

Avaliação de transformadas wavelets para fusão de imagens SPOT 4 e comparação de classificações de uma imagem fusionada e de uma imagem SPOT 5

Suzana Rodrigues Vieira¹
Carlos Augusto Zangrando Toneli¹
Fausto Weimar Acerbi Jr.¹
Luis Marcelo Tavares de Carvalho¹

¹Universidade Federal de Lavras – UFLA
Caixa Postal 37 – 372000-000 – Lavras – MG, Brasil
suzana_floresta@yahoo.com.br
gutoufla@hotmail.com
fausto@ufla.br
passarinho@ufla.br

Abstract: Data fusion is a technique that has been developed aiming at the combination of information provided by different sensors in order to generate an output of better quality. The wavelet transform provides a fusion method in multiple scale levels and the advantage of enhancing spatial resolution with minimum spectral distortion. In this study, data fusion was applied to merge a multispectral image (20m spatial resolution) with a panchromatic image (10m spatial resolution) using the wavelet transform. After the fusion procedure, the quality of the resulting images was evaluated by statistical and visual approaches. The fused image and a SPOT 5 image were classified in order to evaluate the fusion product by an application oriented approach. It was concluded that the fusion generated by the B-spline wavelet transform outperformed the other methods. Furthermore, the classified images were similar, suggesting the fused product might be used to achieve classifications with higher spatial resolution.

Palavras-chave: remote sensing, data fusion, wavelet transform, classification, sensoriamento remoto, fusão de dados, transformada wavelet, classificação.

1. Introdução

Sensoriamento remoto é hoje uma ferramenta que nos fornece informações da cobertura vegetal da Terra, com diferentes resoluções espaciais, temporais e espectrais (Pohl et al., 1998). Uma alta resolução espacial é necessária para uma melhor caracterização da forma, estrutura e textura dos objetos, enquanto que uma alta resolução espectral permite a discriminação e conseqüente classificação de diferentes fisionomias numa imagem. Desta forma, várias técnicas de fusão de imagens vêm sendo desenvolvidas desde a década de 80, com o objetivo de produzir uma imagem com alta resolução espacial e espectral, visando uma diferenciação mais completa e acurada do objeto sob observação.

Segundo Wald (1999) a fusão de dados pode ser definida como uma estrutura de trabalho onde ferramentas e técnicas são desenvolvidas com o objetivo de combinar informações advindas de diferentes sensores. A utilização dessa técnica permite a obtenção de uma imagem de melhor qualidade, ou seja, a produção de uma única imagem que possua mais informações do que cada imagem individual utilizada na sua geração.

O tipo de fusão utilizado nesse trabalho é a integração de dados de alta resolução espacial e espectral. Nesse contexto, muitos métodos de fusão são propostos, como a transformada IHS (intensidade-matiz-saturação), a transformada de Brovey e a análise de Componentes Principais. Garguet-Duport et al., (1996) propuseram um estudo baseado nas transformações wavelets para combinar dados de SPOT multiespectral (MS) com pancromática (PAN)

produzindo uma imagem com 10m de resolução espacial. Yocky (1996) também utilizou transformações wavelets para integrar imagens TM-5 com a SPOT pancromática.

A transformada wavelet é uma técnica apropriada para a fusão de imagens, não somente porque proporciona a fusão de imagens utilizando diferentes escalas, mas também porque produz maiores coeficientes próximos as bordas das diferentes fisionomias, revelando assim informações espaciais relevantes (Piella, 2003). A vantagem da transformada wavelets, com relação aos outros métodos na fusão de imagens é que esta proporciona a melhoria na resolução espacial com uma mínima distorção espectral (Zhou et al., 1998; Ranchin and Wald, 2000; Carvalho et al., 2004).

Esta técnica baseia-se na decomposição dos sinais em funções elementares: as wavelets. A distribuição contínua da transformada wavelet $f(t)$ pode ser expressa por:

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

onde WT (a,b) é o coeficiente wavelet da função $f(t)$; ψ é a wavelet analisada e a ($a>0$) e b são os parâmetros de escala e translação, respectivamente. Este processo pode ser revertido e a imagem original reconstruída exatamente como antes.

Os objetivos deste trabalho foram: a) testar 3 métodos de transformadas wavelets, avaliando quantitativamente e qualitativamente os resultados das fusões e b) comparar a classificação da melhor fusão com a classificação da imagem SPOT 5.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo e dados de sensoriamento remoto

Foram utilizadas imagens do satélite SPOT 4 (imagens PAN e MS) e uma imagem do satélite SPOT 5 (MS) para retratar uma área localizada no município de Bom Jardim, no estado do Maranhão, cujo ponto central encontra-se na latitude 3°56'45" S e longitude 46°18'40" W.

Essas cenas foram cedidas pela empresa Imagem e foram tomadas em 14/07/2005 (SPOT 4) e 02/09/2005 (SPOT 5).

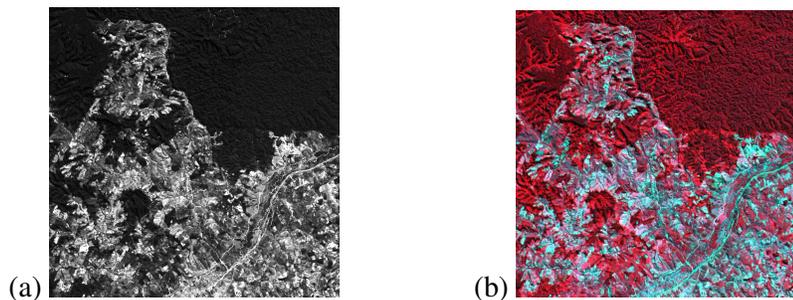


Figura 1: Imagem pancromática (a) e multiespectral (b) da área de estudo.

2.2 Pré-processamento das imagens

As imagens foram georreferenciadas através do software ERDAS na projeção WGS-84 Sul, Fuso 22. Para facilitar o processo da fusão extraiu-se uma sub amostra da imagem, onde a

imagem multiespectral apresentou 1024x1024 (linhas e colunas), enquanto a imagem pancromática apresentou 2048x2048. Este procedimento foi adotado por Oliveira (2005) para que as transformadas em múltiplas escalas que geram imagens ou pirâmides pudessem ser implementadas.

A imagem de alta resolução (PAN) teve sua média e desvio padrão equalizados para cada banda da imagem multiespectral, gerando assim 4 novas imagens pancromáticas.

2.3 Fusão das imagens

A transformada wavelet pode ser operacionalizada através de dois caminhos: (1) substituindo alguns coeficientes da imagem de menor resolução pelos coeficientes correspondentes da imagem de maior resolução (método de substituição) ou (2) adicionando coeficientes da imagem de alta resolução na imagem de baixa resolução (método de adição). No presente trabalho optou-se pelo método de substituição de sub-bandas, uma vez que este mostrou-se eficiente em estudos anteriores (Carvalho et al., 2004; Oliveira, 2005). Três diferentes transformadas wavelets foram testadas: a piramidal Laplacian, a piramidal no espaço Fourier e a B-spline, onde diferentes transformadas decompõem o sinal de formas distintas.

A transformada wavelet decompõe a imagem original f em muitas sub-bandas de diferentes níveis de resolução. Essas sub-bandas representam a imagem aproximação (a) e a imagem detalhe (d). A imagem aproximação representa os componentes de baixa frequência, enquanto a imagem detalhe representa os componentes de alta frequência (Ventura e Fonseca, 2002).

Praticamente todo o processo da fusão foi feito utilizando o programa MR/1 – Multiresolution Environment (Multi Resolutions Ltd., 2003). Para cada imagem pancromática equalizada foi feita apenas uma decomposição, já que a relação espacial entre a imagem pancromática 10m e a imagem multiespectral 20m é 2. O número de decomposições da imagem original é um fator muito importante, pois grandes números de decomposições podem gerar falhas no processo de fusão.

O próximo passo foi a substituição de cada banda multiespectral na referente imagem PAN equalizada, gerando uma imagem final fusionada com 4 bandas e resolução espacial de 10 m.

2.4 Avaliação da qualidade das fusões

Dois tipos de critérios foram propostos para a avaliação das imagens fusionadas. O primeiro considera a informação espectral, enquanto o segundo considera a qualidade da informação espacial. Desta forma, extraiu-se da literatura (Wald et al. 1997; Teggi et al, 2003; Acerbi-Junior et al., 2006) as principais medidas utilizadas para avaliar as imagens fusionadas (**Tabela 1**).

Tabela 1. Critérios e medidas para avaliar a qualidade da fusão das imagens

Critérios	Medidas
1) Informação espectral da imagem fusionada: a) O conteúdo espectral da imagem fusionada deve ser similar à imagem original. 2) Informação espacial da imagem fusionada: b) o tamanho, a forma e a localização das feições devem ser idênticas à imagem original.	1) Medidas qualitativas: Análise Visual 2) Medidas Quantitativas: a) Diferença de Média b) Diferença de Desvio Padrão c) Coeficiente de Correlação d) Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE)

A análise visual foi feita, julgando a melhor fusão de acordo com a similaridade espacial e espectral, com a imagem SPOT 4 MS.

Já o segundo critério utiliza estatísticas, quantificando diferenças espaciais e espectrais entre a imagem original e as imagens fusionadas. O primeiro passo foi calcular a diferença de média e desvio padrão, respectivamente, entre a imagem original MS e a imagem fusionada. O cálculo é feito separadamente para cada banda. O ideal é obter resultados nulos, demonstrando assim a semelhança entre as imagens.

Após isso, o coeficiente de correlação e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) foram calculados segundo as equações abaixo:

$$corr(A, B) = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \mu(A))(x'_{i,j} - \mu(B))}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \mu(A))^2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x'_{i,j} - \mu(B))^2}}$$

onde: A e B são as duas imagens, $n \times m$ é o número de elementos na imagem, $x_{i,j}$ e $x'_{i,j}$ são os elementos da imagem A e B respectivamente; $\mu(A)$ e $\mu(B)$ são os valores de média.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{i,j} - x'_{i,j})^2}{n \times m}}$$

onde: $n \times m$, $x_{i,j}$ e $x'_{i,j}$ são definidos anteriormente.

2.5 Classificação das imagens

O método de classificação isodata é um método que não utiliza amostras de treinamento para poder agrupar os pixels em classes. É por isso chamado de classificação não-supervisionada, onde o algoritmo baseia-se na análise de agrupamentos onde são identificadas no espaço de atributos as nuvens formadas por pixels com características espectrais similares (Carvalho, 2005).

A classificação é uma pós-avaliação da qualidade da fusão, pois os resultados podem então ser comparados à uma outra imagem de mesma resolução espacial, no caso SPOT 5 MS.

Antes de iniciar a classificação foi feito um registro das 2 imagens com os mesmos pontos de controle. A classificação isodata foi feita nas imagens fusionada B-spline e na imagem SPOT 5 MS, cuja resolução espacial é de 10 m.

Foram gerados para as 2 imagens classificações com 20 classes, onde posteriormente essas classes foram unidas em 5 classes principais: floresta, pasto, cultura, água, sombra. Uma sub amostra desta classificação foi feita para uma melhor comparação visual entre as imagens.

3. Resultados e Discussão

A análise visual foi feita comparando a imagem fusionada com a imagem multiespectral do satélite SPOT 4. A fusão que apresentou maior similaridade foi a B-spline, porém a transformada piramidal Laplacian também apresentou um elevado grau de similaridade. A transformada piramidal no espaço Fourier foi a que obteve uma maior diferença espectral com relação à imagem original.

A **Tabela 2** apresenta os resultados das estatísticas envolvendo a diferença de média e desvio padrão entre as bandas da imagem fusionada e da imagem multiespectral original.

Tabela 2. Diferença de Média e Desvio Padrão entre as imagens fusionadas e a imagem original multiespectral SPOT4.

WT	Estatísticas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Piramidal Laplacian	Diferença de Média	0,002	0,011	0,007	0,012
	Diferença de Desvio Padrão	0,191	0,706	0,503	0,753
Piramidal no espaço Fourier	Diferença de Média	0,000	0,000	0,000	0,000
	Diferença de Desvio Padrão	-1,324	1,489	1,006	1,283
B-spline	Diferença de Média	0,002	0,011	0,007	0,012
	Diferença de Desvio Padrão	0,025	0,315	0,228	0,317

Pode-se observar que todas as transformadas apresentaram praticamente valores nulos na diferença de média (**Tabela 2**). Este resultado já era esperado uma vez que uma propriedade das transformadas wavelets é apresentar média próxima a zero. Já com relação ao desvio padrão, a transformada de Fourier apresentou valores maiores em todas as bandas com relação as outras duas transformadas. A transformada B-spline obteve os menores valores de desvio padrão.

De acordo com Wald et al., (1997), a diferença de desvio padrão e seus respectivos valores são medidas da quantidade de informação adicionada ou perdida durante o processo de fusão. Valores negativos são valores que indicam um acréscimo de informação, enquanto valores positivos são informações perdidas. Apenas a banda 1 da transformada de Fourier ocorreu um acréscimo de informações.

O coeficiente de correlação e o RMSE estão apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3. Coeficiente de correlação e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) entre as imagens fusionadas e a imagem original multiespectral SPOT4.

WT	Estatísticas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Piramidal Laplacian	Coeficiente de Correlação	0,95	0,97	0,98	0,97
	Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE)	6,12	5,93	3,71	7,22
Piramidal no espaço Fourier	Coeficiente de Correlação	0,90	0,96	0,96	0,95
	Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE)	9,17	8,36	4,87	10,27
B-spline	Coeficiente de Correlação	0,96	0,98	0,98	0,98
	Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE)	5,57	4,95	3,12	6,20

A transformada B-spline foi a que demonstrou valores maiores de correlação em todas as 4 bandas e valores menores de RMSE comparado às outras duas fusões. A transformada de Fourier obteve a menor correlação na banda 1, fato este explicado também no valor de desvio padrão. A piramidal Laplacian demonstrou resultados intermediários quando comparada aos outros dois métodos.

Segundo Acerbi-Junior et al., (2004), essas medidas mostram a similaridade a nível de pixel entre a imagem original e a imagem fusionada. O coeficiente de correlação deve ser o mais próximo de 1, enquanto o RMSE deve ser o menor valor possível.

Esses resultados obtidos através das estatísticas confirmam os resultados obtidos através da análise visual, já que a maior similaridade a imagem original e os melhores valores foram apresentados pela transformada B-spline. As imagens originais multiespectral e pancromática e os 3 métodos de fusão estão apresentados na **Figura 3**.

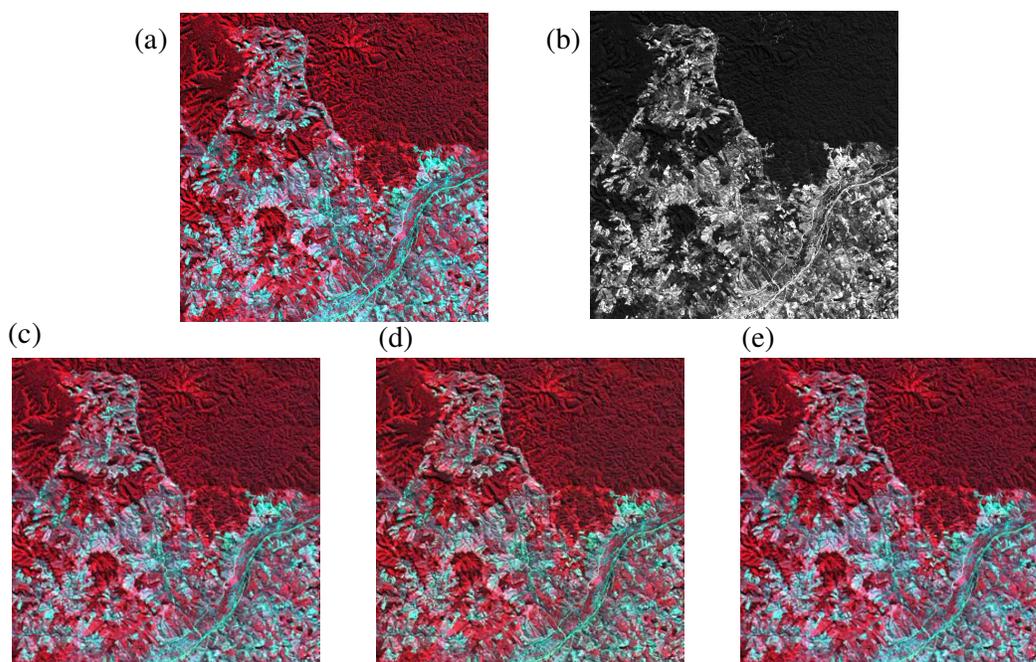


Figura 3. Imagem multiespectral SPOT 4 (a), imagem pancromática SPOT 4 (b), imagem fusionada Piramidal Laplacian (c), imagem fusionada Piramidal no espaço Fourier (d) e imagem fusionada B-spline (e).

A classificação apresentou resultados importantes para a comparação da imagem fusionada com a imagem SPOT 5 MS. Na análise visual das classificações, a imagem fusionada B-spline obteve um resultado próximo à imagem SPOT 5 MS. A pequena diferença existente entre estas duas classificações possivelmente deve-se a própria natureza dos sensores. A **Figura 4** apresenta os resultados das 2 classificações geradas para as imagens fusionada B-spline e SPOT 5 MS.

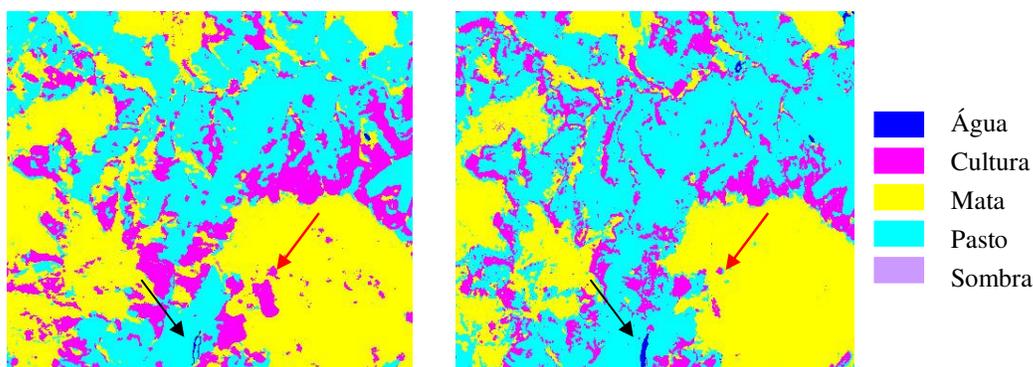


Figura 4. Classificação Isodata. Imagens SPOT 4 MS, fusionada B-spline e SPOT 5 MS.

Observa-se na imagem SPOT 5 MS uma pequena área de cultura que também foi classificada na imagem fusionada. Da mesma forma, uma área de lago na imagem SPOT 5 foi classificada corretamente na imagem fusionada. A **Tabela 4** mostra a distribuição de classes das duas imagens. Os valores apresentados mostram, ainda, uma concordância razoável da área classificada em cada classe nas duas imagens testadas.

Tabela 4. Distribuição de classes (%).

Classes (%)	fusão B-spline	SPOT 5 MS
mata	42,98	34,84
pasto	38,38	49,91
cultura	18,52	14,99
água	0,07	0,21
sombra	0,02	0,02

5. Conclusões

No presente trabalho, a transformada wavelets obteve bons resultados para a fusão de dados, onde a melhor fusão analisada visualmente e estatisticamente foi a B-spline. A análise visual e estatística são duas ferramentas necessárias para se avaliar a qualidade das transformações.

A classificação da imagem fusionada demonstrou uma similaridade em relação à imagem SPOT 5 MS, concluindo assim que ela apresenta potencial para o mapeamento da região. Este estudo demonstra resultados preliminares promissores no âmbito de um trabalho que vem sendo feito em outras áreas de floresta e cerrado, usando outros algoritmos de classificação para avaliar a compatibilidade de imagens SPOT 4 e SPOT 5.

4. Referências

- Acerbi-Junior, F.W.; Clevers, J.G.P.W.; Schaepman, M.E. The assessment of multi-sensor image fusion using wavelet transforms for mapping the Brazilian Savanna. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** (*in press*), 2006.
- Acerbi-Junior, F.W.; Carvalho, L.M.T.; Wachowicz, M.; Clevers, J.G.P.W. Are we using quality measures in multi-resolution data fusion? Proceedings of the 24th EARSeL Symposium: **New strategies for European Remote Sensing**, Dubrovnik, Croatia, p. 631-368, 2004.
- Carvalho, L.M.T.; Acerbi-Junior, F.W.; Fonseca, L.M.; Clevers, J.G.P.W.; De Jon, S.M. **Multi-scale feature extraction from images using wavelets**. In: Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, vol. 5, p. 237-270, 2004.
- Carvalho, L.M.T. Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto dos Recursos Florestais. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.
- Garguet-Duport, B.; Girel, J.; Chassery, J.; Pautou, G. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 62 (9), p. 1057-1066, 1996.
- Oliveira, L.T.; Carvalho, L.M.T.; Acerbi-Junior, F.W. Comparação de métodos para aumentar a resolução de imagens dos sensores ETM+ e ASTER por meio de fusão de imagens. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 4177-4184.
- Piella, G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions*1. *Inf. Fusion* 4 (4), p. 259-280.
- Pohl, C.; Van Genderen, J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 5, p. 823-854, 1998.
- Ranhcin, T.; Wald, L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. **Photogramm. Eng. Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p., 49-61, 2000.
- Teggi, S.; Cecchi, R.; Serafini, F. TM and IRS-1C-PAN data fusion using multiresolution decomposition methods based on the “a trous” algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 6, p. 1287-1301, 2003.
- Ventura, F. N.; Fonseca L. M. G. Remotely sensed image fusion using the wavelet transform. ? Proceedings of the 29th **International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Buenos Aires, Argentina, p. 71-75, 2002.
- Wald, L.; Ranchin, T.; Mangolini, M. Fusion of satellite images of different spatial resolution: assessing the quality of resulting images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 63 (6), p. 691-699, 1997.
- Wald, L. Some terms of reference in data fusion. **IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 3, p. 1190-1193, 1999.
- Yocky, D.A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 62 (9), p. 1067-1074, 1996.
- Zhou, J.; Civeo, D.L.; Silander, J.A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 743-757, 1998.