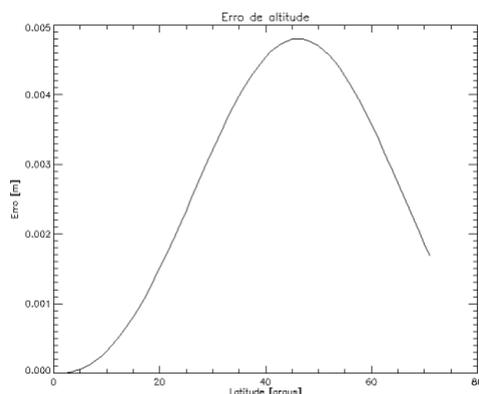


Figura 5 - Erro de altitude na determinação de Pt com duas iterações.

O algoritmo desenvolvido para esse trabalho permite ortorretificar as imagens amplitude da banda L e as imagens SLC da banda X produzidas pelo GSP. O algoritmo é capaz de utilizar tanto o RDEM do GSP quanto o DEM do SRTM. O algoritmo não requer a determinação de pontos de controle no solo para permitir a automação e o aumento da capacidade de processamento dos dados do R-99.

As coletas realizadas em São José dos Campos ocorreram em condições atmosféricas desfavoráveis que prejudicaram a qualidade das imagens e dos RDEM produzidos para vários dos segmentos. Distorções geométricas eram perceptíveis entre algumas imagens ortorretificadas com o RDEM de um mesmo segmento de coleta. Em várias cenas é possível observar a presença de chuva forte entre o radar e área imageada. Isso provocou a perda de coerência do sinal e inviabilizou a utilização do RDEM para a ortorretificação. Nestes casos, utilizaram-se apenas as informações de elevação do SRTM.

Os dados coletados em Formosa – GO foram afetados pelas condições atmosféricas e apresentaram melhores resultados para a ortorretificação. Para as imagens geradas a partir de coletas distintas, mas com a mesma direção de iluminação, foi possível construir mosaicos ortorretificados sem problemas de descasamento de feições. A precisão do posicionamento absoluto está sendo avaliada em outro trabalho. Na Figura 6, as imagens obtidas de coletas distintas não apresentaram deslocamento relativo entre os pixels. Neste caso, as coletas foram realizadas com a mesma visada de sul para norte. Já na Figura 7, as coletas foram realizadas com visadas opostas. As ortoimagens resultantes apresentaram um descasamento relativo de 642 metros. Foi observado que o descasamento das imagens ocorre predominantemente na direção do alcance do radar e concluiu-se que ele é resultante do erro altimétrico do sistema de posicionamento do radar. Na direção do azimute, o descasamento médio observado foi de apenas um pixel (2,5 metros). Esses resultados sugerem que a utilização de um ponto de controle no solo permitiria corrigir o erro altimétrico e melhorar substancialmente a qualidade das ortoimagens produzidas de vários segmentos de coleta de dados.

O reprocessamento das imagens com uma mesma correção de altitude de trajetória para as coletas possibilitou reduzir o descasamento da feição de referência para apenas 2 metros. Mesmo assim, outras partes da cena continuaram apresentando descasamento de vários pixels

na direção do alcance, de onde se conclui que o modelo de elevação utilizado apresenta erros e que o erro altimétrico das trajetórias não era o mesmo.

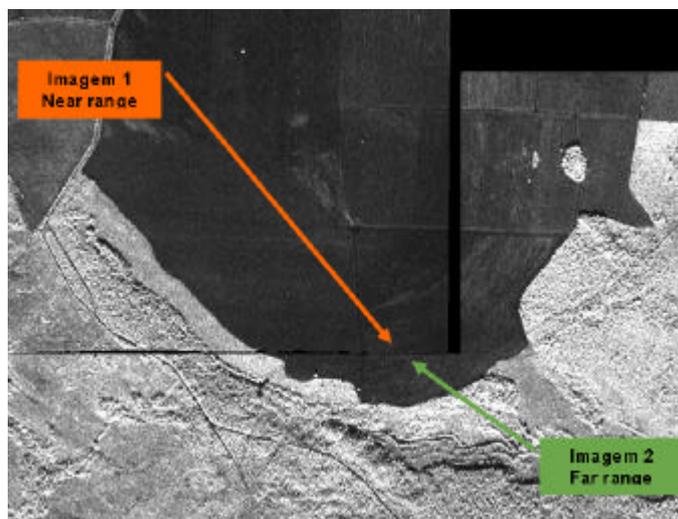


Figura 6. Exemplo de ortomagens de dois segmentos distintos onde há o casamento das feições. As descontinuidades entre as imagens foram propositais para distingui-las.

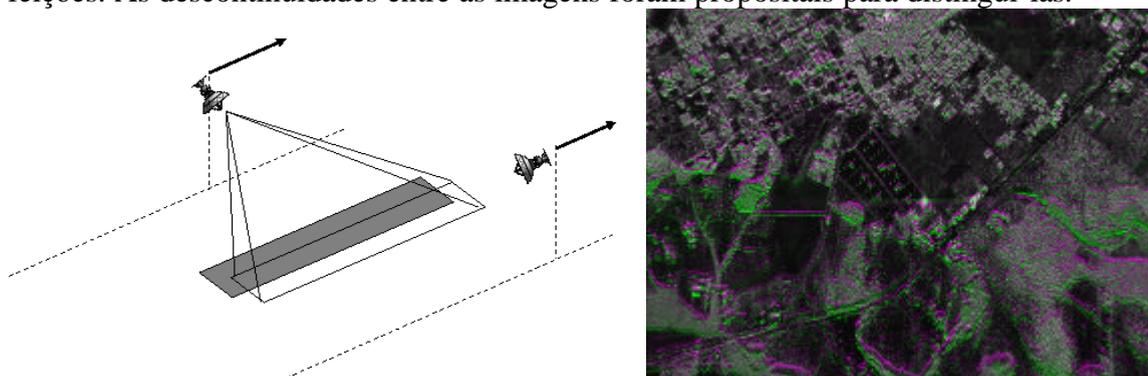


Figura 7. Diagrama das coletas paralelas com visadas opostas e a composição das ortomagens resultantes após a correção da altitude do radar.

4. Conclusão

O algoritmo desenvolvido neste trabalho permite realizar a ortorretificação das imagens SAR produzidas pelo Ground SAR Processor. A utilização do método reverso de mapeamento dos pixels da ortomagem facilita a utilização de espaçamento entre pixels igual ou menor que o da imagem original.

As imagens utilizadas neste trabalho foram todas produzidas a partir do modo interferométrico do radar. Como o algoritmo permite a utilização de DEM gerado por outra fonte, ele também pode ser aplicado para os outros modos de imageamento do SAR, incluindo os modos de média e baixa resolução. Trabalhos futuros podem avaliar a qualidade cartográfica das ortomagens geradas a partir desses outros modos.

A avaliação dos resultados baseada no descasamento das ortomagens mostrou que o R-99 pode apresentar um erro altimétrico de várias centenas de metros para a informação de altitude da trajetória. Porém, é possível remover substancialmente esse erro através de uma imagem de visada oposta cobrindo uma área de referência. Sugere-se que um algoritmo de remoção automática do erro altimétrico seja desenvolvido e incorporado à ortorretificação de imagens SAR do R-99.

Referências bibliográficas

- Cossu R.; et al. **Global Automatic Orthorectification of ASAR Products in ESRIN G-POD**, Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007, ESA Procedures. Disponível em <<http://earth.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/3F1/508536co.pdf>>. Acesso em 17.nov.2008
- C. B. M. Cruz, R. S. Barros, R. B. Reis, Ortorectificação de imagens CBERS2 usando DEM do SRTM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 899-906. CD-ROM.
- P. R. A. Santos, C. Gaboardi, L. C. Oliveira, Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 4473-4480. CD-ROM.
- F. I. Okeke. **Review of Digital Image Orthorectification Techniques**. Disponível em <http://www.gisdevelopment.net/magazine/years/2006/july/36_1.htm>. Acesso em 18.set.2008.
- S. Leung, **SIVAM Airborne SAR System Operations Manual**, MacDonald Detwiller, Richmond, BC, Canadá, 18.abril.2000.
- J. B. Mercer, J. Allan, N. Glass, J. Rasmussen, M. Wollersheim, **Orthorectification of Satellite Images Using External DEMS from IFSAR**, Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2003", Hannover, Germany, October 6-8th, 2003