

Medidas simultâneas de concentração de clorofila por LIDAR, fluorescência, MODIS e radiometria: resultados do cruzeiro FITOSAT I

Milton Kampel ¹
João A. Lorenzetti ¹
Cristina Maria Bentz ²
Raul A. Nunes ³
Rodolfo Paranhos ⁴
Frederico de Moraes Rudorff ¹
Alexandre Tadeu Politano ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{milton, loren, fmr} @dsr.inpe.br

² PETROBRAS/CENPES - Centro de Pesquisas
Cidade Universitária, Q.7, Ilha do Fundão - 21949-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{cris,politano.gorceix} @petrobras.com.br

³ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio DCMM
Caixa Postal 38008 - 22453-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{nunes} @dcm.puc-rio.br

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ Instituto de Biologia
Av. Pau Brasil 211, Cidade Universitária, I. Fundão - 21941-590 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{rodpar} @biologia.ufrj.br

Abstract. Comparisons between *in situ* measurements of surface chlorophyll concentration and ocean colour remote sensing estimates were conducted during the FITOSAT I cruise in the Brazilian Southeastern continental shelf and slope during November 2004. *In situ* estimates were based on Turner fluorometry, above-water radiometry and lidar fluorosensor. Three empirical algorithms were used to estimate chlorophyll *a* concentration from radiometric measurements: Ocean Chlorophyll 3 bands (OC3M), Ocean Chlorophyll 4 bands (OC4v4), and Ocean Chlorophyll 2 bands (OC2v4). The satellite estimates of chlorophyll *a* were derived from data collected by the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) with a nominal 1.1 km resolution at nadir. Three algorithms were used to estimate chlorophyll concentrations from MODIS data: one empirical - OC3M, and two semi-analytical - Garver, Siegel, Maritorena version 01 (GSM01), and Carder. In this paper, LIDAR, MODIS and *in situ* above-water radiometry and fluorometry are briefly described and the estimated values of chlorophyll retrieved by these techniques are compared.

Palavras-chave: chlorophyll concentration, MODIS, LIDAR, above-water radiometry, fluorometry, concentração de clorofila, MODIS, LIDAR, radiometria acima da superfície da água, fluorimetria.

1. Introdução

Sensores orbitais da cor do oceano (Cracknell et al. 2001) mudaram a perspectiva de observação oceânica: mapas globais da concentração de clorofila *a* superficial - CSM (Falkowski e Raven 1997), e conseqüentemente da produtividade primária fitoplanctônica (Behrenfeld e Falkowski 1997), podem ser processados e gerados em apenas alguns dias. Entretanto, esses produtos são resultantes de cálculos muitas vezes complexos como os modelos de correções atmosféricas (Gordon and Wang 1994) e algoritmos bio-ópticos

(O'Reilly et al. 2000). Estes modelos e algoritmos têm que ser aplicados às radiâncias brutas emergentes da água medidas pelos radiômetros orbitais. Por estas razões, as imagens de satélites devem ser calibradas e validadas por instrumentos *in situ* (O'Reilly et al. 2000) frequentemente operados a partir de bóias, estações fixas e navios de pesquisa.

O projeto FITOSAT, desenvolvido pelo INPE e PETROBRAS em parceria com universidades, tem como objetivo analisar cientificamente e tecnicamente diferentes metodologias de processamento de dados obtidos por sensores remotos, integrados a dados *in situ*, para a detecção e monitoramento de ocorrências ambientais em áreas costeiras e oceânicas. Uma das etapas do projeto envolveu a realização de um cruzeiro oceanográfico – FITOSAT I, com a aquisição simultânea de dados *in situ* e de sensores remotos orbitais e aerotransportados, na região da Bacia de Campos, localizada na margem continental sudeste brasileira.

Neste contexto, foram adquiridos dados orbitais do sensor *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), dados radiométricos *in situ*, dados de LIDAR (*Light Detection And Ranging*) e amostras de água para análises fluorimétricas com o objetivo de se estimar a concentração de clorofila superficial. Neste trabalho, estas diferentes técnicas de estimativa da CSM são descritas resumidamente e seus respectivos dados são comparados.

2. Material e Métodos

Medidas *in situ*

Clorofila

As concentrações de clorofila *a* superficial *in situ* (CSM_{insitu}) foram medidas durante o cruzeiro FITOSAT I em 18 estações amostrais, entre 21 e 25 de novembro de 2004. A área de estudo abrange a plataforma continental e o talude entre o Cabo de São Tomé (22°S) e Cabo Frio (23°S), Bacia de Campos, RJ (**Figura 1**). A abundância fitoplanctônica foi estimada a partir de amostras superficiais de 2 L de água filtradas por membranas de celulose Millipore® com poros de 0,45 µm. Os filtros foram mantidos em nitrogênio líquido e as concentrações de clorofila *a* determinadas após extração em acetona 90% por 18 horas a 4°C em fluorímetro Turner Designs® TD-700 (Parsons et al. 1984).

Radiometria

Medidas radiométricas *in situ* sobre a superfície da água foram realizadas com o radiômetro hiperespectral Spectron SE590 nos mesmos pontos de coleta de água e em estações intermediárias, num total de 29 estações (**Figura 1**). A faixa espectral amostrada foi de 400 – 800 nm, com resolução média de 5 nm. O protocolo de medidas adotado foi o sugerido por Fougnie et al. (1999), com a utilização de polarizador. Os dados radiométricos foram integrados de modo a simular as bandas espectrais dos sensores orbitais de cor do oceano *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) e MODIS, pelo método dos retângulos.

A reflectância de sensoriamento remoto, $R_{RS}(\lambda)$ foi calculada através da seguinte equação:

$$R_{RS}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)}, \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $L_w(\lambda)$ é a radiância espectral emergente da água e $E_d(\lambda)$ é a irradiância espectral incidente na superfície do mar. $E_d(\lambda)$ foi estimada através da medida da radiância, $L(\lambda)$, de uma placa branca de *Spectralon* (Mobley 1999). Assim, $E_d(\lambda)$ é dada pela seguinte equação:

$$E_d(\lambda) = L(\lambda) \times f_c \times \pi, \quad (\text{Eq. 2})$$

onde f_c é um fator de correção calculado em laboratório pela razão entre $L(\lambda)$ da placa de *Spectralon* utilizada no campo e $L(\lambda)$ de uma placa de referência padrão.

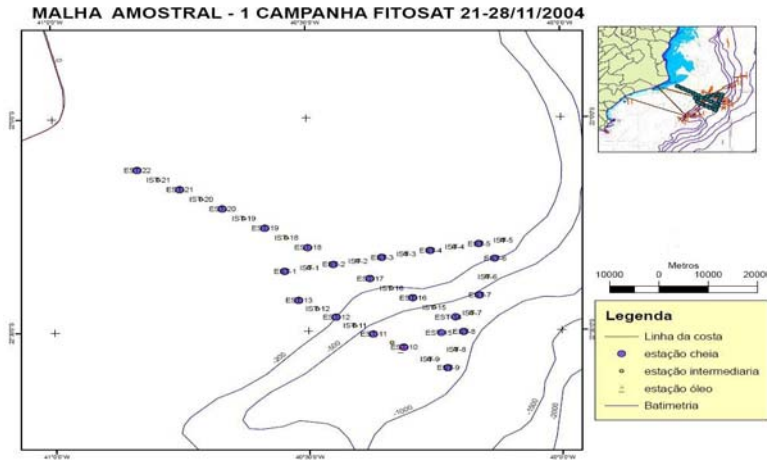


Figura 1 – Área de estudo e estações amostrais do cruzeiro FITOSAT I. Isóbatas em metros. Estações de amostragem de água, radiometria e LIDAR identificadas pela letra E. Estações sem coleta de água identificadas pela letra I.

Aos dados radiométricos integrados foram aplicados os algoritmos empíricos da cor do oceano *Ocean Chlorophyll 4-bands* - OC4v4 e *Ocean Chlorophyll 2-bands* - OC2v4, referentes ao sensor SeaWiFS e o algoritmo *Ocean Chlorophyll 3-bands* - OC3M, referente ao sensor MODIS para a estimativa das concentrações de clorofila (O'Reilly et al. 2000).

O algoritmo OC2v4 estima a CSM partir da razão de bandas $R_{RS}(490)/R_{RS}(555)$ utilizando a função polinomial cúbica modificada:

$$C_a = 10,0^{(0,319 - 2,336R_{2S} + 0,879R_{2S}^2 - 0,135R_{2S}^3) - 0,071}, \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{onde } R_{2S} = \log_{10}(R_{555}^{490}).$$

O algoritmo OC4v4 também relaciona razões de bandas com a CSM através de uma única função polinomial, mas emprega a razão de banda máxima determinada como a maior razão (R_{\max}) entre os valores de $R_{RS}(443)/R_{RS}(555)$, $R_{RS}(490)/R_{RS}(555)$ e $R_{RS}(510)/R_{RS}(555)$ através da seguinte função de quarta ordem (O'Reilly et al. 2000):

$$C_a = 10,0^{(0,366 - 3,067R_{4S} + 1,930R_{4S}^2 - 0,649R_{4S}^3 - 1,532R_{4S}^4)}, \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{onde } R_{4S} = \log_{10}(R_{\max}).$$

O algoritmo OC3M também utiliza uma função polinomial de quarto grau a partir das R_{\max} entre $R_{RS}(443)/R_{RS}(550)$ e $R_{RS}(490)/R_{RS}(550)$, seguindo a equação:

$$C_a = 10,0^{(0,283 - 2,753R_{3M} + 1,457R_{3M}^2 - 0,659R_{3M}^3 - 1,403R_{3M}^4)}, \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{onde } R_{3M} = \log_{10}(R_{\max}).$$

LIDAR

O LIDAR fluorosensor da PUC-Rio tem como fonte de luz o segundo harmônico (532 nm) de um laser de Nd-YAG. A radiação retroespalhada pelo alvo é coletada por um telescópio newtoniano, filtrada para a eliminação dos espalhamentos elásticos, direcionada a um monocromador e seu espectro é lido por uma câmera CCD linear de 1020 elementos. Dois tipos de radiação são coletados: a radiação decorrente do espalhamento Raman da água e a radiação de fluorescência gerada pela interação da fonte com os elementos fluorescentes

presentes na água. Dentre esses fluoróforos se destaca o pigmento clorofila. Durante a campanha, com o LIDAR instalado no passadiço da embarcação Astro-Garoupa, mais de 13.000 espectros foram obtidos. Para validar cada um destes espectros foi realizada uma análise do espectro de potência de sua transformada de Fourier e estabelecido um critério de validação destes espectros. Deste total estão sendo objetos de análise 9.511 espectros coletados entre os dias 21 e 25 de novembro durante o deslocamento da embarcação.

As intensidades das bandas de clorofila (I_{cl}) foram calculadas de acordo com o método desenvolvido por Barbosa (2003) para o equipamento. Para obtenção dos valores de CSM procedeu-se a um ajuste utilizando os parâmetros de calibração obtidos através de análises laboratoriais de amostras testemunho de um outro cruzeiro na mesma região onde ocorreu um evento de floração de algas. A calibração utilizada é dada por:

$$CSM_{LIDAR} = 4,9 * (I_{cl}) - 0,175, \quad (\text{Eq. 6})$$

Sensoriamento remoto

Imagens da cor do oceano do sensor MODIS foram adquiridas no mesmo período do cruzeiro FITOSAT I e processadas de modo a fornecer informações sobre os campos de CSM, com a utilização de um algoritmo empírico e dois semi-analíticos. O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais, das quais oito tem aplicações em estudos da cor do oceano. Estas bandas possuem resolução espacial de 1,1 km no nadir e repetitividade de 1-2 dias.

As imagens MODIS nível 1 utilizadas neste trabalho foram adquiridas em formato HDF do grupo *Ocean Biology Processing Group* (OBPG), do *Goddard Space Flight Center* (GSFC), NASA. O processamento digital foi realizado em ambiente Linux-SeaDAS. Os dados brutos foram calibrados radiometricamente para gerar valores de radiâncias normalizadas referentes à superfície marinha. As imagens julgadas de interesse foram recortadas de acordo com a área de estudo. Cada imagem passou por algoritmos de correção atmosférica (Gordon e Wang, 1994) antes do cálculo da CSM.

Foi utilizado o algoritmo empírico OC3M (O'Reilly et al. 2000) e os algoritmos semi-analíticos Garver, Siegel, Maritorena versão 01 - GSM01 (Maritorena et al. 2002) e Carder (Carder et al. 2004) para estimar a CSM com dados MODIS.

Maritorena et al. (2002) apresentaram um procedimento para aperfeiçoar o modelo semi-analítico inicialmente proposto por Garver e Siegel (1997), para aplicações globais. A formulação completa do modelo utilizado pode ser expressa da seguinte forma:

$$L_{WN}(\lambda) = \frac{tF_0(\lambda)}{n_w^2} \sum_{i=1}^2 g_i \left\{ \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda/\lambda_0)^{-\eta}}{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda/\lambda_0)^{-\eta} + a_w(\lambda) + Cloa_{ph}^*(\lambda) + a_{cdm}(\lambda_0)\exp[-S(\lambda - \lambda_0)]} \right\}^{-i}, \quad (\text{Eq. 7})$$

onde L_{WN} é a radiância normalizada da água t é o fator de transmissão oceano-atmosfera; $F_0(\lambda)$ é a irradiância solar extraterrestre; n_w é o índice de refração da água; $g_1=0,0949 \text{ sr}^{-1}$ e $g_2=0,0794 \text{ sr}^{-1}$; $b_{bw}(\lambda)$ é o retroespalhamento da água; $a_w(\lambda)$ é a absorção pela água; $b_{bp}(\lambda)$ é o retroespalhamento por partículas; $Cloa_{ph}^*$ é o coeficiente de absorção específico da clorofila a , S é o decaimento espectral constante para a absorção pelo material dissolvido e detritos (cdm); η é o expoente da lei de potência para o coeficiente de retroespalhamento particulado; λ_0 é o comprimento de onda 443 nm.

O algoritmo de Carder (2004) emprega uma abordagem mais complexa que o algoritmo GSM01. Em Carder, os componentes referentes à absorção pelo pigmento são separados daqueles devido aos produtos de degradação (por exemplo, *gelbstoff* e detritos, $a_g^*(\lambda)$). O coeficiente de absorção específica pela clorofila fitoplanctônica, $a_{ph}^*(\lambda)$, é ajustado com base

na concentração de clorofila e na disponibilidade de luz e nutrientes. A distinção entre efeitos devidos aos principais constituintes é obtida por diferenças espectrais entre $a_{ph}^*(\lambda)$ e $a_g^*(\lambda)$. Comparando-se a temperatura da superfície do mar com a temperatura de depleção do nitrato (*NDT*) (Kamykowski 1987), a presença de células grandes ricas em clorofila e células pequenas pobres em clorofila é deduzida a partir dos dados orbitais (Carder et al. 2004). As células ricas em clorofila com baixos valores de $a_{ph}^*(\lambda)$, ou seja, com pigmentos empacotados, ocorrem geralmente em ambientes pobres em luz e repletos de nutrientes. Por outro lado, as células pobres em clorofila, mas com altos valores de $a_{ph}^*(\lambda)$, isto é, sem empacotamento, estão presentes em ambientes repletos de fótons, porém pobres em nutrientes. No desenvolvimento e na validação do algoritmo Carder, bases de dados *in situ* globais foram compartimentadas em duas regiões. Uma onde o empacotamento do pigmento seria pouco esperado e outra onde este empacotamento deveria ocorrer com maior frequência ou intensidade. Ainda, foi desenvolvido um algoritmo médio global para ser usado em condições onde o empacotamento é desconhecido ou transicional. O algoritmo também alterna entre formulações empírica e semi-analítica, com diferentes coeficientes para os diferentes níveis de empacotamento do pigmento.

Comparações estatísticas

As comparações entre as medidas de CSM *in situ* (C_{insitu}) e estimadas por satélite (MODIS) foram realizadas dentro de um período de 1 dia. Os pares de dados foram formados entre a C_{insitu} e o valor mediano de uma janela de 3 x 3 pixels (9 km²) centrada na posição geográfica da estação amostral na imagem MODIS equivalente.

Os dados fluorimétricos foram comparados estatisticamente às estimativas obtidas por satélite, pelo radiômetro *in situ* e pelo LIDAR, através de análises de regressão linear, erro quadrático médio (*rmse*) e erro quadrático médio linearmente transformado (*rmse-L*) (Carder et al. 2004).

3. Resultados e Discussão

Os valores de CSM_{insitu} variaram entre 0,077 e 0,197 mg m⁻³, com valor médio de 0,12 (±0,04) mg m⁻³. Estes baixos valores típicos de águas oligotróficas como as da Corrente do Brasil (CB) também foram observados por Kampel (2003) e Gaeta et al. (1993).

De forma geral, os algoritmos empíricos aplicados aos dados radiométricos *in situ* superestimaram os valores de CSM_{insitu} (**Figura 2**). Os algoritmos OC3M e OC4v4 apresentaram o mesmo desempenho, com menores valores de *rmse-L* (0,28) e *rmse* (0,93) que o OC2v4 (0,40 e 1,36, respectivamente) (**Tabela 1**).

Tabela 1. Comparação das diferentes medidas *in situ* e por satélite da concentração de clorofila em relação à clorofila fluorimétrica *in situ*.

Algoritmo/LIDAR	<i>rmse-L</i>	<i>rmse</i>	N
OC2v4 _{RAD}	1,36	0,40	17
OC4v4 _{RAD}	0,93	0,28	17
OC3M _{RAD}	0,93	0,28	17
OC3M _{SAT}	0,36	0,11	10
GSM01 _{SAT}	0,28	0,08	10
Carder _{SAT}	1,14	0,34	10
CSM _{LIDAR}	0,48	0,14	14

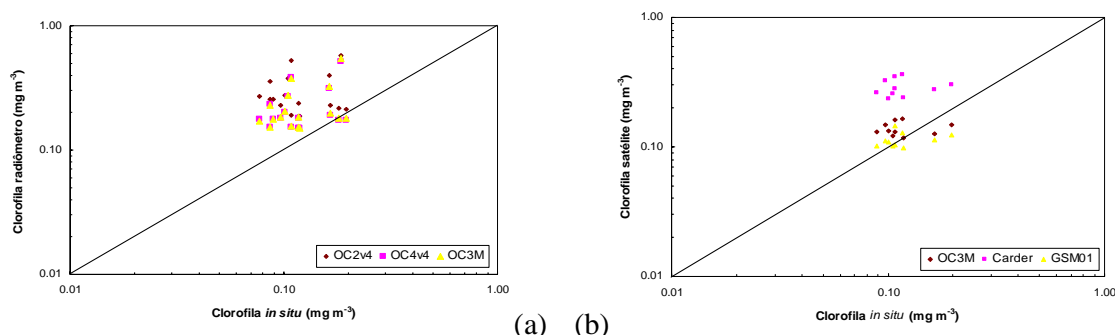


Figura 2 - Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por (a) radiometria acima da superfície da água (3 algoritmos) e (b) sensor orbital MODIS (3 algoritmos) *versus* a clorofila da superfície do mar medida *in situ*.

Para ilustração, são mostrados exemplos de imagens MODIS processadas para o período do cruzeiro, utilizando os três algoritmos testados (**Figura 3**). Na imagem de 25/11/2004, as águas oligotróficas da Corrente do Brasil aparecem ao largo, sobre o talude em tons de azul mais escuro (OC3M < 0,08 mg m⁻³; GSM01 < 0,08 mg m⁻³; Carder < 0,1 mg m⁻³). Uma assinatura do vórtice em frente ao de Cabo de São Tomé foi identificada entre as latitudes 22,00 - 22,65°S e as longitudes 39,90 - 40,77°W, com valores de CSM relativamente mais altos (0,1 < OC3M < 0,15 mg m⁻³; 0,08 < GSM01 < 0,13 mg m⁻³; 0,2 < Carder < 0,3 mg m⁻³) e diâmetro médio entre 75 e 80 km.

De forma geral, as estimativas por satélite também superestimaram os valores de CSM_{insitu} (**Figura 2**), ainda que os algoritmos GSM01 e OC3M tenham subestimado as concentrações relativamente mais altas. O algoritmo que apresentou o melhor desempenho foi o semi-analítico GSM01, com menores valores de $rmse-L$ (0,28) e $rmse$ (0,08) (**Tabela 1**). O algoritmo empírico OC3M também teve bom desempenho, com valores $rmse-L$ de 0,36 e $rmse$ 0,11.

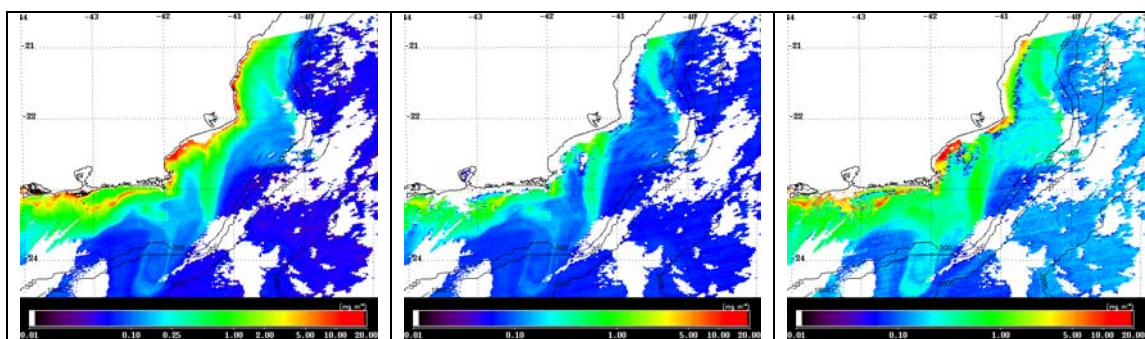


Figura 3 – Distribuições superficiais da concentração de clorofila-*a* estimadas pelos algoritmos OC3M (esquerda), GSM01 (meio) e Carder (direita) aplicados à imagem MODIS de 25/11/2004 (ver texto). Isóbatas em metros. Tabela de cores em escala logarítmica. Continente e nuvens mascarados em branco.

A **Figura 4** mostra a distribuição espectral de R_{RS} coletadas em 33 estações completas e intermediárias. De modo geral, os espectros apresentam formas típicas de águas do Caso 1 oceânicas, oligotróficas e com baixas concentrações de clorofila. Na estação I03 (azul claro na **Figura 4**) obteve-se a maior concentração de clorofila medida pelo LIDAR (0,22 mg m⁻³), com valor de CSM muito próximo aos estimados pelos algoritmos OC3M e OC4v4 aplicados aos dados radiométricos (0,18 e 0,19 mg m⁻³, respectivamente). O ruído também observado na estação E05 (vermelho escuro na **Figura 4**) foi devido à baixa condição de luminosidade na hora da coleta. A forma diferenciada do espectro obtido em E21 corresponde a águas mais

costeiras, com concentrações relativamente mais altas de CSM ($0,54 \text{ mg m}^{-3} \text{ OC3M}$) e ainda, com a possível presença de outros constituintes opticamente ativos.

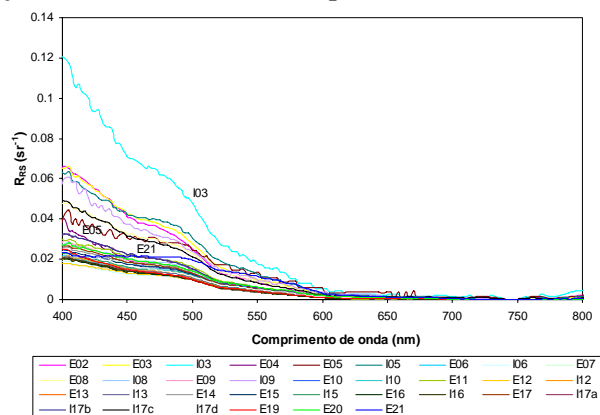


Figura 4 - Espectros de reflectância de sensoriamento remoto obtidos por radiometria *in situ* acima da água durante o cruzeiro FITOSAT I, novembro/2004 (estações completas indicadas pela letra E, e intermediárias pela letra I, ver texto).

A **Figura 5** apresenta o espectro de fluorescências processado dos dados LIDAR, convertidos em valores de CSM. As concentrações de clorofila estimadas pelo LIDAR (CSM_{LIDAR}) variaram entre $0,083$ e $0,163 \text{ mg m}^{-3}$, com valor médio de $0,13 (\pm 0,03) \text{ mg m}^{-3}$, muito próximos aos observados para CSM_{insitu} . De fato, o teste-t pareado comprova que a média das diferenças é zero. O desempenho do LIDAR foi similar ao obtido pelos métodos fluorimétricos e radiométricos *in situ*, com valores *rmse* de $0,14$ e *rmse-L* $0,48$.

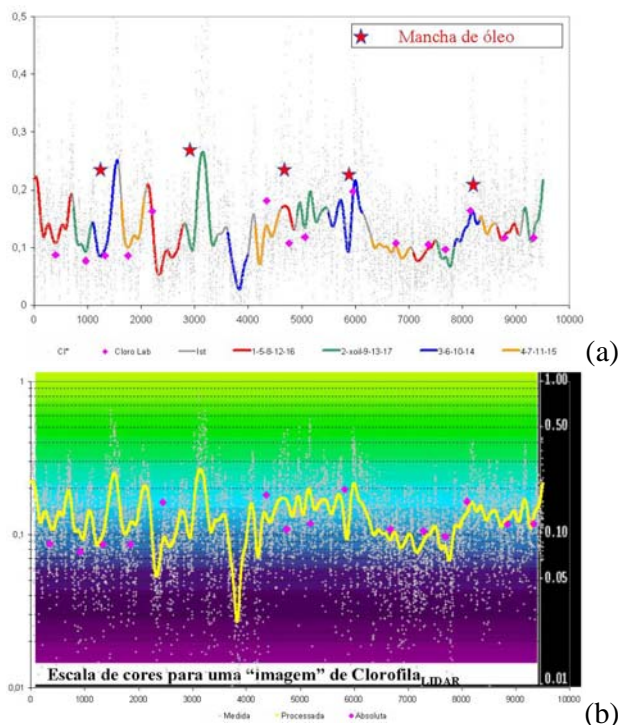


Figura 4 – Concentração de clorofila medida pelo LIDAR ao longo da trajetória da embarcação durante o cruzeiro FITOSAT I, novembro de 2004. a) Cores indicam as estações amostradas; estrelas marcam ocorrências de manchas de óleo. b) Estimativas LIDAR sobrepostas a tabela logarítmica de cores utilizada nas imagens MODIS. Losangos roxos representam as estimativas fluorimétricas de laboratório.

4. Conclusões

Neste trabalho, medições simultâneas da concentração de clorofila *a* superficial na região da Bacia de Campos, margem continental sudeste brasileira, foram realizadas através de medidas *in situ* fluorimétricas, com LIDAR e por radiometria acima da superfície da água, complementadas por imagens MODIS de sensoriamento remoto da cor do oceano.

As concentrações de clorofila foram bem estimadas pelos métodos empregados, ainda que os algoritmos empíricos aplicados aos dados radiométricos *in situ* e aos dados de satélite tenham superestimado um pouco os valores de CSM. O algoritmo semi-analítico GSM01 aplicado aos dados MODIS apresentou melhor desempenho que OC3M e Carder.

Outras comparações entre os dados radiométricos *in situ*, LIDAR e de satélite serão realizadas de modo a explorar melhor estas técnicas de amostragem e assim, avançar no estudo ecossistêmico da região.

Referências

- Barbosa, P. C. C. **Aplicações de Fluorescência Induzida por Laser em Monitoramento Ambiental**. 2003. 139p. (PUC-Rio, N° 9916186/CA). Tese (Doutorado em Física) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Behrenfeld, M.J.; Falkowski, P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. **Limnology Oceanography**, v.42, p. 1-20, 1997.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Cannizzaro, J. P.; Campbell, J. W.; Mitchell, B. G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-*a*. **Advances in Space Research**, v. 33, n.7, p. 1152-1159, 2004.
- Cracknell, A. P., Newcombe, S. K., Black, A. F., Kirby, N. E. The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) concerted action. **Int. Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 205–247, 2001.
- Falkowski, P. G., Raven, J. A. **Aquatic Photosynthesis**. Malden: Blackwell, 1997. 375 p.
- Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P.-Y. Reduction of Skylight Reflection Effects in the Above-Water Measurement of Diffuse Marine Reflectance. **Applied Optics**, v. 38, n.18, p. 3844-3856, 1999.
- Garver, S.A.; Siegel, D.A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation. I. Time series from the Saragasso Sea. **Journal Geophysical Research**, v.102, p. 18607-18625, 1997.
- 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, p. 443-452, 1994.
- Kamykowski, D. A preliminary biophysical model of the relationship between temperature and plant nutrients in the upper ocean. **Deep-Sea Research I**, v. 34, p. 1067-1079.
- Kampel, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplânctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na costa sudeste brasileira**. 2003. 272p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 2003.
- Maritorena, S., Siegel, D.A.; Peterson, A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v.41, p. 2705-2714. 2002.
- Mobley, C. D. Estimation of the Remote-Sensing Reflectance from Above-Surface Measurements. **Applied Optics**, v. 38, n.36, p. 7442-7455, 1999
- O'Reilley, J.E.; Maritorena, S.; O'Brien, M.C.; Siegel, D.A.; Toole, D.; Menzies, D.; Smith, R.C.; Mueller, J.L.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, R P.; Strutton, P.; Cota, G.F.; Hooker, S.B.; McClain, C.R.; Carder, K.L.; Mueller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phynney, D.; Moore, G.F.; Aiken, J.; Arrigo, K.R.; Letelier, R.; Culver, M. **SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, Volume 11**. In: S. B. Hooker e E. R. Firestone (ed). NASA Tech. Memo. 2000-2206892. Greenbelt, Md, NASA Goddard Space Flight Center, 2000.
- Parsons, T.R.; Maita, Y.; Lalli, C.M. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- Gaeta, S.A.; Metzler, P.M.; Lopes, R.M. **Plâncton e Produtividade Primária na plataforma da costa norte do Estado do Rio de Janeiro-Campanha de Verão (dez/91-jan/92)**. Relatório do Projeto Monitoramento Oceânico da Bacia de Campos FUNDESPA/GEOMAP-PETROBRÁS, 1993.