

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL PARA O MAPEAMENTO DA PLUMA DO RIO AMAZONAS

Gustavo S. F. MOLLER¹

Evelyn M. L. de M. NOVO²

Milton KAMPEL³

Resumo

Este artigo tem como objetivo verificar a aplicação da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para o mapeamento da pluma do Rio Amazonas, uma feição de grande importância na dinâmica costeira da região nordeste da América do Sul. Foram utilizados dados de reflectância de sensoriamento remoto obtidos pelo sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) para identificar 5 massas de água com características espectrais e de cor distintas, das quais se obtiveram assinaturas espectrais médias. Os 5 tipos de massas de água foram classificados de acordo com suas características espectrais, sendo estas, típicas de águas com (i) sedimentos em suspensão, (ii) matéria orgânica dissolvida, (iii) água oceânica e (iv e v) com diferentes concentrações de concentrações de clorofila. As assinaturas espectrais médias foram utilizadas como *endmembers* no MLME o que resultou em 5 imagens fração. A imagem fração referente à água oceânica foi a que possibilitou a melhor identificação e mapeamento da pluma. A área mapeada na imagem mostrou a grande extensão (510 x 10³ km²) que a pluma alcança na direção noroeste da desembocadura do Rio Amazonas e para o Oceano Atlântico sob o efeito da Contra Corrente Norte Equatorial e Corrente Norte do Brasil, respectivamente.

Palavras chave: Modelo linear de mistura espectral. Pluma do Rio Amazonas. Sensoriamento remoto. SeaWiFS.

Abstract

Spectral mixture analysis applied for mapping the plume of the Amazonas River

This paper aims to verify the applicability of Spectral Mixture Analysis (SMA) for mapping the plume of the Amazonas River, a feature of great importance for the coastal dynamics at the South-American Northeastern coast. Remote sensing reflectance data acquired by Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) were utilized to identify 5 water masses with different spectral and color characteristics. Through one SeaWiFS image were identified 5 water masses with different spectral and color characteristics, of what mean spectral signatures were obtained. The 5 types of water masses were classified according to its spectral characteristics, of what demonstrated typical behavior of waters with (i) suspended sediment, (ii) dissolved organic matter, (iii) oceanic water, and (iv and v) with different chlorophyll concentration. The mean spectral signatures were applied as endmembers in the SMA resulting in 5 fraction images. The fraction image related to the oceanic water allowed the best classification and mapping of the plume. The mapped area in the image shows the great extension (510 x 103 km²) that the plume can reach in the Northwestern direction from the Amazonas River mouth and into the Equatorial Atlantic, driven by the North Equatorial Counter Current and the North Brazil Current, respectively.

Key words: Spectral mixture analysis. Amazon River plume. Remote sensing, SeaWiFS.

¹ Mestrando em Sensoriamento Remoto pelo programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. e-mail: gustavo.moller@gmail.com

² Pesquisador Titular III - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação Geral de Observação da Terra, Divisão de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. e-mail: evlyn@ltd.inpe.br

³ Pesquisador - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação Geral de Observação da Terra, Divisão de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. e-mail: milton@dsr.inpe.br

INTRODUÇÃO

As descargas dos rios nos oceanos influenciam as características geomorfológicas (erosão e deposição), físicas (temperatura e propriedades ópticas), químicas (aporte de nutrientes) e biológicas (produtividade primária) das regiões costeiras adjacentes (DAGG, BENNER et al., 2004; GEYER, HILL et al., 2004). No caso do Rio Amazonas, que contribui com, aproximadamente, 16% do total de descarga de água doce para os oceanos do planeta, a influência alcança escalas globais (MILLIMAN; MEADE, 1983; GEYER, BEARDSLEY et al., 1996; NITTROUER; DEMASTER, 1996; HU, MONTGOMERY et al., 2004).

A descarga, por este rio, de grande volume de água ($630 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) e de altas concentrações de materiais inorgânicos ($115 \times 10^7 \text{ ton ano}^{-1}$), principalmente nas frações silte e argila, e orgânicos particulados e dissolvidos é acompanhada de grande aporte de nutrientes (NH_3 , NO_2 e NO_3) o que, conseqüentemente, influi de forma significativa na produtividade primária do Oceano Atlântico Equatorial (MILLIMAN; MEADE, 1983; MULLER-KARGER, MCCLAIN et al., 1988; DEMASTER; POPE, 1996; DEMASTER, SMITH et al., 1996; GEYER, BEARDSLEY et al., 1996; NITTROUER; DEMASTER, 1996). Neste sentido, a pluma do Rio Amazonas e as áreas sob influência do material descarregado por este rio representam, também, importantes sumidouros de carbono (*carbon sink*) atmosférico (RICHEY, HEDGES et al., 1990; SMITH; DEMASTER, 1996; TERNON, OUDOT et al., 2000), o que confere a estas feições grande destaque devido à sua participação no equilíbrio climático global (SCHIMMEL, 1995).

Entretanto, a pluma do Rio Amazonas e, conseqüentemente, o material descarregado (orgânico e inorgânico) por este rio sofrem influências de diversos fatores ambientais que agem em diferentes escalas espaciais e temporais, como por exemplo: as correntes costeiras, as marés, os ventos e as variações sazonais na vazão do rio. Além destes fatores, pode-se citar, também, a localização latitudinal da bacia, que resulta na diminuição da atuação da força de Coriolis sobre a dispersão da pluma e, também, na intensificação dos ventos alísios e das amplitudes de maré (GEYER; KINEKE, 1995; LENTZ, 1995; GEYER, BEARDSLEY et al., 1996; NITTROUER; DEMASTER, 1996; HU, MONTGOMERY et al., 2004).

A dinâmica intensa da pluma e a sua grande dimensão tornam a aquisição de dados a partir de coletas *in situ* para fins de mapeamento e monitoramento uma atividade demorada e custosa financeiramente. Desta forma, o sensoriamento remoto orbital da cor do oceano apresenta-se como uma ferramenta útil para a aquisição de dados de forma sinóptica, permitindo, também, o monitoramento com alta resolução temporal das regiões costeira e oceânica adjacentes (CHEN, HANSON et al., 1991).

Nesta linha, diversos estudos mostram que o material inorgânico em suspensão (aqui denominado como sedimento), a matéria orgânica dissolvida e o fitoplâncton apresentam respostas espectrais diferenciadas (CURRAN; NOVO, 1988; CHEN, HANSON et al., 1991). Este comportamento espectral permite, a partir da utilização de técnicas de processamento digital de imagens, mapear a pluma de material descarregado pelos rios (HU, MONTGOMERY et al., 2004; MILLER; MCKEE, 2004; VECCHIO; SUBRAMANIAM, 2004; WARRICK, MERTES et al., 2004; THOMAS; WEATHERBEE, 2006; LORENZZETTI, NEGRI et al., 2007).

Cabe salientar que, atualmente, devido ao fato de não haver sensores remotos orbitais capazes de adquirir informações sobre a salinidade da água, principal propriedade físico-química da água capaz de distinguir as plumas de rios das águas marinhas adjacentes, a pluma do Rio Amazonas será identificada neste trabalho, a partir dos materiais orgânicos e inorgânicos procedentes, preferencialmente, deste rio.

Entretanto, existem limitações tecnológicas (insuficientes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas dos sensores atuais) e metodológicas (dificuldades em modelar os efeitos de misturas espectrais que ocorrem entre os componentes opticamente ativos

da água (COAS)) que não permitem, ainda, adquirir dados precisos de águas opticamente complexas (águas continentais, costeiras e oceânicas) (RUDORFF, NOVO et al., 2007). Devido a estas limitações são propostos modelos, como o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que visam isolar a componente da reflectância da água que traz a informação sobre os COAs dos demais fluxos de radiação detectados pelos sensores (RUDORFF, NOVO et al., 2007).

Portanto, o objetivo deste estudo é o de verificar a aplicabilidade da técnica de MLME no mapeamento da pluma do Rio Amazonas. O MLME consiste em uma técnica de processamento digital de imagens que tem por finalidade facilitar a classificação de imagens por meio da separação de imagens multi-espectrais ou hiper-espectrais em imagens fração dos (COAs) especificados (NOVO e SHIMABUKURO, 1994; MATHER, 1999). Esta técnica tem apresentado resultados bastante significativos em estudos relativos à caracterização de diferentes tipos de massas de água, tanto em ambientes fluviais como costeiros (NOVO; SHIMABUKURO, 1994; WARRICK, MERTES et al., 2004; ALCÂNTARA, 2006; RUDORFF, 2006; ADAMS, SMITH et al., 1989).

ÁREA DE ESTUDO

A extensa rede hidrográfica do Rio Amazonas (6.110.000 km²) faz com que o volume de água e material dissolvido e particulado descarregados pelo Rio Amazonas no Oceano Atlântico Equatorial seja considerado um dos maiores do planeta (MILLIMAN; MEADE, 1983; MULLER-KARGER, MCCLAIN et al., 1988; WRIGHT; NITTROUER, 1995; NITTROUER; DEMASTER, 1996).

A grande vazão, a influência dos ventos do quadrante nordeste e as correntes oceânicas transportam o material descarregado pelo Rio Amazonas a grandes distâncias, tendo já sido relatada sua chegada ao Caribe e à região central do Oceano Atlântico Equatorial (NITTROUER; DEMASTER, 1996; ALLISON, LEE et al., 2000; FROIDEFOND, LAHET et al., 2004; HU, MONTGOMERY et al., 2004; VECCHIO; SUBRAMANIAM, 2004).

Por este motivo, torna-se problemática a delimitação de uma área de influência desta pluma, uma vez que seu alcance total direto e indireto, ainda não é totalmente conhecido. Para contornar essa dificuldade, neste trabalho serão utilizados os limites próximos aos definidos em artigos da literatura que tiveram como objeto de estudo a pluma do Rio Amazonas e a sua variabilidade espacial (HU, MONTGOMERY et al., 2004; VECCHIO; SUBRAMANIAM, 2004). Portanto, a área de estudo utilizada neste artigo tem como limites as latitudes 12° N e 1° S e as longitudes 42° O e 55°O (Figura 1).

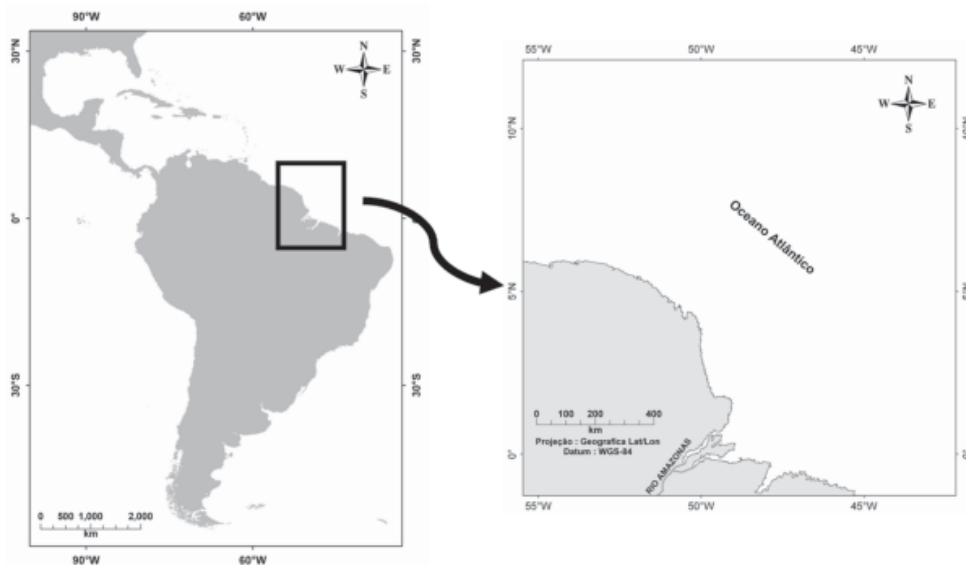


Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo definida entre as latitudes 12° N e 1° S e as longitudes 42° O e 55° O

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Principais componentes opticamente ativos (COAs) da água

A cor da água está diretamente relacionada às propriedades ópticas inerentes da água (absorção e espalhamento). Estas propriedades variam conforme a concentração e tipos de materiais dissolvidos e particulados presentes na água (KIRK, 1983; NOVO, HANSOM et al., 1989; BOWERS, EVANS et al., 2004). Estes materiais que apresentam influência nas propriedades ópticas de corpos de água são denominados de componentes opticamente ativos e, segundo Kirk (1983), podem ser citados 4 como os principais: (1) água, (2) material orgânico dissolvido (*gilvin*, substância amarela ou *gelbstoff*), (3) fitoplâncton e (4) material inorgânico em suspensão (sedimento em suspensão).

Na figura 2 são apresentados, como exemplo, as curvas espectrais dos 4 COAs, adquiridos por Froindefond et al. (2002) na região costeira, sob influência do Rio Amazonas, próxima à fronteira entre o Brasil e a Guiana Francesa. Como demonstrado nesta figura, os COAs apresentam comportamentos espectrais bastante distintos, conferindo, conseqüentemente, a cada uma destas massas de água diferentes cores. Froindefond et al. (2002), identificaram, também, os principais elementos dissolvidos e/ou particulados presentes em cada uma destas massas de água que conferiram a estas seus distintos comportamentos.

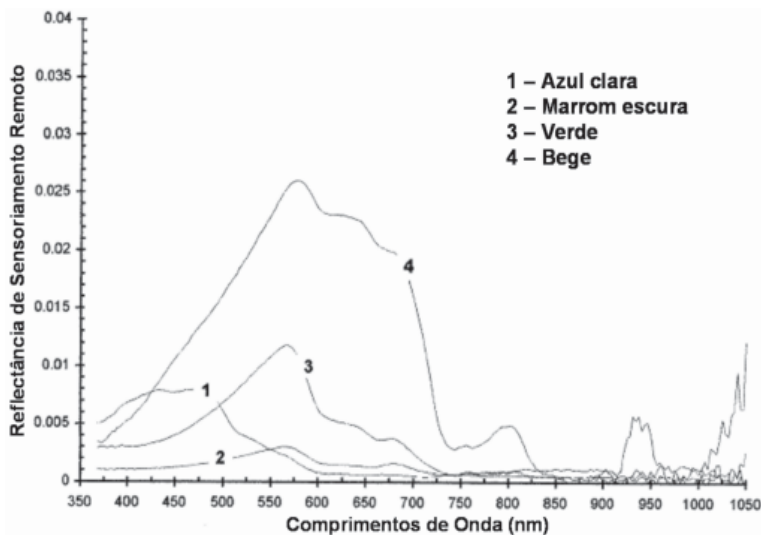


Figura 2 – 4 Diferentes tipos de massas de água identificadas por Froindefond et al. (2002) e seus respectivos espectros: (1) azul clara, (2) marrom escura, (3) verde e (4) bege

Este autor comenta, portanto, que a água classificada como azul clara (1) é caracterizada por baixas concentrações médias de clorofila *a* (1.4 mg m^{-3}), sedimentos em suspensão (0.4 mg l^{-1}) e valores de salinidade, em média, de 36 psu.

Na água marrom escura (2) foi identificado o material orgânico dissolvido como o principal componente opticamente ativo na água, devido à grande absorção na região do azul e aos baixos valores de reflectância ao longo do espectro, mesmo com relativamente altas concentrações médias de sedimentos em suspensão (3.9 mg l^{-1}) e clorofila *a* (6.84 mg m^{-3}). Outra característica interessante desta água, também apontado por Froindefond et al. (2002), está nos seus baixos valores de salinidade, em média 18 psu, caracterizando esta como uma água proveniente, sobretudo, do Rio Amazonas.

A água verde (3) apresentou altas concentrações médias de clorofila *a* (3.07 mg m^{-3}) e de sedimentos em suspensão (4.4 mg l^{-1}). Entretanto, a clorofila apresentou-se como o COA mais significativo. Podem ser observadas na Figura 2 no espectro referente à água verde (3) as bandas de absorção pela clorofila *a* situadas em 440 nm e 665 nm e os altos valores de reflectância por volta de 555 nm devido à baixa absorção pela clorofila conforme comentado por Morel e Prieur (1977) e Kirk (1983).

A água bege (4) destaca-se pelos altos valores de reflectância entre os comprimentos de onda entre 500-700 nm associados à alta concentração de sedimentos em suspensão em média (115 mg l^{-1}) (KIRK, 1983).

Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

O MLME é uma técnica de processamento digital de imagens que visa facilitar o processo de classificação de imagens. Esta técnica utiliza-se das assinaturas espectrais de componentes “puros” opticamente ativos da água (*endmembers*) para determinar a sua

participação (ou fração) na reflectância de cada pixel medida por sensores remotos multi-espectrais ou hiper-espectrais. O MLME baseia-se, portanto, na teoria de que a energia refletida detectada pelos sensores remotos orbitais é uma mistura linear de diversos componentes opticamente ativos puros na área imageada conforme demonstrado na Equação 1 (NOVO; SHIMABUKURO, 1994):

$$R_b = \sum_{i=1}^n F_i R_{i,b} + E_b \quad (1)$$

Onde, R_b é a reflectância da banda b de um pixel na imagem, F_i é a fração do *endmember* i , $R_{i,b}$ é a reflectância do *endmember* i na banda b , n é o número de *endmembers*, e E_b é o erro para a banda b de um pixel na imagem.

Os *endmembers* utilizados no MLME podem ser obtidos, por exemplo, a partir de: medições radiométricas realizadas em laboratório (MERTES, SMITH et al., 1993; WARRICK, MERTES et al., 2004), por medições radiométricas realizadas em campo junto com coletas de amostras (RUDORFF, 2006) e pela aquisição de *endmembers* a partir de imagens multi-espectrais e hiper-espectrais (ADAMS, SMITH et al., 1989).

Deste modo, a técnica de MLME foi utilizada para estimar a concentração de sedimentos em suspensão no Rio Amazonas (MERTES, SMITH et al., 1993), em áreas costeiras da Califórnia (WARRICK, MERTES et al., 2004), para identificar diferentes massas de água na confluência do Rio Amazonas com o Rio Tapajós (RUDORFF, 2006) e para estimar turbidez na planície de inundação de Curuaí (ALCÂNTARA, 2006).

MATÉRIAS E MÉTODOS

Na figura 3 é apresentado, de forma resumida, um fluxograma da metodologia indicando os procedimentos realizados neste estudo.

Portanto, como forma de testar a aplicação da técnica de MLME no mapeamento da pluma do Rio Amazonas, foi adquirida do *Goddard Ocean Biology Processing Group* (OGBP) (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) uma imagem do sensor SeaWiFS referente ao dia 23 de setembro de 2000. Optou-se pela utilização do sensor SeaWiFS, pois este foi desenvolvido especificamente para a aquisição de dados da cor da água e, portanto, seus sensores apresentam grande resolução radiométrica (10 bits) e as suas bandas (Tabela 1) localizam-se em importantes comprimentos de ondas para o estudo do comportamento espectral da água oceânica e costeira (HOOKER, ESAIAS et al., 1992).

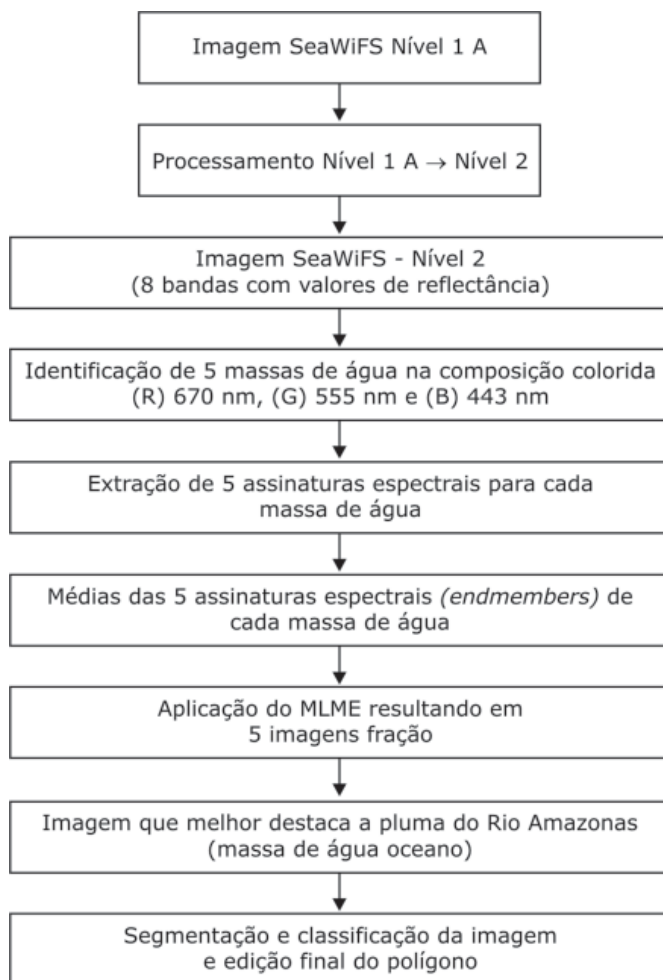


Figura 3 – Metodologia aplicada neste artigo

Esta data foi escolhida devido à pequena cobertura de nuvens, a qual, na região equatorial representa um dos maiores impedimentos para a utilização de imagens de sensores remotos orbitais ópticos. A imagem foi obtida com nível de processamento 1A, ou seja, com 8 bandas codificadas como radiancias e resolução espacial nominal de 4 km (Tabela 1). Estas bandas foram processadas para o nível 2, onde são aplicados algoritmos de correção atmosférica (GORDON; WANG, 1994), em ambiente computacional SeaDAS 5.0.4. Neste nível foram geradas 8 imagens com valores de reflectância de sensoriamento remoto (*Rrs*) nos comprimentos de onda 412, 443, 490, 510, 555 e 670, 765, 865 nm.

Tabela 1 – Bandas da cor do oceano do sensor SeaWiFS

Band	Comprimentos de onda (nm)
1	412
2	443
3	490
4	510
5	555
6	670
7	765
8	865

Fonte: *Goddard Ocean Biology Processing Group* (OGBP) (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)

As imagens de *Rrs* foram exportadas para o software ENVI 4.2 para a definição dos *endmembers* e extração de suas respectivas assinaturas espectrais. O processo de definição dos *endmembers* foi realizado visualmente (ADAMS, SMITH et al., 1989) a partir da análise das cores de uma imagem de composição colorida gerada com as bandas 670 nm (R), 555 nm (G) e 443 nm (B) no formato *Rrs* (Figura 4).

Nesta imagem foram identificadas 5 massas de água com diferentes cores. Em seguida, foram extraídas as assinaturas espectrais com os valores de refletância, nas 8 bandas do sensor SeaWiFS, de 5 pontos (cada ponto sendo representado por um pixel da imagem) para cada uma das massas de água, conforme demonstrado na Figura 4, dando um total de 25 assinaturas espectrais.

A partir das 5 assinaturas espectrais de cada massa de água foram gerados valores médios de reflectância para as 8 bandas do sensor SeaWiFS que, em seguida, foram utilizados como *endmembers* no MLME (Figura 5).

As 5 imagens fração (uma imagem para cada *endmember* utilizado), resultantes do MLME, foram analisadas visualmente a fim de identificar a fração em que a pluma de materiais (orgânicos e inorgânicos) descarregados pelo rio Amazonas é melhor definida. A imagem identificada foi, então, exportada para o ambiente SPRING (CÂMARA, SOUZA et al., 1996) onde foram testados diversos critérios de similaridade e área para o processo de segmentação por crescimento de regiões. Este processo consiste em um agrupamento de pixels em regiões por meio de critérios de similaridade estatística (média) e proximidade espacial (GONZALEZ e WINTZ, 1987).

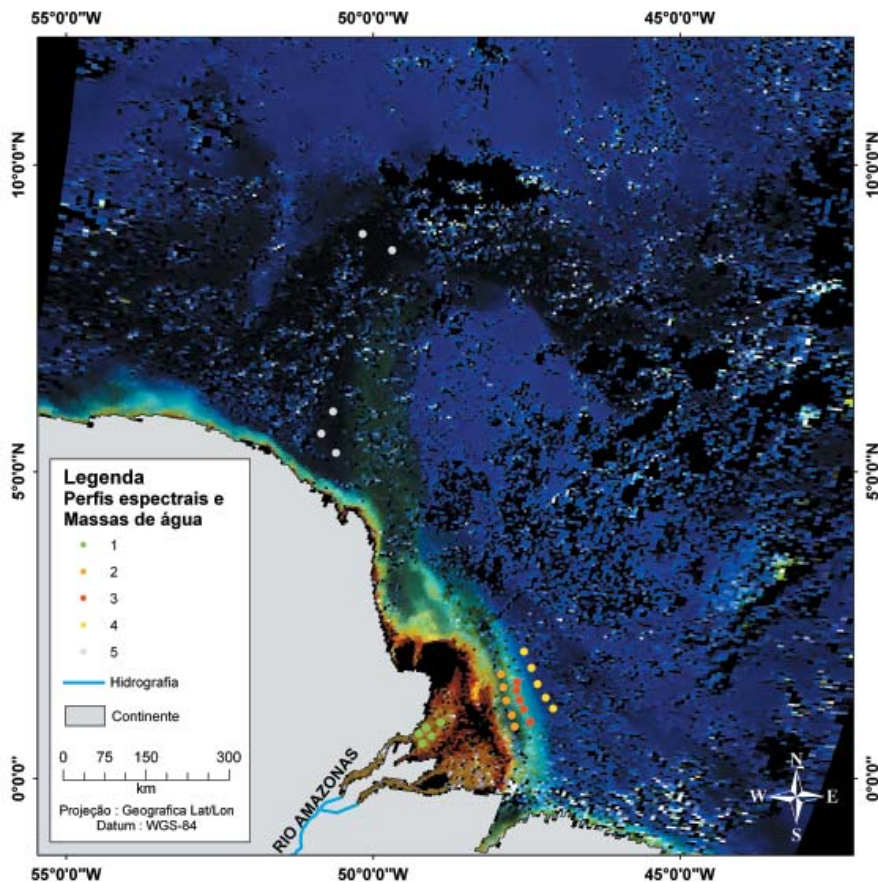


Figura 4 – Composição colorida (R) 670 nm, (G) 555 nm e (B) 443 nm da imagem SeaWiFS de 23/08/2000 e localização dos pontos de coletas das assinaturas espectrais para a obtenção dos *endmembers*

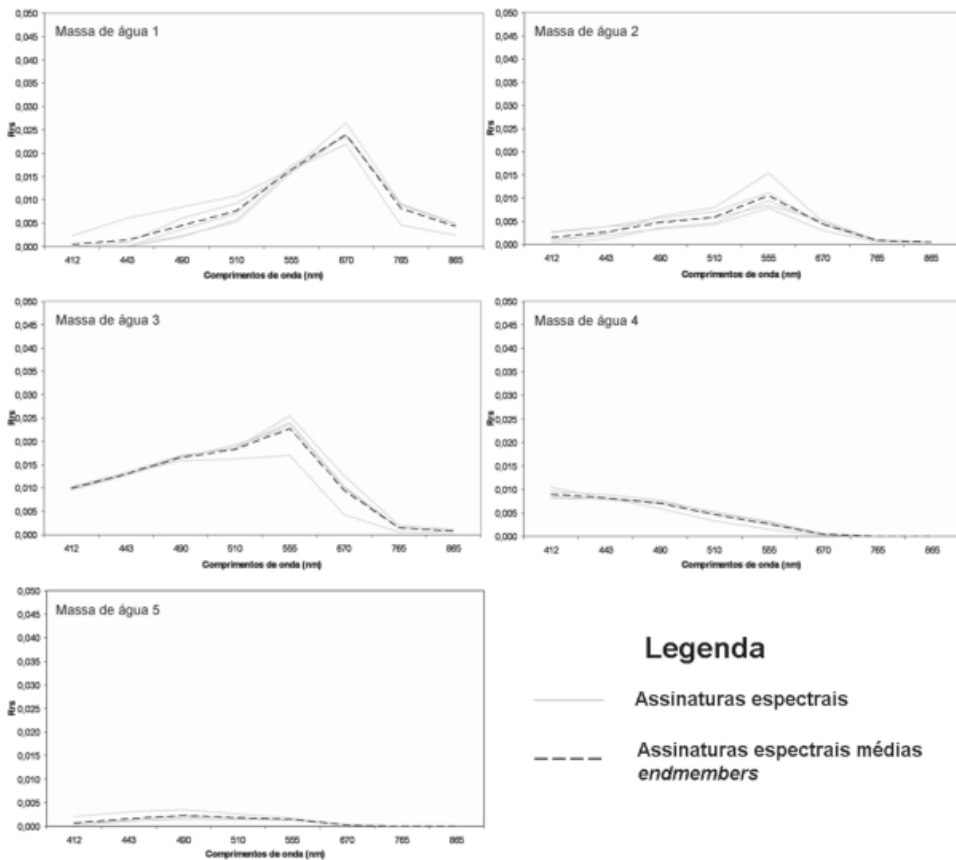


Figura 5 – Curvas de R_{rs} e as curvas médias referentes aos 5 pontos extraídos para cada massa de água

Os polígonos resultantes do processo de segmentação foram classificados de forma supervisionada no software SPRING. A classificação realizada foi exportada para o software ArcMap, onde foram realizadas as edições finais no polígono referente à pluma e, também, foi extraída a área da pluma em km².

Um fato importante que teve de ser considerado na determinação de imagens fração das massas de água refere-se à questão da cobertura de nuvens. Em diversas imagens as nuvens apresentaram níveis de cinza próximos aos da pluma o que prejudicou o processo de segmentação e posterior classificação da pluma do Rio Amazonas. Por este motivo optou-se por gerar uma máscara das nuvens a partir de uma imagem fração selecionada. A imagem fração escolhida foi a qual a cobertura de nuvens se destacou melhor. Na geração da máscara foi realizado o mesmo procedimento citado anteriormente de testes de critérios de segmentação e posterior classificação das nuvens e exportação para o software ArcMap onde foram editados os polígonos classificados como nuvens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cinco *endmembers* resultantes das médias das reflectâncias coletadas em cada massa de água mostram comportamentos espectrais distintos (Figura 6). Comparando-se os *endmembers* com as curvas de reflectância coletadas por Froindefond et al. (2002), apresentadas anteriormente, pode-se identificar os 4 principais COAs da água.

A massa de água 1 pode, portanto, ser caracterizada como uma água onde os sedimentos em suspensão são os principais componentes presentes na água. As massas de água 2 e 3 apresentam formas semelhantes, podendo concluir que a clorofila é o COA que mais importante nesta massa de água. Entretanto, os valores das reflectâncias significativamente diferentes conferiram a estas diferentes tonalidades da cor verde. A massa de água 3, devido aos maiores valores de reflectância, apresenta, provavelmente maiores concentrações de clorofila.

A massa de água 4 apresentou cor azul na imagem e é muito similar a água classificada como azul clara por Froindefond et al. (2002). Esta massa apresenta, portanto, poucas concentrações de sedimentos em suspensão, clorofila e matéria orgânica, além de valores de salinidade elevados indicando que esta é uma massa de água com características de águas oceânicas.

A massa de água 5 apresentou os menores valores de reflectância, provavelmente, segundo Froindefond et al. (2002), devido à grande concentração de matéria orgânica dissolvida.

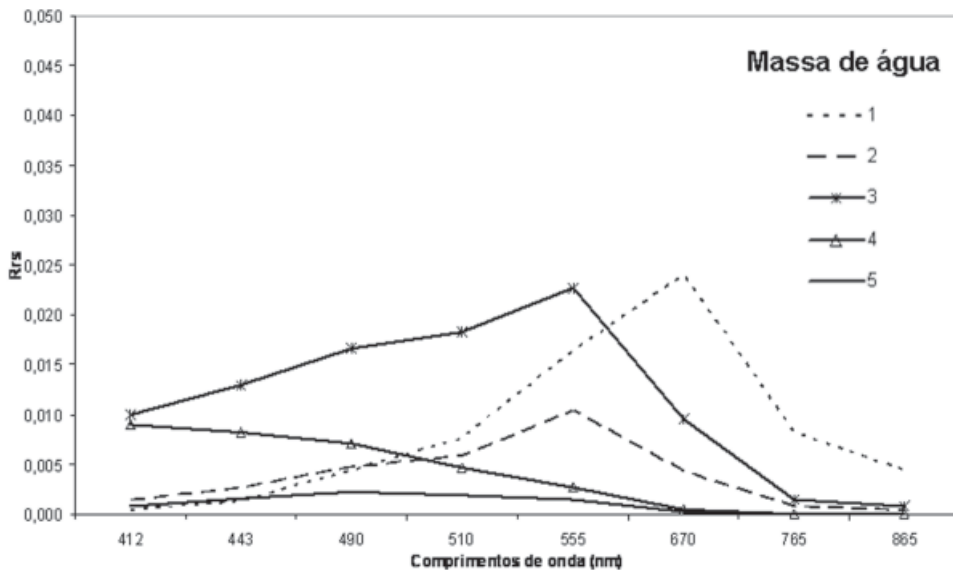


Figura 6 – Endmembers referente às médias das curvas de Rrs dos cinco pixels coletados para cada massa de água

Como resultado final do processo de MLME foram geradas 5 imagens fração referentes às 5 massas de água identificadas (Figura 7). Cada imagem foi analisada visualmente com objetivo de identificar a que caracterizava melhor a feição da pluma do Rio Amazonas para então ser utilizada no mapeamento. Optou-se, portanto, pela imagem fração massa de água 4 (referente à água oceânica), pois, como pode ser observado na figura 7 (d), a pluma do Amazonas se destaca (maior contraste) mais nesta imagem que nas demais.

Para gerar a máscara das nuvens optou-se por utilizar a imagem fração referente à massa de água 2 (água com presença de clorofila) (Figura 7 (b)). Nesta imagem a cobertura de nuvens apresentou maior contraste do que o observado nas demais imagens.

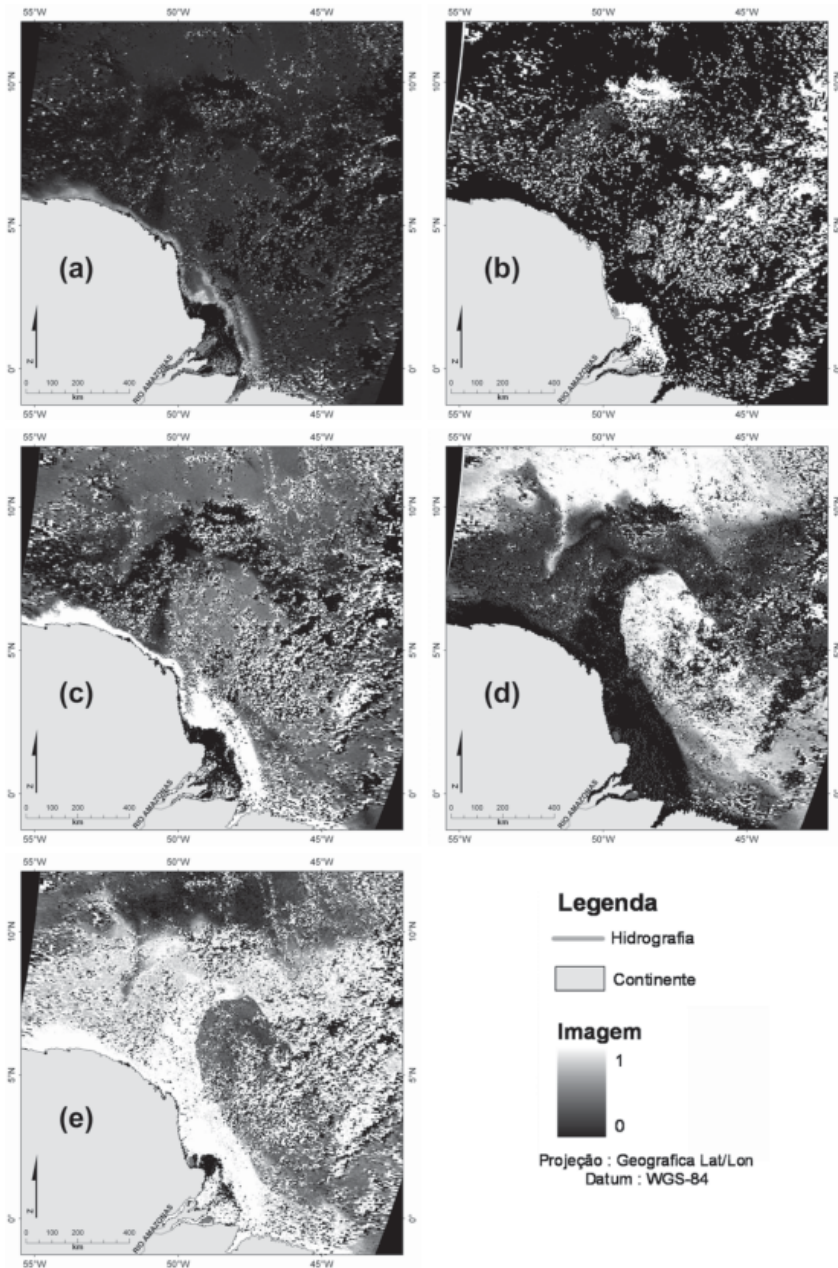


Figura 7 – Imagens fração geradas pelo modelo de mistura a partir dos endmembers coletados nas massa de água: (a) – massa de água 1, (b) – massa de água 2, (c) – massa de água 3, (d) – massa de água 4, (e) – massa água 5

Após diversos testes dos critérios de similaridade e área para o mapeamento da pluma selecionaram-se empiricamente os valores de 20 e 200, respectivamente (Figura 8 (a)). No caso do mapeamento das nuvens os melhores resultados foram obtidos com 20 de similaridade e 80 de área (Figura 8 (b)).

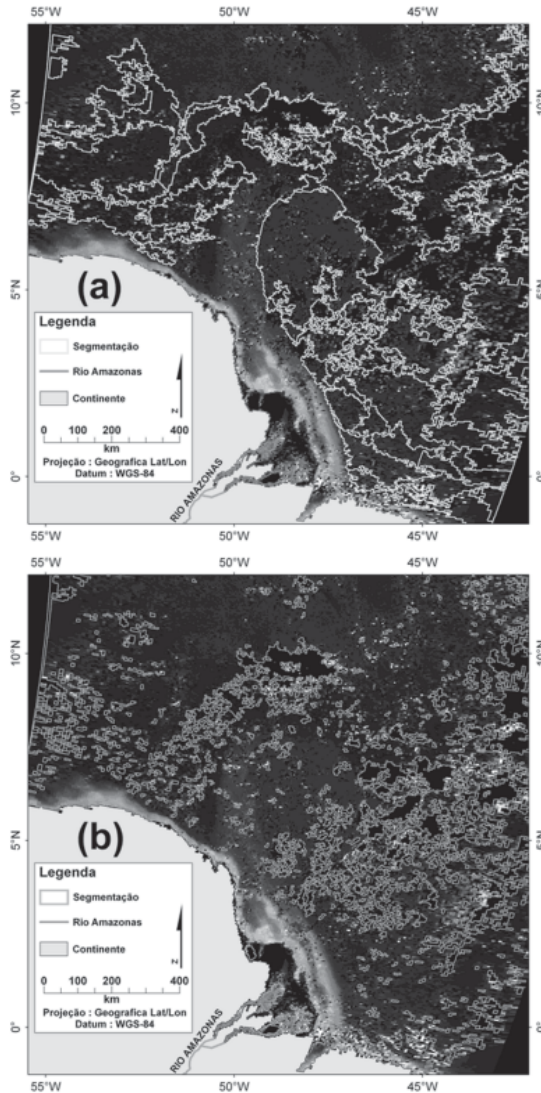


Figura 8 – Resultados das segmentações das imagens fração: (a) segmentação da imagem fração referente à massa de água 4 para posterior classificação supervisionada e delimitação da pluma do Rio Amazonas (similaridade 20 e área 200), e (b) segmentação da imagem fração referente a massa de água 2, utilizada para gerar a máscara das nuvens (similaridade 20 e área 80)

Observa-se na figura 9 (a) a necessidade de edição na área da pluma com relação à presença de nuvens e, também, devido às imperfeições referentes ao processo de segmentação.

Este fato fez com que a pluma fosse delimitada até uma determinada região conforme demonstrado na figura 9 (a) pela linha tracejada. Devido a essas limitações dos dados não foi possível delimitar corretamente a pluma em toda sua extensão.

A figura 9 (a) mostra, portanto, a presença de nuvens e seu impacto na classificação da pluma. A edição, também, permitiu a remoção de áreas que não correspondiam à pluma como é o caso da área da Baía de Marajó e da região costeira do Estado do Pará, conforme indicado pelas setas (Figura 9 (a e b)).

O final da edição (Figura 9 (b)) mostra a grande extensão da pluma alcançando regiões do noroeste da América do Sul e do Oceano Atlântico Equatorial. A área calculada da pluma nesta figura foi de $510 \times 10^3 \text{ km}^2$. Entretanto, cabe ressaltar que a delimitação da pluma foi prejudicada pela presença de nuvens.

Na figura 9 (b) fica evidente, pela forma da pluma, a influência da Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE) e a Corrente Norte do Brasil (CNB) no transporte da pluma para a região central do Oceano Atlântico Equatorial. A forma característica que a pluma do Rio Amazonas adquire é, também, citada nos trabalhos de Muller-Karger et al. (1998), Hu et al. (2004) e Vecchio e Subramaniam (2004).

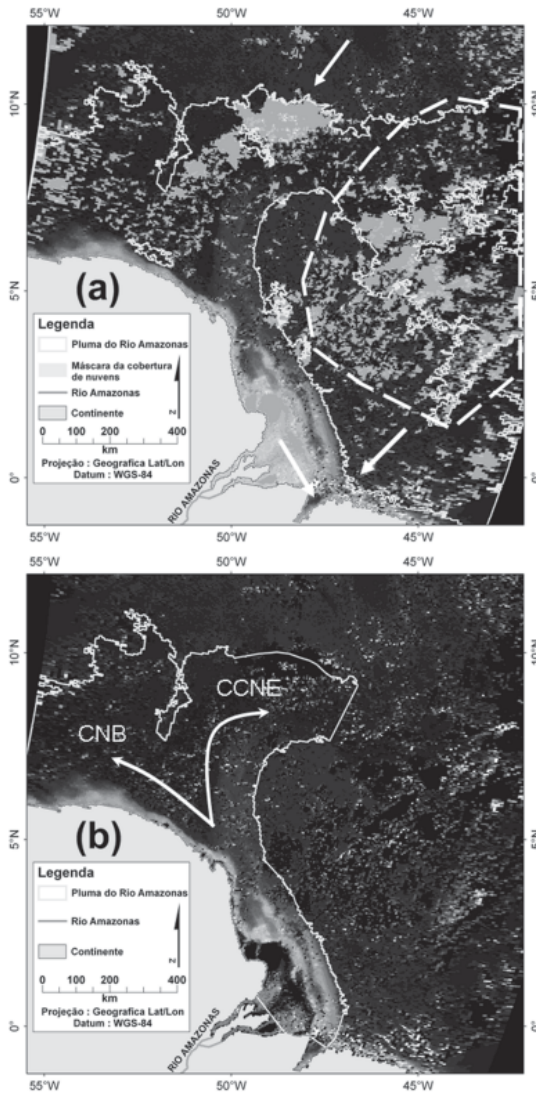


Figura 9 – (a) Locais onde o polígono referente à segmentação da pluma foi editado e influência das nuvens na classificação supervisionada da pluma do Rio Amazonas; (b) pluma do Rio Amazonas mapeada

CONCLUSÕES

Na região próxima a desembocadura do Rio Amazonas foram identificadas 5 massas de água com assinaturas espectrais singulares. A assinatura espectral da massa de água 4 referente à água oceânica destacou melhor a pluma do Rio Amazonas e foi utilizada no processo de segmentação, classificação e mapeamento da pluma.

Entretanto, a presença de nuvens prejudicou o processo de segmentação da pluma do Rio Amazonas. Por este motivo optou-se por gerar uma máscara referente à cobertura de nuvens. A imagem fração referente à massa de água 2 (água com concentração de clorofila) foi utilizada para extrair a máscara das nuvens. Esta máscara facilitou o processo de edição da pluma. Entretanto, em certas regiões, a grande quantidade de nuvens impediu a delimitação da pluma, o que comprometeu, também, a extração da medida da área da pluma.

Apesar da questão da cobertura de nuvens, a técnica de MLME apresentou-se como uma valiosa ferramenta no mapeamento da pluma do Rio Amazonas. Mesmo assim, sugere-se, para trabalhos futuros, a realização de coletas *in situ* de dados radiométricos e de água a fim de identificar e validar os principais componentes opticamente ativos presentes na pluma do Rio Amazonas.

REFERÊNCIAS

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O. et al. Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Vancouver, CA. **Proceedings...** 1989. p. 16-21.

ALCANTARA, E. H. **Análise da turbidez na Planície de Inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA.** 2006. 220 f. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) -Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

ALLISON, M. A.; LEE, M. T. et al. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. **Marine Geology**, v.163, p.241-256, 2000.

BOWERS, D. G.; EVANS, D. et al. Interpreting the colour of an estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.59, p.13-20, 2004.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v.20, p.395-403, 1996.

CHEN, Z.; HANSON, J. D. et al. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus1268 data. **Remote Sensing Letters**, v.12, p.215-222, 1991.

CURRAN, P. J.; NOVO, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Research**, v.4, n.3, p.351-368, 1988.

DAGG, M.; BENNER, R. et al. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. **Continental Shelf Research**, v.24, p.833-858, 2004.

DEMASTER, D. J.; POPE, R. H. Nutrient dynamics in Amazon shelf waters: results from AMASSEDS. **Continental Shelf Research**, v.16, p.263-289, 1996.

- DEMASTER, D. J.; SMITH, W. et al. Biogeochemical processes in Amazon shelf waters: chemical distributions and uptake rates of silicon, carbon and nitrogen. **Continental Shelf Research**, v.16, p.617-643, 1996.
- FROIDEFOND, J. M.; LAHET, F. et al. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. **Marine Geology**, v.208, p.153-168, 2004.
- GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. C. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v.16, p.575-616, 1996.
- GEYER, W. R.; HILL, P. S. et al. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. **Continental Shelf Research**, v.24, p.927-949, 2004.
- GEYER, W. R.; KINEKE, G. C. Observations of currents and water properties in the Amazon frontal zone. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.C2, p.2321-2339, 1995.
- GONZALEZ, R. C.; WINTZ, P. **Digital image processing**. Prodding: Addison Wesley, 1987. 503 p.
- GORDON, H. R.; WANG, M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. **Applied Optics**, v.33, n.3, p.443-452, 1994.
- HOOKE, S. B.; ESAIAS, W. E. et al. **NASA technical report series**. v. 1, p.34. 1992.
- HU, C.; MONTGOMERY, E. et al. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: observation from space and S-PALACE floats. **Deep-Sea Research II**, v.51, p.1151-1171, 2004.
- KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 401 p.
- LENTZ, S. J. The Amazon River plume during AmasSeds: subtidal current variability and the importance of wind forcing. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.C2, p.2377-2390, 1995.
- LORENZETTI, J. A.; NEGRI, E. et al. Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, Brasil. **Anais...** INPE, 2007. 3429-3436 p.
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed imagens: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1999. 292 p.
- MERTES, L. A. K.; SMITH, M. O. et al. Estimating Suspended Sediment Concentrations in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images. **Remote Sensing of Environment**, v.43, p.281-301, 1993.
- MILLER, R. L.; MCKEE, B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v.93, p.259-266, 2004.
- MILLIMAN, J. D.; MEADE, R. H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. **Journal of Geology**, v.91, p.1-21, 1983.
- MULLER-KARGER, F. E.; MCCLAIN, C. R. et al. The dispersal of the Amazon's water. **Nature**, v.333, p.56-58, 1988.
- NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, v.16, p.553-573, 1996.
- NOVO, E. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral mixture analysis of inland tropical waters. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.6, p.1351-1356, 1994.

NOVO, E. M. M.; HANSOM, J. D. et al. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v.10, n.7, p.1283-1289, 1989.

RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I. et al. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, v.35, n.2, p.352-371, 1990.

RUDORFF, C.; NOVO, E. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**, v.37, n.2, p.279 - 290, 2007.

RUDORFF, C. D. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância dos sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 140 f. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) -Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

SCHIMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, v.1, n.1, p.77-91, 1995.

SMITH, W. O.; DEMASTER, D. J. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. **Continental Shelf Research**, v.16, n.3, p.291-319, 1996.

TERNON, J. F.; OUDOT, C. et al. A seasonal tropical sink for atmospheric CO₂ in the Atlantic ocean: the role of the Amazon River discharge. **Marine Chemistry**, v.68, 2000.

THOMAS, A. C.; WEATHERBEE, R. A. Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume. **Remote Sensing of Environment**, v.100, p.167-178, 2006.

VECCHIO, R. D.; SUBRAMANIAM, A. Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the western tropical North Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.C11001, p.1-13, 2004.

WARRICK, J. A.; MERTES, L. A. K. et al. Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.10, p.1995-2002, 2004.

WRIGHT, L. D. e C. A. NITTROUER. Dispersal of River Sediments in Coastal Seas: Six Contrasting Cases. **Estuaries**, v.18, p.494-508, 1995.

Recebido em agosto de 2007

Aceito em novembro de 2007