

## SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL NO ESTUDO DE BAÍAS E SALINAS DO PANTANAL BRASILEIRO

LÊNIO SOARES GALVÃO<sup>1</sup>  
WATERLOO PEREIRA FILHO<sup>2</sup>  
MYRIAN DE MOURA ABDON.<sup>1</sup>  
EVLYN MÁRCIA LEÃO DE MORAES NOVO<sup>1</sup>  
JOÃO DOS SANTOS VILA DA SILVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{lenio, myriam, evlyn}@ltid.inpe.br

<sup>2</sup>UFSM - Universidade Federal de Santa Maria  
Depart. de Geociências, 97119-900, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>3</sup>Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
C. Postal 6041, 13083-970, Campinas, SP, Brasil

**Abstract.** Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and field reflectance data were used in this investigation to characterize the spectral behavior of the Pantanal lakes, and associated physico-chemical characteristics. Results show the capability of the hyperspectral remote sensing to retrieve narrow absorption bands observed in water field spectra on a per-pixel basis.

**Keywords:** hyperspectral remote sensing, AVIRIS, reflectance, Pantanal.

### 1. Introdução

Devido a sua complexidade hidrológica, o Pantanal brasileiro poder ser dividido em 11 sub-regiões, com base em critérios referentes aos aspectos de inundação, relevo, solo e vegetação (Silva e Abdon, 1998). A sub-região da Nhecolândia possui 26.691 km<sup>2</sup> (19,5% da área do Pantanal) e está localizada entre os rios Taquari e Negro, no Estado do Mato Grosso do Sul. O Pantanal da Nhecolândia caracteriza-se pela riqueza de lagoas de água doce ("baías") e de água salgada ("salinas"). Além de contribuir para o suprimento de água, sais minerais e alimentos para os seres humanos e animais selvagens e domésticos, estas lagoas também têm um importante papel como hábitat temporário de várias espécies nativas de mamíferos (Brum e Souza, 1985; Pott et al., 1987; Campos, 1991; Abdon et al., 1998).

Em agosto de 1995, dados foram obtidos pelo sensor hiperespectral AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) em 224 bandas espectrais no Pantanal da Nhecolândia. Através da inspeção destas imagens, uma campanha de campo para obtenção de dados de reflectância nas lagoas foi executada. O objetivo deste trabalho é discutir o comportamento espectral destas lagoas e o uso potencial de dados hiperespectrais no estudo destes ambientes.

### 2. Metodologia

A área de estudo (aproximadamente 11 km x 22 km) está delimitada pelas latitudes de 19°22'16"S e 19°31'34"S e pelas longitudes de 55°57'30"W e 55°50'39"W. Os dados hiperespectrais foram obtidos em 20 de agosto de 1995 pelo sensor AVIRIS durante a Missão SCAR-B (Smoke, clouds, and Radiation - Brazil). No auge da estação seca, o sensor AVIRIS adquiriu imagens da área de estudo em 224 bandas espectrais estreitas (10 nm de largura) regularmente distribuídas ao longo do intervalo 400-2500 nm. Uma aeronave da NASA

(National Aeronautics & Space Administration) posicionada a 20 km de altitude possibilitou uma resolução espacial de 20 metros. Durante a aquisição das imagens AVIRIS, o ângulo zenital solar foi de 34°. Os efeitos de espalhamento e de absorção atmosférica por vários gases (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO, CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>) foram minimizados e as imagens AVIRIS foram convertidas para valores de reflectância de superfície através da técnica ATREM (Atmosphere Removal) (Gao et al., 1993).

A coleta de dados espectrais nas lagoas envolveu a obtenção do Fator de Reflectância Bidirecional da água, através do uso do espectrorradiômetro SPECTRON SE-590. Posicionado em um barco, o instrumento adquiriu dados em intervalos de 2 nm na faixa espectral de 450 a 900 nm. Uma placa de sulfato de bário foi utilizada como referência. Em cada ponto de amostragem, foram obtidas três medidas radiométricas. De fato, cada uma dessas medidas representou a leitura média de quatro aquisições consecutivas.

Além das medidas radiométricas, foram medidos os seguintes parâmetros: condutividade elétrica, temperatura da água e do ar e pH da água, profundidade total e profundidade do disco de Secchi. Em laboratório, os seguintes métodos foram utilizados para a determinação dos constituintes das 50 amostras de água: Cálcio, Magnésio, Potássio e Sódio (Espectrometria de Absorção Atômica), Fósforo Total (Método Colorimétrico do Ácido Ascórbico), Nitrogênio Orgânico Total (Método Kjeldahl Hach), Carbono Orgânico Total (COD) (Método colorimétrico) e total de Clorofila *a* mais Feofitina (Método Espectrofotométrico). Detalhes destes métodos foram descritos por Eaton et al. (1995). O total de sedimento em suspensão (TSS) foi obtido pelo resíduo não filtrado retido em membrana com 0,45 µm de porosidade, sendo que os filtros foram pesados em balança analítica com precisão de 0,01 mg. Os valores de TSS foram obtidos conforme metodologia descrita em CETESB (1987).

Após a análise dos espectros de reflectância de campo, o método do contínuo espectral (Clark e Roush, 1984) foi aplicado sobre as imagens AVIRIS. O objetivo foi filtrar as bandas de absorção dos espectros dos pixels e obter os valores de profundidade de banda, especialmente das feições centradas em 630 nm (limites do contínuo em 560 nm e 650 nm) e em 667 nm (limites em 560 nm e 720 nm).

### 3. Resultados

A **Figura 1** mostra uma composição colorida normal da área de estudo produzida com as bandas AVIRIS centradas em 667 nm (vermelho), 559 nm (verde) e 480 nm (azul). A localização das lagoas investigadas em campo está indicada nesta figura. As lagoas de água doce, localizadas próximas à Vazante do Castelo, exibem cores verde-claro ou escuro na composição colorida. Estas lagoas apresentam uma ocorrência restrita de macrófitas em suas margens. Densas coberturas de plantas aquáticas (*Nymphaea amazonum*, *Nymphaea lingulata* and *Salvinia auriculata*) predominam nas lagoas 9 e 12, sendo responsáveis pelas cores esverdeadas na **Figura 1**. Em porções das lagoas 10 e 11, plantas aquáticas como *Eichhornia azurea*, *Oxycaryum cubense* and *Nymphaea amazonum*, que ocorrem em proporções variadas, produzem um padrão espectral distinto em relação as lagoas 9 e 12.

Por outro lado, as lagoas salinas mostram cores azuladas (p.ex., lagoa 3) e esverdeadas (lagoas 5, 6 e 9) na composição colorida normal. A cor da lagoa 8 na **Figura 1** é produzida pela influência da alga macroscópica *Chara rusbyana*, que recobre de forma densa o fundo desta lagoa. Dados AVIRIS não foram obtidos sobre a lagoa 7, que apresenta características similares as da lagoa 3.

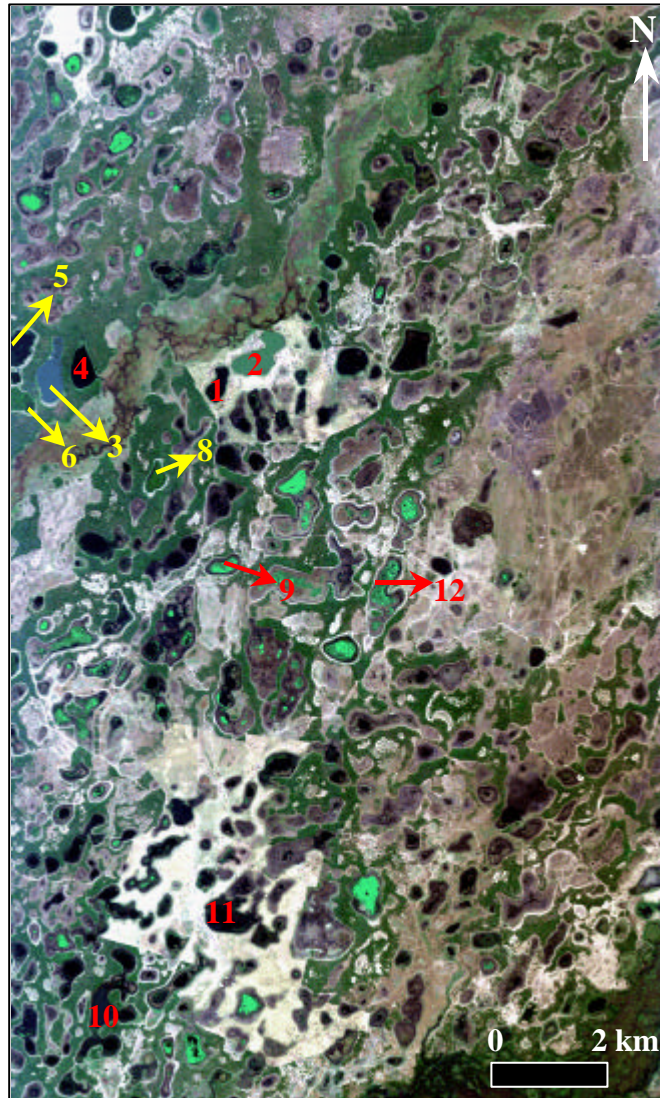


Figura 1 - Composição colorida normal, obtida a partir das bandas AVIRIS centradas em 667 nm (vermelho), 559 nm (verde) e 480 nm (azul). A localização das principais lagoas salinas (legenda em amarelo) e das de água doce (legenda em vermelho) visitadas em campo está indicada.

A **Figura 2** mostra espectros de reflectância, obtidos em campo, representativos das cinco lagoas salinas (**Figura 2a**) e sete baías (**Figura 2b** e **Figura 2c**) estudadas. Para facilitar a representação gráfica, na **Figura 2b** são mostradas apenas as curvas da água das baías 1, 2 e 4, com plantas aquáticas restritas às suas margens, e na **Figura 2c** os espectros da água das baías com uma quantidade de plantas aquáticas no espelho d'água superior a 50%. A **Tabela 1** apresenta as características físico-químicas destas lagoas.

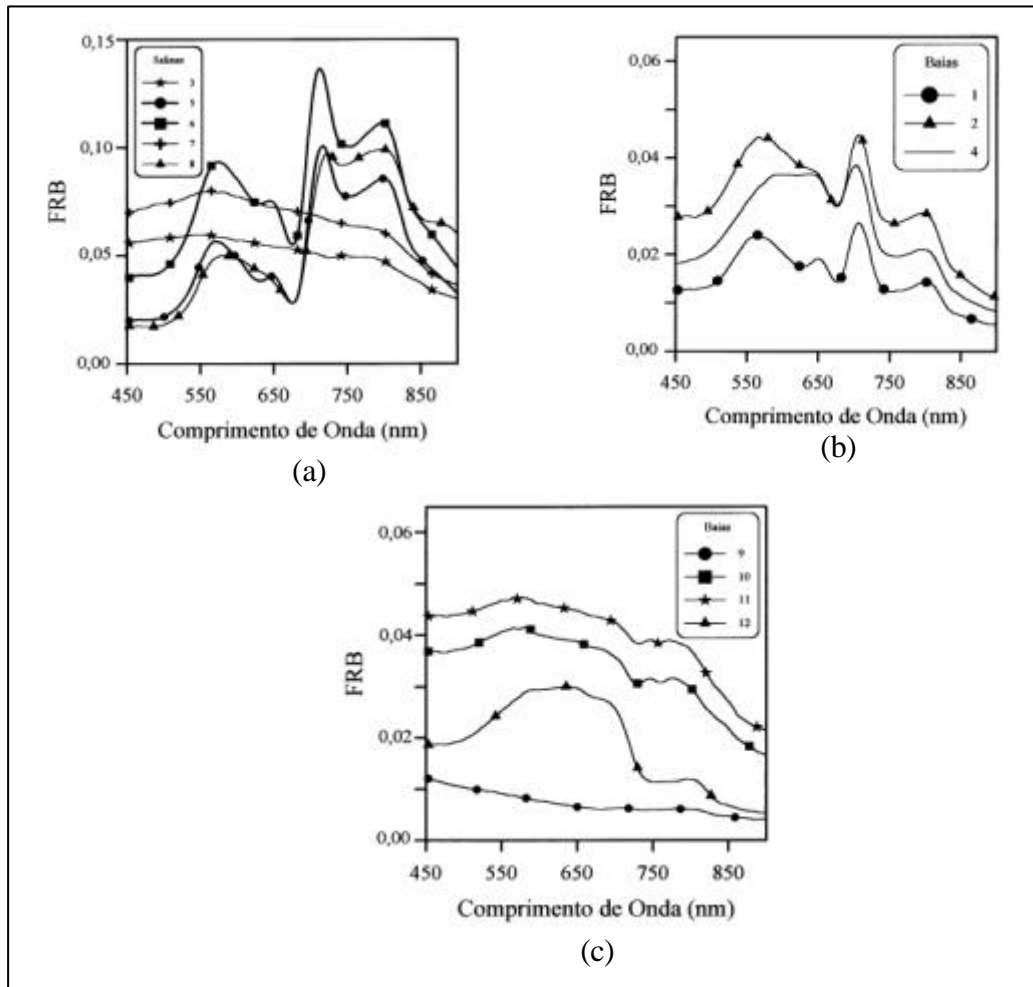


Figura 2 - Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) representativo das águas das salinas (a) e das baías (b e c) estudadas. Para facilitar a representação gráfica, os espectros das baías que apresentaram macrófitas concentradas em suas margens e as que exibiram uma concentração expressiva de plantas aquáticas ao longo de todo o espelho d'água são mostrados, respectivamente, em (b) e (c).

Em geral, conforme indicado na **Tabela 1**, quando comparadas com as baías, as salinas da área de estudo são mais rasas (profundidade total inferior a 50 cm) e tendem a apresentar maiores valores de COD e de TSS, além de maiores quantidades de cálcio, magnésio, sódio e potássio no período seco de amostragem. As salinas também apresentaram menores valores de profundidade Secchi do que as baías estudadas.

Na **Figura 2a**, as salinas 5 e 6 mostram características espectrais totalmente distintas das salinas 3 e 7, apresentando na **Tabela 1** maiores quantidades de clorofila e de TSS e menores quantidades de COD. A cor esverdeada das salinas 5 e 6 na **Figura 1** é produzida por uma grande quantidade de fitoplâncton. Na **Figura 2a**, além de bandas de absorção bem definidas no azul e no vermelho e de um pico de reflectância no verde, devido à presença de clorofila, foram também observadas uma banda de absorção estreita em 630 nm (phycocianina) e uma

feição mais ampla em 750 nm (absorção por água). Exemplos de feições similares foram descritas por Kirk (1994) e Smith e Baker (1981). Por outro lado, o espectro de reflectância da salina 8 e sua cor esverdeada na **Figura 1** é decorrente da presença da alga macroscópica submersa fixa *Chara rusbyana*, que afeta fortemente a resposta espectral da fina lâmina d'água transparente.

O fitoplâncton também é responsável por um espalhamento significativo da energia radiante na faixa do infravermelho próximo, produzindo valores de reflectância superiores a 10% em torno de 720 nm. O COD é uma substância opaca que tende a reduzir a reflectância da água e mascarar as feições espectrais de outros constituintes. A cor azulada da salinas 3 na **Figura 1** aparentemente é decorrente de uma diminuição do conteúdo de clorofila nestas lagoas. Por outro lado, a maior quantidade de COD na lagoa 3 tende a mascarar as feições espectrais acima citadas e produzir valores de razões de reflectância verde/azul ou verde/vermelho comparativamente menores do que os verificados nas salinas 5 e 6

Tabela 1 - Valores médios e desvio-padrão (parêntesis) dos parâmetros físico-químicos das baías (D) e salinas (S) estudadas. N é o número de medidas *in situ* de Profundidade Secchi, Profundidade, pH e Condutividade Elétrica (CE).

Lag.	Chl µg l <sup>-1</sup>	DOC mg l <sup>-1</sup>	TSS mg l <sup>-1</sup>	Secchi m	Prof. m	pH	CE µS cm <sup>-1</sup>	Ca mg l <sup>-1</sup>	P <sub>t</sub> mg l <sup>-1</sup>	Mg mg l <sup>-1</sup>	N <sub>t</sub> mg l <sup>-1</sup>	K mg l <sup>-1</sup>	Na mg l <sup>-1</sup>	N
1 (D)	724.6 (570.9)	0.13 (0.02)	3.07 (0.42)	0.35 (0.00)	0.97 (0.25)	8.99 (0.36)	97.1 (2.44)	1.07 (0.06)	0.12 (0.04)	0.63 (0.27)	120.3 (9.52)	8.60 (0.56)	2.37 (0.23)	3
2 (D)	579.4 (429.5)	0.13 (0.02)	2.17 (0.19)	0.30 (0.00)	0.83 (0.21)	8.87 (0.60)	62.5 (0.15)	1.40 (0.61)	0.08 (0.02)	0.27 (0.27)	79.9 (40.0)	4.43 (0.46)	2.20 (0.44)	3
4 (D)	68.0 (25.9)	0.11 (0.01)	16.41 (2.30)	0.40 (0.00)	0.87 (0.09)	6.68 (0.17)	72.2 (1.60)	1.97 (0.09)	0.65 (0.62)	0.29 (0.14)	121.6 (44.0)	4.02 (0.40)	1.75 (0.90)	4
9 (D)	62.4 (35.7)	0.05 (0.00)	5.25 (2.33)	0.80 (0.00)	0.88 (0.04)	6.37 (0.04)	105.0 (38.0)	4.10 (0.14)	0.01 (0.00)	0.25 (0.08)	22.2 (7.92)	3.20 (0.28)	9.20 1.13	2
10 (D)	468.8 (395.5)	0.02 (0.00)	0.80 (0.58)	1.32 (0.09)	1.57 (0.15)	6.11 (0.26)	37.5 (2.01)	1.75 (0.01)	0.01 (0.00)	0.30 (0.09)	12.5 (5.30)	4.70 (0.22)	2.27 (0.29)	4
11 (D)	62.0 -	0.03 -	1.10 -	1.10 -	1.10 -	6.29 -	34.9 -	1.80 -	0.01 -	0.14 -	9.80 -	5.10 -	2.00 -	1
12 (D)	183.7 (96.5)	0.06 (0.01)	3.40 (4.24)	0.70 (0.00)	0.70 (0.00)	6.14 (0.11)	105.2 (2.90)	6.30 (0.28)	0.01 (0.00)	0.61 (0.19)	16.75 (8.84)	6.05 (6.86)	7.95 (0.07)	2
3 (S)	95.6 (73.9)	1.05 (0.04)	39.16 (10.9)	0.07 (0.00)	0.42 (0.07)	9.33 (0.03)	4907 (55.0)	13.66 (1.35)	4.55 (0.45)	9.11 (5.78)	66.3 (23.7)	188.5 (26.9)	394.4 (56.4)	7
5 (S)	538.3 (324.9)	0.62 (0.01)	200.6 (51.4)	0.08 (0.00)	0.45 (0.28)	10.19 (0.11)	3882 (25.9)	9.08 (1.28)	0.02 (0.03)	0.87 (0.91)	66.3 (64.9)	117.2 (64.0)	255.5 (142)	5
6 (S)	778.9 (34.3)	0.43 (0.02)	220.3 (9.81)	0.09 (0.00)	0.45 (0.05)	10.44 (0.07)	4293 (130)	8.73 (2.31)	0.01 (0.00)	1.47 (0.55)	42.2 (5.91)	165 (44.2)	384.4 (123)	3
7 (S)	267.3 (-)	2.07 (0.05)	42.70 (37.2)	0.06 (0.00)	1.10 (0.21)	9.07 (0.17)	1530 (14.1)	9.40 (0.00)	0.39 (0.11)	5.87 (0.64)	17.5 (1.13)	46.1 (0.14)	145.6 (7.07)	2
8 (S)	103.6 (30.5)	0.06 (0.01)	5.88 (5.07)	0.30 (0.00)	0.30 (0.00)	9.91 (0.47)	1590 (70.0)	5.33 (1.15)	0.01 (0.00)	0.26 (0.32)	12.7 (1.75)	73.6 (7.52)	88.2 (7.91)	3

Para ilustrar a capacidade dos sensores hiperespectrais em reconstituir bandas de absorção, as **Figuras 3a** e **3b** mostram as variações da profundidade das bandas de absorção de phycocianina (630 nm) e clorofila (667 nm), respectivamente. Na **Figura 3a**, as bandas de absorção mais profundas estão associadas com espectros de pixels das baías 1 e 2 e das salinas 5 e 6, o que é consistente com os resultados da **Figura 2**. De acordo com Jupp et al. (1994), a caracterização desta feição é importante, porque este pigmento tem um papel importante na adaptação das algas à luz e na própria identificação de grupos de algas.

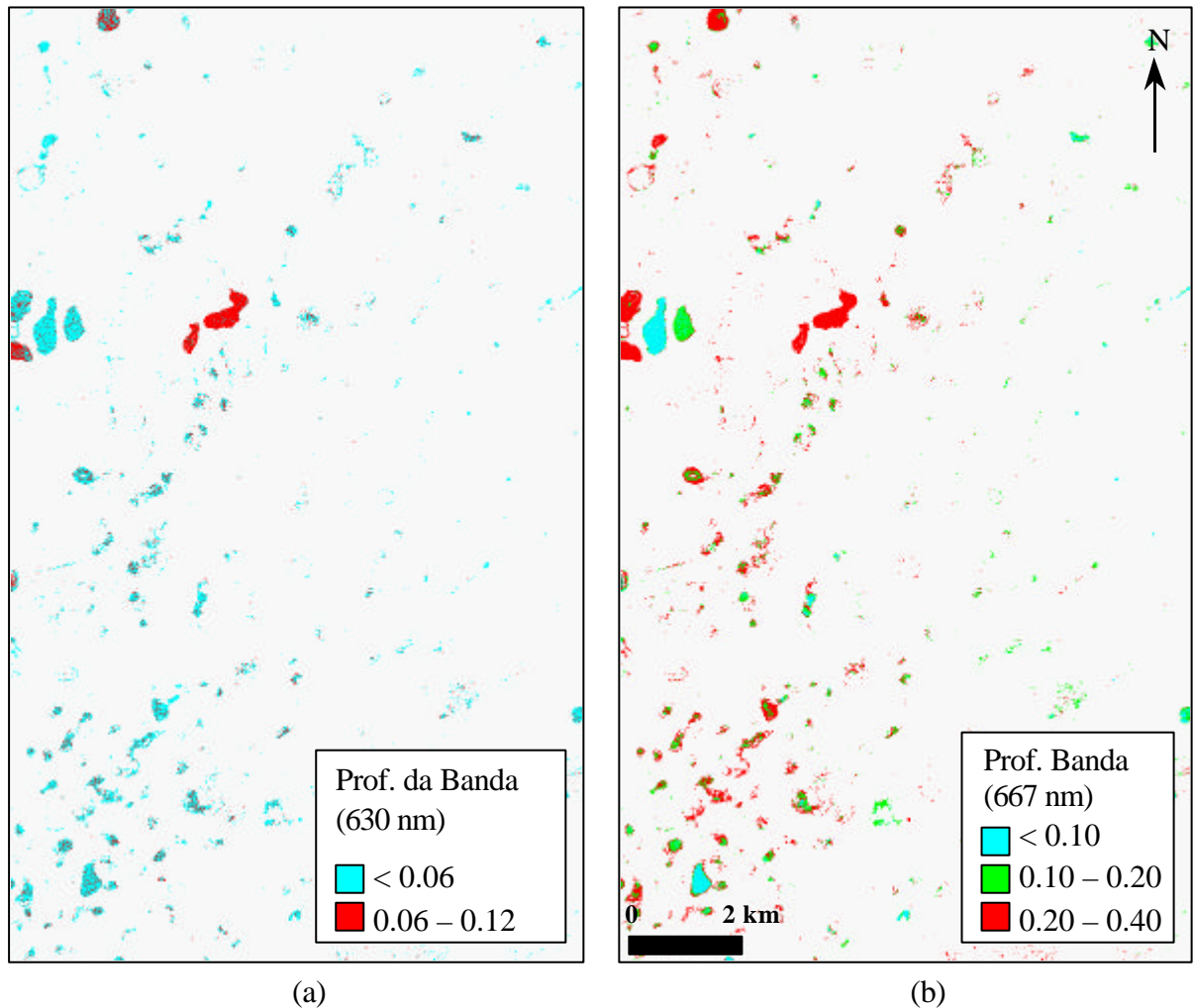


Figura 3 - Variação na profundidade das bandas de absorção posicionadas em 630 nm (a) e 667 nm (b), obtida através do método do contínuo espectral.

#### 4. Conclusões

As baías e salinas do Pantanal de Nhecolândia são caracterizadas por padrões espectrais e físico-químicos distintos no período seco de amostragem. Do ponto de vista espectral, as salinas da área de estudo apresentam cores esverdeadas ou azuladas em composições coloridas normais obtidas a partir de sensores hiperespectrais (AVIRIS). A cor esverdeada das salinas 5 e 6 é produzida por uma grande quantidade de fitoplâncton e a da salina 8 por algas macroscópicas. Por outro lado, a cor azulada das salinas 3 e 7 nas composições coloridas aparentemente é decorrente de uma menor quantidade de clorofila. A maior quantidade de carbono orgânico dissolvido nestas lagoas tende a mascarar as feições espectrais de outros constituintes.

Dados hiperespectrais são úteis no estudo destas lagoas por propiciarem a reconstituição, pixel-a-pixel, das bandas de absorção associadas a pigmentos fotossintéticos, que são comumente observadas nos espectros de campo. Tais dados também podem ser úteis na identificação de algumas plantas aquáticas, especialmente daquelas que apresentam resposta espectral e uma ocorrência espacial bem definida em alguns corpos de água (p. ex., *Nymphaea*).

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão dos recursos necessários à execução desta pesquisa por meio do Auxílio à Pesquisa 2000/04966-7; À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa/CPAP) pela cessão de uma viatura para as atividades de campo; Ao centro laboratorial QUIMBIOL pelas facilidades e instruções fornecidas para a coleta das amostras d'água e subseqüentes análises químicas; À Coordenação-Geral de Observação da Terra e à Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (OBT/DSR/INPE) pelo apoio na execução da pesquisa.

## Referências

- Abdon, M. de M.; Pott, V.J.; Silva, J. dos S.V. da Avaliação da cobertura por plantas aquáticas em lagoas da sub-região da Nhecolândia no Pantanal por meio de dados Landsat e SPOT. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, p.1675-1683, 1998.
- Brum, P.A.R.; Souza, J.C. Níveis de nutrientes minerais em lagoas ("baías" e salinas) no Pantanal sul-mato-grossense. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, p.1451-1454, 1985.
- Campos, Z.M.S. Fecundidade das fêmeas, sobrevivência dos ovos e razão sexual dos filhotes recém-eclodidos de *Caiman cocodilus yacare* (Crocodylia, Alligatoridae) no Pantanal, Brasil. Manaus: INPA/FUA, 1991. 61 p. Dissertação de Mestrado.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Guia de coleta e preservação de amostras de água. São Paulo: CETESB, 1987.
- Clark, R.N.; Roush, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, v.89, p.6329-6340, 1984.
- Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.; Greenberg, A.E. Standard methods for the examination of water and wastewater. Baltimore: United Book Press, 1985.
- Gao, B.C.; Heidebrecht, K.B.; Goetz, A.F.H. Derivation of scaled surface reflectance from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.44, p.165-178, 1993.
- Jupp, D.L.B.; Kirk, J.T.O.; Harris, G.P. Detection, identification and mapping of cyanobacteria using remote sensing to measure the optical quality of turbid inland waters. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, v. 45, p. 801-828, 1994.
- Kirk, J.T.O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. New York: Cambridge University Press, 1994. 509 p.
- Pott, E.B.; Brum, P.A.R. de; Almeida, I.L. de; Comastri Filho, J.A.; Dynia, J.F. Nutrição mineral de bovinos de corte no Pantanal mato-grossense: I. Levantamento de macronutrintes na Nhecolândia (parte central). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 22, p.1093-1109, 1987.

Silva, J. dos S.V. da; Abdon, M. de M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, p.1703-1711, 1998.

Smith, R.C.; Baker, K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Applied Optics*, v.20, p.177-184, 1981.