

## Avaliação da performance do algoritmo para a determinação das concentrações de Carbono Orgânico Particulado através de sensoriamento remoto em áreas costeira e oceânica no Oceano Atlântico Sudoeste

Luís Henrique Bordin <sup>1</sup>  
Gabriel Serrato de Mendonça Silva <sup>1</sup>  
Carlos Alberto Garcia <sup>1</sup>  
Eunice da Costa Machado <sup>2</sup>

1 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Caixa Postal 476 - 88010-970 - Florianópolis - SC, Brasil  
{graoceano, gabrielsilva, garcia.io.@gmail.com

2 Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Caixa Postal 474 - 96201-900 - Rio Grande - RS, Brasil  
eunice.machado@furg.br

**Abstract.** To understand the influence of ocean in carbon biogeochemical cycle and their consequences in global climate changes advances of ocean-color satellite mission has progressed beyond the estimation of chlorophyll-a concentrations. One of recent products provided by NASA is particulate organic carbon (POC) concentration. To evaluate the performance of standard NASA POC algorithm (Stramski et al. 2008) in coastal and oceanic areas of the Southwestern Atlantic Ocean, comparisons of simultaneous *in situ* and satellite POC determinations were carried out in this paper. The results indicate that the POC algorithm overestimate *in situ* data. Nevertheless, the algorithm proved to be satisfactory in estimate POC concentrations, both in coastal and oceanic areas, moreover, to be an important tool to investigate the spatial and temporal variability of POC in the global oceans. However, the necessity of increase the efforts in collect *in situ* data is unquestionable and essential to improve the results of algorithm validation processes.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, oceanography, particulate organic carbon, sensoriamento remoto, processamento de imagens, oceanografia, carbono orgânico particulado.

### 1. Introdução

A origem, qualidade, distribuição e variabilidade da matéria orgânica particulada, bem como do carbono orgânico particulado (COP) nos oceanos, são consideradas peças chave para a compreensão do ciclo biogeoquímico regional e global do carbono (Sabine et al. 2004; Honjo et al. 2008), tendo ganhado atenção especial nas últimas décadas pela comunidade científica, devido ao aumento das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> e suas consequências nas alterações climáticas globais (Hartmann et al. 2013; Giering et al. 2014).

No entanto, devido às dificuldades logísticas, estudos que avaliam o COP no Oceano Atlântico são escassos, podendo-se citar o trabalho de Pedrosa et al. (2006). São mais frequentes estudos que avaliam os parâmetros físico-químicos e biológicos, relacionados com a dinâmica oceanográfica (Brandini et al. 2007; 2014; Braga et al. 2008; Carvalho et al. 1998).

A compreensão da variabilidade de propriedades biogeoquímicas derivadas da cor do oceano (radiação visível), através de sensoriamento remoto, tem apresentado grandes avanços nas últimas décadas (McClain, 2009), ajudando a minimizar tais dificuldades e a preencher lacunas na distribuição espacial e temporal de diversos parâmetros, como por exemplo, a concentração de clorofila-a.

O desenvolvimento de algoritmos para a determinação de COP na superfície do mar através de imagens de satélite da cor do oceano é algo recente e ainda em evolução, contudo, tem se mostrado viável e com potencial para ampliar o entendimento da distribuição e variabilidade de COP nos oceanos (Stramski et al. 1999; 2008; Loisel et al. 2002; Swirgon e Stramska, 2015). Estes algoritmos estão em contínuo processo de aprimoramento pela NASA e vários programas de observação tem sido conduzidos para validação do COP. A Tabela 1 mostra os resultados da validação realizado pela NASA, obtidos na página *Ocean Color* (<http://oceanocolor.gsfc.nasa.gov>), bem como a frequência de distribuição e o *match-up* de comparação entre os produtos MODIS/Aqua e dados de COP medidos *in situ* (Figura 1).

Tabela 1. Amplitude das concentrações de COP ( $\text{mg m}^3$ ), derivadas do sensor MODIS/Aqua e medidas *in situ*, ajuste da reta, coeficiente angular, coeficiente de correlação ( $R^2$ ), razão mediana, diferença mediana %, e erro quadrático médio (RMSE), determinados pelo processo de validação do algoritmo padrão da NASA.

Produto	Amplitude		N	Ajuste da reta	Coeficient e angular	$(R^2)$	Razão média	Diferença a mediana %	RMSE
	Aqua	<i>in situ</i>							
COP	21,275 3149,250	25,308 1168,776	193	1,723	-168,102	0,263	0,921	26,143	237,591

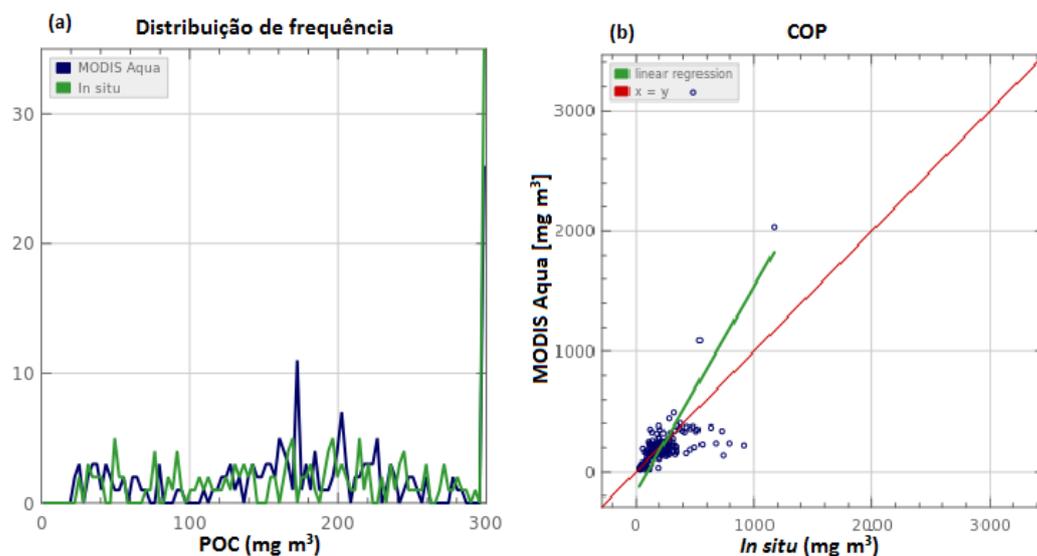


Figura 1. (a) Distribuição de frequência de dados de COP obtidos *in situ* versus os produtos do sensor MODIS/Aqua ( $\text{mg m}^3$ ); (b) *Match-up* de comparação entre dados de COP obtidos *in situ* versus os produtos MODIS/Aqua ( $\text{mg m}^3$ ), e a regressão linear (linha verde).

Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar a performance do algoritmo padrão da NASA (Stramski et al., 2008) para estimar as concentrações de COP na superfície do mar através de imagens de satélite da cor do oceano no Atlântico Sudoeste e, em especial, na área costeira da plataforma interna central do estado de Santa Catarina (SC).

## 2. Metodologia de Trabalho

O desempenho do algoritmo para estimar as concentrações de COP na superfície do mar através de sensoriamento remoto foi testado a partir da comparação (*match-up*) entre os dados *in situ* e o COP derivado pelo MODIS/Aqua.

Para a região oceânica, os dados *in situ* utilizados foram obtidos através do banco de dados público *SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System* (SeaBASS), mantido pelo *NASA Ocean Biology Processing Group* (OBPG) da NASA. Foram selecionados apenas dados coletados pelo *Atlantic Meridional Transect* (AMT), referente aos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 (Figura 1a). Dentre estes, apenas medidas de COP superficiais (profundidade menor que 6m) no Oceano Atlântico Sul, totalizando 318 amostras. A análise e processamento das amostras de COP do SeaBASS seguiu o protocolo utilizado pelo programa *Joint Global Ocean Flux Study* (JGOFS) (Knap et al. 1996).

Os dados costeiros utilizados foram cedidos pelo projeto de Monitoramento Ambiental da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Entorno (MAArE), os quais foram coletados na plataforma interna central do estado de Santa Catarina (SC) (Figura 2b). Foram usados os dados de COP superficiais, amostrados durante cruzeiro de verão de 2016, totalizando 12 amostras (Figura 2b). A análise e processamento dos dados de COP foram de acordo com Wallner-Kersanach e Machado (2010).

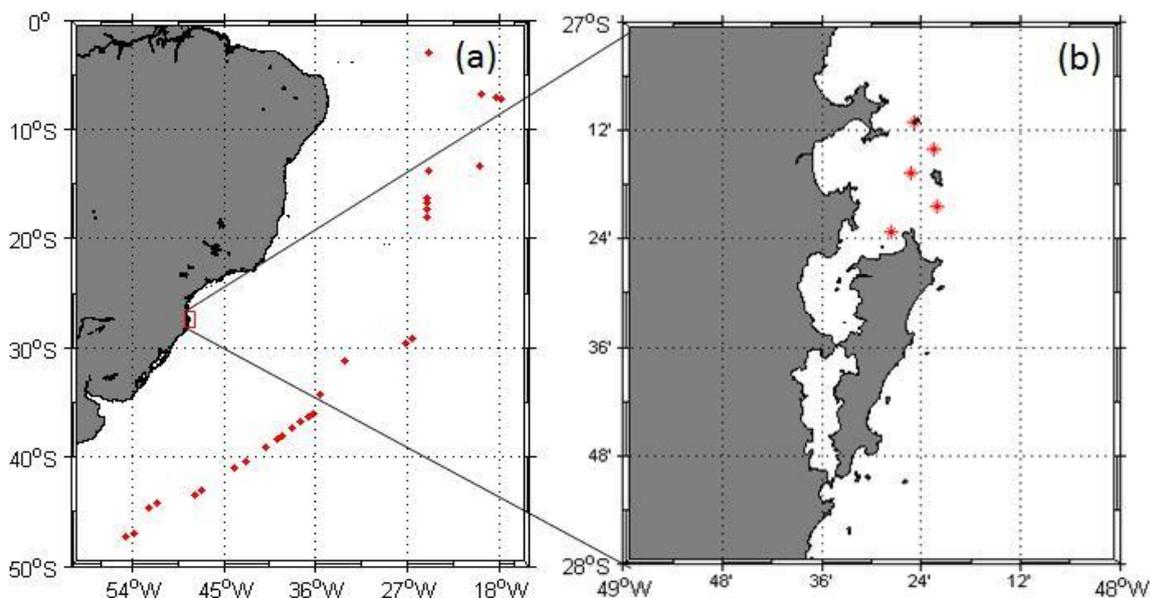


Figura 2. Mapa da área de estudo apresentando a área oceânica (a), em maior escala, com os pontos amostrais do experimento AMT (pontos vermelhos), e indicando a localização da plataforma interna central de SC, com os pontos amostrais do projeto MAArE (b). Os pontos amostrais apresentados foram apenas aqueles pareados, ou seja, dados válidos de COP derivados pelo MODIS/Aqua e medidos *in situ*.

Os valores de COP derivados do MODIS/Aqua foram obtidos através do site *Ocean Color* (<http://oceanocolor.gsfc.nasa.gov>), mantidos pelo OBPG. A abordagem utilizada pela NASA para o processamento das imagens inclui uma relação empírica direta entre as concentrações de COP e a razão das bandas de refletância azul para o verde,  $R_{rs}(\lambda_B)/R_{rs}(555)$ , e algoritmos de dois passos que consistem na relação entre a refletância e as propriedades ópticas inerentes (IOP) (atenuação do raio de luz ou coeficiente de retroespalhamento) e relações entre COP e IOPs (Stramski et al. 2008).

A imagem utilizada para a área costeira de SC foi do nível L1A do dia 17/02/2016 com resolução espacial de 1 quilômetro. Devido ao fato de estar próxima à costa, utilizamos o esquema de Wang et al. (2009) para as correções atmosféricas da imagem. O seu processamento foi realizado no programa SeaDAS. As imagens utilizadas para extração dos dados da área oceânica foram do nível L3, com resolução de 4 quilômetros. As análises estatísticas realizadas foram em ambiente MATLAB.

Para a validação do COP (*matchup*), imagens diárias foram utilizadas conjuntamente (área costeira e oceânica). No total, encontramos 30 pares de dados de COP (satélite e *in situ*) na região oceânica e 5 na costeira. Quando comparados os dados *in situ* com os produtos derivados dos satélites devemos lembrar que ambas estimativas estão sujeitas a erros. Esta questão é descrita em detalhes por Gardner et al. (2003). A diferença entre os dados *in situ* e dos produtos MODIS/Aqua foi quantificada através de métodos padrões, descritos por Ostasiewicz et al. (2006). São eles:

Erro médio absoluto (AAE);

$$AAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|$$

(Equação. 1)

Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE);

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

(Equação. 2)

Viés (B);

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - \sum_{i=1}^N O_i = \bar{P} - \bar{O}$$

(Equação. 3)

Viés médio normalizado (Pviés);

$$P_{BIAS} = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

(Equação. 4)

Onde:  $N$  é o total de medições,  $O_i$  os dados de COP *in situ* e  $P_i$  os dados de COP estimados pelas imagens de satélite.

### 3. Resultados e Discussão

O conjunto de valores da concentração de COP pareados entre os dados *in situ* e as imagens MODIS/Aqua totalizaram 35 amostras, sendo 30 obtidas na área oceânica e 5 na área costeira. Todos os dados costeiros *in situ*, comparados com as imagens de satélite, são referentes ao dia 17/02/2016 (Figura 3), uma vez que, dos três dias em que a campanha amostral do projeto MAArE foi realizada, apenas este dia não estava nublado. A baixa quantidade de dados disponíveis para as etapas de validação do algoritmo, deve-se à dificuldade de aquisição simultânea de dados de COP *in situ* e a disponibilidade de imagens de satélite sem cobertura de nuvens.

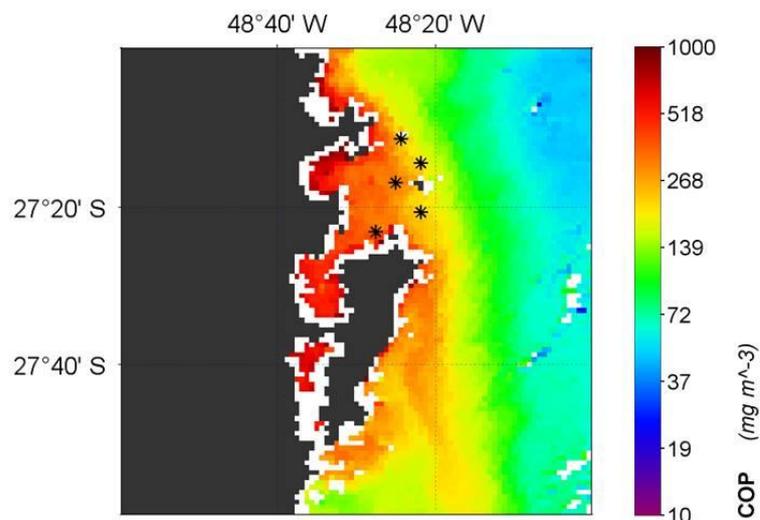


Figura 3. Produto MODIS/Aqua L1A (17/02/2016), com a correção atmosférica, representando a distribuição das concentrações superficiais de COP na plataforma interna central de SC.

O histograma da distribuição dos dados e o *match-up* (comparação) entre os produtos MODIS Aqua e os dados de COP *in situ* são apresentados na Figura 4. Na Tabela 2, são sumarizados os erros estatísticos para o conjunto de dados.

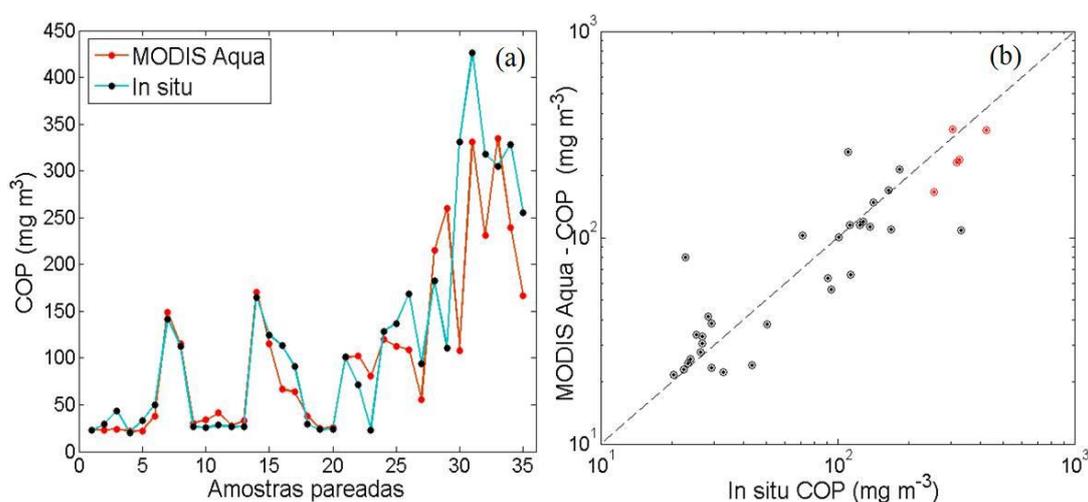


Figura 4. Histograma de distribuição dos dados (a) *match-up* (comparação) entre os produtos COP - MODIS Aqua ( $\text{mg m}^3$ ) e concentrações de COP *in situ* ( $\text{mg m}^3$ ).

Tabela 2. Número de dados pareados, amplitude das concentrações de COP MODIS/Aqua e *in situ* (mg m<sup>3</sup>), erro médio absoluto (AAE), viés, viés médio normalizado (Pviés), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e erro quadrático médio (RMSE).

	N	Aqua	<i>in situ</i>	AAE	Viés	Pviés	R <sup>2</sup>	RMSE
MAArE	5	Min: 167 Max: 334,799	Min: 255 Max: 426	77,6	-65,68	-20,122	0,47	81,243
AMT	30	Min: 21,612 Max: 260,269	Min: 20,273 Max: 330,83	27,3	-5,05	-6,05	0,441	53,901
Total	35	Min:21.612 Max: 334,799	Min:20.273 Max: 426,000	34,491	-13,715	-11,608	0.726	58,594

Como podemos observar, o valor de viés e de AEE (Tabela 2) indicam a subestimação das concentrações de COP pelas imagens de satélite, tanto nos valores para a área costeira, como para a oceânica, também evidenciado pelo *match-up* (Figura 4b), estando de acordo com o observado no Atlântico Sul por Swirgon e Stramska (2015). Neste trabalho, obtivemos um valor de viés e AEE menores do que o trabalho anteriormente citado, por não incluirmos na presente análise, os dados provindos dos experimentos AMT realizados nos anos de 2004, 2005 e 2008. Estes, não foram incluídos devido à divergência na metodologia utilizada para determinação de COP nos cruzeiros posteriores Swirgon e Stramska (2015).

Nota-se que os coeficientes de determinação, considerados separadamente para cada experimento, apresentam baixos valores. No entanto, quando considerados conjuntamente, ocorre um aumento em seu valor devido os dados costeiros apresentarem concentrações de COP elevados (Figura 4a e 4b), fazendo com que estes influenciem de forma positiva no coeficiente de determinação.

#### 4. Conclusões

A performance do algoritmo para estimar as concentrações superficiais de COP no Oceano Atlântico Sul foi satisfatória, apresentando-se como uma ferramenta importante para estudos de variabilidade do COP no domínio espaço-temporal. No entanto, a escassez de dados disponíveis no Atlântico Sudoeste é enorme, principalmente para a região costeira, porém os resultados apresentados aqui são promissores. Ressaltamos a importância dos esforços científicos em ampliar o levantamento de dados *in situ*, em aprimorar o algoritmo do COP através de sensoriamento remoto, assim como minimizar as fontes de erros.

#### Agradecimentos

Parte dos dados apresentados neste trabalho foram obtidos no âmbito do Projeto MAArE. A realização do projeto MAArE é uma condicionante indicada pelo ICMBio no âmbito do processo de licenciamento ambiental do IBAMA. Somos gratos a todos os cientistas e técnicos que contribuíram com a realização do projeto MAArE. Agradecemos também a todos os cientistas que contribuíram com o banco de dados do SeaBASS, especialmente a William Balch. Agradecemos a NASA por manter e compartilhar os produtos MODIS/Aqua na página da web Ocean Color. Bordin, L.H. é bolsista CAPES pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina.

## Referências bibliográficas

- Carvalho, J. L. B.; Schettini, C. A. F.; Ribas, T. M. Estrutura Termohalina Do Litoral Centro-Norte Catarinense. **Notas Téc. Facimar**, v. 2, p. 181–197, 1998.
- Braga, E. S. et al. Nutrient distributions over the Southwestern South Atlantic continental shelf from Mar del Plata (Argentina) to Itajaí (Brazil): Winter–summer aspects. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1649-1661, 2008.
- Brandini, F. P. et al. Sources of nutrients and seasonal dynamics of chlorophyll in the inner shelf off Paraná State-South Brazil Bight. **Journal of Coastal Research**, p. 1131-1140, 2007.
- Brandini, F. et al. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. **Continental Shelf Research**, p. 1–15, 2014.
- Gardner, W. D. et al. Determining true particulate organic carbon: bottles, pumps and methodologies. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 50, n. 3, p. 655-674, 2003.
- Giering, S. et al. Reconciliation of the carbon budget in the ocean/s twilight zone. **Nature**, v. 507, n. 7493, p. 480-483, 2014.
- Hartmann, D. L. et al. IPCC fifth assessment report, climate change 2013: The physical science basis. IPCC, p. 31-39, 2013.
- Honjo, Susumu et al. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983. **Progress in Oceanography**, v. 76, n. 3, p. 217-285, 2008.
- Knap, A. H. et al. Protocols for the joint global ocean flux study (JGOFS) core measurements. **JGOFS, Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29, UNESCO 1994, v. 19, 1996.**
- Loisel, H. et al. Seasonal and inter-annual variability of particulate organic matter in the global ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 24, p. 1-4, 2002.
- Mcclain, Charles R. A decade of satellite ocean color observations. **Annual Review of Marine Science**, v. 1, p. 19-42, 2009.
- Möller, O. O. et al. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1607–1624, 2008.
- Ocean Color. Disponível em: <<http://oceanocolor.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 03.out.2016.
- Ostasiewicz et al. Urszula. Statystyka: **elementy teorii i zadania. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego**, 2006.
- Pedrosa, Paulo et al. Hidroquímica de massas d'água oceânicas em regiões da margem continental Brasileira, Bacia de Campos, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 20, n. 1, 2012.
- Piola, Alberto R. et al. Subtropical shelf front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105, n. C3, p. 6565-6578, 2000.
- Piola, A. R. et al. The subtropical shelf front off eastern South America. *Journal of Geophysical Research*, n. 105, p. 6565–6578, 2000. PIOLA, A. R.; MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; MOLLER JR, O. O.; CAMPOS, E. J. D. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. **Geophysical Research Letters**, n. 32, p. 01603, 2005.
- Reichstein, M. et al. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, n. 7462, p. 287-295, 2013.
- Sabine, C. L. et al. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. **Science**, v. 305, n. 5682, p. 367-371, 2004.
- Schettini, C. A. F. et al. Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State – Southern Brazil. Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries. Bahia Blanca, Argentina. **Resumos**. 29-32pp, 1996.
- Stramski, Dariusz et al. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing. **Science**, v. 285, n. 5425, p. 239-242, 1999.
- Stramski, Dariusz et al. Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. **Biogeosciences**, v. 5, n. 1, p. 171-201, 2008.
- Wang, M. et al. Evaluation of MODIS SWIR and NIR-SWIR atmospheric correction algorithms using SeaBASS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 3, p. 635-644, 2009.
- Wallner-Kersanach M, Machado E.C. **Amostragem e análise de carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio orgânico particulado (NOP)**. In: Baumgarten MGZ, Wallner-Kersanach M, Niencheski LFH (Org.) Manual de Análises em Oceanografia Química 2ed, Rio Grande, Editora da FURG, p. 156-166, 2010.