

EXPERIMENTOS EM FUSÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

Experimenting fusion of high resolution image

MARIO JORGE SCHNEIDER¹
OLGA REGINA PEREIRA BELLON¹
HIDEO ARAKI²

IMAGO - Grupo de Pesquisa em Visão Computacional,
Computação Gráfica e Processamento de Imagens
Universidade Federal do Paraná
Departamento de Informática¹
Departamento de Geomática²
Centro Politécnico – Jardim das Américas
CEP 81531-990 – Curitiba – PR
marioj@bsi.com.br, olga@inf.ufpr.br, haraki@geoc.ufpr.br

RESUMO

As técnicas de fusão de imagens de satélite de diferentes resoluções espaciais visam obter uma imagem melhorada, com melhor definição dos detalhes espaciais, o que possibilita melhor interpretação visual e análise automática ou semi-automática. Idealmente, a imagem resultante deve manter as informações espectrais. Diferentes métodos de fusão têm sido propostos para efetuar a fusão de imagens de sensores de média resolução espacial como o Landsat TM e SPOT. O lançamento do satélite IKONOS tornou possível a obtenção de imagens de alta resolução espacial (1 metro no modo pancromático) que contém informação espacial para várias aplicações de mapeamento e análise de áreas urbanas. Entretanto, a imagem multiespectral, que proporciona informação espectral importante para aplicações temáticas, é obtida com resolução espacial de 4 metros. Este trabalho compara os resultados de métodos tradicionais (Substituição, Transformação HSV, Substituição da Componente Principal e Filtragem Passa-Alta) quando usados na fusão das imagens multiespectral e pancromática do satélite IKONOS, avaliando a aplicabilidade desses métodos em imagens de alta resolução. Os resultados são analisados com base em comparações estatísticas por meio do coeficiente de correlação e na análise visual das imagens híbridas. A área teste corresponde a uma região urbana com diferentes tipos de cobertura do solo.

ABSTRACT

The techniques for fusion of satellite images with different spatial resolutions aims to enhance the image quality, that allows a better visual interpretation. Ideally, the resulting image must keep the spectral resolution, leading to a more precise image segmentation and classification. Many different methods have been proposed to perform image fusion for medium resolution images (e.g., Landsat-TM and SPOT). The launch of IKONOS satellite made it possible to obtain high spatial resolution images (1 meter in panchromatic mode). These images have spatial information for mapping applications and analysis of urban areas. However, the multispectral images, that provide the most relevant information for thematic applications, are obtained with 4 meter spatial resolution. This work compares the experimental results of 4 traditional methods (Band Substitution, HSV Transformation, Principal Component Substitution and High-Pass Filtering) applied to fusion of multispectral and panchromatic images of IKONOS, and evaluates the applicability of these methods for high-resolution images. The analysis of the results is done by statistical comparison, correlation coefficient, and visual inspection of the resulting images. The test area corresponds to an urban region with different types of land cover.

1. INTRODUÇÃO

A fusão de imagens visa a geração de uma imagem a partir de imagens múltiplas (por exemplo, imagens multiespectrais, fotografias aéreas e imagens de radar) para a extração de informação de maior qualidade. A fusão de imagens com diferentes resoluções busca a melhoria da resolução espacial e a manutenção da qualidade espectral. Imagens pancromáticas de alta resolução podem ser combinadas com imagens multiespectrais de menor resolução espacial mediante o uso de técnicas apropriadas. Deste modo, a resolução espectral pode ser preservada, enquanto a resolução espacial mais alta é incorporada de maneira a representar o conteúdo de informação das imagens com muito mais detalhes. Um caso especial é a fusão de bandas de um único sensor para realce de resolução

Imagens de satélite de alta resolução são adquiridas de dois diferentes modos: no modo pancromático (PAN) com resolução espacial de 1 metro (IKONOS) ou de 0,7 metro (Quick Bird), ou no modo multiespectral (MS) com resolução espacial de 4 metros (IKONOS) ou de 2,5 metros (Quick Bird). As imagens PAN contém informação espacial adequada para aplicações de mapeamento de média a grande escala e para análise de áreas urbanas. Entretanto, a imagem multiespectral dos sensores de alta resolução espacial contém bandas que englobam a região visível e a região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, contendo informação espectral para aplicações temáticas. A tabela 1 apresenta as bandas espectrais de sensores de alta resolução, bem como as bandas espectrais do sensor ETM do Landsat 7 e do satélite SPOT 5.

Algumas das abordagens para a fusão (como, por exemplo, Transformação HSV e Substituição da Componente Principal) já estão implementadas em programas comerciais. Também os provedores de imagem já integraram produtos de fusão de resolução no catálogo de produtos padrão. Exemplos são imagens SPOT e IKONOS. Porém, muito frequentemente os usuários têm que ajustar parâmetros individuais do processo de fusão; um bom exemplo é o uso de combinações aritméticas que permitam ao usuário pôr pesos diferentes nas imagens de entrada para realçar características relevantes à aplicação.

Alguns autores expressam a idéia de que o método de fusão não deve distorcer as características espectrais dos dados MS originais, de forma a assegurar que alvos que são espectralmente separáveis nos dados originais sejam separáveis no conjunto de dados resultante (CHAVEZ et al, 1991). Diferentes métodos de fusão têm sido propostos e mutuamente comparados com relação à preservação de informação espectral (CHAVEZ et al, 1991; POHL, 1999). Porém, em todos os casos, os resultados obtidos são dependentes da cena.

Este trabalho compara os resultados de métodos tradicionais (Substituição, Transformação HSV, Substituição da Componente Principal e Filtragem Passa-Alta) quando usados na fusão das imagens multiespectral e pancromática do satélite IKONOS. Na segunda seção, é apresentada a área teste e, na seção 3, são descritos os métodos de fusão utilizados. Na seção 4, os resultados são analisados com base em comparações estatísticas por meio do coeficiente de correlação e na análise visual das imagens híbridas resultantes da fusão.

Tabela 1: Comparativo da Resolução espectral entre Landsat 7, SPOT 5, IKONOS e QuickBird.

LANDSAT 7	SPOT 5	IKONOS	QUICKBIRD
Pancromática 0.52 to 0.90 μm	Pancromática 0.48 - 0.71 μm	Pancromática 0.45 - 0.90 μm	Pancromática 0.45 - 0.90 μm
Multispectral B1 0.45 a 0.52 μm B2 0.52 a 0.60 μm B3 0.63 a 0.69 μm B4 0.75 a 0.90 μm B5 1.55 a 1.75 μm B6 10.4 a 12.5 μm B7 2.09 a 2.35 μm	Multiespectral B1 0.50 a 0,59 μm B2 0.61 a 0.68 μm B3 0.78 - 0.89 μm B4 1.58 a 1.75 μm	Multispectral B1 0.45 a 0.52 μm B2 0.52 a 0.60 μm B3 0.63 a 0.69 μm B4 0.76 a 0.90 μm	Multispectral B1 0.45 a 0.52 μm B2 0.52 a 0.60 μm B3 0.63 a 0.69 μm B4 0.76 a 0.90 μm

2. ÁREA TESTE E CARACTERÍSTICAS DOS DADOS

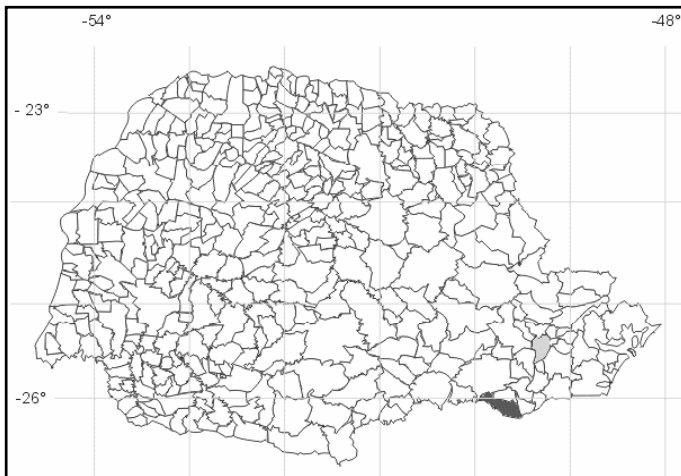
Os tipos de coberturas do solo presentes na cena influenciam fortemente os resultados da fusão (WALD et al, 1997). Áreas urbanas apresentam grande número de objetos com diferentes escalas, sendo o caso mais difícil em termos de fusão por corresponderem a alta variabilidade de informações espaciais e espectrais. Os

testes com áreas urbanas, com grande diversidade de assinaturas espectrais, são úteis para julgar a capacidade dos métodos de fusão em sintetizar as assinaturas espectrais durante a modificação da resolução espacial.

Nos experimentos com imagens adquiridas simultaneamente pelo mesmo sensor, as propriedades ópticas da atmosfera são idênticas. A geometria de imageamento também é semelhante. A reamostragem com interpolador bilinear para tornar a dimensão do pixel da banda MS equivalente à da banda PAN oferece um bom compromisso entre a acurácia e o tempo de processamento (WALD et al, 1997).

A área teste escolhida para os experimentos corresponde ao município de Rio Negro, no Estado do Paraná, representada na figura 1 em cinza escuro. As imagens MS e PAN do sensor IKONOS foram coletadas em 2000, cedidas para estudo pelo PARANÁ CIDADE. Na área escolhida estão presentes diferentes tipos de cobertura do solo, como vegetação arbórea e rasteira, água, solo exposto e edificações com diferentes tipos de cobertura.

Figura 1. Localização do Município de Rio Negro no Estado do Paraná. Rio Negro está destacado com cinza escuro, e Curitiba em cinza claro.



Na imagem pancromática de parte da cidade de Rio Negro, mostrada na figura 2, a vegetação arbórea apresenta sombras e mesmo árvores isoladas podem ser distinguidas pela sua sombra. Já entre asfalto e vegetação rasteira, percebe-se que a tonalidade é parecida, enquanto que solo exposto apresenta tonalidades mais claras. Diferentes tipos de telhado apresentam características distintas de reflectância: telhas de Eternit aparecem bem claras, enquanto que telhas de barro parecem mais escuras. Na figura 2 estão destacadas sete áreas. A área 1

corresponde a uma rotatória com canteiro com gramado. A área 2 destaca uma edificação com cobertura de Eternit, que aparece clara na imagem; já as edificações com outros tipos de cobertura ficam mais escuras. A área 3 mostra uma área coberta por vegetação rasteira, com presença de árvores ao redor. A área 4 destaca um trecho de estrada de terra, mata e o Rio Negro. As árvores se destacam por apresentarem textura rugosa; e a estrada de terra aparece clara, enquanto o asfalto tem uma tonalidade mais escura. A área 5 destaca uma casa com telhado avermelhado tendo ao redor uma área de solo exposto, grama e mata. A área 6 destaca uma área de solo exposto com vegetação rasteira na parte central. Fazendo a composição colorida das bandas multiespectrais percebe-se claramente a distinção entre asfalto, vegetação rasteira e diferentes tipos de telhados.

3. MÉTODOS DE FUSÃO

Foram utilizados os seguintes métodos de fusão: Substituição, Transformada HSV, Substituição da Componente Principal (SCP) e Filtragem Passa-Alta (HPF). Estes métodos podem ser agrupados em três categorias, uma puramente visual (Substituição), outra baseada em transformação (HSV e SPC) e, a última, com uso de filtro (HPF).

Figura 2. Imagem pancromática da área teste.

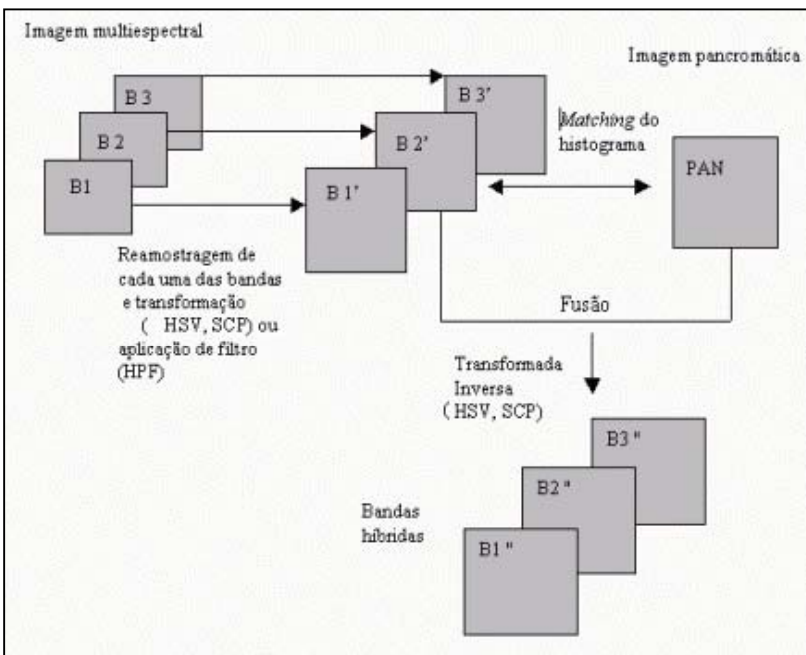


Na figura 3, é apresentado um esquema que identifica os passos necessários à realização de um processo de fusão de imagens. O processo parte de um conjunto de bandas multiespectrais (B1, B2, B3). Uma das bandas originais pode ser substituída pela banda pancromática (PAN); ou uma das bandas geradas por um processo de transformação (HSV ou SPC) pode ser substituída pela banda pancromática; ou, ainda, a informação de alta frequência espacial presente na banda pancromática pode ser adicionada a cada banda espectral. Para o caso da

fusão baseada em transformação, é efetuada uma transformada inversa para gerar as bandas híbridas (B1'', B2'', B3'').

Os métodos de substituição e de transformação no espaço de cores possibilitam efetuar a fusão para três bandas, enquanto a utilização de componentes principais ou de filtros permite efetuar a fusão para maior número de bandas. As bandas multiespectrais devem ser reamostradas de modo que os pixels sejam compatibilizados com os da imagem PAN, e também é necessário que as imagens estejam registradas. Faz-se necessário também o *matching* do histograma entre a banda a ser substituída e a banda pancromática, para aproximar o comportamento radiométrico entre as mesmas no processo de fusão (MUNECHIKA et al, 1996).

Figura 3. Princípio da fusão de imagens de diferentes resoluções (adaptado de GUARGUET-DUPORT(1996))



3.1. Substituição

A composição colorida facilita a interpretação visual de imagens multiespectrais. Dependendo da seleção das bandas carregadas nos canhões RGB do monitor, diferentes características podem ser realçadas. No método de fusão por Substituição, inicialmente faz-se a verificação da correlação entre as bandas

originais e a banda PAN e, a seguir, efetua-se o *matching* de histograma entre a banda MS de maior correlação e a PAN e, finalmente, a sua substituição pela PAN, gerando a imagem híbrida com três bandas. Este método possui a vantagem de não alterar os valores radiométricos de quaisquer uma das bandas originais (JENSEN, 1996).

3.2. Substituição da componente principal (SCP)

A análise de componentes principais (PCA, Principal Component Analysis) é uma técnica estatística que transforma um conjunto de dados multivariados de variáveis correlacionadas em um conjunto de novas variáveis não correlacionadas que são combinações lineares das originais. Este método exige três passos para ser realizado. Primeiro, a construção da matriz de covariância (ou da matriz correlação) da imagem a ser transformada, segundo a determinação dos autovalores e autovetores desta matriz, e terceiro a formação das componentes usando os autovetores como pesos. O primeiro autovetor produz a primeira componente, o segundo autovetor, a segunda componente, e assim por diante (MUNECHIKA et al, 1996).

O método PCA, também conhecido por Karhunen-Loève ou Transformada de Hotelling, se caracteriza pela separabilidade das informações, onde a primeira componente, caracteriza-se por estar orientada segundo a direção da maior variância dos níveis de cinza da imagem original, apresentando maior contraste do que as demais componentes (GONZALEZ E WOODS, 2000). A primeira componente então conterá teoricamente a informação que é comum a todas as bandas originais, enquanto as informações espectrais específicas de cada banda estão nas outras componentes (CHAVEZ, 1986; CHAVEZ et al, 1991).

A componente principal 1 (CP1) é substituída pela banda PAN após efetuar o *matching* de histograma. É efetuada a operação inversa para levar os dados combinados de volta ao espaço da imagem. Este método é denominado Substituição da Componente Principal (SCP).

3.3. HSV (Matiz, Saturação e Valor)

Matiz (H), Saturação (S) ou Valor (V) se referem aos parâmetros da percepção de cores. No modelo HSV, Valor se refere ao brilho total da cor, Tonalidade se refere ao comprimento de onda dominante e a Saturação especifica a pureza da cor. A transformação RGB-HSV separa a informação acromática (valor) e cromática (matiz e saturação) de uma imagem RGB.

No método de fusão pela transformação HSV, três bandas espectrais de baixa resolução espacial são transformadas do espaço RGB de cores para o espaço HSV. A componente V é substituída pela imagem PAN, e é efetuada a operação inversa, retornando para o espaço RGB.

3.4. HPF (Filtro Passa-Alta)

A idéia da fusão com filtro passa-alta é a de transferir o conteúdo de alta frequência espacial da imagem de alta resolução espacial para a imagem de menor resolução espacial. O realce das variações dos níveis de cinza torna mais nítidas as feições da imagem de alta resolução espacial, podendo ser utilizado um filtro passa-alta com máscara pequena (3x3) ou com dimensão correspondendo ao dobro da diferença de resolução espacial (CHAVEZ et al, 1991).

Nos testes efetuados com a imagem IKONOS, foi feito o *matching* de histograma entre a imagem pancromática e cada uma das bandas multiespectrais. Sobre cada imagem resultante do passo anterior, foi aplicado o filtro passa-alta gerando P1, P2 e P3. Para cada banda, foi efetuada a soma pixel a pixel dos valores de cinza das bandas originais (b1, b2 e b3) com as a informação de alta frequência espacial. Normalmente, o método HPF, introduzido por SCHOWENGERDT (1980), produz imagens híbridas com a menor distorção espectral (CHAVEZ et al, 1991).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Vários programas foram desenvolvidos em linguagem IDL para possibilitar os testes. A avaliação dos resultados foi efetuada com base na comparação estatística e na análise visual. Na análise visual, a qualidade percebida da imagem é fortemente dependente do observador e da aplicação temática, por isso, foi também utilizada uma medida quantitativa.

4.1. Análise Estatística

O Coeficiente de Correlação fornece um indicativo de similaridade estatística entre dois conjuntos de dados. A correlação entre a banda PAN e a banda a ser substituída no processo de fusão deve ser alta. Além disso, uma boa técnica de fusão deve proporcionar bandas híbridas que mantenham as correlações das bandas originais com a banda PAN, e a similaridade das correlações entre si das bandas híbridas com aquelas existentes entre as bandas originais. O uso da correlação entre imagens, apesar de não ser uma medida absoluta da qualidade do resultado da fusão, fornece indicação sobre alterações que podem ocorrer na imagem híbrida em relação à original.

A tabela 2 apresenta a correlação entre a banda PAN e as bandas substituídas no processo de fusão. A maior correlação ocorre entre a banda PAN e a componente principal 1 obtida a partir das quatro bandas multiespectrais. Nos demais casos, a correlação se manteve em torno de 72%, indicando que, em todos os casos, a substituição da respectiva componente pela PAN resultará em alteração nas informações espectrais presentes nas bandas híbridas. O intervalo espectral adquirido pela PAN corresponde às faixas visível e infravermelho próximo; já as bandas B1, B2 e B3 se situam no visível e a B4 no infravermelho próximo, o que justifica a diferença dos valores de correlação para a componente principal 1

obtida com 3 e 4 bandas. A correlação não atinge o valor 1 porque o intervalo espectral abarcado pela PAN se estende além daqueles das 4 bandas MS.

Na tabela 3 são apresentados os coeficientes de correlação entre a banda PAN e as bandas originais reamostradas, e entre PAN e as correspondentes bandas híbridas, para os experimentos realizados com três bandas. Também são apresentadas as correlações entre si entre as bandas originais e híbridas. Verifica-se que a correlação entre as bandas PAN e B3 é de 72%, e que a substituição da banda B3 pela PAN gerando a banda híbrida B3" diminuiu a correlação anteriormente existente entre B3 e B1 e entre B3 e B2. No método HSV, a substituição da componente V pela banda PAN produziu bandas híbridas mais correlacionadas com a banda PAN, e com menor correlação entre si. A fusão com o método SCP produziu bandas híbridas mais correlacionadas com a banda PAN, mas manteve as correlações entre si entre as bandas híbridas semelhante às existentes entre as bandas B1, B2 e B3 originais.

Tabela 2. Coeficiente de correlação entre a banda PAN e as componentes a serem substituídas no processo de fusão. (*) SCP com 3 bandas e (**) SCP com quatro bandas.

<i>Banda 3</i>	<i>Valor</i>	<i>Componente 1(*)</i>	<i>Componente 1(**)</i>
0,7202	0,7150	0,7186	0,8925

Tabela 3. Coeficiente de correlação entre as bandas espectrais para as imagens originais e híbridas, para o caso de 3 bandas.

<i>Bandas</i>	<i>Original</i>	<i>Sub</i>	<i>HSV</i>	<i>SCP</i>
<i>Pan-B1</i>	0,6693	0,6693	0,8756	0,9581
<i>Pan-B2</i>	0,7197	1,7197	0,9489	0,9920
<i>Pan-B3</i>	0,7202	1,0000	0,9421	0,9854
<i>B1-B2</i>	0,9857	0,9857	0,8729	0,9734
<i>B1-B3</i>	0,9488	0,6693	0,7826	0,9009
<i>B2-B3</i>	0,9774	0,7197	0,9475	0,9579

Tabela 4. Coeficiente de correlação entre as bandas espectrais para as imagens originais e híbridas, para o caso de 4 bandas.

<i>Bandas</i>	<i>Original</i>	<i>SCP</i>	<i>HPF</i>
<i>Pan-B1</i>	0,6693	0,6242	0,7669
<i>Pan-B2</i>	0,7197	0,7017	0,8055
<i>Pan-B3</i>	0,7202	0,7026	0,7988
<i>Pan-B4</i>	0,7388	0,6409	0,7992
<i>B1-B2</i>	0,9857	0,9765	0,9882
<i>B1-B3</i>	0,9488	0,9100	0,9569
<i>B1-B4</i>	0,2566	-0,1647	0,3618
<i>B2-B3</i>	0,9774	0,9568	0,9806
<i>B2-B4</i>	0,3233	-0,0882	0,4173
<i>B3-B4</i>	0,3263	-0,0801	0,4138

Na tabela 4, são apresentados os coeficientes de correlação para os experimentos realizados com 4 bandas. Pode-se verificar, com o método SCP, que a correlação entre a banda PAN e as híbridas B1", B2" e B3" são próximas àquelas das bandas originais, com diminuição para a banda B4". As correlações entre si entre as bandas híbridas B1", B2" e B3" também são próximas às existentes entre as bandas originais reamostradas, enquanto entre as três bandas híbridas e a banda B4" ocorre diminuição. Para o caso da fusão com HPF, observa-se que ocorre aumento da correlação entre a banda PAN e cada uma das híbridas, bem como da correlação entre si das bandas híbridas.

A tabela 5 apresenta os coeficientes de correlação entre as bandas originais reamostradas e as respectivas bandas híbridas. Verifica-se que a utilização de 4 bandas para a fusão produz bandas híbridas com maior semelhança espectral com as bandas originais, resultando em coeficientes de correlação mais próximos de 1. No entanto, a banda PAN abarca toda a faixa de 0,45 a 0,90 μm , que compreende faixas não imageadas pelas 4 bandas MS (tabela 1), fazendo com que as bandas híbridas obtidas pelo método SCP não sejam espectralmente iguais às bandas originais. Já a utilização do método HPF, por adicionar componentes de alta frequência espacial às bandas MS, tende a manter maior semelhança espectral entre as bandas híbridas e originais.

Tabela 5. Coeficiente de correlação entre as imagens original e híbridas.

(*) SCP com 3 bandas. (**) SCP com 4 bandas.

<i>Bandas</i>	<i>SUB</i>	<i>HSV</i>	<i>SCP(*)</i>	<i>SCP(**)</i>	<i>HPF</i>
B1	1,0000	0,3323	0,7326	0,9258	0,9766
B2	1,0000	0,6860	0,7222	0,9184	0,9794
B3	0,7202	0,7793	0,7323	0,9184	0,9833
B4	-	-	-	0,9229	0,9899

4.2. Análise Visual

A resolução espacial é importante para extração de informação em áreas urbanas, por exemplo, detectar, distinguir entre e/ou identificar o tipo de edificações. Naturalmente, deve haver suficiente contraste espacial entre os objetos de interesse e o fundo (JENSEN e COWEN, 1999).

A figura 4a mostra, em escala de cinza, a composição BGR das bandas B1, B2 e B3 originais reamostradas. A vegetação fica escura, por apresentar baixa reflectância no visível, enquanto o solo parece marrom. Na composição colorida, os telhados se apresentam como branco, marrom, vermelho ou cinza escuro, em função do material constituinte. Existe semelhança de cores entre solo exposto e alguns telhados, e também entre telhados e asfalto. O asfalto aparenta cor cinza, enquanto as calçadas estão mais claras.

Figura 4. Composição das bandas 1, 2 e 3 em BRG: original (a), resultante da fusão pelo método da substituição (b) e pelo método HSV (c).



A figura 4b mostra, em escala de cinza, a composição BGR das bandas B1, B2 e PAN. Como resultado, na composição colorida da imagem híbrida, a vegetação se destaca, parecendo mais vermelha. O asfalto teve sua cor alterada, ficando azul claro, o que dificulta a diferenciação entre asfalto e calçadas, enquanto a água ficou mais escura que nas bandas originais. Os telhados escuros se

tornaram azulados, enquanto que os telhados com a cor marrom continuaram com cores equivalentes à de solo exposto. Já na substituição da banda 2 pela PAN, a vegetação se tornou mais verde, mas foi mantida a semelhança de cores entre telhado escuro e asfalto, bem como entre telhas de cor marrom e solo exposto. Deve-se considerar que, apesar da melhor resolução espacial, a banda PAN é menos sensível a variações de reflectância que são melhor registradas pelas bandas multiespectrais.

Na fusão com o método HSV (figura 4c), a vegetação teve sua cor alterada, passando a ficar com uma cor azulada, enquanto calçadas e solo exposto ficaram com a cor amarela. Houve melhor possibilidade de distinguir entre asfalto e cimento e entre ruas asfaltadas e ruas de terra.

Visualmente, a composição BGR das bandas B1", B2" e B3" obtidas com SCP foi semelhante para três bandas e quatro bandas, e se assemelha às bandas originais, com a água ficando mais escura. A figura 5a mostra, em escala de cinza, a composição das bandas B1", B2" e B3". A composição colorida destas bandas possibilita boa percepção dos diferentes tipos de telhado, de mata e de vegetação rasteira, de solo exposto, asfalto e cimento, e de água.

Figura 5. Composição em BGR das bandas 1, 2 e 3 resultantes da fusão pelo método SCP com 4 quatro bandas (a) , e pelo método HPF (b).



O Método HPF apresenta alteração visual por ter sido gerado pela somatória das bandas originais à imagem pancromática sobre a qual foi aplicado o filtro passa-alta. Assim, as altas frequências ficam ressaltadas, com o realce de bordas (figura 5b, mostrada em escala de cinza). Mas as cores percebidas na combinação colorida BGR das bandas originais tendem a ser preservadas na composição colorida das bandas híbridas.

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Todos os métodos produziram imagem híbrida com melhor resolução espacial, mas cada um deles produziu alterações espectrais das bandas resultantes em relação às bandas originais. O método mais simples, com menor custo computacional, é o da substituição, que mantém duas das três bandas originais sem alteração das informações espectrais, e pode-se escolher a banda a ser substituída, para ressaltar determinados tipos de cobertura do solo.

Os métodos SCP e HPF mantiveram maior correlação entre as bandas híbridas e as originais. O método SCP, pela semelhança entre o intervalo espectral abarcado pela banda PAN ser equivalente ao das bandas MS, e o método HPF por adicionar às bandas MS as altas frequências espaciais presentes na banda PAN pode levar à excessiva segmentação ao efetuar a classificação da imagem.

Para concluir, pode-se considerar que os resultados gerais apresentados pelos métodos anteriormente empregados para os sensores do satélite Landsat com menor resolução espacial, podem ser utilizados para imagens do satélite IKONOS. Mas, com o aumento da resolução espacial e radiométrica, ao efetuar os processos de classificação e de segmentação das imagens híbridas deve-se ter muito mais cuidado do que anteriormente, quando se dispunha apenas de imagens como as do Landsat TM ou do SPOT. A incorporação da lógica fuzzy na segmentação das imagens híbridas pode melhorar a separabilidade; esta alternativa está sendo verificada pelo Grupo IMAGO. Além disso, o uso de outros elementos, tais como textura, forma, tamanho, orientação, padrão, localização e contexto produzirá uma interpretação mais consistente do que a feita apenas com base nos pixels .

6. REFERÊNCIAS

- CHAVEZ, P. S.; SIDES, S. C.; ANDERSON, J. A.. Compararison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 57, n. 3, pp. 295-303, 1991.
- CHAVEZ, P. S. Digital Merging of Landsat/TM and Digitized NHAP Data for 1:24.000 Scale Image Mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 52, n. 10, pp. 1637-1646, 1986.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2000.

- GUARGUET-DUPORT, B.; GIREL, J.; CHASSERY, J. M.; PATOU, G. The Use of Multiresolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 9, pp. 1057-1066, 1996.
- JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1996.
- JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 65, n. 5, pp. 611-622, 1999.
- MUNECHIKA, C. K.; WARNICK, J. S.; SALVAGGIO, C.; SHOTT, J. R. Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 1, pp. 67-72, 1993.
- POHL, C. Tools and Methods for fusion of images of different spatial resolution. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, Jun. 1999.
- SCHOWENGERDT, R. A. Reconstruction of Multispatial, Multispectral Image Data Using Spatial Frequency Content. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 46, n. 10, pp. 1325-1334, 1980.
- WALD, L.; RANCHIN, T.; MANGOLINI, M. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of resulting Images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 63, n. 6, pp. 691-699, 1997.

(Recebido em 23/09/02. Aceito para publicação em 15/05/03.)