

FUSÃO DE DADOS MULTISENSOR PARA A IDENTIFICAÇÃO E O MAPEAMENTO DE AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA AMAZÔNIA

Fabrcio Dias Goncalves^{1*}, Pedro Walfir Martins e Souza Filho¹, Waldir Renato Paradella²
e Fernando Pellon de Miranda³

Recebido em 26 setembro, 2007 / Aceito em 23 junho, 2008
Received on September 26, 2007 / Accepted on June 23, 2008

ABSTRACT. Multisensor data fusion has been widely used in response to complementary nature of many data sets. This paper compares the results of four different data fusion methods used to merge Landsat-7 ETM+ and RADARSAT-1 Wide 1 data. The comparison was based on spectral characteristics of images using statistical and visual analyses of generated products. Four methods were used in the Landsat-7 ETM+ and RADARSAT-1 W1 data fusion: i) The best three bands combination (Landsat-7) based OIF (Optimum Index Factor) selection were merged with RADARSAT-1 data; ii) Decorrelation stretch was applied in the three bands (Landsat-7) selected by OIF and merged with RADARSAT-1 image; iii) PCA (Principal Component Analysis) to six reflective ETM+ bands (1, 2, 3, 4, 5 and 7) and posterior fusion of the three first Principal Components (PC1, PC2, PC3) with SAR; iv) A new approach SPC-SAR (Selective Principal Component – Synthetic Aperture Radar). The SPC-SAR product presented the best performance in the identification of coastal features and allowed the most effective enhancement of the different environments.

Keywords: multisensor remote sensing, image fusion, Amazon Coastal Zone.

RESUMO. A fusão de imagens multisensor tem sido um procedimento amplamente utilizado em função da natureza complementar dos vários conjuntos de dados. Este artigo compara o desempenho de quatro métodos diferentes para fusão de imagens Landsat-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1. A comparação foi baseada nas características espectrais das imagens, utilizando-se de análise estatística e visual dos produtos gerados. Quatro métodos foram usados para a fusão das imagens Landsat-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1: i) fusão do SAR (radar de abertura sintética) com a tríade selecionada pelo OIF (*Optimum Index Factor*); ii) realce por decorrelação da tríade selecionada pelo OIF, seguida da fusão com SAR; iii) ACP (Análise por Componentes Principais) para as seis bandas ETM+ do espectro refletido (1, 2, 3, 4, 5 e 7) e posterior fusão das três primeiras componentes principais (1CP; 2CP; 3CP) com o SAR; iv) SPC-SAR (Principal Componente Seletivo – SAR). O produto SPC-SAR mostrou melhor desempenho na identificação das feições costeiras e permitiu o realce mais efetivo dos diferentes ambientes.

Palavras-chave: sensoriamento remoto multisensor, fusão de imagens, Zona Costeira Amazônica.

¹Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), Av. Augusto Correa, 1, Campus do Guamá, Caixa Postal 8608, 66075-110 Belém, PA, Brasil – E-mails: fabrcio.goncalves@petrobras.com.br; walfir@ufpa.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), Caixa Postal 515, 12201-970 São José dos Campos, SP, Brasil – E-mail: waldir@itid.inpe.br

³Petróleo Brasileiro S.A., Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Melo (CENPES), Ilha do Fundão, Cidade Universitária, 21941-598 Rio de Janeiro, RJ, Brasil – E-mail: fmiranda@petrobras.com.br

*Instituição atual: Petróleo Brasileiro S.A.

INTRODUÇÃO

A utilização de dados de sensores remotos orbitais, em função da rapidez e precisão na obtenção de imagens, possibilita o monitoramento e o mapeamento dos ambientes terrestres com boa acurácia e menor custo. A visão sinóptica obtida com esses sensores auxilia em um melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros, bem como sua evolução no tempo e no espaço (Souza Filho & Paradella, 2002; Vrieling & Van der Sanden, 2001). A alta repetitividade na aquisição de imagens (resolução temporal) propicia o monitoramento dos ambientes e de suas rápidas variações.

As modernas plataformas de sensoriamento remoto com alta e média resolução espacial (Quickbird, Ikonos, SPOT-5, Landsat-7, CBERS-2) operam na faixa óptica do espectro eletromagnético (comprimentos de ondas entre 0.4-0.7 μm) e do infravermelho refletido (0.7-2.35 μm). Tais sensores remotos fornecem informações importantes dos alvos presentes na superfície da Terra. No entanto, nas regiões costeiras tropicais, notadamente na Amazônia, a constante cobertura de nuvens representa um obstáculo para sua utilização. Tal fato abre espaço para a utilização de sensores remotos ativos (JERS-1, RADARSAT-1, ENVISAT, ALOS-PALSAR), que operam na faixa das microondas (1 cm-1 m) (Cracknell, 1999; Kushwaha et al., 2000).

A versatilidade do sensoriamento remoto nas microondas é expressa pela capacidade de penetração em nuvens e chuvas (para comprimentos de ondas maiores que 4 cm), iluminação independente da fonte solar, com a possibilidade de mapeamento noturno, bem como a geometria controlada do feixe de iluminação, permitindo o aumento da capacidade de identificação de estruturas geológicas, unidades litológicas, formas e tipos de relevo (Barbosa et al., 1999; Paradella et al., 2000).

A extração de informações complementares de diferentes faixas do espectro eletromagnético (microondas, infravermelho e visível), em detrimento da obtenção da informação em cada faixa separadamente, obtida com a fusão de diferentes imagens, representa uma tendência atual dos estudos envolvendo dados de sensores remotos. Tal abordagem apresenta como resultado um produto híbrido, com qualidade superior para extração de atributos e maior capacidade de discriminação dos ambientes (Singhroy, 1996; Ramsey III et al., 1998; Souza Filho & Paradella, 2005).

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a potencialidade das técnicas de realce e fusão digital de dados multisensores, nas microondas (RADARSAT-1, banda C e polarização HH) e óptico (Landsat-7), para a identificação e o mapeamento dos ambientes fluvio-estuarinos amazônicos. Pretende-se, dessa forma,

contribuir para um melhor entendimento dos processos naturais na região, em especial a região da Baía de Guajará (Belém-PA), que foi escolhida como área teste em função de sua importância econômica e social.

ÁREA DE ESTUDO

A área estudada faz parte da Amazônia, que constitui a maior região tropical úmida do planeta (Fig. 1). A costa amazônica, localizada no norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão, onde os principais processos responsáveis pela dinâmica ambiental são a energia das marés e a descarga fluvial. Nesse contexto, a Baía de Guajará é tipicamente uma região fluvio-estuarina, situada em um domínio transicional dominado por mesomaré, com amplitude média de 3.5 m. Na Costa Amazônica, quando há ação das marés mais altas, as áreas inundáveis, tais como manguezais, pântanos e várzeas, estendem-se por mais de 30 km, formando uma das maiores áreas contínuas de manguezais do planeta (Souza Filho, 2005).

A Baía de Guajará é constituída por ambientes de elevada sensibilidade ambiental, representados por várzeas e rios, utilizados pela população local como via de transporte e fonte de subsistência alimentar e econômica (Gonçalves, 2005). A geomorfologia é representada por duas regiões de acordo com o seu posicionamento na fisiografia regional: a região de Terra Firme e a região das Várzeas, que se diferenciam por um conjunto de elementos antrópicos, bióticos e sócio-econômicos (Pará, 1995).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira, foi realizado o processamento digital das imagens ópticas (Landsat-7 ETM+) e de microondas (RADARSAT-1 W1). Na segunda, foram aplicadas técnicas de fusão digital de imagens multisensor e a avaliação do sinergismo radar/óptico, como também a geração e avaliação da imagem coeficiente de retroespalhamento (σ°) para a imagem RADARSAT-1 W1.

Para o processamento digital das imagens de sensores remotos foi utilizado o *software* PCI Geomatica V. 9.1 (PCI Geomatics, 2004). Para geração dos mapas e manipulação espacial de dados foi utilizado o *software* ArcView GIS 3.3 (ESRI, 2001).

A Tabela 1 abaixo mostra uma descrição dos principais parâmetros das imagens e dos sistemas sensores utilizados.

Processamento digital de imagens

A imagem RADARSAT-1 W1, órbita descendente, foi inicialmente reescalada de 16 para 8 bits e ortoretificada usando funções

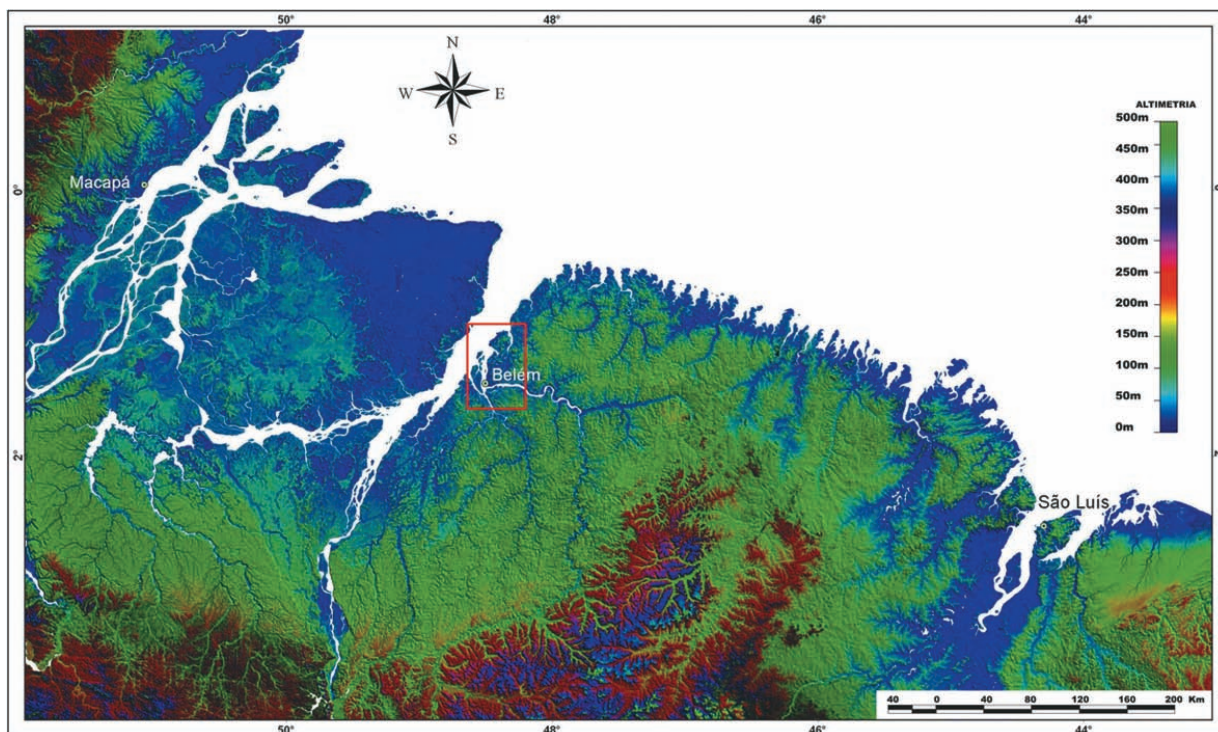


Figura 1 – Mapa de localização da área estudada, elaborado a partir do modelo digital de elevação (MDE) obtido pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Tabela 1 – Principais características dos sensores remotos utilizados na pesquisa.

Plataforma	Sensor	Data de aquisição	Ângulo de incidência (°)	Resolução espacial (m)	Tamanho pixel	Faixa imageada (km)
RADARSAT-1	Wide 1	5 Jan. 2003	20-31	33×27	12,5	165
Landsat-7	ETM+	3 Out. 2001	nadir	30	30	185
SRTM	InSAR	Fev. 2000	<i>off-nadir</i>	90	90	111

do OESE – *OrthoEngine Satellite Edition* (PCI Geomatics, 2004). Durante o processo de ortorretificação das imagens, foi utilizado o modelo digital de elevação adquirido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Rabus et al., 2003) e pontos de controle selecionados a partir de cartas planialtimétricas do IBGE, na escala 1:100.000. Neste procedimento, 15 pontos de controle no terreno ou GCP (*Ground Control Points*) foram coletados e o erro médio quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*) obtido foi de 0,5 e 0,9 pixels para as imagens Landsat-7 e RADARSAT-1 W1, respectivamente.

Em seguida, um filtro adaptativo (*Enhanced Frost*, com janela 3×3) para redução do *speckle* foi aplicado na imagem RADARSAT-1 W1, simultaneamente ao processo de ortorretificação, evitando múltiplos processos de reamostragem e asseguran-

do a padronização das imagens de sensores remotos, permitindo sua comparação em uma base de dados pixel-a-pixel (Souza Filho & Paradella, 2002).

A calibração radiométrica com a geração da imagem coeficiente de retroespalhamento (σ°) foi realizada para a imagem RADARSAT-1 W1. Posteriormente, a imagem calibrada foi ortorretificada e uma reamostragem por vizinho mais próximo foi realizada em detrimento da utilização de filtro adaptativo para redução de *speckle*, uma vez que esta filtragem poderia degradar a informação gerada pela imagem calibrada.

A correção atmosférica da imagem Landsat-7 foi realizada por meio da técnica de subtração do pixel escuro, diminuindo o efeito aditivo da atmosfera, melhorando a qualidade visual e radiométrica das imagens, bem como o desempenho das técnicas

de classificação (Chavez Jr., 1988). A escolha da melhor tríade de bandas espectrais para uma composição colorida, obtendo um conjunto de dados com a menor correlação e máxima variância, foi feita pelo critério estatístico do OIF (*Optimum Index factor*) (Chavez Jr. et al., 1982).

Fusão de imagens multisensor

Quatro abordagens para integração de dados multisensor foram avaliadas, usando duas técnicas diferentes de realce para as imagens Landsat-7 (ACP – Análise por Componentes Principais e Decorrelação). O objetivo da integração digital de dados de sensores remotos é maximizar a extração de informações, utilizando para isso a sinergia obtida com a fusão de imagens correspondentes a diferentes faixas do espectro eletromagnético (e.g. SAR/óptico). Tal procedimento permite uma melhor identificação e mapeamento das principais feições dos ambientes costeiros amazônicos (Souza Filho & Paradella, 2002; Gonçalves, 2005; Gonçalves & Souza Filho, 2005; Souza Filho & Paradella, 2005).

Assim, as abordagens de integração testadas foram: 1) fusão do SAR com a tríade selecionada pelo OIF; 2) realce por decorrelação da tríade selecionada pelo OIF, seguida da fusão com o SAR; 3) ACP nas seis bandas Landsat-7 ETM+ do espectro refletido (1, 2, 3, 4, 5, 7) e posterior fusão das três primeiras componentes principais com o SAR; 4) SPC-SAR (Paradella et al., 1999; Souza Filho & Paradella, 2005), onde as primeiras componentes principais dos conjuntos de bandas (ETM+ 1, 2, 3) e (ETM+ 5 e 7) são usadas como dados de entrada conjuntamente com a banda 4 numa transformação RGB-IHS, com a subsequente substituição do componente I pela imagem RADARSAT-1 durante a transformação inversa IHS-RGB.

Realce por decorrelação

O realce por decorrelação é uma técnica também baseada no conceito de rotação espectral, produzindo imagens não correlacionadas, tal como na ACP. Entretanto, esta técnica minimiza o problema da perda das características espectrais dos alvos e restitui as relações originais de cores, conferindo ao interprete maior capacidade de discriminação dos alvos superficiais (Harris et al., 1994).

O realce por decorrelação gera imagens com maior contraste espectral e, conseqüentemente, maior variação de cores, mantendo preservada a relação espectral dos alvos da imagem original, o que não ocorre na ACP.

Análise por componentes principais (ACP)

A técnica ACP foi usada para eliminar a redundância de informação contida nas bandas refletidas do Landsat-7 ETM+, pela alta correlação entre as bandas, bem como para realçar feições espectrais sutis, que são exclusivas de cada banda espectral (Jensen, 1996; Picchiotti et al., 1997).

A ACP é baseada em transformações matemáticas que geram novas bandas (componentes principais) não correlacionadas entre si, resultantes de combinações lineares das bandas originais, onde a contribuição de cada banda para uma determinada componente principal (CP) é função dos autovetores correspondentes. Já os autovalores representam a variância das componentes principais (Picchiotti et al., 1997; Grunsky, 2002).

Análise por componentes principais seletivos (SPC)

Uma variação da técnica ACP, chamada de *Selective Principal Component Analysis* (SPC), foi proposta por Chavez Jr. et al. (1984 *apud* Paradella et al., 2001) e reformulada por Chavez Jr. & Kwarteng (1989). Uma nova abordagem chamada de SPC-SAR, criada por Paradella et al. (1999) com o objetivo de integrar imagens SAR e ópticas, tem permitido a obtenção de excelentes resultados, maximizando a quantidade de informação no produto resultante (Souza Filho & Paradella, 2002).

Na técnica SPC-SAR são utilizados grupos de bandas altamente correlacionadas, representando faixas específicas do espectro eletromagnético, como dados de entrada em uma Análise por Componentes Principais Seletivos (Paradella et al., 1999). Assim, as imagens são agrupadas objetivando mapear a maioria das informações (variância) nas primeiras componentes principais, em função da grande correlação entre as bandas utilizadas.

Assim, os subconjuntos de bandas utilizados como dados de entrada na foram: Landsat-7 ETM+ 1, 2, 3 (grupo 1) e ETM+ 5, 7 (grupo 2). Em seguida, as primeiras componentes principais do grupo 1 e do grupo 2, que detêm a máxima variância do visível e infravermelho médio, foram associadas à banda 4 do ETM+ em uma transformação no espaço de cores RGB-IHS, buscando mapear uma ampla faixa de respostas espectrais dos alvos terrestres (Paradella et al., 2001; Souza Filho & Paradella, 2005). Ademais, o restante do procedimento segue com a integração SAR/Óptico via transformação IHS, onde o componente I (intensidade) é substituído pela imagem RADARSAT-1, o componente H (matiz) é mantido e o S (saturação) foi substituído por uma máscara sintética com valor digital constante de 60, o que permite uma mistura proporcional da matiz e intensidade (Harris et al., 1994; Paradella et al., 2001) (Fig. 2).

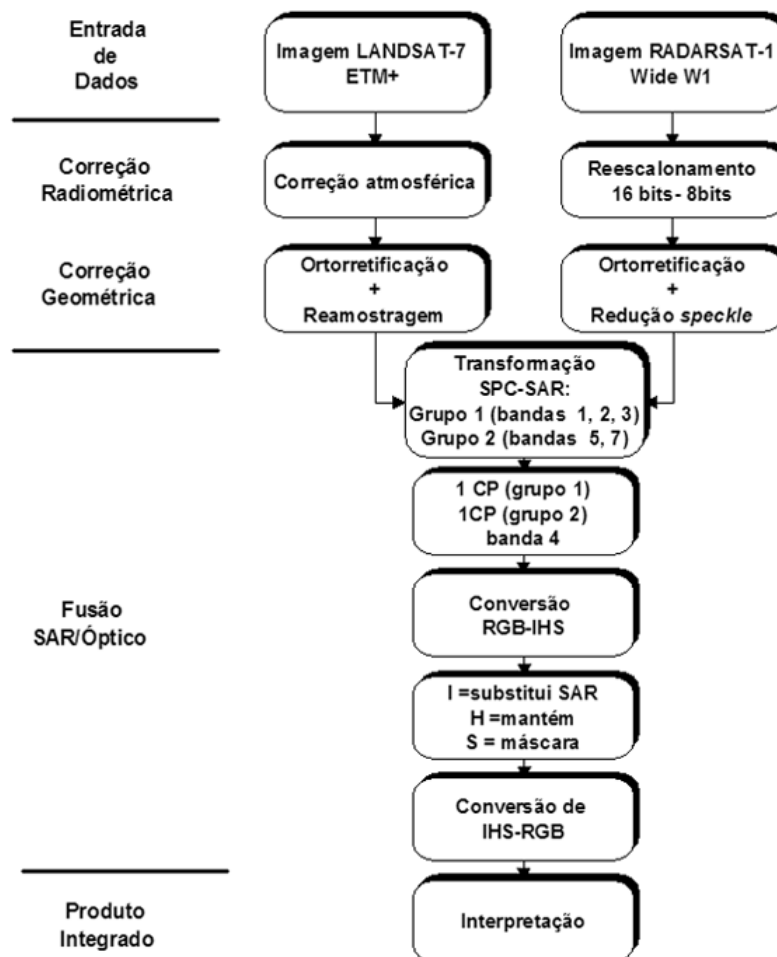


Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos para fusão de dados utilizando a técnica SPC-SAR (Paradella et al., 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Imagens Landsat-7 ETM +

A correção do efeito atmosférico, aplicada nas imagens Landsat-7 ETM+ pelo método da subtração do pixel escuro, aumentou seu contraste e removeu os valores adicionais de níveis de cinza ocasionados pelo espalhamento atmosférico. Este procedimento melhorou a qualidade visual e radiométrica das imagens.

Através do cálculo OIF, foram selecionadas as bandas 3, 5, 7 como a melhor tríade para uma composição colorida. Este conjunto de imagens, segundo os critérios do OIF, apresenta a maior quantidade de informação e menor taxa de redundância entre bandas analisadas, mostrando o melhor conjunto de dados para uma composição colorida, considerando apenas os critérios estatísticos.

A composição 5R7G3B gerada apresenta informações sobre a quantidade de sedimentos em suspensão nos corpos de água em

tons de azul, com menor quantidade de sedimentos em tons de azul escuro. Variações no teor de umidade na vegetação aparecem em tons de marrom, onde o marrom mais escuro representa a Região de Várzeas e o marrom mais claro a Região de Terra Firme. De maneira similar, as áreas construídas são apresentadas em coloração branca amarelada, denotando uma alta resposta espectral desse alvo para todas as três bandas utilizadas na composição selecionada (Fig. 3).

A análise das imagens Landsat-7 ETM+ mostrou uma ampla gama de informação espectral, função da interação da energia eletromagnética nas diferentes faixas de comprimento de onda com os alvos superficiais, que é traduzida num componente cromático, permitindo uma clara distinção dos tipos de vegetação e dos solos expostos. No entanto, esta é uma imagem relativamente lisa sem a informação de textura relacionada à rugosidade superficial dos alvos.

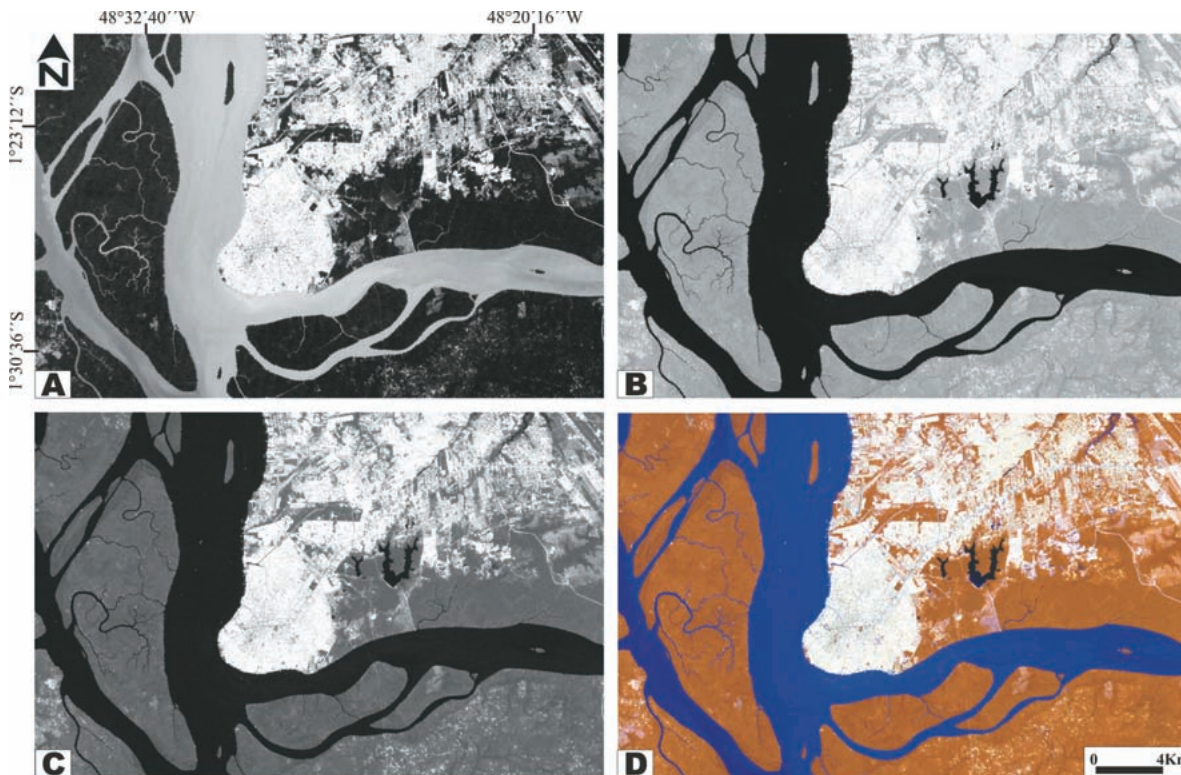


Figura 3 – Tríade de bandas multiespectrais do Landsat-7 ETM+ que apresentou o melhor OIF (*Optimum Index Factor*): A) banda 3; B) banda 5; C) banda 7; D) composição colorida resultante (5R7G3B).

Imagem RADARSAT-1 Wide 1

A análise dos coeficientes de retroespalhamento mostrou que, na imagem RADARSAT-1 W1, há certa dificuldade de identificação e mapeamento para determinadas unidades de paisagem, em função da grande sobreposição entre os valores estatísticos (Fig. 4). Os valores de coeficientes de retroespalhamento apresentam valores similares para as Regiões de Várzea (valor médio de -6.6 dB), Planície de Maré (valor médio de -6.6 dB) e Terra Firme (valor médio de -7.1 dB). Tal efeito, impossibilita ou dificulta a identificação e o mapeamento destes ambientes usando somente as imagens RADARSAT-1 W1. No entanto, os corpos de água e as áreas urbanas foram mapeados com boa acurácia, apresentando valores médios de coeficiente de retroespalhamento bem distintivos para os Canais Fluviais (-10.9 dB), Áreas Urbanas (-2.0 dB) e Lagos Artificiais (-18.9).

Todavia, a aplicação de técnicas de integração de dados é de grande relevância, uma vez que fica comprometida a identificação e o mapeamento de algumas unidades de paisagem, utilizando as imagens RADARSAT-1 W1 e Landsat-7 ETM+ separadamente, como visto anteriormente.

Fusão radar/óptico

No produto híbrido gerado, enquanto o SAR (RADARSAT-1 W1) fornece informações sobre a geometria do terreno (macro e microtopografia) e suas propriedades elétricas (conteúdo de umidade), realçando características geométricas e texturais, os sensores ópticos (Landsat-7 ETM+) fornecem informações espectrais relacionadas com as propriedades físico-químicas dos alvos (Lewis et al., 1998). Portanto, a integração destas imagens é uma efetiva técnica de realce para a identificação dos ambientes, mapeamento geomorfológico e do uso da terra (Singhroy, 1996). As abordagens utilizadas para integração das imagens apresentaram diferentes resultados e serão detalhadas abaixo.

As Tabelas 2 e 3 mostram os parâmetros estatísticos, autovetores e autovetores das componentes principais gerados a partir da matriz de covariância calculada para as seis bandas refletidas do Landsat-7 ETM+ (1, 2, 3, 4, 5 e 7). Assim, a primeira componente principal (1ª CP) retém 71.46% da variância das seis bandas refletidas do Landsat-7 ETM+, a segunda componente principal (2ª CP) apresenta 26.46% da variância total e a terceira componente principal (3ª CP) possui 1.55% da variância. Estas três primeiras componentes principais agregam 99.47% da

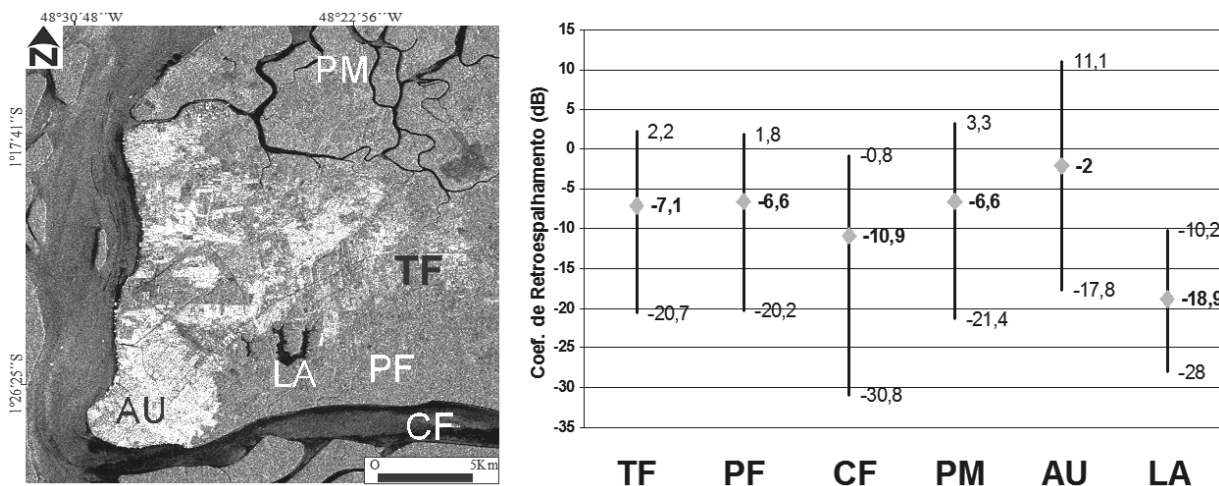


Figura 4 – Principais parâmetros (valores máximo, médio e mínimo) obtidos pela análise estatística das amostras de coeficiente de retroespalhamento para as principais unidades de paisagem identificadas na área em estudo (Imagem Radarsat-1 W1). **TF** = Terra firme; **PF** = Planície fluvial; **CF** = Canais fluviais; **PM** = Planície de maré; **AU** = Áreas urbanas; **LA** = Lagos artificiais.

variância total. Com isso, as informações das seis bandas espectrais podem ser comprimidas dentro das três primeiras componentes principais, abrangendo todo o espectro coberto pelo sensor ETM+ (visível, infravermelho próximo e médio).

Tabela 2 – Estatística das componentes principais para as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 7) do Landsat-7 ETM+.

CP	Autovalor	Desvio-padrão	Variância (%)	Cumulativo (%)
1	2390,8389	48,8962	71,46	71,46
2	885,1882	29,7521	26,46	97,92
3	51,7444	7,1934	1,55	99,47
4	10,1635	3,1880	0,30	99,77
5	5,4250	2,3292	0,16	99,93
6	2,3505	1,5331	0,07	100

A análise da matriz de autovetores (Tab. 3) mostra que a 1ª CP é dominada pela contribuição da banda 5 (0.67747), banda 4 (0.62794) e banda 7 (0.34593). Este fato sugere que os maiores valores de autovetores para essas bandas têm relação com a maior resposta espectral dos solos expostos/áreas urbanas nas bandas 5 e 7 (região do infravermelho próximo e médio) e da vegetação na banda 4 (infravermelho próximo). A 1ª CP mostra claramente uma distinção entre a maior colaboração das bandas do infravermelho, em detrimento da menor colaboração das bandas do visível, de forma que estes dois conjuntos de dados estão inversamente associados.

A 2ª CP é dominada pela contribuição da banda 3 (-0.57380), banda 7 (-0.47272) e banda 4 (0.40730). Tal resultado sugere

uma forte influência das respostas espectrais da quantidade de sedimentos em suspensão na Baía de Guajará, áreas urbanas e vegetação, respectivamente. A resposta espectral dos sedimentos em suspensão é influenciada pela natureza e tamanho das partículas em suspensão, por sua distribuição espacial, variações sazonais e condições climáticas (Picchiotti et al., 1997). A 3ª CP é dominada pelas contribuições das bandas 4, 3 e 2.

A técnica ACP mostrou-se excelente para o realce de feições espectrais sutis, como também para reduzir a dimensionalidade dos dados, uma vez que nas três primeiras componentes principais as maiores contribuições (autovetores) estão relacionadas às principais feições ambientais encontradas na área em estudo. Dado que as três primeiras componentes principais retêm 99.47% da variância, estas foram usadas para integração com a imagem RADARSAT-1 W1, via transformação IHS.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os parâmetros estatísticos dos autovetores e autovalores calculados para os dois conjuntos de bandas ETM+ utilizados, grupo 1 (bandas 1, 2, 3) e grupo 2 (bandas 5 e 7). Estes grupos foram usados como dados de entrada numa transformação por componentes principais na técnica SPC-SAR (*Selective Principal Component – SAR*). Dessa forma, o uso de pequenos grupos de bandas altamente correlacionadas como dados de entrada para uma ACP, possibilita que informações importantes de cada grupo de bandas sejam mapeadas dentro da 1CP (Picchiotti et al., 1997).

Os produtos híbridos gerados pela fusão de dados SAR/ETM+ foram avaliados visualmente, considerando padrões de cores e de textura. Assim, o melhor desempenho do produto

Tabela 3 – Matriz de autovetores das componentes principais para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat-7 ETM+, destacando em negrito as maiores contribuições para as três primeiras CP.

Matriz de Autovetores						
Bandas	1 CP	2 CP	3 CP	4 CP	5 CP	6 CP
1	-0,06116	-0,27884	0,24609	0,26698	-0,74242	0,48527
2	-0,07253	-0,32775	0,40899	-0,00059	-0,26292	-0,80680
3	-0,13437	-0,57380	0,48581	-0,18700	0,52900	0,31919
4	0,62794	0,40730	0,59918	0,25616	0,11491	0,04420
5	0,67747	-0,31021	-0,20546	-0,59990	-0,20475	0,02813
7	0,34593	-0,47272	-0,36732	0,68429	0,21148	-0,09469

integrado está relacionado com uma melhor identificação dos ambientes e feições costeiras, considerando a variação do componente cromático e textural (Fig. 5).

Tabela 4 – Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas 1, 2 e 3 do Landsat-7 ETM+.

Bandas	1 CP	2 CP	3 CP
1	-0,38560	0,77957	-0,49353
2	-0,46130	0,30036	0,83486
3	-0,79907	-0,54959	-0,24380
Variância	98,37%	1,09%	0,53%

Tabela 5 – Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas 5 e 7 do Landsat-7 ETM+.

Bandas	1 CP	2 CP
5	-0,85112	0,52498
7	-0,52498	-0,85112
Variância	95,81%	4,19%

A fusão da imagem SAR com a tríade selecionada pelo OIF não mostrou bom resultado, uma vez que não possibilitou boa discriminação dos diferentes ambientes flúvio-estuarinos da Baía de Guajará (Fig. 5A). A interpretação e detecção de padrões neste produto integrado são baixas, o que têm relação com a menor variação no seu conteúdo cromático. Este produto forneceu principalmente informações referentes ao SAR, macro e microtopografia, apresentando um padrão de cores homogêneo.

De forma contrária, quando a tríade selecionada pelo OIF foi submetida a um realce por decorrelação e em seguida fundida com a imagem SAR (Fig. 5B), o produto resultante mostrou uma maior variação no conteúdo cromático, mas apresentando certa confusão entre os ambientes, não mostrando bons padrões distintos e dificultando a interpretação e a extração de informações.

A fusão da imagem SAR com as três primeiras componentes principais das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat-7 não apresentou bons resultados (Fig. 5C). Este produto apresentou o pior resultado quanto à distinção dos ambientes, não possibilitando nem mesmo uma clara diferenciação entre as regiões de água e as planícies de inundação (fluvial e estuarina).

O produto integrado SPC-SAR mostrou um excelente resultado para o mapeamento da região flúvio-estuarina da Baía de Guajará, conferindo maior variação aos padrões de cores e texturas, facilitando a interpretação destes ambientes. As informações cromáticas e texturais obtidas neste produto têm relação com diferenças na topografia (elevação), conteúdo de umidade dos solos e vegetação, controle geobotânico (estrutura da vegetação), bem como o arranjo e a disposição dos elementos superficiais. Dessa forma, este produto foi o que agregou maior valor para o reconhecimento e interpretação dos ambientes da Baía de Guajará (Fig. 5D).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da imagem Landsat-7 ETM+ mostrou uma ampla gama de informações espectrais (componente cromático), permitindo uma boa distinção dos diferentes ambientes. Esta imagem apresenta a desvantagem de ter baixa informação textural e a limitação da aquisição de dados em condições atmosféricas adversas. A imagem SAR forneceu informações sobre a geometria do terreno (topografia e rugosidade superficial) e suas propriedades elétricas (conteúdo de umidade), realçando características geométricas e texturais.

Este trabalho mostrou a importância da utilização de técnicas de integração de dados, uma vez que fica comprometida a identificação e o mapeamento de algumas unidades de paisagem, usando as imagens Landsat-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1, isoladamente. As técnicas de fusão usadas permitiram maximizar a extração de informações, valendo-se do sinergismo obtido com

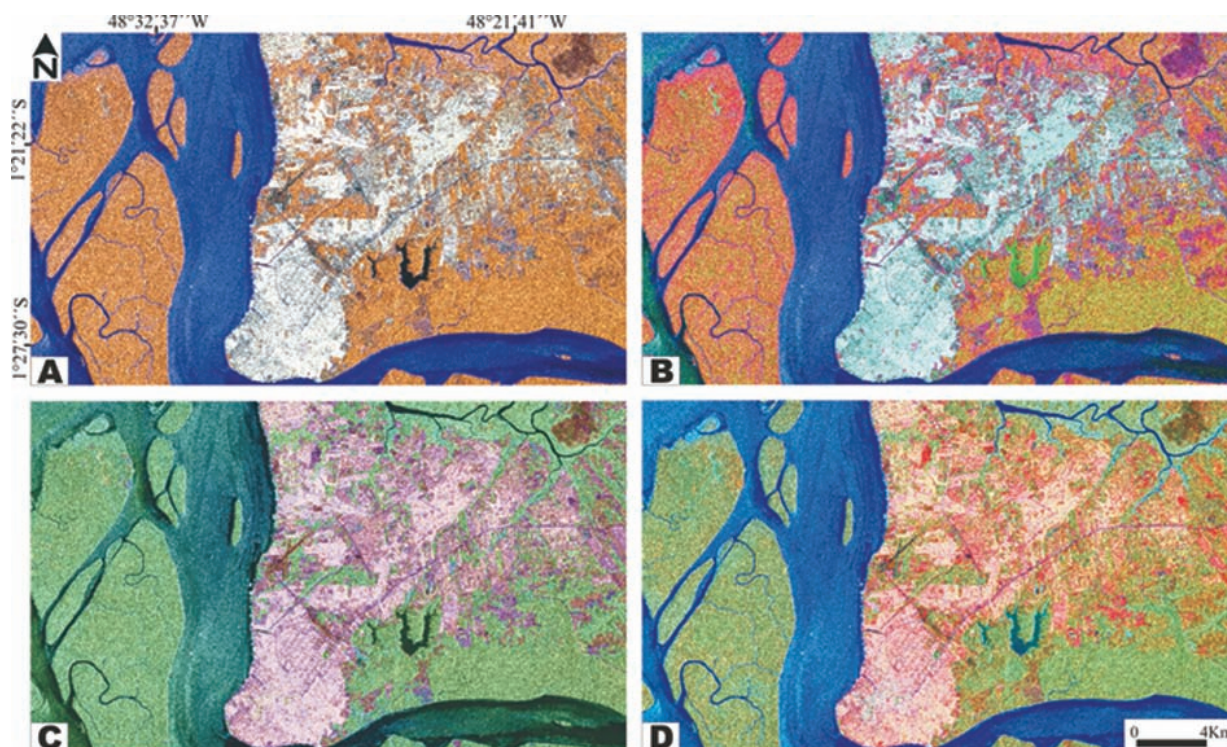


Figura 5 – Técnicas de integração utilizadas: A) fusão SAR + tríade OIF (bandas 3B, 5R, 7G); B) realce por decorrelação na tríade OIF e posterior fusão com SAR; C) ACP nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 e fusão 1CP, 2CP, 3CP + SAR; D) SPC-SAR (Paradella et al., 1999).

a imagem híbrida gerada e apresentando qualidade superior para extração de feições e atributos.

O produto integrado a partir da técnica SPC-SAR mostrou o melhor resultado para o mapeamento da região, permitindo uma melhor variação nos padrões de cores e de texturas e facilitando a interpretação dos ambientes. Dessa forma, este foi o produto que mais forneceu valor agregado para interpretação e mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão de uma bolsa de fixação de recursos humanos (Edital CT-AMAZÔNIA/MCT/CNPq – Proc. #553175/2005-0), assim como aos projetos PIATAM Mar e PETRORISCO, financiados pela Petrobras e FINEP, pelo suporte à realização desse estudo. O segundo e o terceiro autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de produtividade em pesquisa (Proc. #303238/2002-0 e #300985/90-8, respectivamente).

REFERÊNCIAS

BARBOSA MP, SINGHROY V & SAINT-JEAN R. 1999. Mapping coastal erosion in southern Paraíba, Brazil from RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(3): 323–328.

CHAVEZ JR. PS. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3): 459–479.

CHAVEZ JR. PS & KWARTENG AY. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(3): 339–348.

CHAVEZ JR. PS, BERLIN GL & SOWERS LB. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8: 23–31.

CRACKNELL AP. 1999. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones – an update. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3): 485–496.

ESRI. 2001. *Using ArcView GIS*, New York, 350 p.

GONÇALVES FD. 2005. Utilização de dados de sensores remotos para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na Baía de Guajará, Belém-PA. Belém, Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Dissertação de Mestrado. 179 p.

GONÇALVES FD & SOUZA FILHO PWM. 2005. Integração digital de imagens RADARSAT-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará

- (Belém-PA). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 1: 2005, Goiânia. Anais SBSR, São José dos Campos, p. 1789–1796.
- GRUNSKY EC. 2002. The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-1 satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(6): 758–769.
- HARRIS JR, BOWIE C, RENCZ AN & GRAHAM D. 1994. Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20(3): 210–221.
- JENSEN JR. 1996. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. 2nd edition, New Jersey, Prentice Hall, 318 p.
- KUSHWAHA SPS, DWIVEDI RS & RAO BRM. 2000. Evaluation of various digital image processing techniques for detection of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 565–579.
- LEWIS AJ, HENDERSON FM & HOLCOMB DW. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON FM & LEWIS AJ (Ed.). *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, 131–180.
- PARÁ. 1995. *Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbanas: Região Metropolitana de Belém*. Governo do Estado do Pará/IBGE, 157 p.
- PARADELLA WR, SANTOS AR, VENEZIANI P & MORAIS MC. 1999. Avaliação de dados do RADARSAT-1 em aplicação geológica na Província Mineral de Carajás, Estado do Pará. Relatório Final: FAPESP #10946-4/1997, INPE, São José dos Campos.
- PARADELLA WR, SANTOS AR, VENEZIANI P & MORAIS MC. 2000. Synthetic Aperture Radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the Brazilian Amazon region. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3): 538–542.
- PARADELLA WR, SANTOS AR, VENEZIANI P & MORAIS MC. 2001. O Sinergismo de Imagens Standard Descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do Landsat-5 em Aplicação Geológica na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10: 2001, Foz do Iguaçu. Anais SBSR, São José dos Campos. p. 315–322.
- PCI GEOMATICS. 2004. *Geomatica: User Manual*. PCI Geomatics, Version 9.1, Canada, 352 p.
- PICCHIOTTI A, CASACCHIA R & SALVATORI R. 1997. Multitemporal principal component analysis of spectral and spatial features of the Venice Lagoon. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1): 183–196.
- RABUS B, EINEDER M, ROTH A & BAMLER R. 2003. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57: 241–262.
- RAMSEY III EW, NELSON GA & SAPKOTA SK. 1998. Classifying coastal resources by integrating optical and radar imagery and color infrared photography. *Mangroves and Salt Marshes*, 2: 109–119.
- SINGHROY V. 1996. Interpretation of SAR images for coastal zone mapping in Guyana. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22(3): 317–328.
- SOUZA FILHO PWM. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4): 427–435.
- SOUZA FILHO PWM & PARADELLA WR. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10(2): 123–132.
- SOUZA FILHO PWM & PARADELLA WR. 2005. Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31(3): 214–224.
- VRIELING A & VAN DER SANDEN J. 2001. Satellite remote sensing for monitoring coastline dynamics of the Canadian Beaufort sea coast. Canada Center for Remote Sensing, Internal Report, 31 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Fabrcio Dias Gonçaves. Geólogo formado pela UFPA em 2003, obteve o título de mestre em 2005. Desenvolveu trabalho na área de sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos no Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA. Atualmente, é geólogo da Petróleo Brasileiro S.A., lotado na Unidade de Negócio de Exploração e Produção da Bahia.

Pedro Walfir Martins e Souza Filho. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Pará (1993), especialista em Geologia e Geofísica Marinha pela Universidade Federal Fluminense (1993), e doutorado na área de Sensoriamento Remoto Geológico na Universidade Federal do Pará (2000). É professor adjunto da Faculdade de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará desde 2002. Atualmente coordena o Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido da UFPA, é Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq desde 2003 e foi indicado como Jovem Cientista da Academia Brasileira de Ciências em 2008.

Waldir Renato Paradella. Geólogo (IGUSP), Mestre em Sensoriamento Remoto (INPE), Doutor em Geologia (IGUSP), pesquisador-titular III do INPE e Bolsista em PQ pelo CNPq (IB). Sua linha de pesquisa principal envolve o uso de radares multipolarizados e polarimétricos nas Geociências (Geologia, Cartografia) e é o pesquisador responsável no Brasil pelo segmento de aplicações do MAPSAR, uma iniciativa de construção de um radar imageador orbital no Programa Espacial brasileiro, entre o Brasil (INPE e AEB) e a Alemanha (DLR).

Fernando Pellon de Miranda. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1978), mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações em Geologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1984) e doutorado pela University of Nevada (1990). Atualmente é Geólogo Sênior da PETROBRAS/CENPES, Professor Colaborador do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia e Collaborating Professor of Environmental Studies da Washington and Lee University.