

Estimativa por satélite da concentração de clorofila *a* superficial na costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul: Comparação dos algoritmos SeaWiFS

Milton Kampel¹
Salvador A. Gaeta²
João A. Lorenzetti¹
Mayza Pompeu²

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

² Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - IOUSP
Praça do Oceanográfico - 05508-900 - São Paulo - SP, Brasil
{sagaeta, pompeu} @usp.br

Abstract. Comparisons between *in situ* measurements of surface chlorophyll *a* concentration and ocean colour remote sensing estimates were conducted in the Brazilian Southeast coast, Southwestern South Atlantic. *In situ* data were acquired from four seasonal hydrographic cruises carried out during the summer and winter of 2001 and 2002, along the continental shelf and slope waters. The satellite estimates of chlorophyll *a* were derived from data collected by the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) recorded in High Resolution Picture Transmission mode by INPE's station with a nominal 1.1 km resolution at nadir. Four algorithms were used to estimate chlorophyll concentrations: two empirical - Ocean Chlorophyll 4 bands (OC4), and Ocean Chlorophyll 2 bands (OC2); one semi-analytical - Garver, Siegel, Maritorena version 01 (GSM01); and one based on neural network (NN). Comparisons of estimated and measured (*in situ* fluorometric data) surface chlorophyll concentration were conducted within a temporal window of 24 hours around the *in situ* sampling time. SeaWiFS algorithms values are 5x5 pixel medians centered on the location of sampling station. For the Brazilian Southeastern coast chlorophyll concentration was fairly well estimated by all the SeaWiFS algorithms. The OC4 algorithm performed better ($R^2 = 0.71$; rms = 0.22) than the other chlorophyll retrieval algorithms (OC2, GSM01, and NN). The OC2 algorithm also showed a good performance with $R^2 = 0.67$ and rms = 0.23. The neural network algorithm performed better than the semi-analytical one ($R^2 = 0.62$ and 0.55, respectively), but with a higher rms (0.34 and 0.2, respectively). In general, the OC4, OC2, and NN algorithms showed a tendency for overestimating chlorophyll *a* at higher concentrations and underestimating at lower values. The semi-analytical GSM01 algorithm overestimated only the lower chlorophyll *a* concentrations, but underestimated most of the other values.

Palavras-chave: phytoplankton biomass, chlorophyll *a* concentration, remote sensing, ocean colour, SeaWiFS, SW Atlantic, biomassa fitoplanctônica, concentração de clorofila *a*, sensoriamento remoto, cor do oceano, SeaWiFS, Atlântico Sudoeste.

1. Introdução

A absorção seletiva da radiação solar dos comprimentos de onda nas faixas do azul e verde do espectro eletromagnético pelos pigmentos fotossintéticos, principalmente pela clorofila *a*, possibilita a quantificação da biomassa fitoplanctônica oceânica através de medidas da cor do oceano obtidas por satélite (Morel e Prieur, 1977; Gordon e Morel, 1983). Nesse contexto, o sensor orbital *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), lançado em agosto de 1997, tem o propósito de fornecer dados quantitativos das propriedades bio-ópticas dos oceanos, examinando os fatores oceânicos que afetam as mudanças globais. As estimativas de produtos derivados, tais como, a concentração de clorofila *a*, radiâncias e produtividade primária, obtidos com a utilização de algoritmos desenvolvidos para dados orbitais da cor do oceano, devem ser comparados e validados em relação a medidas *in situ*. Entretanto, as propriedades bio-ópticas da água do mar nas regiões do Atlântico Sul permanecem pouco

conhecidas, apesar dos esforços isolados de alguns pesquisadores (Mitchel e Holm-Hansen, 1991; Omachi e Garcia, 2000; Mitchel *et al.*, 2001).

As acurácia, precisão e utilidade dos algoritmos empíricos da cor do oceano para estimar a distribuição de clorofila *a* superficial (CSM) dependem das características desses algoritmos e das observações *in situ* usadas em seus respectivos desenvolvimentos. Os algoritmos semi-analíticos da cor do oceano têm como principal vantagem sobre os modelos empíricos de razão de bandas, a obtenção de várias propriedades ópticas simultaneamente a partir de um único espectro de radiancias emergentes do oceano. Entretanto, a complexidade desses modelos semi-analíticos tem dificultado seu desenvolvimento e implementação operacional. As principais vantagens de uma abordagem por rede neural artificial para estimar a CSM são a associação com complexidades não lineares, a sensibilidade reduzida a ruído e uma aparente filtragem mais eficiente de erros residuais da correção atmosférica (Gross *et al.*, 2000).

Neste trabalho, dados da concentração de clorofila *a* na camada superficial do mar medidos *in situ* por técnicas fluorimétricas são comparados com estimativas obtidas concomitantemente pelo sensor SeaWiFS na costa sudeste brasileira. A acurácia de dois algoritmos empíricos, um semi-analítico e um por redes neurais utilizados na geração da CSM por satélite são avaliados pelo cálculo da diferença média e valor rms (*root mean square*) entre as medidas orbitais e *in situ*.

2. Material e Métodos

Medidas *in situ*

As concentrações de clorofila *a* superficial *in situ* foram medidas em quatro cruzeiros oceanográficos do projeto DEPROAS na costa sudeste brasileira, nos períodos de verão e inverno de 2001 e 2002 (**Figura 1**). A área de estudo abrange a plataforma continental e o talude entre o Cabo de São Tomé (22°S), RJ e a Ilha de São Sebastião (23°50'S), SP. Os cruzeiros foram realizados nas seguintes datas: M1 – 7 a 13/2/2001; M2 – 12 a 19/7/2001; M3 – 5 a 24/1/2002 e M4 – 3 a 21/8/2002. A abundância fitoplanctônica foi estimada a partir de amostras superficiais de 250 mL de água filtradas por filtros *Whatman* GF/F. Os filtros foram mantidos em nitrogênio líquido e as concentrações de clorofila *a* determinadas por fluorescência em fluorímetro Turner 10-AU-005 após extração em 5 mL de acetona 90% a -4 °C por 12 horas (Holm-Hansen *et al.*, 1965; Shoaf e Lium, 1976).

Sensoriamento remoto

Imagens da cor do oceano do sensor SeaWiFS foram adquiridas nos mesmos períodos dos cruzeiros oceanográficos e processadas de modo a fornecer informações sobre os campos de CSM, com a utilização de algoritmos empíricos, semi-analítico e de rede neural.

O sensor SeaWiFS possui oito bandas espectrais (**Tabela 1**) com resolução espacial de 1,1 km no nadir e repetitividade diária. Algumas características do sensor SeaWiFS estão na **Tabela 2**.

As imagens do sensor SeaWiFS foram adquiridas em modo de alta resolução pela antena de recepção instalada no INPE, em São José dos Campos, SP. O processamento das imagens foi realizado em ambiente SeaDAS. Os dados brutos foram calibrados radiometricamente para gerar valores de radiancias 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 das concentrações de clorofila *a*.

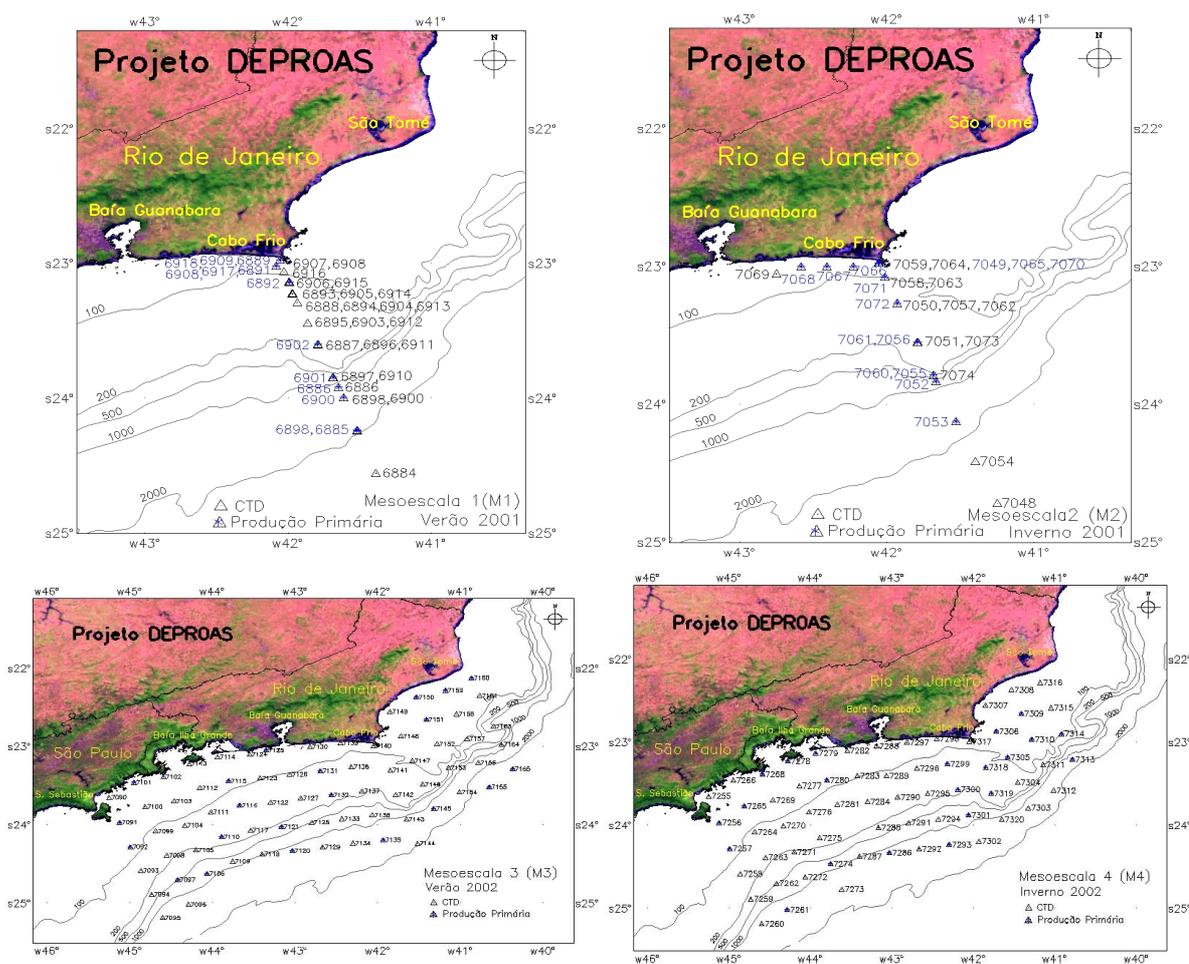


Figura 1 - Rede amostral dos cruzeiros oceanográficos de mesoescala 1 e 2 (verão e inverno 2001), e mesoescala 3 e 4 (verão e inverno 2002). Isóbatas em metros. Mascara de terra: imagem SPOT 5 *Vegetation*.

Tabela 1 - Bandas espectrais do sensor SeaWiFS

Banda	λ SeaWiFS (nm)
1	402-422
2	433-453
3	480-500
4	500-520
5	545-565
6	660-680
7	745-785
8	845-885

Tabela 2 – Características do sistema SeaWiFS

Resolução no nadir	1,1 km LAC; 4,5 km GAC
Tipo de órbita	Heliossíncrona, 705 km
Cruzamento com equador	12:00, ± 20 min., descendente
Faixa imageada	2800 km LAC ($\pm 58,3^\circ$); 1505 km GAC ($\pm 45^\circ$)
Resolução radiométrica	10 bits

Foram utilizados os algoritmos empíricos *Ocean Chlorophyll 4-bands* - OC4 e *Ocean Chlorophyll 2-bands* - OC2 (O'Reilly *et al.*, 2000), semi-analítico Garver, Siegel, Maritorea *version 01* - GSM01 (Maritorea *et al.*, 2002) e redes neurais artificiais NN (Gross *et al.*, 2000) para estimar as concentrações de clorofila *a* a partir dos dados SeaWiFS. O algoritmo empírico OC2 estima a C_{insitu} a partir da razão de bandas $R_{35} = R_{RS}(490)/R_{RS}(555)$ utilizando uma função polinomial cúbica modificada (MCP). O algoritmo OC4 também relaciona razões de bandas com a clorofila *a* através de uma única função polinomial, mas emprega a razão de banda máxima (MBR) determinada como a maior razão (R_{max}) entre os valores de $R_{RS}(443)/R_{RS}(555)$, $R_{RS}(490)/R_{RS}(555)$ e $R_{RS}(510)/R_{RS}(555)$ (R_{25} , R_{35} e R_{45} , respectivamente). O'Reilly *et al.* (2000) apresentaram uma revisão dos algoritmos OC2 e OC4 baseados em um conjunto de dados mais amplo e mais representativo de diferentes províncias biogeoquímicas, oligotróficas e eutróficas. Estas últimas versões dos algoritmos empíricos OC2 e OC4 foram utilizadas no presente trabalho para estimar as concentrações de clorofila *a*. O polinômio de quarta ordem para o algoritmo OC4 versão 4 é:

$$C_{insitu} = 10^{(0,366-3,067R_{45}+1,930R_{45}^2+0,649R_{45}^3-1,532R_{45}^4)} \quad (2.1)$$

onde $R_{45} = \log_{10}(R_{25} > R_{35} > R_{45})$, ou seja, o logaritmo do máximo entre os três valores. A equação polinomial cúbica modificada para o algoritmo OC2 versão 4 é:

$$C_{insitu} = 10^{(0,319-2,336R_{25}+0,879R_{25}^2-0,135R_{25}^3)} - 0,071 \quad (2.2)$$

onde $R_{25} = \log_{10}(R_{35})$.

Maritorea *et al.*, (2000) apresentaram um procedimento para aperfeiçoar o modelo semi-analítico inicialmente proposto por Garver e Siegel (1997), para aplicações globais. O modelo GSM01 obtém simultaneamente, estimativas da concentração de clorofila *a*, coeficiente de absorção do material dissolvido e detritos [$a_{cdm}(443)$] e o coeficiente de material retroespalhado [$b_{bp}(443)$] a partir de medidas do espectro de radiancias normalizadas ascendentes da água. A formulação completa do modelo utilizado pode ser expressa da seguinte forma:

$$L_{wv}(\lambda) = \frac{tF_0(\lambda)}{n_w^2} \sum_{i=1}^2 g_i \left\{ \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda/\lambda_0)^{-\eta}}{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda/\lambda_0)^{-\eta} + a_w(\lambda) + Cloa_{ph}^*(\lambda) + a_{cdm}(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)]} \right\}^{-i} \quad (2.3)$$

onde 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; $b_{bw}(\lambda)$ é o retroespalhamento da água; $a_w(\lambda)$ é a absorção pela água; $b_{bp}(\lambda)$ é o retroespalhamento por partículas; a_{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.

No presente trabalho, foi utilizado o modelo de rede neural (NN) de Gross *et al.*, (2000), que propuseram a utilização de uma rede multicamada *perceptron* (MLP) para estimar a concentração de clorofila *a* partir das reflectâncias medidas pelo SeaWiFS. O *perceptron* é uma forma simples de rede neural para classificar um tipo especial de padrão denominado de linearmente separável, ou seja, padrões que ficam em lados opostos de um hiperplano (Bishop, 1995). Rumelhart *et al.*, (1986) desenvolveram o algoritmo de treinamento *back-propagation*, demonstrando que era possível treinar com eficiência redes com camadas

intermediárias. Isto resultou no modelo de rede neural mais utilizado atualmente, as redes MLP.

As comparações entre as medidas de Clorofila *a in situ* (C_{insitu}) e estimadas por satélite (SeaWiFS) foram realizadas dentro de um período de ± 1 dia, a partir da data da estação oceanográfica. Os pares de dados foram formados entre a C_{insitu} e o valor mediano de uma janela de 5 x 5 pixels (25 km x 25 km) centrada na posição geográfica da estação oceanográfica na imagem SeaWiFS equivalente.

3. Resultados e Discussão

Para ilustração, são mostrados exemplos de imagens processadas para o período de inverno de 2001, utilizando os quatro algoritmos testados (**Figura 2**). Na imagem de 17/07/2002, as águas oligotróficas da Corrente do Brasil aparecem ao largo, sobre o talude em tons de azul. Uma intrusão de águas mais ricas vindas de sul pela costa pode ser observada nos processamentos com os algoritmos empíricos e por rede neural com concentrações de clorofila superficial (CSM) acima de $2,0 \text{ mg.m}^{-3}$ em torno da Ilha de São Sebastião. Uma assinatura do vórtice em frente ao de Cabo de São Tomé foi identificada entre as latitudes $22,5^\circ - 22,8^\circ\text{S}$ e as longitudes $40,5^\circ - 41,5^\circ\text{W}$, com diâmetro médio em torno de 70 km. Águas mais ricas de plataforma (CSM $> 2,0 \text{ mg.m}^{-3}$) aparecem sendo advectadas para o interior deste vórtice. Outro vórtice com diâmetro de 75 km foi observado em torno de $23,3^\circ\text{S} - 41,5^\circ\text{W}$ sobre a quebra de plataforma. Estruturas semelhantes, porém de dimensões menores, foram notadas sobre a plataforma, entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, com CSM entre 2,0 e $2,7 \text{ mg.m}^{-3}$. Manchas de alta biomassa fitoplanctônica (CSM $> 2,0 \text{ mg.m}^{-3}$) foram encontradas na zona costeira desde Cabo Frio até Vitória.

A **Figura 3** mostra os diagramas de dispersão dos quatro algoritmos de clorofila por satélite testados para os períodos de verão e inverno, respectivamente. Os coeficientes encontrados nas regressões lineares entre as concentrações de clorofila *a in situ* e as estimativas feitas por satélite, também são apresentados.

A **Figura 4** apresenta a distribuição de frequência das concentrações de clorofila *a* referentes ao conjunto completo de dados, e os diagramas de dispersão dos quatro algoritmos de clorofila por satélite testados para o conjunto completo.

Como mostrado na **Figura 3** no presente trabalho, o algoritmo OC4 apresentou o melhor desempenho durante o verão ($R^2 = 0,87$), ainda que o rms tenha sido um pouco maior que o observado para OC2 (0,22 e 0,20, respectivamente). Os outros algoritmos testados GSM01 e NN também tiveram bom desempenho. O desempenho relativo entre os algoritmos se manteve no inverno, ainda que os coeficientes de determinação tenham sido todos mais baixos que no verão. Em relação ao conjunto completo de dados (**Figura 4**), o algoritmo NN obteve um coeficiente de determinação maior que o GSM01. O algoritmo OC4 obteve ainda o melhor desempenho ($R^2 = 0,71$, rms = 0,22). De modo geral, o algoritmo OC4 subestimou as concentrações de clorofila mais baixas e superestimou as mais altas.

Comparações entre medidas *in situ* de clorofila *a* e estimativas feitas por satélite são raras em águas brasileiras. Para a região da Corrente da Califórnia, Kahru e Mitchell (1999) obtiveram um coeficiente de determinação igual a 0,92 (rms = 0,27 e n = 27) entre medidas de clorofila *a in situ* e estimativas com o algoritmo OC2. Em geral, as estimativas com OC2 naquela região superestimaram a clorofila *a* em altas concentrações e subestimaram em baixas concentrações. Omachi e Garcia (2000) analisaram algoritmos empíricos para estimativa das concentrações de clorofila *a* para o SeaWiFS na região do Atlântico S-SO e concluíram que uma razão de duas bandas (490 e 555 nm) obtém melhores resultados ($R^2 = 0,90$) que uma abordagem com quatro bandas.

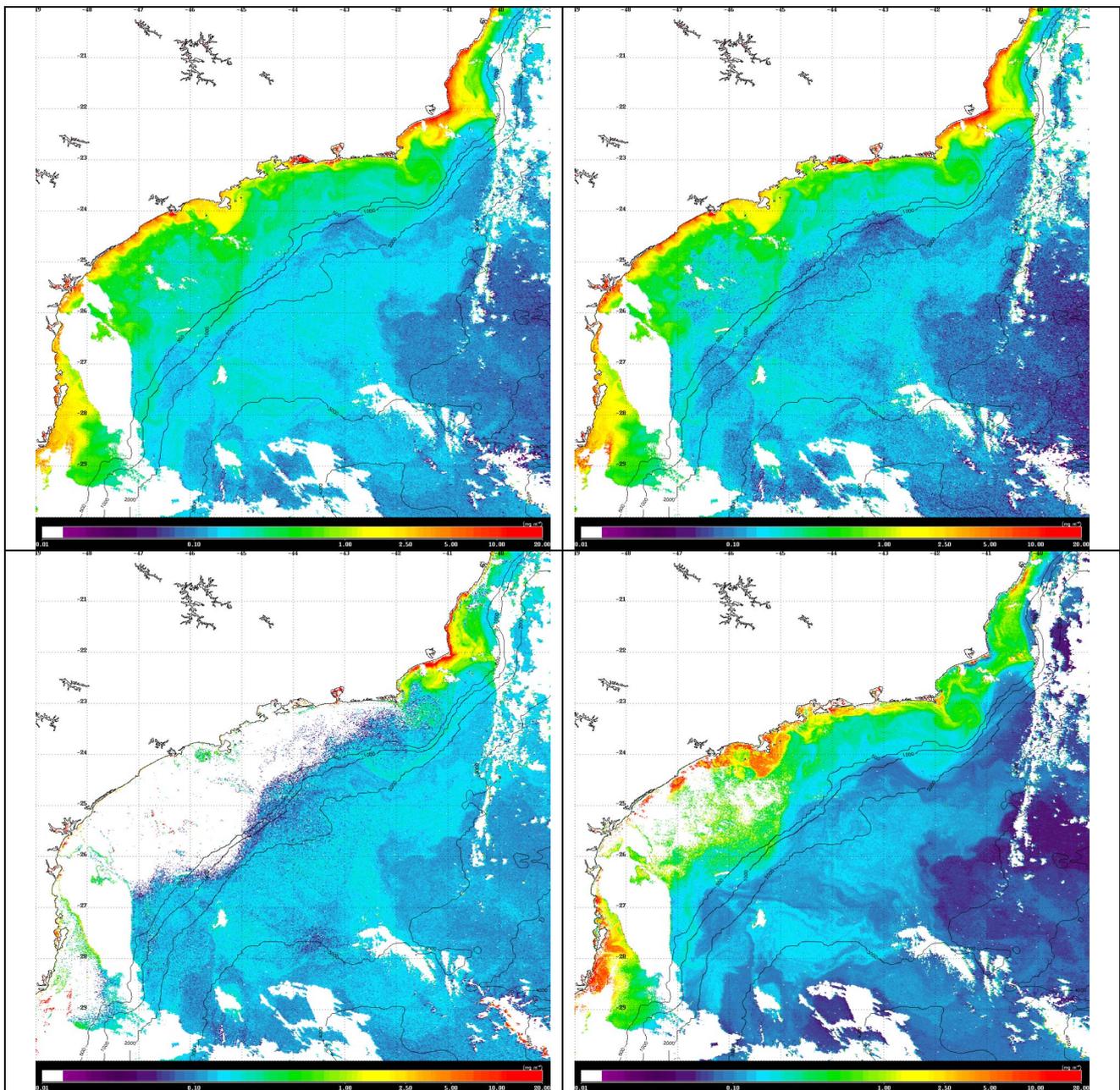


Figura 2 – Imagem SeaWiFS de 17/07/2002 processada com os algoritmos OC4 (esquerda em cima), OC2 (direita em cima), GSM01 (esquerda em baixo), e NN (direita em baixo), respectivamente (ver explicação no texto). Isóbatas de 500, 1.000, 2.000, 3.000 e 4.000 m em preto. Tabela de cores em escala logarítmica.

O conjunto de dados utilizado neste trabalho nas análises de regressão inclui pontos localizados em águas do Caso 1 e em águas do Caso 2 (Morel, 1980). Os algoritmos da NASA são ajustados a um conjunto heterogêneo e representativo de dados, principalmente para águas do Caso 1. Por outro lado, medidas *in situ* frequentes e bem distribuídas na região do Atlântico Sudoeste são raras, o que torna necessário o ajuste regional desses algoritmos. Quando se comparam medidas *in situ* de clorofila *a* e estimativas obtidas por satélite, outros aspectos da metodologia de processamento se tornam dominantes em relação aos algoritmos bio-ópticos propriamente ditos. Uma correção atmosférica eficiente dos dados orbitais é fundamental para o bom funcionamento dos algoritmos bio-ópticos. Uma vez que na faixa do

visível a maior parte da radiância medida por um sensor orbital no topo da atmosfera é originada na própria atmosfera e não no oceano (Gordon *et al.*, 1988), pequenos erros na correção atmosférica podem resultar em grandes erros nas propriedades ópticas marinhas assim derivadas.

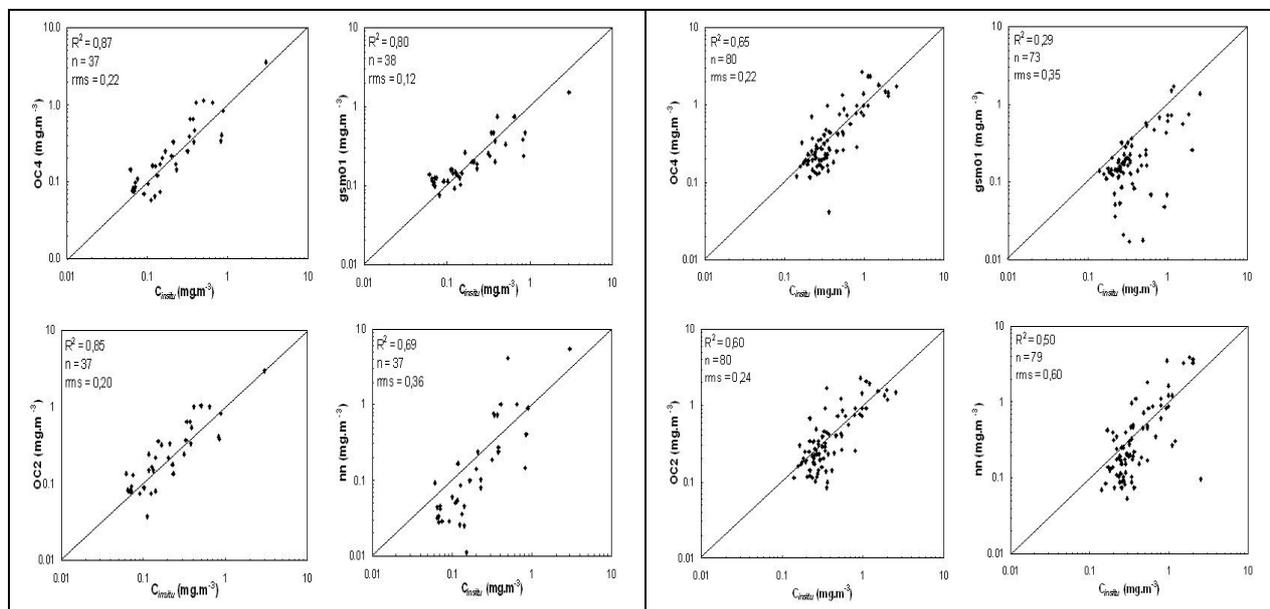


Figura 3 - Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida *in situ*, para os períodos de verão (lado esquerdo) e inverno (lado direito).

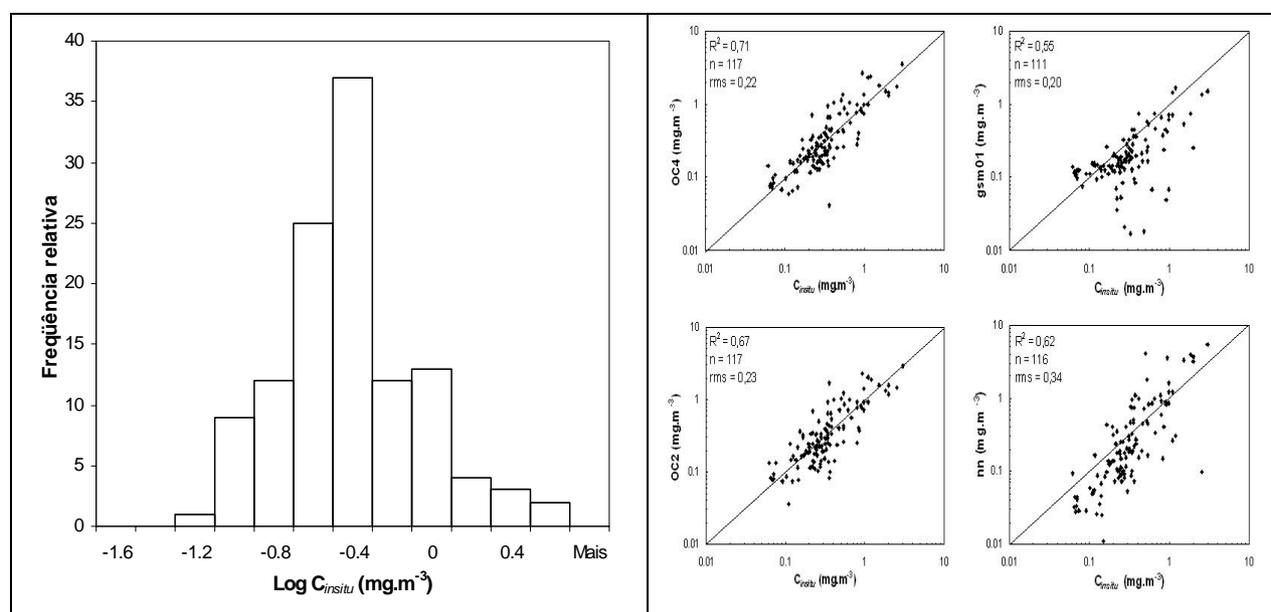


Figura 4 - Histograma da distribuição de freqüência dos valores de Log (clorofila *a*) *in situ* do conjunto completo de dados ($n = 117$, lado esquerdo) e diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida *in situ*, para o conjunto completo de dados (lado direito).

4. Conclusões

Neste trabalho, comparações entre medidas *in situ* da concentração de clorofila *a* superficial e estimativas por sensoriamento remoto da cor do oceano foram realizadas em águas de plataforma e talude da costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul.

As concentrações de clorofila foram razoavelmente bem estimadas pelos algoritmos SeaWiFS, no período considerado. O algoritmo OC4 apresentou o melhor desempenho entre os quatro algoritmos testados, em relação às medidas fluorimétricas *in situ*. De modo geral, o OC4 subestimou as concentrações de clorofila *a* mais baixas e superestimou as mais altas.

O algoritmo OC2 também teve um bom desempenho. O algoritmo por rede neural teve um desempenho melhor do que o semi-analítico, ainda que com um resíduo maior. Os algoritmos OC2 e NN mostraram uma tendência para superestimar os valores de concentração de clorofila *a* mais altas e subestimar os valores mais baixos. O algoritmo GSM01 tendeu a superestimar concentrações mais baixas e subestimar grande parte dos demais valores.

Referências

- Bishop, C.M. **Neural Network for pattern recognition**. Oxford, England, UK: Clarendon, 1995. 482 p.
- 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.; Brown, J.W.; Evans, R.H. Exact Reyleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 coastal zone color scanner. **Applied Optics**, v.27, n.5, p. 862-871, 1988.
- 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.
- Gross, L.; Thiria, S.; Frouin, R.; Mitchell, B.G. Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration. **Journal Geophysical Research**, v.105, n.2, p. 3483-3496, 2000.
- Holm-Hansen, O.; Lorenzen, C.J.; Holems, R.W.; Strickland, J.D.H. Fluorimetric determination of chlorophyll. **International council for the exploration of the sea**, v.30, p. 3-15, 1965.
- Kahru, M.; Mitchell, B.G. Empirical chlorophyll algorithm and preliminary SeaWiFS validation for the California Current. **International Journal Remote Sensing**, v.20, n.17, p. 3423-3429, 1999.
- 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.
- Mitchell, B.G.; Holm-Hansen, O. Bio-optical properties of Antarctic Peninsula waters: Differentiation from temperate ocean models. **Deep-Sea Research, Part A**, v.38, p. 1009-1028, 1991.
- Mitchell, B.G.; Kahru, M.; Reynolds, R.; Wieland, J.; Stramski, D.; Hewes, C.; Holm-Hansen, O. **Evaluation of chlorophyll-a ocean color algorithms for the Southern Ocean**. San Francisco, p. 2001.
- Morel, A. In-water and remote measurements of ocean colour. **Boundary Layer Meteorology**, v.18, p. 177-201, 1980.
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology Oceanography**, v.22, p. 709-722, 1977.
- Omachi, C. Y. and C. A. E. Garcia. Analysis of empirical algorithms of surface chlorophyll a for SeaWifs in the Southwestern Atlantic Ocean. In: Ocean Optics XV, **Proceedings...** Monaco: p. 11-14, 2000.
- 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.

Rumelhart, D.E.; Hinton, G.E.; Williams, R.J. Learning representations by back-propagating errors. **Nature**, v.323, p. 533-536, 1986.

Shoaf, W.T.; Lium, B.W. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. **Limnology Oceanography**, v.21, p. 926-928, 1976.