

Uso da transformada *wavelet* na fusão de imagens termais

Eduardo Viegas Dalle Lucca^{1,2}
Leila Maria Garcia Fonseca²
João Antônio Lorenzetti²

¹Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Caixa postal 6044 – 12231-970 São José dos Campos – SP, Brasil
lucca@ieav.cta.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa postal 515 – 12245-970 São José dos Campos – SP, Brasil
leila@dpi.inpe.br, loren@ltd.inpe.br

Abstract. This study examines the use of wavelet transform and multiresolution analysis to fuse thermal images obtained from different sensors (different spatial resolutions). The final objective is to provide useful tools for scientists interested in smaller-size geophysical phenomena and in complex environmental such as costal zones. The phenomenon in study is the heated effluent jet (plume) produced by the surface discharge a nuclear power plant in Angra dos Reis, Brazil. The wavelet algorithm was tested using sea surface temperature (SST) imagery from orbital ASTER and airborne HSS (HyperSpectral Scanner System) sensors. The images were acquired almost simultaneously and were analyzed for overlapping concurrent ground-coverage. The fusion algorithm based on wavelet multiresolution analysis was used to combine the spatial information from HSS image and spectral information from ASTER image. The hybrid product presented improved spatial resolution without changing the spectral information and it largely contributed for the thermal plume analysis.

Palavras-chave: thermal image, thermal plume, wavelets, image fusion, fusão de imagens termais, pluma termal.

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos o avanço tecnológico na área de sensoriamento remoto tornou disponível um crescente número de modernos e sofisticados sistemas sensores capazes de gerar imagens em diferentes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas. Este salto tecnológico proporcionou também o surgimento de sensores com canais no espectro do infravermelho médio e termal com resoluções espaciais e espectrais que podem permitir a investigação de processos térmicos de escala local que ocorrem em zonas costeiras tais como as ressurgências e as plumas termais.

A comunidade científica rapidamente incorporou esta oferta de dados em suas metodologias de análise, fato este que acabou impulsionando o desenvolvimento de técnicas de processamento que fossem capazes de explorar a natureza multisensor, multiespectral, multiresolução e multitemporal dos dados de sensoriamento remotos, dentre elas a fusão de imagens. Uma aplicação importante dos métodos de fusão é combinar a informação espacial e espectral derivadas de diferentes fontes em uma única imagem (híbrida ou sintética), a qual deve, tanto quanto possível, preservar a informação espectral original ao passo que refina a resolução espacial.

Diversos métodos de fusão de imagens têm sido desenvolvidos e disponibilizados em aplicativos comerciais tais como o HSI (*Hue, saturation, intensity*), a Análise ou Transformação por Componentes Principais, a Filtragem Passa Altas, dentre outros (Pohl e Genderen, 1998). O problema com estes métodos é que, embora sejam capazes de melhorar a característica espacial, frequentemente eles introduzem distorções no conteúdo espectral dos pixels da imagem. Mais recentemente, abordagens para fusão de imagens que empregam o conceito de análise em múltiplas resoluções através da transformada *wavelet* têm sido

propostas (Garguet-Duport et al., 1996). Além da robustez, a vantagem destas abordagens é a capacidade de preservar a informação espectral das imagens de entrada no produto final.

Entretanto, muitas destas metodologias foram desenvolvidas e testadas apenas com imagens obtidas na faixa espectral do visível. Além disto, muitas rotinas são desenvolvidas para aplicações específicas e não são facilmente aplicáveis para qualquer conjunto de dados. Neste contexto, em contraposição a escassez de trabalhos anteriores e face à relevância dos estudos com imagens termais, o objetivo deste trabalho é examinar o emprego da transformada *wavelet* para combinar informações espaciais e espectrais derivadas de imagens termais obtidas através de diferentes sensores (ASTER e HSS). O propósito é fornecer subsídios para cientistas interessados em estudar fenômenos termais de escala local que ocorrem em ambientes marinhos complexos como as zonas costeiras.

Diante disso, espera-se que a metodologia proposta permita explorar de modo eficiente a diversidade atual e futura de imagens de sensores termais e contribua para um melhor entendimento e caracterização de fenômenos termais de escala local que ocorram em ambientes aquáticos e zonas costeiras.

2. Metodologia

A metodologia estabelecida para este trabalho pode ser resumida nos seguintes passos: seleção da área de estudo, obtenção das imagens e dos dados de campo, alinhamento das imagens para o processo de fusão, fusão das imagens e avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos.

2.1. Seleção da área de estudo

Na costa sudeste do Brasil, na cidade de Angra dos Reis, a cerca de 100 km da cidade do Rio de Janeiro, existem atualmente duas usinas nucleares em funcionamento: Angra I (600MW) e Angra II (1300MW). Instaladas próximo ao mar, as usinas captam água em uma enseada semifechada para utilizá-la como fluido refrigerador de seus reatores. Em condições normais, a água aquecida proveniente do resfriamento dos reatores (com fluxo de 40 e 80 metros cúbicos por segundo, respectivamente) é escoada através de um túnel (400 m de comprimento) na Baía de Piraquara de Fora, situada em lado oposto à área de captação, separada por uma península. A descarga de água aquecida (pluma termal) constitui-se numa anomalia local, a qual pode alcançar alguns quilômetros quadrados. Sua porção mais quente chega a atingir 8°C acima da temperatura da água do ambiente marinho adjacente.

Além desse aspecto, em ocorrências eventuais, o vento, a maré e as correntes marinhas podem deslocar a pluma de descarga em direção ao lado da enseada onde ocorre a captação. A detecção e a caracterização deste fenômeno trazem, portanto, informações importantes para a adequada tomada de decisões.

Assim esta área de estudo foi escolhida por apresentar o fenômeno termal de escala local (característica desejável para a aplicação da metodologia proposta), ocorrer em zona costeira e pela necessidade de mapear a pluma termal com o propósito de fornecer subsídios para cientistas interessados em estudar fenômenos termais de escala local que ocorrem em ambientes marinhos complexos como as zonas costeiras.

2.2. Obtenção dos dados de entrada

As imagens dos sensores ASTER e HSS foram adquiridas no dia 09 de outubro de 2003 durante campanha de imageamento realizada nas adjacências da Central Nuclear. O sobrevôo da área com o sensor HSS foi feito no período da manhã (linhas de vôo executadas entre 09:30 e 11:00h) para coincidir com a passagem do sensor ASTER (10:17h).

Durante a obtenção das imagens somente o reator de Angra II estava em operação. As condições atmosféricas na hora e local dos sobrevôos sobre a área de estudo estavam plenamente satisfatórias, sem nuvens, visibilidade acima de 25 km e o vento de sudoeste com velocidades inferiores a 2 m/s. Também foram obtidas medidas da temperatura superficial em pontos dentro da pluma.

2.2.1. Obtenção e processamento das imagens do HSS

O sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*), adquirido para o SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), possui 50 canais, dos quais sete estão posicionados na faixa espectral de 3 a 5 μm e seis na faixa de 8 a 12 μm . O sensor possui quantização do sinal em 12 bits (discriminação radiométrica de 4096 níveis digitais), uma óptica que permite obter imagens com resoluções espaciais entre 4 e 10 m (variável com a altura de vôo), e é equipado com corpos negros de referência que possibilitam, após o processamento radiométrico, determinar a temperatura de brilho dos alvos imageados. Maiores informações sobre este sensor podem ser obtidas em Moreira et al. (2005).

O sensor foi configurado com IFOV de 2,5 mrad e frequência de rotação do espelho de varredura igual a 12,5Hz, o que permitiu obter valores médios de NETD de 0,27°C para os canais da faixa espectral de 8 a 14 μm (SENSYTECH (2002a)). As temperaturas máxima e mínima dos corpos negros de referência foram definidas como 37°C e 15°C, respectivamente. Estipulou-se o sobrevôo da área de estudo nas seguintes alturas: 3048, 2743, 2438, 2134, 1981 e 1829 metros. A direção de imageamento foi definida no rumo magnético 073° em função da geografia local. Todas as faixas de vôo foram executadas na mesma direção para se preservar as condições de imageamento (vento, iluminação solar, etc.).

Os dados obtidos foram processados através de programa de importação e processamento de dados do próprio fabricante do sensor, o qual permite gerar, como produto final, imagens dos diversos canais registradas entre si, corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada e ainda expressas em valores de radiância (canais no visível) ou temperatura (para os canais termais).

2.2.2. Obtenção e processamento das imagens do ASTER

O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um instrumento imageador multiespectral a bordo do TERRA-1 e foi desenvolvido para obter mapas detalhados da temperatura, emissividade, reflectância e elevação da superfície terrestre. Para tanto é composto por três subsistemas distintos, totalizando 14 bandas que variam do visível ao infravermelho termal. A resolução espacial (nadir) varia com o comprimento de onda: 15 metros nos espectros do visível e infravermelho próximo (VNIR), 30 no infravermelho médio (SWIR) e 90 no infravermelho termal (TIR). Maiores informações sobre este sensor podem ser encontradas em ERSDAC (2002).

O sensor ASTER permite gerar dois tipos de dados: Level-1A (L1A) e Level-1B (L1B). O primeiro consiste dos dados da imagem (bruta), dos coeficientes radiométricos e geométricos e outros dados auxiliares. A imagem é mantida no formato original, pois os coeficientes não são aplicados neste dado. No segundo (L1B), as imagens são geradas aplicando-se os coeficientes para calibração radiométrica e reamostragem geométrica. O processo de geração deste tipo de dado também inclui o registro das bandas SWIR e TIR com as do VNIR, tendo-se ao final todas as bandas corregistradas. Pode ainda ser gerado em diferentes projeções cartográficas e ser reamostrado pelos métodos de convolução cúbica, vizinho mais próximo ou Bilinear.

As imagens do ASTER foram solicitadas através de *Data Acquisition Request* (DAR) ao *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC). Para este trabalho foram solicitados, além dos dados L1B, o produto 2B03, que é uma imagem derivada dos canais TIR onde os níveis digitais expressam valores da temperatura cinética (graus K) da superfície com resolução espacial de 90 metros e processada em 12 bits. Segundo Gillespie et al. (1998), a derivação operacional da temperatura superficial dos alvos (terrestres e aquáticos) possui acurácia de 0,5 K. Para tanto se aplica um algoritmo desenvolvido especificamente para este propósito. Os dados L1B e o produto 2B03 foram solicitados em projeção UTM e reamostrados por vizinho mais próximo.

2.2.3 Alinhamento dos dados para o processo de fusão

Os dados de entrada para o processo de fusão são: a imagem do Canal 47 do sensor HSS e a imagem do produto 2B03 do sensor ASTER. Antes do processo de registro a imagem do HSS foi reamostrada para possuir resolução espacial de 11 metros. Este valor de resolução espacial foi escolhido porque ao se aplicar a transformada *wavelet* nesta imagem, a aproximação de baixa resolução terá 22 m no primeiro nível de decomposição, 44 m no segundo e 88 m no terceiro. Neste último, sua resolução espacial estará próxima à original do ASTER (90 m). Para ajustar os dados, a imagem do ASTER (2B03) foi reamostrada de 90 para 88 m. A reamostragem das imagens foi feita empregando-se método de reamostragem por vizinho mais próximo.

Após o registro selecionou-se uma área da imagem registrada do HSS com dimensões de 256 x 256 pixels (potência de 2). As coordenadas dos cantos superiores e inferiores desta cena foram então utilizadas para recortar a cena equivalente na imagem 2B03 do ASTER (também previamente georreferenciada), que resultou em uma imagem com dimensões de 32 x 32 pixels. Ao final destas etapas foram obtidas duas imagens de entrada que representavam a mesma cena, estavam registradas e possuíam resoluções espaciais e dimensões compatíveis para execução do processo de fusão através da transformada *wavelet*.

2.2.4. Fusão das imagens termais dos sensores ASTER e HSS

O processo de fusão das imagens foi feito utilizando o algoritmo *Wavefusion*, desenvolvido especificamente para este trabalho. O *Wavefusion* foi implementado em linguagem C++. Aceita dados de entrada em diversos formatos e também não possui restrição quanto ao nível de quantização das imagens de entrada. Incorpora ainda uma função que permite equalizar a média e a variância dos dados de entrada antes do processo de fusão. Como o resultado da fusão depende da função de base da transformada *wavelet*, foram implementadas 31 funções de base distintas. Foram incluídas as clássicas e outras encontradas na literatura e disponíveis em (Antonini et al., 1992; Villasenor et al., 1995; Davis, 2005). Antes do processo de fusão optou-se por equalizar a média e a variância das imagens de entrada.

O algoritmo segue o mesmo princípio daquele proposto por Garguet-Duport *et al.* (1996). No caso em estudo, inicialmente a transformada *wavelet* é aplicada na imagem HSS para extrair as componentes com detalhes (verticais, horizontais e diagonais) e a aproximação de baixa resolução. No terceiro nível de decomposição, a aproximação de baixa resolução da imagem HSS (agora com 88m de resolução e mesmas dimensões de 32x32 pixels) é substituída pela imagem (quase original) do sensor ASTER e a transformada inversa é então aplicada, criando-se uma imagem sintética com 11 m de resolução espacial e dimensões de 256 x 256 pixels, ou seja, as mesmas do HSS.

2.2.5. Avaliação dos resultados

A avaliação das imagens sintéticas (híbridas) é realizada tanto qualitativa quanto quantitativamente. A avaliação qualitativa é feita visualmente e tem por objetivo verificar a qualidade espacial das imagens sintéticas. Neste caso, as imagens sintéticas são comparadas visualmente com a imagem original do HSS. A avaliação quantitativa é feita através de cálculos de histogramas, médias, variâncias, imagens diferença e testes estatísticos utilizando dados de campo e amostras aleatórias tomadas das imagens de forma pareada. O objetivo é testar se foram preservadas as características espectrais (valores de temperatura) da imagem do ASTER na imagem sintética obtida.

3. Resultados e discussões

3.1 Avaliação qualitativa

A inspeção visual das 31 (trinta e uma) imagens sintéticas obtidas revelou que 05 ficaram muito boas, 12 puderam ser consideradas boas e 13 apresentaram resultados ruins. Imagens sintéticas consideradas boas e muito boas são aquelas que poderiam substituir a imagem do HSS no processo de análise sem maiores prejuízos da informação espacial (não foram acrescentadas ou perdidas informações). Cabe ressaltar que durante a avaliação visual o contraste aplicado nas duas imagens comparadas foi o mesmo (linear 2%). Como esperado, o resultado é fortemente influenciado pela função de base utilizada. No entanto, a maioria (55%) das funções implementadas no algoritmo produziu, para a aplicação proposta, resultados considerados bons e muito bons. Qualitativamente, os melhores resultados foram obtidos com as seguintes funções de base: Villa6, Silva66, Pseudocoiflet, Brislawn2, Coeff05 e Antonini.

Na **Figura 3.1** são apresentadas as imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m, esta última ampliada seis vezes) e as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Brislawn2, Silva66, Haar, Symmlet04 e db03. As quatro primeiras foram classificadas como muito boas. As duas últimas são exemplos de resultados insatisfatórios. A obtida com a função Haar é apresentada para exemplificar o que poderia ser obtido com a função *wavelet* mais simples de todas. Verifica-se que as imagens sintéticas obtidas pelas funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 possuem basicamente quase a mesma informação espacial (detalhes) contida na imagem original do HSS. A linha da costa, feições na porção continental, as variações internas de temperatura no interior da pluma e até mesmo o ruído presente na imagem de entrada foram incorporados. Na obtida com a função Coeff05 é possível notar também feições de aspecto granular no interior e adjacências da pluma termal. Nas imagens sintéticas obtidas com as funções de base Haar e db03 observam-se os aspectos quadriculado e granular em todas as porções da imagem. Já a imagem sintética obtida pela função de base Symlet04 verifica-se o aspecto bloqueado na porção aquática da cena imageada.

A partir destes resultados pode-se inferir que a fusão através de transformada *wavelet* foi capaz de introduzir detalhes espaciais extraídos da imagem do HSS na imagem do ASTER.

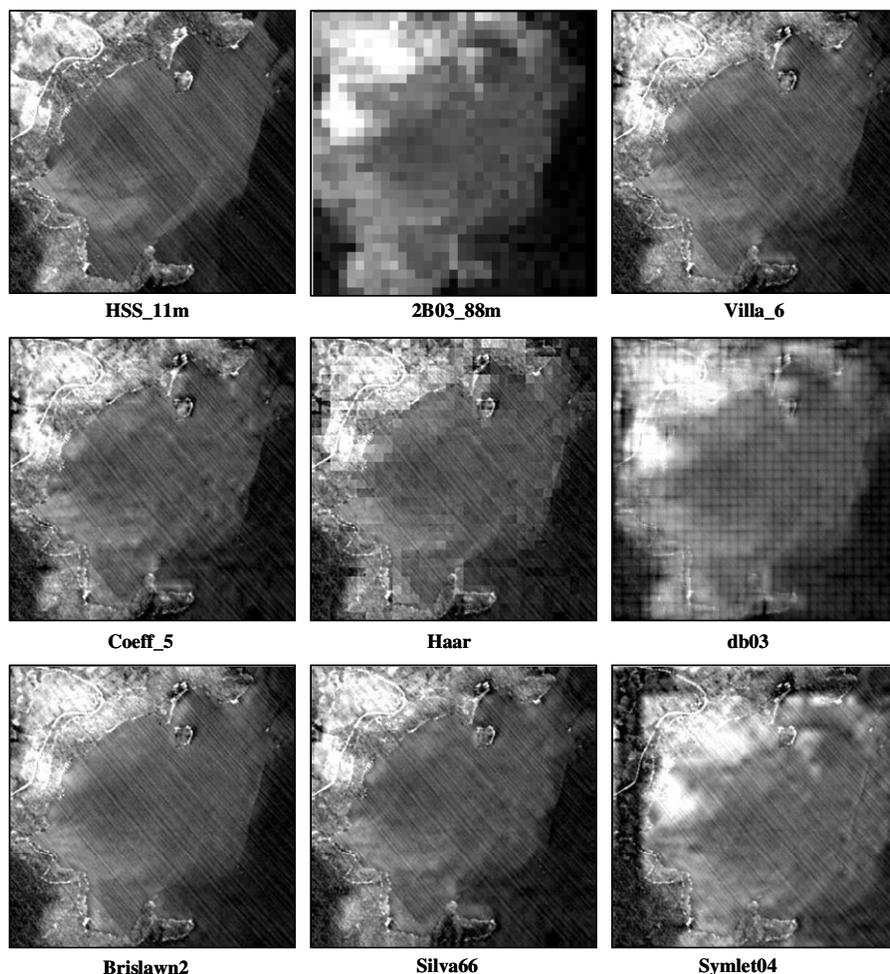


Figura 3.1 – Imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e as sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Brislawn2, Silva66, Haar, Symmlet04 e db03.

3.2 Avaliação quantitativa

A comparação dos histogramas das imagens sintéticas com o histograma original da imagem do ASTER revelou que, do ponto de vista da distribuição dos valores radiométricos, as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 mantiveram as características espectrais da imagem de entrada original. Para a comparação as imagens sintéticas foram reamostradas (pelo método do vizinho mais próximo) de 11 para 88 metros de resolução espacial (a mesma da imagem do ASTER).

Também foram calculados e comparados a média, a variância e o desvio padrão das imagens sintéticas e das imagens de entrada. Os valores foram obtidos tanto a partir das imagens sintéticas originais (11m) quanto a partir das imagens sintéticas reamostradas para 88 metros. Verificou-se que os valores da média e do desvio padrão das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2 e Haar, tanto original quanto reamostradas para 88 m, são muito próximos dos obtidos na imagem 2B03. O fato das médias serem próximas indica que as imagens sintéticas (originais e reamostradas) mantêm o brilho médio da imagem 2B03. Já as semelhanças entre os valores das variâncias indicam que não houve adição ou supressão expressiva de informação espectral durante o processo.

Outra abordagem quantitativa realizada foi o teste descrito em Wald *et al.* (1997). O teste consiste em reamostrar a imagem sintética para possuir a mesma resolução espacial da imagem 2B03. Em seguida obtém a imagem diferença pixel a pixel entre a imagem 2B03 e a sintética reamostrada. Em tese, se a imagem sintética possui as mesmas propriedades espectrais da imagem de entrada 2B03, então a diferença pixel a pixel destas deve resultar numa imagem cujos valores digitais sejam iguais ou muito próximos de zero. Isto foi verificado para as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2 e Haar, sugerindo que estas imagens sintéticas são equivalentes à imagem original do ASTER.

Outro teste quantitativo realizado usou os dados de temperatura coletados em campo. Partiu-se do princípio de que se o processo de fusão ocorreu com sucesso, então os valores de temperatura tomados de um conjunto de pontos na imagem 2B03 e na imagem sintética devem ser iguais ou próximos. Os valores foram tomados nas mesmas coordenadas dos pontos em que foram feitas as medidas de temperatura superficial *in situ*. Verificou-se que os valores de temperatura derivados das imagens sintéticas analisadas são altamente correlacionados com os medidos na imagem 2B03 para quase a totalidade dos pontos amostrados. Em muitos casos eles são coincidentes. Isto foi verificado mesmo na imagem sintética obtida com a função de base Haar, a qual, como visto anteriormente, não apresentou um bom resultado qualitativo. Também foram feitas regressões lineares entre os valores de temperatura derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles obtidos nas imagens sintéticas. Observou-se que existe uma boa correlação entre os valores de temperatura obtidos nas imagens 2B03 e sintéticas. Avaliando-se os valores da estatística *t* e do Valor-P dos coeficientes angulares e lineares, pode-se verificar que as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Brislawn2, Silva 66 e Villa06 são equivalentes à imagem 2B03 com nível de significância superior a 5%.

Embora o resultado acima confirme os demais, considerou-se ainda o fato de que a amostragem não ocorreu de forma independente e também que o número de amostras de campo foi insuficiente e para a análise pretendida. Assim, seguiu-se uma abordagem que consistiu em amostrar 100 (cem) pontos aleatórios (dentro da superfície aquática) na imagem de entrada 2B03 e tomar o valor da temperatura nestes pontos. De forma pareada, os valores de temperatura dos mesmos 100 pontos foram computados nas imagens sintéticas obtidas (reamostradas para 88 metros de resolução espacial). Neste caso, verificou-se que ainda existe uma boa correlação entre os valores de temperatura obtidos nas imagens 2B03 e sintéticas. Entretanto, o teste estatístico indica que apenas as imagens sintéticas geradas com as funções de base Brislawn2, e Villa06 são equivalentes à imagem 2B03 com nível de significância igual a 5%. O mesmo procedimento acima foi realizado tomando-se as amostras em toda a imagem, isto é, computando valores de temperatura tanto em porções de água quanto na superfície terrestre. Neste caso, embora ainda haja uma boa correlação entre os valores medidos na imagem de entrada e nas sintéticas, o teste estatístico indica que as imagens não são significativamente equivalentes em todos os casos.

5. Conclusões

É possível combinar em uma única imagem os conteúdos espectral e espacial extraídos de duas imagens termais distintas através de processos de fusão baseados na transformada *wavelet*. Foi possível obter mais de uma imagem híbrida resultante do processo de fusão que reunisse as informações de interesse das duas imagens de entrada (detalhes espaciais e valores de TSM). O ganho de informação espacial ocorre sem comprometimento da média dos valores originais da imagem ASTER. Este fato evidencia a utilidade da transformada *wavelet*

em processos de fusão objetivando a melhoria da resolução espacial quando a informação espectral de uma das imagens precisa ser preservada.

Como esperado, a função de base usada na transformação influencia fortemente o resultado da fusão. Assim, é desejável que haja o maior número possível de funções *wavelets* implementadas para serem testadas, uma vez que cada função tem características diferentes. A metodologia de fusão deve ser bem conhecida para que a aplicação, avaliação e análise dos dados resultantes sejam corretas.

Os dados termais gerados pelo ASTER e pelo HSS são fontes disponíveis de informações ainda pouco exploradas pela comunidade científica. Assim, este trabalho contribui para ampliar o conhecimento acerca destes sensores e suas aplicabilidades em atividades de pesquisa, oferecendo mecanismos metodológicos e aplicativos que podem facilitar o tratamento e emprego destes para estudos de fenômenos termais de escala local. Além disto, a metodologia pode ser aplicada para outros fenômenos de interesse, como detecção de óleo e de descargas de agentes poluidores em zonas costeiras, por exemplo.

6. Referências bibliográficas

ANTONINI, M. et al. Image coding using wavelet transform. **IEEE Transactions on image processing**, v. 1, p. 205-220, 1992.

DAVIS, G. Baseline wavelet transform coder construction kit. [online]. Disponível em: <<http://www.geoffdavis.net/darhmouth/wavelet/wavelet.html>>. Acesso em: nov. 2005.

ERSDAC. **Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer**. [online]: ERSDAC, 2002. Disponível em: <<http://www.asterweb.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: nov. 2002.

GARGUET-DUPOUR, B. et al. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 62, n. 9, p. 1057-1066, set. 1996.

GILLESPIE, A. et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, NY, v. 36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.

MOREIRA, R. C. et al. Sensor hyperspectral HSS: sumário das características técnicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE/Selper, 2005. 1 CD-ROM.

POHL, C.; VAN GENDEREN, J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 19, n. 5, p. 823-854, 1998.

VILLASEÑOR, J.; BELZER, B.; LIAO, J. Wavelet filter evaluation for image compression. **IEEE Transactions on image processing**, v. 2, p. 1053-1060, 1995.

WALD, L.; RANCHIN, T.; MANGOLINI, M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 63, n. 6, p. 691-699, jun. 1997.