

Avaliação de Técnicas de Fusão de Imagens Aplicadas ao Sensor NAOMI-1/FASAT

Cibele Teixeira Pinto^{1,2}
Leila Maria Garcia Fonseca¹
Flávio Jorge Ponzoni¹
Ruy Morgado de Castro^{2,3}

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cibele, leila, flavio}@dsr.inpe.br

² Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 - 12.231-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cibele, rmcastro}@ieav.cta.br

³ Universidade de Taubaté – UNITAU
Caixa Postal 515 - 12201-970 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

Abstract. Image fusion process consists in combining of two or more images into a single image. It retains significant characteristic of each original images used. Fusion of multispectral images (low spatial resolution) with panchromatic images (better spatial resolution) has become a common procedure in many remote sensing applications, for instance. Several techniques for image fusion have been proposed, however, each one presents limitations. This study aims to evaluate 4 (four) techniques of image fusion (Principal Component Analysis, Gram-Schmidt, Hue Saturation Intensity and High-Pass Filter) applied to the Chilean NAOMI-1 sensor images aboard of FASAT satellite. The performance of the 4 (four) techniques was evaluated using 5 (five) quantitative methods: 3 (three) of them assessing the preservation ability of the spectral content (mean of bias, difference variance and correlation coefficient) and 2 (two) of them evaluating the details transference in the spatial domain (coefficient correlation and HCC method). All fusion techniques tested were considered satisfactory. The correlation between the resulted images and the original multispectral ones was approximately 0.9 for all tested techniques, indicating high fidelity of spectral content. Regarding the assessment of spatial quality, HCC method showed that PC and Gram-Schmidt techniques presented better applicability on study images fusion, with an average correlation values equal to 0.9, indicating high level of spatial information transferring.

Palavras-chave: remote sensing, image fusion, Chilean NAOMI-1 sensor, sensoriamento remoto, fusão de imagem, sensor Chileno NAOMI-1.

1. Introdução

Para aproveitar completamente as informações geradas por sensores de observação da Terra, diversos métodos e técnicas de processamento digital de imagens têm sido propostos. Entre os métodos existentes destaca-se a fusão de imagens, que combina imagens de diferentes resoluções espectrais e espaciais para gerar uma nova imagem sintética com melhor resolução espacial do que a imagem multiespectral original (NIKOLAKOPOULO, 2008).

A fusão de imagens multiespectrais de baixa resolução espacial com imagens pancromáticas com melhor resolução espacial tornou-se um processo frequente em diversas aplicações de sensoriamento remoto, especialmente em área urbanas. Durante os últimos anos, muitas técnicas de fusão foram propostas e desenvolvidas, como por exemplo: *Principal Component Analysis* (PC), *Intensity Hue Saturation* (IHS), *Wavelet Transform*, *Gram Schmidt* e *Brovey Transformation* (KALPOMA e KUDOH, 2007; CHAVEZ *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1995; LABEN e BROWER, 2000). Entretanto, apesar de gerar imagens fundidas de boa qualidade, cada técnica de fusão apresenta limitações (NIKOLAKOPOULO, 2008).

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de 4 (quatro) técnicas de fusão aplicadas ao sensor NAOMI-1 colocado abordo do satélite FASAT: (a) PC (Principais Componentes); (b) *Gram-Schmidt*; (c) IHS e (d) *High-Pass Filter* (HPF). As quatro técnicas foram avaliadas levando em consideração o seu desempenho relacionado à

qualidade espacial (transferência de detalhes) e espectral (conservação do conteúdo espectral). Os métodos para avaliação da qualidade espectral utilizados foram baseados em três parâmetros estatísticos: *Bias of Mean*, diferença da variância e o coeficiente de correlação (entre a imagem multiespectral original e a fusionada). Para a avaliação da qualidade espacial foi utilizado o método HCC (*High-Pass Correlation Coefficients*) e o coeficiente de correlação (entre a imagem pancromática original e a fusionada).

2. Sensor NAOMI-1/FASAT

O sensor chileno *New AstroSat Optical Modular Instrument-1*(NAOMI-1) abordo do satélite FASAT foi lançado em 16 de dezembro de 2011. Na **Tabela 1** são apresentadas as características gerais desse sensor.

Tabela 1: Características técnicas gerais do sensor NAOMI-1 abordo do satélite FASAT. Fonte: SAF (2013).

Característica	NAOMI-1
Tipo do Sensor	<i>Pushbroom</i>
Altitude	620 km
Hora Passagem (Equador)	10:30 h
Bandas Espectrais	PAN: 450-750 nm Azul: 450-520 nm Verde: 530-590 nm Vermelho: 625-695 nm NIR: 760-890 nm
Resolução Espacial	PAN: 1,45 m (nadir) MS: 5,8 m (nadir)
Resolução Radiométrica	10 bits
Resolução Temporal	37 dias (nadir)

É apresentada na **Figura 1** a Função de Resposta Espectral (FRE) das cinco bandas espectrais do sensor NAOMI-1. Analisando esta figura, verifica-se que a banda pancromática recobre todo o intervalo das bandas da região do visível (azul, verde e vermelho), fator importante na conservação de cores da imagem sintética fusionada.

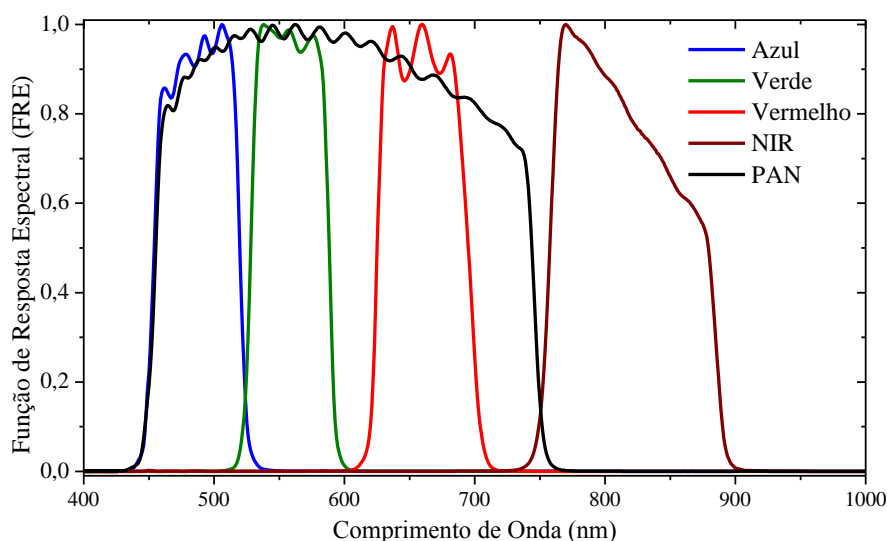


Figura 1: Função de Resposta Espectral das bandas do sensor NAOMI-1. Fonte: SAF (2013).

3. Metodologia

A área de estudo utilizada para a realização dos testes de fusão de imagens compreende a parte das áreas urbana e rural do município de Chillán, localizada na Região de Biobío, no Chile. As fusões foram realizadas utilizando as imagens pancromática e multiespectral adquiridas pelo sensor NAOMI-1/FASAT no dia 29 de março de 2012. As imagens foram obtidas com ângulo de elevação solar de 42°. A resolução espacial das imagens foram 7,5 e 1,85 m, respectivamente, para as bandas multiespectrais (azul, verde, vermelho e NIR) e banda pancromática. Na **Figura 2** é apresentada a composição colorida da imagem NAOMI-1/FASAT da área de estudo.

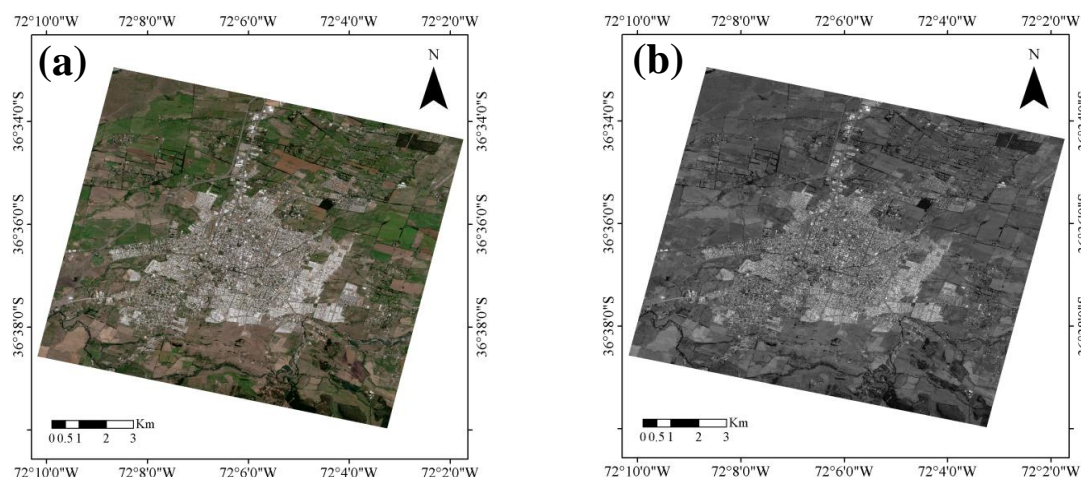


Figura 2: Localização da área de estudo. Em (a) Imagem do sensor NAOMI-1 multiespectral, resolução espacial de 7,5 metros (composição colorida cor verdadeira); (b) Imagem do sensor NAOMI-1 da banda pancromática, resolução espacial de 1,85 metros.

Na **Figura 3** encontra-se o fluxograma geral do trabalho. Analisando esta figura, verifica-se que o trabalho foi dividido em duas partes: (a) fusão das imagens por meio das quatro técnicas; e (b) avaliação das imagens resultantes das técnicas aplicadas.

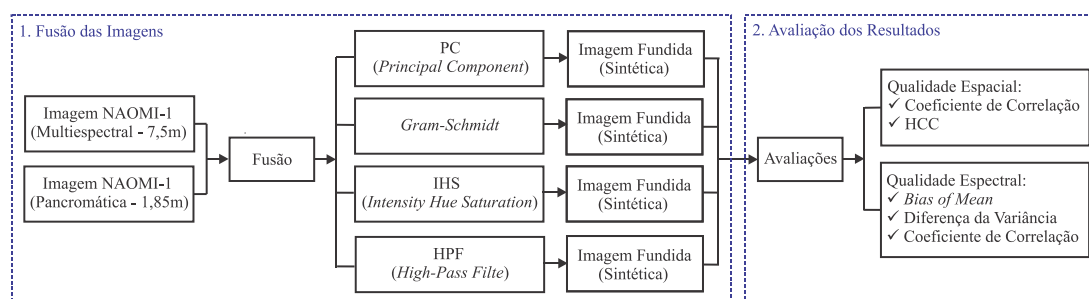


Figura 3: Fluxograma geral do trabalho.

3.1 Fusão das Imagens

A primeira etapa do trabalho envolveu a aplicação das técnicas de fusão. As imagens referentes às bandas multiespectrais e à pancromática do sensor NAOMI-1/FASAT foram fusionadas com o objetivo de melhorar a resolução espacial das imagens multiespectrais. Para tanto foram aplicadas quatro técnicas de fusão: *Principal Component Spectral Sharpening* (PC) (KALPOMA e KUDOH, 2007; RSI, 2004), *Gram-Schmidt Spectral Sharpening* (*Gram-Schmidt*) (LABEN e BROWER, 2000; RSI, 2004), *Intensity Hue Saturation* (IHS) (KALPOMA e KUDOH, 2007) e *High-Pass Filter* (HPF) (CHAVEZ *et al.*, 1991). As duas primeiras foram executadas no programa ENVI 4.7 e as duas últimas no programa ERDAS 9.2.

Vale ressaltar que no método IHS só é possível trabalhar com três bandas espectrais, portanto, optou-se por utilizar as bandas correspondentes ao espectro eletromagnético da região do visível (azul, verde e vermelho) para realizar a fusão com a pancromática. No caso das técnicas PC, *Gram-Schmidt* e HPF, que não possuem limitação quanto ao número de bandas espectrais a serem utilizadas no processo de fusão, foram usadas as quatro bandas multiespectrais disponíveis do sensor NAOMI-1/FASAT.

3.2 Avaliação das Imagens Resultantes Fusionadas

Na etapa seguinte foram avaliados os resultados obtidos com cada um das quatro técnicas de fusão realizadas. É necessário aferir a capacidade de transferência de detalhes (qualidade espacial) e a fidelidade do conteúdo espectral (qualidade espectral) da imagem sintética resultante (NIKOLAKOPOULO, 2008). Para tanto foram utilizados critérios quantitativos.

3.2.1 Qualidade Espectral

A avaliação da qualidade espectral da imagem resultante foi realizada através da análise de parâmetros estatísticas das imagens: *Bias of Mean*, diferença da variância e coeficiente de correlação. O índice *Bias of Mean* (**Equação 1**) corresponde à diferenças entre as médias das imagens (original e fundida) relativo à média da imagem original. Segundo Han *et al.* (2008) a diferença entre as médias da imagem resultante e da imagem multiespectral original deve ser, idealmente, nula.

$$Bias\ of\ Mean = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\bar{x}} \quad (1)$$

onde: \bar{x} e \bar{y} são, respectivamente, o valor médio dos pixels da imagem multiespectral original e fundida.

A avaliação baseada na Diferença da Variância (DV) (**Equação 2**) indica se ocorreu alguma perda ou algum ganho de informação na imagem durante o processo de fusão (TELLES JR, 2008). Valores positivos indicam perda de informação e valores negativos indicam ganho de informação. Em condições ideais espera-se obter valores negativo próximos de zero (TELLES JR, 2008).

$$DV = \frac{(\sigma_o)^2 - (\sigma_f)^2}{(\sigma_o)^2} \quad (2)$$

onde: σ_o^2 e σ_f^2 são, respectivamente, a variância da imagem original multiespectral e da imagem resultante fusionada.

O coeficiente de correlação (**Equação 3**), r , estabelece o nível da relação entre duas variáveis, neste caso entre a imagem resultante e a imagem multiespectral original. Idealmente o coeficientes de correlação entre as duas imagens deverá ser 1 (um) (HAN *et al.*, 2008), pois indicam alta semelhança na informações espectrais entre as bandas da imagem multiespectral original e as bandas da imagem fusionada.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c (x_{i,j} - \bar{x}) \times (y_{i,j} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c (x_{i,j} - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^c (y_{i,j} - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

onde: l e c são, respectivamente, o número de linhas e colunas das imagens; $x_{i,j}$ e $y_{i,j}$ são, respectivamente, o valor do pixel na imagem original e resultante na linha i e coluna j ; e \bar{x} e \bar{y} são, respectivamente, o valor médio dos pixels da imagem original e resultante.

Para ser possível determinar o coeficiente de correlação, as imagens fusionadas foram reamostradas para o tamanho do pixel da imagem original multiespectrais. Neste trabalho, o processo de reamostragem foi realizado utilizando a técnica de vizinho mais próximo.

3.2.2 Qualidade Espacial

A avaliação da qualidade espacial da imagem resultante foi realizada através da determinação do coeficiente de correlação e pelo método HCC (*High-Pass Correlation Coefficients*).

O coeficiente de correlação é determinado conforme a **Equação 3**, entretanto, neste caso (avaliação da qualidade espacial) ele foi determinado entre a imagem pancromática original e aquelas resultantes do processo de fusão. Já o método HCC é semelhante, pois consiste também no cálculo do coeficiente de correlação entre a banda pancromática e as bandas fusionadas. A diferença é que antes de calcular o coeficiente de correlação aplica-se um filtro Passa-Alta (*High Pass Filtering*) nas imagens fusionadas e na imagem pancromática (YAKHDANI, 2010). Ao se utilizar o filtro obtêm-se os dados de alta frequência, que está relacionada com a informação espacial. O processo de filtragem passa-alta consiste em mover uma máscara (**Equação 4**) pixel-a-pixel na imagem. Valores altos de correlação entre as componentes de alta frequência do resultado da fusão e a componente de alta frequência de imagem pancromática indicam que a informação espacial da imagem pancromática foi introduzida no resultado da fusão (YAKHDANI, 2010).

$$mask = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. Resultados e Discussão

Os resultados da fusão das imagens multiespectrais e pancromáticas do sensor NAOMI-1/FASAT utilizando os métodos IHS, principais componentes, *Gram-Schmidt* e HPF podem ser visualizados na **Figura 4**.

Analisando a **Figura 4**, pode-se observar que, visualmente, os objetos (estradas, vegetação e área urbana) que compõem as imagens geradas pelo processo de fusão apresentam mais detalhes dos que os mesmos objetos nas imagens originais. Entretanto, para uma análise quantitativa da qualidade espectral do resultado das fusões, os parâmetros estatísticos (*Bias of Mean*, diferença da variância -DV e coeficiente de correlação) são apresentados na **Tabela 2**.

O valor do *Bias of Mean* foi em média igual a 0,04 para as técnicas de fusão avaliadas, com exceção da técnica IHS, onde o valor médio do *Bias of Mean* foi igual a 0,06.

Em relação aos valores de DV obteve-se em média -0,3 para a técnica PC nas bandas do visível (azul, verde e vermelho) e 0,04 para a banda do infravermelho próximo. Para a técnica *Gram-Schmidt* o valor de DV foi aproximadamente -0,2 para as bandas do visível e 0,03 para a banda NIR. O valor de DV foi em média -0,08 para todas as bandas com a técnica de fusão HPF e 0,07 para a técnica IHS. Levando em consideração os valores de DV a pior técnica seria a PC para as bandas do visível, pois apresentou valores mais elevados. Já os valores mais baixos (próximo de zero) para as bandas do visível foram obtidos com as técnicas HPF e IHS.

O coeficiente de correlação (entre a imagem fundida e a imagem multiespectral original) foi maior do que 0,90 para todas as técnicas de fusão testadas, com exceção da técnica PC na banda do infravermelho próximo, onde o coeficiente de correlação foi de 0,88. Estes resultados indicaram que existe alta semelhança nas informações espectrais entre as bandas da

imagem multiespectral original e as bandas da imagem resultante fusionada para as quatro técnicas em questão.



Figura 4: Em (a) imagem original multiespectral; (b) imagem pancromática; (c) imagem resultante fusionada pela técnica principal componente; (d) imagem resultante fusionada pela técnica *Gram-Schmidt*; (e) imagem resultante fusionada pela técnica IHS (f) imagem resultante fusionada pela técnica HPF.

Tabela 2: Avaliação da qualidade espectral do resultado da fusão através das quatro técnicas avaliadas e para quatro bandas espectrais do sensor NAOMI-1 (azul, verde, vermelho e NIR).

Bias of Mean				
	Azul	Verde	Vermelho	NIR
PC	0,040	0,042	0,042	0,039
Gram-Schmidt	0,036	0,038	0,040	0,032
IHS	-0,091	0,070	0,209	#
HPF	0,045	0,044	0,045	0,037
Diferença da Variância (DV)				
	Azul	Verde	Vermelho	NIR
PC	-0,325	-0,314	-0,342	0,037
Gram-Schmidt	-0,196	-0,185	-0,210	0,028
IHS	0,058	0,068	0,077	#
HPF	-0,091	-0,078	-0,060	-0,104
Coefficiente de Correlação (entre a imagem multiespectral original e as fusões)				
	Azul	Verde	Vermelho	NIR
PC	0,917	0,915	0,926	0,880
Gram-Schmidt	0,927	0,925	0,931	0,916
IHS	0,926	0,928	0,929	#
HPF	0,907	0,905	0,901	0,900

A **Tabela 3** apresenta os resultados da análise da qualidade espacial das imagens resultantes fusionadas. Pela análise dos coeficientes de correlação (entre a imagem pancromática original e as fusões) verificam-se que os menores valores foram obtidos na banda do infravermelho próximo para as técnicas *Gram-Schmidt* e *HPF*, 0,88 e 0,81, respectivamente. Os demais coeficientes de correlação foram superiores a 0,92, indicando que a maioria da informação espacial da imagem pancromática foi transferida para a imagem resultante fusionada. Entretanto, para verificar melhor a capacidade de transferência de detalhes foi também utilizado o método *HCC*, sendo que neste caso obtiveram-se valores de correlação mais baixos. Os dois métodos que apresentaram piores resultados foram o *IHS* e *HPF* com valores de correlação aproximadamente 0,55 e 0,66, respectivamente. Para os outros dois métodos (*PC* e *Gram-Schmidt*) obteve-se, em média, correlação de 90%.

Tabela 3: Avaliação da qualidade espacial do resultado da fusão através das quatro técnicas avaliadas e para quatro bandas espectrais do sensor NAOMI-1 (azul, verde, vermelho e NIR).

Coefficiente de Correlação (entre a imagem pancromática original e as fusões)				
	Azul	Verde	Vermelho	NIR
PC	0,958	0,958	0,915	0,937
Gram-Schmidt	0,978	0,979	0,941	0,880
IHS	0,974	0,977	0,962	#
HPF	0,959	0,959	0,943	0,811
HCC (High-Pass Correlation Coefficients)				
	Azul	Verde	Vermelho	NIR
PC	0,910	0,895	0,823	0,934
Gram-Schmidt	0,949	0,947	0,896	0,880
IHS	0,551	0,558	0,556	#
HPF	0,661	0,658	0,657	0,661

5. Conclusões

Neste trabalho, foram avaliadas quatro técnicas de fusão aplicadas em imagens do sensor chileno NAOMI-1 abordo do satélite FASAT: IHS, principais componentes, *Gram-Schmidt* e HPF. Os resultados obtidos foram avaliados quanto à capacidade de transferência de detalhes e conservação do conteúdo espectral.

O processo de fusão foi realizado entre a imagem pancromática e a multiespectral do sensor NAOMI-1/FASAT. Foi possível notar, nas quatro técnicas testadas no trabalho, melhoria na visibilidade e na distinção dos alvos terrestres.

Através da análise quantitativa dos resultados obtidos, pode-se concluir que os desempenhos das técnicas de fusão de imagens testadas foram satisfatórios.

De acordo com os resultados, a correlação entre as imagens resultantes da fusão e as imagens multiespectrais originais foi aproximadamente de 0,9 em todas as técnicas avaliadas, mostrando alta fidelidade do conteúdo espectral.

Já em relação à avaliação de qualidade espacial, o método HCC indicou que as técnicas PC e *Gram-Schmidt* tem melhor aplicabilidade para a fusão das imagens do estudo, com valores de correlação em média igual a 0,9, indicando alta transferência da informação espacial.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa da Sra. Cibele T. Pinto e ao *Servicio Aerofotogramétrico* (SAF) do Chile pelo fornecimento das imagens NAOMI-1 utilizadas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- CHAVEZ, P.S. JR.; SIDES, S.C.; ANDERSON, J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 57, n. 3, p. 295–303, 1991.
- HAN, S.S.; LI, H.T.; GU, H.Y. **The study on image fusion for high spatial resolution remote sensing images**. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, 2008.
- KALPOMA, K. A.; KUDOH, J. Image Fusion Processing for IKONOS 1-m Color Imagery. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing (IEEE)**, vol. 45, n. 10, p. 3076-3086, 2007.
- LABEN, C. A., BROWER, B. V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. United States Eastman Kodak Company (Rochester, NY), **US Patent** 6011875, p. 1 – 9, 2000.
- LI, H., MANJUNATH, B.S.; MITRA, S.K. Multisensor image fusion using the wavelet transform. **Graphical Models and Image Processing**, vol. 57, n. 3, p. 234–245, 1995.
- NIKOLAKOPOULO, K. G. Comparison of Nine Fusion Techniques for Very High Resolution Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 74, n. 5, p. 647-659, 2008.
- RSI (Research Systems, Inc). **ENVI User's Guide**. ENVI Version 4.1 September, 2004. Disponível: <http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf> Acesso em: 10 jun. 2014.
- SERVICIO AEROFOTOGRAMÉTRICO (SAF). Aerial Photogrammetric Service & Space Operations Group. Chile Air Force. **FASAT-Charlie User's Guide**. Version 1.0, 2013. 56 p.
- TELLES JR, M. A. B. G. **Super-Resolução de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 2008. 118 p. Tese (Doutorado em Geologia – Área de concentração Processamento de Dados em Geologia e Análise Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília. 2008. Disponível em: <http://bdtd.bce.unb.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4333>. Acesso em: 10 jun. 2014.
- YAKHDANI, M. F. I; AZIZI, A. **Quality assessment of image fusion techniques for multisensor high resolution satellite images (case study: IRS-P5 and IRS-P6 satellite images)**. In: Wagner W., Székely, B. (eds.): ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B, 2010.