Melissa Carvalho

Estimativa da concentração de clorofila-*a* através de dados de cor do oceano e caracterização oceanográfica da plataforma continental adjacente à Baixada Santista

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de Oceanografia Biológica.

Orientadora:
Profa. Dra. Sônia Maria Flores Gianesella

Co-orientadora:
Profa. Dra. Áurea Maria Ciotti

São Paulo
2009

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Estimativa da concentração de clorofila-*a* através de dados de cor do oceano e caracterização oceanográfica da plataforma continental adjacente à Baixada Santista

Melissa Carvalho

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de Oceanografia Biológica.

Julgada em ____/____/_____ por:

_____ _____

_____ _____

_____ _____

_____ _____

_____ _____

Agradecimentos

À Profa. Dra. Sônia M. F. Gianesella pela orientação, incentivo, confiança depositada e por toda a estrutura e recursos fornecidos para realização deste trabalho.

À Profa. Dra. Áurea Ciotti, pela co-orientação, imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Flávia M. P. Saldanha Corrêa, por todo conhecimento transmitido e pelo auxílio em todas as etapas de desenvolvimento desta tese e pela amizade inestimável.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

À FAPESP, financiadora do projeto ECOSAN, no âmbito do qual esta tese foi desenvolvida.

A todos os funcionários e alunos do IOUSP que participaram dos embarques do ECOSAN, em especial aos funcionários do DOB, Tomás, Marta e Ricardo.

Aos alunos e estagiários do laboratório PROFITO que participaram dos embarques e das análises em laboratório: André, Andrés, Bárbara, Breno, Bruna, Cíntia, Fernanda, Juan, Rebeca e Thaís.

Aos alunos da UNESP – Campus do Litoral Paulista, que participaram dos embarques do ECOSAN na plataforma: Rafael, Amabile, Fabiana e em especial a Fernanda "Caju", que além de auxiliar na coleta de dados na etapa de março, me recebeu sempre que preciso em sua "república" em São Vicente.

A toda tripulação do N. Oc. Prof. W. Besnard, especialmente ao comandante José H. M. Rezende, pelo auxílio com os dados de vento.

Às secretárias da pós-graduação, Silvana e Ana Paula, sempre muito prestativas.

Ao Valter Miyagi, pelo eficiente suporte computacional.

Às secretárias do Depto de Oceanografia Biológica, pelo apoio nas questões burocráticas.

Ao pessoal do LIO e oficina do IOUSP, pelo auxílio com os equipamentos.

Ao pessoal da biblioteca do IO, sempre muito atenciosos.

A todos os demais funcionários do IOUSP que direta ou indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos examinadores da qualificação, Dr. Paulo Polito e Dra. Claudia Omachi, pelas sugestões valiosas e esclarecimentos.

Ao LARAD/INPE (Laboratório de Radiometria – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), na pessoa de Dra. Elisabete Caria de Moraes, pelo empréstimo do espectroradiômetro e calibração em laboratório da placa de referência.

Ao Msc. Fabrício Sanguinetti, pelo auxílio da coleta dos dados radiométricos *in situ* durante o cruzeiro de outubro de 2005, e auxílio na instalação e utilização da plataforma Linux e softwares associados.

Ao Msc. Rafael Soutelino, pelos esclarecimentos das dúvidas e solução de problemas com o Linux e Matlab.

Ao Msc. Frederico Rudorff, pela calibração em laboratório da placa de espectralon®.

Ao Msc. Marcos Adami, pela ajuda com as análises estatísticas.

Aos alunos e professores do curso "*Evaluation of satellite ocean-colour algorithms and products In coastal regions of Central and South America*", promovido pela NF/POGO (*Nippon Foundation – Partnership for Observation of the Global Oceans*) em parceria com o INPE, pelo conhecimento compartilhado, especialmente ao Dr. Sergio Cerdeira, pelo auxílio com o Seadas, esclarecimento de dúvidas, além de sua amizade.

À Dra. Evlyn M. Novo, pelo esclarecimento de dúvidas essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os colegas que passaram pelo laboratório PROFITO/IOUSP no decorrer destes quatro anos: André, Andres, Adriana, Breno, Bruna, Bárbara, Fernanda, Juan e Rebeca, pela alegre convivência e troca de experiências.

Às grandes amigas Cíntia e Thaís, pelo apoio durante toda a fase de desenvolvimento deste trabalho e amizade.

Ao amigo e vizinho Juliano, pelas conversas descontraídas e trocas de idéias e experiências.

À grande amiga Flávia, por tudo que pude aprender com ela, tanto no campo científico como pessoal.

Aos amigos dos tempos de INPE, que estão sempre de alguma forma por perto, auxiliando com sugestões, esclarecimento de dúvidas, incentivo e amizade: André, Camila, Enner, Fabrício, Letícia, Marcos, Renata e Thiago.

Às amigas da vida toda, Analucia e Juliana, pelo companheirismo e incentivo em todos os aspectos.

Ao meu grande amor, Claudio, por ter tornado minha vida tão mais bonita e conseqüentemente essa fase final da tese mais suave.

À minha família, pela confiança e total apoio sempre.

Resumo

Um algoritmo empírico regional para estimativa de clorofila-a na plataforma continental adjacente à Baixada Santista foi desenvolvido a partir de dados radiométricos e de concentração de clorofila-a, obtidos em 49 estações oceanográficas durante dois cruzeiros, em outubro de 2005 e março de 2006. Foram selecionadas aleatoriamente 32 estações para o desenvolvimento do algoritmo e 17 para avaliação do desempenho de modo a representar todos os intervalos de concentração de Cl-a nos dois subconjuntos de dados. O desempenho do algoritmo obtido foi superior (r^2 = 0,8424 e EMQ= 0,0418) ao dos algoritmos globais dos sensores SeaWIFS, OC2v4 (r^2=0,77; EMQ=0,07), OC4v4 (r^2=0,78;EMQ=0,07) e MODIS, OC3 (r^2=0,79;EMQ=0,09) para os dados radiométricos, e também superior (r^2=0,68; EMQ = 0,028) ao algoritmo global OC3 (r^2= 0,62; EMQ= 0,036) para os dados de refletância do sensor MODIS, e apresentou melhor desempenho quanto à influência dos demais componentes bio-ópticos da água nos desvios das estimativas. Com base em dados de dois outros cruzeiros (setembro de 2005 e março de 2006), foi feita uma caracterização oceanográfica da plataforma adjacente à Baixada Santista, que mostrou que a região apresenta acentuada variabilidade sazonal e pode ser caracterizada como oligotrófica em termos de disponibilidade de nutrientes e biomassa fitoplanctônica.

Palavras-chave: cor do oceano, plataforma continental, Baixada Santista, radiometria, Clorofila-a, algoritmo empírico regional, MODIS, SeaWIFS.

Abstract

A regional empirical algorithm for chlorophyll-*a* estimative in the continental shelf adjacent to Baixada Santista was developed based on in situ data on spectral radiometric and chlorophyll-a concentration obtained in 49 oceanographic stations during two oceanographic cruisers, in October 2005 and March 2006. Data from 32 stations were randomly selected for algorithm development and the other 17 for algorithm evaluation, representing all intervals of chlorophyll-a concentration in the two data subset. The performance of the regional algorithm was superior (r^2 = 0,8424; RMS = 0,0418) to the global algorithms of the SeaWiFS, OC2v4 (r^2=0,77; RMS=0,07), OC4v4 (r^2=0,78;RMS=0,07) and MODIS, OC3 (r^2=0,79; RMS=0,09) for the radiometric data, and also superior (r^2=0,68; RMS = 0,028) to the global algorithm OC3 (r^2= 0,62; RMS= 0,036) for reflectance data acquired by MODIS sensor. Also, the regional algorithm presented better performance, while estimative errors, related to the influence of other bio-optical components of seawater. Based on the data of two other cruisers (September 2005 and March 2006), the oceanographic characterization of the continental shelf adjacent to Baixada Santista was made, revealing the region presents accentuate seasonal variability and can be characterized as oligotrophic in terms of nutrient availability and phytoplankton biomass.

Key-words: ocean color, continental shelf, Baixada Santista, radiometry, Chlorophyll-a, regional empirical algorithm, MODIS, SeaWIFS.

Sumário

Agradecimentos..... i
Resumo..... iii
Abstract..... iv
Sumário..... v
Lista de Tabelas..... vii
Lista de Figuras..... ix
Lista de Siglas e Abreviaturas.....xvi
Lista de Símbolos..... xviii
1. Introdução.....1
1.1. Justificativa.....2
1.2. Objetivos.....3
1.2.1. Objetivo geral.....3
1.2.2. Objetivos Específicos.....3
2. Fundamentação teórica 5
2.1. Oceanografia da plataforma continental sudeste 5
2.2. Produtividade primária fitoplanctônica 12
2.3. O material em suspensão e dissolvido nos ambientes costeiros.....14
2.4. Sensoriamento remoto da cor do oceano.....16
3. Material e métodos 24
3.1. Área de estudo 24
3.2. Coleta de dados in situ – Desenhos amostrais.....27
3.3. Análise dos dados coletados in situ 28
3.4. Radiometria 31
3.4.1. Coleta de dados radiométricos in situ.....31
3.4.2. Cálculo dos espectros de refletância da superfície da água.....32
3.4.3. Simulação de bandas espectrais dos sensores 33
3.4.4. Comparação dos dados obtidos in situ com os dados globais 33
3.4.5. Estimativa de concentração de clorofila-a através de algoritmos globais: OC3 (MODIS), OC2v4 e Oc4v4 (SeaWiFS) 33
3.4.6. Desenvolvimento de um algoritmo empírico regional para estimativa de clorofila-a na plataforma continental de Santos 35
3.5. Imagens MODIS.....36

3.5.1. Aquisição e processamento das imagens MODIS 36
3.5.2. Processamento das imagens: nível 1 (L1) para nível 2 (L2) 37
3.5.3. Extração das informações 39
3.5.4 Análise dos algoritmos regionais aplicados às imagens MODIS 40
3.5.5. Aquisição de imagens de TSM - MODIS 40
4. Resultados 41
4.1. Oceanografia Regional 41
4.1.1. Primavera - Etapa de Hidrografia – Setembro de 2005 41
4.1.2. Primavera - Etapa de Radiometria – Outubro de 2005 45
4.1.3. Verão – Etapa de Hidrografia – Março de 2006 48
4.1.4. Verão – Etapa de Radiometria – Março de 2006 52
4.1.4.1. Abundância fitoplanctônica 55
4.2. Radiometria 56
4.2.1. Análise dos espectros de refletância da água 56
4.2.2. Estimativa da clorofila-a através de algoritmos globais: OC3, OC2v4, OC4v4 57
4.2.3. Algoritmo Regional para estimativa de clorofila-a 59
4.3. Imagens MODIS 61
4.3.1. Aquisição das imagens MODIS 61
4.3.2. Processamento das imagens: L1 para L2 61
4.3.2.1. Correção atmosférica 61
4.3.2.2. Produtos Nível 2 62
4.3.3. Análise dos algoritmos regionais aplicados às imagens MODIS 63
5. Discussão 65
6. Conclusões e considerações finais 85
Referências bibliográficas 88
Anexo 1 – Tabelas 98
Anexo 2 – Figuras 109

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Intervalos de comprimentos de onda das bandas dos sensores MODIS e SeaWiFS. Fonte: NASA (2009c); NASA (2009b)..... 99

Tabela 4.1.1 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de hidrografia, de 20 a 25 de setembro de 2005..... 99

Tabela 4.1.2 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de radiometria de 12 a 15 de outubro de 2005 (superfície)..... 100

Tabela 4.1.3 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de hidrografia, de 12 a 17 de março de 2006..... 101

Tabela 4.1.4 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas, para a superfície, analisadas durante o cruzeiro de radiometria, de 23 a 26 de março de 2006 (superfície)..... 102

Tabela 4.1.5 – Abundância dos grupos fitoplanctônicos observada durante o cruzeiro de radiometria, de 23 a 26 de março de 2006..... 103

Tabela 4.2.1– Comparação entre as refletâncias medidas pelo sensor MODIS e pelo espectroradiômetro in situ após a correção (os valores de refletância em 869 nm são iguais a zero porque esta banda foi utilizada na correção das demais, através da subtração)..... 104

Tabela 4.2.2 – Descrição estatística da clorofila-a obtida in situ e pelos algoritmos globais, OC3, OC2v4 e OC4v4 (logaritmicamente transformados)..... 104

Tabela 4.2.3 – Coeficiente de correlação e determinação, p-value, soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) dos algoritmos globais OC3, OC2v4 e OC4v4, para todo o conjunto de dados e para cada etapa de coleta, em relação à clorofila-a medida in situ (log).....104

Tabela 4.2.4 – Parâmetros estatísticos da concentração de clorofila-a (Cla), carotenóides (Carot), MST, MSO, MSI e MODC, para os cruzeiros de radiometria, de 12 a 15 de outubro de 2005 e de 23 a 26 de março de 2006 na plataforma continental de Santos.....105

Tabela 4.2.5– Parâmetros da regressão linear entre as razões de bandas (log) e a concentração de clorofila-a in situ (log): número de amostras (n), coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R2) e a equação linear obtida por cada regressão.....105

Tabela 4.2.6 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre o logaritmo da razão de bandas 531/551 (R) e o logaritmo da clorofila-a in situ, para o ajuste linear e polinomiais de segunda, terceira e quarta ordem.....105

Tabela 4.2.7 – Coeficientes de correlação (R) e determinação (R2), soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) de cada algoritmo (regionais lineares e polinomiais, e OC3) em relação à clorofila-a medida in situ (log).....106

Tabela 4.3.1 – Soma do Quadrado dos Erros (SQE) e Erro Médio Quadrático (EMQ) entre o coeficiente de atenuação da água (Kd) obtido in situ, e coeficiente de atenuação difusa da água em 488 nm (K490) obtido no processamento das imagens MODIS, utilizando a correção atmosférica padrão do Seadas (IVP) e a correção MUMM.....106

Tabela 4.3.2 – Matriz de correlação (r) entre as variáveis bio-ópticas obtidas in situ e as obtidas pelo satélite MODIS.....106

Tabela 4.3.3. - Coeficiente de correlação e determinação, soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) de cada algoritmo, regionais lineares e polinomiais e OC3 (log) aplicados às refletâncias obtidas pelo sensor MODIS, em relação à clorofila-a medida in situ (log).....106

Tabela 4.3.4 – Parâmetros estatísticos descritivos dos componentes bio-ópticos da água para o conjunto de dados de 26 estações obtidas "simultâneas" à passagem do sensor MODIS.....107

Tabela 5.1 - Valores médios, mínimos e máximos das variáveis biológicas e químicas obtidas por Aidar et al. (1993) para a região da plataforma de Ubatuba (*), por Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003) para a região da plataforma em São Sebastião (**) e pelo presente trabalho, na região de Santos (***).....108

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Composição colorida, cor natural (321) ETM+/Landsat 7 de 25 de maio de 2003, mostrando a plataforma continental entre Peruíbe e São Sebastião.....110

Figura 3.2 – Rede de estações oceanográficas amostradas durante as etapas hidrografia, realizadas entre 19 a 26 de setembro de 2005 (a) entre 12 a 17 de março de 2006 (b).....111

Figura 3.3 – Rede de estações oceanográficas amostradas durante os cruzeiros de 12 a 15 de outubro de 2005 e de 23 a 26 de março de 2006.....112

Figura 3.4 – Geometria da coleta dos dados radiométricos.....112

Figura 4.1.1 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005. A linha mais espessa na figura b indica a isoterma de 18 °C, limite superior da ACAS.....113

Figura 4.1.2 – Distribuição horizontal da salinidade na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....113

Figura 4.1.3 - Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 1 (extremo norte da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....114

Figura 4.1.4 - Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 5 (região central da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....115

Figura 4.1.5 - Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 9 (extremo sul da área de estudo) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....116

Figura 4.1.6 – Diagrama T-S: temperatura (°C) versus salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD na plataforma de Santos de 20 a 25 de setembro de 2005.....117

Figura 4.1.7 – Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede hidrográfica realizada de 20 a 25 de setembro de 2005. Os vetores indicam a origem do vento.....117

Figura 4.1.8 - Distribuição da Temperatura da Superfície do Mar (°C). Valor médio de oito dias (nível 3) para Setembro de 2005, obtida pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a partir de dados fornecidos pela NASA (2008). (a) 22 a 29 de setembro de 2005; (b) 14 a 21 de setembro de 2005; (c) 6 a 13 de setembro de 2005.....118

Figura 4.1.9 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d), N-nitrato (µM), e; (e e f) e N-nitrogênio inorgânico total (NIT, em µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....119

Figura 4.1.10 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-fosfato (µM); (c e d) silicato (µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....120

Figura 4.1.11 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) MST (mg l^{-1}); (c e d) MSO (mg l^{-1}), e; (e e f) MSI (mg l^{-1}), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....121

Figura 4.1.12 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....122

Figura 4.1.13 – Distribuição horizontal da profundidade da zona eufótica (Zeu) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....122

Figura 4.1.14 – Distribuição horizontal das concentrações de clorofila-a (mg m^{-3}) (a e b), e carotenóides (mg m^{-3}) (c e d), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....123

Figura 4.1.15 – Distribuição horizontal da razão 480:665, na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.....124

Figura 4.1.16 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) (a) e salinidade (b) na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 124

Figura 4.1.17 – Diagrama T-S, temperatura (°C) versus salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD de 12 a 15 de outubro de 2005. A massa de água indicada está de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira).....125

Figura 4.1.18 – Distribuição vertical da temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) na radial D (estações 17 a 23) da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 125

Figura 4.1.19 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede de radiometria realizada de 12 a 15 de outubro de 2005. Os vetores indicam a origem do vento. 126

Figura 4.1.20 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a) N-amônia (µM); (b) N-nitrito (µM), e; (c) e N-nitrato (µM), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 127

Figura 4.1.21 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a) P-Fosfato (µM), e; (b) Silicato (µM), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 128

Figura 4.1.22 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a) MST (mg l^{-1}); (b) MSO (mg l^{-1}), e; (c) MSI (mg l^{-1}), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 129

Figura 4.1.23 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 130

Figura 4.1.24 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a) Clorofila-a (mg m^{-3}), e; (b) Carotenóides (mg m^{-3}), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005. 130

Figura 4.1.25 - Distribuição horizontal da razão 480/665, na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005..... 131

Figura 4.1.26 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. A linha mais espessa na figura b indica a isoterma de 18 °C, limite superior da ACAS..... 131

Figura 4.1.27 – Distribuição horizontal da salinidade na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 132

Figura 4.1.28 - Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 1 (extremo norte da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 133

Figura 4.1.29 – Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 5 (região central) da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 134

Figura 4.1.30 - Perfis batimétricos de temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) da radial 9 (extremo sul da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005..... 135

Figura 4.1.31 – Diagrama T-S: temperatura (°C) versus salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD na plataforma de Santos de 12 a 17 de março de 2006. As massas de água indicadas estão de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira); AT (Água Tropical) e ACAS (Água Central do Atlântico Sul)..... 136

Figura 4.1.32 - Distribuição da TSM (°C). Valor médio de oito dias (nível 3) para Março de 2006, obtida pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a partir de dados fornecidos pela NASA (2008). (a) e (b) 14 a 21 de março de 2006; (c) e (d) 06 a 13 de março de 2006; (e) e (f) 26 de fevereiro a 05 de março de 2006. 137

Figura 4.1.33 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede hidrográfica realizada de 12 a 17 de março de 2006. Os vetores indicam a origem do vento. 137

Figura 4.1.34 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d), N-nitrato (µM), e; (e e f) e N-nitrogênio inorgânico total (NIT, em µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 138

Figura 4.1.35 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-fosfato (µM); (c e d) silicato (µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 139

Figura 4.1.36 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) MST (mg l^{-1}); (c e d) MSO (mg l^{-1}), e; (e e f) MSI (mg l^{-1}), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006..... 140

Figura 4.1.37 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 141

Figura 4.1.38 - Distribuição horizontal da profundidade da zona eufótica (Zeu) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. As estações em que a ACAS atingiu a zona eufótica estão destacadas com um círculo vermelho. 141

Figura 4.1.39 – Distribuição horizontal das concentrações de clorofila-a (mg m^{-3}) (a e b), e carotenóides (mg m^{-3}) (c e d), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 142

Figura 4.1.40 – Distribuição horizontal da razão 480:665, na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. 143

Figura 4.1.41 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) (a) e salinidade (b) na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 143

Figura 4.1.42 – Distribuição vertical da temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) na radial D (estações 17 a 23) da rede de radiometria realizada no dia 24 de março de 2006. 144

Figura 4.1.43 – Perfil vertical de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da estação 17, a mais externa da radial D, da rede de radiometria, realizada no dia 24 de março de 2006. 144

Figura 4.1.44 – Diagrama T-S, temperatura (°C) versus salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD de 23 a 26 de março de 2006. As massas de água indicadas estão de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira) e ACAS (Água Central do Atlântico Sul). 145

Figura 4.1.45 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede de radiometria realizada de 23 a 26 de março de 2006. Os vetores indicam a origem do vento. 145

Figura 4.1.46 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d) N-nitrito (µM), e; (e e f) e N-nitrato (µM), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 146

Figura 4.1.47 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-Fosfato (µM), e; (c e d) Silicato (µM), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 147

Figura 4.1.48 - Distribuição horizontal das concentrações de MST (mg l^{-1}), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 148

Figura 4.1.49 - Distribuição horizontal das concentrações de (a) MSO (mg l^{-1}) e (b) MSI (mg l^{-1}) na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 148

Figura 4.1.50 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 149

Figura 4.1.51 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) Clorofila-a (mg m^{-3}), e; (c e d) Carotenóides (mg m^{-3}), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 150

Figura 4.1.52 - Distribuição horizontal da razão 480/665, na superfície (a) e na profundidade de máxima fluorescência (b), nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006. 151

Figura 4.1.53 – Floração de Trichodesmium erythraeum ocorrida na etapa de 23 a 26 de março de 2006. Foto: Poliana Carvalho em 24/03/2006. 151

Figuras 4.2.1 – Espectros de refletância obtidos pelo sensor MODIS (Rsr MODIS) e medidos in situ, sem correção (sem correção); com correção da refletância de Fresnel (Fresnel 0.022); com correção da refletância de Fresnel e subtração da refletância em 869 nm (Fresnel (0.022- Rsr 869): (a) estação 16, (b) estação 17 e (c) estação 18, coletadas em março/2006. 152

Figura 4.2.2 – Espectros de refletância coletados em outubro/2005, agrupados por dia de coleta: a) Estações 1 a 8, coletados em 12 de outubro/2005; b) Estações 16 a 20, coletados em 13 de outubro/2005; c) Estações 26 a 31, coletados em 14 de outubro/2005, e; d) Estações 33 a 40, coletados em 15 de outubro/2005. 153

Figura 4.2.3 – Espectros de refletância coletados em março/2006, agrupados por dia de coleta: a) Estações 1 a 8, coletados em 23 de março de 2006; b) Estações 15 a 18, coletados em 24 de março de 2006; c) Estações 24 a 31, coletados em 25 de março de 2006, e; d) Estações 40 e 41, coletados em 26 de março de 2006. 154

Figura 4.2.4 – Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a (log) e a razão Rsr531/551 (log) global, obtidas na base de dados do NOMAD, e entre as concentrações de clorofila-a (log) e a razão Rsr531/551 (log) medidas in situ durante os cruzeiros de outubro de 2005 e março de 2006 de radiometria, na plataforma continental de Santos. 154

Figura 4.2.5 – Histograma de frequência de observação (%) da concentração de clorofila-a obtida in situ e pelos algoritmos globais, OC3, OC2v4 e OC4v4. 155

Figura 4.2.6 – Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida in situ e a clorofila-a estimada pelos algoritmos OC3 (a), OC2v4 (b) e OC4v4 (c), e suas respectivas barras de erros (Cla estimada – Cla observada). 156

Figura 4.2.7– Diagramas de dispersão entre as concentrações de clorofila-a estimada pelos algoritmos OC3, OC2v4 e OC4v4 (log) versus a concentração de clorofila-a medida in situ (log), para: (a) todo o conjunto de dados (n = 49); (b) outubro/2005, (n = 27), e; (c) março/2006 (n = 22). 157

Figura 4.2.8– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão Carotenóides/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c). 158

Figura 4.2.9– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MST/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2 005 (b) e para março/2006 (c). 159

Figura 4.2.10– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MSO/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c). 160

Figura 4.2.11– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MSI/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c). 161

Figura 4.2.12– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MODC/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c). 162

Figura 4.2.13– Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida in situ (log) e as razões de bandas (log), ajustadas linearmente: (a) 412/551; (b) 443/551; (c) 488/551; (d) 531/551, e; (e) R443/551 > 488/551. 163

Figura 4.2.14– Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida in situ (log) e a razão de bandas Rsr531/Rsr551 (log), ajustadas linearmente, para (a) outubro/2005 e (b) março/2006. 164

Figura 4.2.14- Diagrama de dispersão entre a clorofila-a obtida in situ (log) e a razão entre as bandas 531 e 551 (log) ajustados por um polinômio de segunda (a), terceira (b) e quarta (c) ordem, com suas respectivas equações e coeficientes de determinação. .. 164

Figura 4.2.16– Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a obtida in situ (log) e a estimada pelos algoritmos regionais, linear (a), polinomial de segunda (b), terceira (c) e quarta ordem (d), e os globais OC3 (e), OC4v4 (f) e OC2v4 (g), a partir dos dados radiométricos. 165

Figura 4.2.17– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa dos algoritmos OC3 e o regional polinomial de quarta ordem, respectivamente: (a) e (b) clorofila-a; (c) e (d) razão carotenóides/Clorofila-a, e; (e) e (f) razão MODC/Clorofila-a. 166

Figura 4.2.18– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa dos algoritmos OC3 e o regional polinomial de quarta ordem, respectivamente: (a) e (b) razão MST/ Clorofila-a; (c) e (d) razão MSI/ Clorofila-a, e; (e) e (f) razão MSO/Clorofila-a, para o conjunto de dados com 17 estações. 167

Figura 4.3.1 – Radiância ascendente da água nas bandas centradas em 488, 531 e 551 nm (a, b e c, respectivamente), de 17 de março de 2006, para a região da plataforma continental em frente à Santos. 168

Figura 4.3.2 – Diagrama de dispersão entre o coeficiente de atenuação da água (Kd) medido in situ e estimado pelo sensor MODIS (K488). 168

Figura 4.3.3 – Imagens de refletância das bandas centradas em 412, 488, 531 e 551 nm, referente ao dia 17 de março de 2006, obtidas através do modelo de aerossóis com as bandas do IVP (a, c, e, e g, respectivamente) e utilizando o modelo MUMM (b, d, f e h, respectivamente). 169

Figura 4.3.4 – Detalhe do mapa de clorofila-a (mg m^{-3}) produzido utilizando a correção padrão do Seadas (a), onde se observa pixels com valor nulo de concentração de clorofila-a, e utilizando a correção atmosférica pelo método MUMM (b), com menor número de pixels nulos. 170

Figura 4.3.5 – Curvas de refletância das obtidas pelo sensor MODIS para as estações de coleta in situ dentro de uma janela temporal de 24 horas em relação ao horário de aquisição da imagem. 171

Figura 4.3.6. - Exemplos dos produtos nível 2 obtidos para a imagem de 17 de março de 2006: (a) Clorofila-a (mg m^{-3}) – OC3; (b) Coeficiente de atenuação difusa da água - K488 (m^{-1}); (c) Material em suspensão total (mg l^{-1}) – Clark. 172

Figura 4.3.7 – Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a obtida in situ (log) e a estimada pelos algoritmos regionais: linear (a), polinomial de segunda (b), terceira (c) e quarta ordem (d); e pelo algoritmo OC3 (e), a partir dos dados de refletância do sensor MODIS. 173

Figura 4.3.8 – Histograma de freqüência de observação (%) da concentração de clorofila-a obtida in situ e pelos algoritmos regionais, linear, polinomial de segunda, terceira e quarta ordem, e pelo algoritmo OC3, a partir de dados de refletância do sensor MODIS (n = 26). 174

Figura 4.3.9 – Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-*a* obtida in situ (log) e as razões de bandas (log) do sensor MODIS (n = 26), ajustadas linearmente: (a) 488/551; (b) 531/551. 174

Figura 4.3.10 – Concentração de clorofila-a estimada pelo (a) algoritmo regional polinomial de quarta ordem e pelo (b) algoritmo global OC3, para a imagem MODIS do dia 17 de março de 2006. 175

Lista de Siglas e Abreviaturas

AC	Água Costeira
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
ACS	Água Circumpolar Superior
AIA	Água Intermediária Antártica
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
AT	Água Tropical
Cal-P6	Algoritmo regional empírico para estimativa de cl-*a* na região da corrente da Califórnia
CARDER	Algoritmo semin-analítico para estimativa de clorofila-a, desenvolvido por Carder *et al.* (1999)
CB	Corrente do Brasil
CG	Corrente do Golfo
Cl-*a*	Clorofila-a
CSE	Corrente Sul Equatorial
CTD	*Condutivity Temperature Density*
CZCS	*Coastal Zone Color Scanner*
DAAC/GSFC	*Distributed Active Archive Center/Goddard Space Flight Center*
DiPeCO	Laboratório de Dinâmica Pelagial Costeira
ECOSAN	Projeto desenvolvido pelo IOUSP: A influência do complexo estuarino da Baixada Santista sobre o ecossistema da plataforma adjacente
EMQ	Erro médio quadrado
FHS	Frente Halina Superficial
FOV	*Field of View*
FR	Fator de refletância
FTP	Frente Térmica Profunda
FURG	Fundação Universidade Federal do Rio Grande
GSM01	*Garver-Siegel-Maritorena model version 1*
HPLC	*High Performance Liquid Cromatography*
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOCCG	*International Ocean-Colour Coordinating Group*
IOUSP	Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
IVP	Infra-vermelho próximo
K488	Coeficiente de atenuação difusa da água em 488 nm

MODC	Matéria Orgânica Dissolvida Colorida
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MPS	Material Particulado em Suspensão
MSI	Material em Suspensão Inorgânico
MSO	Material em SuspensãoOrgânico
MST	Material em Suspensão Total
MUMM	*The Management Unit of the North Sea Mathematical Models and the Scheldt estuary*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
OC2-LP	*Ocean Color 2 Algorithm* (modificado regionalmente)
OC2v2	*Ocean Color 2 Algorithm, Version 2*
OC3	*Ocean Color 3 Algorithm*
OC4v4	*Ocean Color 4 Algorithm, Version 4*
OCTS	*Ocean Color Temperature Sensor*
PCE	Plataforma Continental Externa
PCI	Plataforma Continental Interna
PCM	Plataforma Continental Média
PROFITO	Laboratório de Produção Primária e Ecologia do Fitoplâncton
Seadas	*SeaWiFS Data Analysis System*
SeaWiFS	*Sea Wide Field of View*
SQE	Soma do quadrado dos erros
SWIR	*Short-wave Infrared*
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

Lista de Símbolos

C_a - concentração de clorofila-a

k - fator de refletância da placa de referência

Kd - Coeficiente de atenuação difusa da água

L - Radiância

L_c - Radiância ascendente do céu

L_l - Radiância ascendente da placa de referência de laboratório

L_p - Radiância ascendente da placa de referência de campo

L_t - Radiância ascendente total (da água mais a especular do céu)

L_w - Radiância ascendente da água

n - número amostral

P - peso do filtro

R - Razão de bandas de refletância

$R_{s,t,p}$ - Razão de condutividade

R_{sr} - Refletância de Sensoriamento Remoto

V - volume filtrado

α - razão entre as refletâncias das bandas do IVP

λ - comprimento de onda

ρ - refletância na interface ar-água

ρ_w - refletância da água

Σ - somatório

1. Introdução

Nas últimas décadas, dados de cor do oceano tanto obtidos *in situ* como remotamente têm sido utilizados para estudos de ambientes oceânicos. Dentre as variáveis estimadas através da refletância espectral da água do mar, a concentração de pigmentos fotossintéticos, principalmente a clorofila-*a*, apresenta grande aplicação científica, já que permite estudar a distribuição da biomassa fitoplanctônica no tempo e no espaço e viabiliza modelos de estimativa da produção primária marinha (Behrenfeld & Falkowski, 1997; Platt & Sathyendranath, 1993). A obtenção dessas estimativas se dá pela elaboração de algoritmos, que podem ser semi-analíticos, isto é, derivados de formulações matemáticas teóricas com alguns ajustes estatísticos, ou algoritmos empíricos, obtidos a partir de relações estatísticas entre medidas ópticas e a concentração dos constituintes medidas *in situ* (IOCCG, 2000).

Tais informações quantitativas são particularmente úteis não apenas para biólogos marinhos ou exploração pesqueira, mas também em estudos relacionados às mudanças climáticas, uma vez que o fitoplâncton é um importante elemento no ciclo do carbono planetário (Darecki *et al*., 2005). Melhoras na acurácia dos modernos satélites sensores para dados de cor do oceano fornece uma oportunidade para estimar parâmetros da sub-superfície com melhor acurácia. Para alcançar tais objetivos, é necessário também um aperfeiçoamento dos algoritmos bio-ópticos (Darecki *et al*., 2005).

Os processos físicos nos oceanos tais como a intrusão sazonal de massas de água, plumas estuarinas, fenômenos de ressurgência e subsidência, turbulência, exercem influência sobre os processos químicos e biológicos. Todos estes fenômenos atuam no transporte e acúmulo/dispersão de material dissolvido e particulado, e na injeção de nutrientes na zona eufótica. Assim, o conhecimento dos processos oceanográficos e da variabilidade espacial e sazonal das condições oceanográficas é imprescindível para a interpretação dos dados de cor do oceano e desenvolvimento de algoritmos para a estimativa de clorofila-*a*.

Neste trabalho, foi feita uma caracterização oceanográfica da região da plataforma ao largo de Santos quanto à variabilidade sazonal e espacial das propriedades físicas, concentração de nutrientes, pigmentos fitoplanctônicos, material em suspensão na água e matéria orgânica dissolvida. Estas informações, além de

contribuírem para o entendimento dos processos oceanográficos na região, foram utilizadas como suporte para o desenvolvimento de um algoritmo regional empírico para a estimativa de clorofila-*a* adequado a esta região. Foram avaliados também o desempenho de três algoritmos globais empíricos existentes (OC3, OC2v4 e o OC4v4), para estimativas de clorofila-*a*, e finalmente proposto um algoritmo regional empírico específico para a região, a partir dos dados obtidos *in situ*. Com a finalidade de avaliar não apenas quantitativamente o desempenho de cada um, os desvios das estimativas foram avaliados em função da importância relativa dos demais componentes bio-ópticos presentes na água, como a matéria orgânica dissolvida colorida (MODC) o material em suspensão total (MST) e suas frações orgânica e inorgânica, além da razão entre pigmentos fotossintéticos.

O presente estudo foi realizado no âmbito do projeto "ECOSAN - *A influência do complexo estuarino da Baixada Santista sobre o ecossistema da plataforma adjacente*", desenvolvido por uma equipe multidisciplinar do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), junto ao subprojeto "Influência dos estuários sobre o fluxo de energia e ciclagem de materiais nos primeiros níveis da cadeia trófica da plataforma de Santos", coordenado pela Prof.ª Dra. Sônia M. F. Gianesella.

1.1. Justificativa

A região da plataforma continental ao largo de Santos, apesar de sua grande importância socioeconômica e de ser intensamente explorada pelas atividades humanas, tem sido pouco estudada quanto ao funcionamento do seu ecossistema, sendo escassas as informações referentes às suas características físicas, químicas e biológicas, e os processos oceanográficos que nela ocorrem. Assim, o presente trabalho pretende contribuir para a geração dessas informações e para a compreensão do funcionamento deste ecossistema.

A biomassa fitoplanctônica está diretamente relacionada à produção primária do fitoplâncton e sua distribuição ao longo da plataforma é de extrema importância, uma vez que os organismos fitoplanctônicos são os principais produtores primários marinhos e base da cadeia trófica marinha. A biomassa fitoplanctônica pode ser estimada com grande confiabilidade através da determinação da clorofila-*a*, a partir de dados coletados *in situ* e análises espectofotométricas, fluorimétricas e mais recentemente por cromatografia.

A existência de algoritmos eficientes para estimativas de clorofila-*a* a partir de dados de cor do oceano, sejam eles obtidos *in situ* ou por sensores à bordo de satélites, torna o monitoramento das regiões costeiras mais eficiente, uma vez que levantamentos a partir de amostras discretas *in situ* são em geral custosos e lentos, e tornam-se dispensáveis, desde que esses algoritmos sejam acuradamente calibrados.

Os algoritmos globais disponíveis para estimativas de clorofila-*a* são construídos para águas de Caso 1, onde a variável óptica predominante é a concentração de clorofila-*a*, sendo menos eficientes em águas opticamente mais complexas (Caso 2), como as regiões costeiras, onde a influência desses componentes na refletância pode ser muito significativa, e essas águas são classificadas como Caso 2.

As águas da plataforma continental de Santos, objeto desse trabalho, podem ser classificadas como águas Caso 2, de composição e propriedades ópticas bastante complexas e dinâmicas. A variabilidade sazonal e espacial dos componentes em suspensão e dissolvidos na água devem ser conhecidos, para uma melhor interpretação dos resultados dos algoritmos e espectros de refletância da superfície da água.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Propor um algoritmo empírico regional para a estimativa da concentração da clorofila-*a* na plataforma continental ao largo de Santos, a partir de dados de refletância obtidos *in situ* ou pelo sensor MODIS.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a variabilidade espacial e sazonal das variáveis físicas, químicas e biológicas da plataforma continental ao largo de Santos;
- Identificar os processos físicos que influenciam a concentração e a distribuição dessas variáveis;
- Analisar o desempenho do algoritmo regional proposto para estimativa da concentração de clorofila-*a* a partir de dados radiométricos obtidos *in situ* frente aos algoritmos globais OC2v4, OC4v4 (SeaWiFS) e OC3 (MODIS);

- Analisar o desempenho do algoritmo regional proposto para estimativa da concentração de clorofila-*a* a partir de dados de refletância do sensor MODIS frente ao algoritmo global OC3 (MODIS);
- Avaliar os produtos do sensor MODIS comparáveis às variáveis bio-ópticas obtidas *in situ* (concentração de clorofila-*a*, material em suspensão total e coeficiente de atenuação difusa da água);
- Avaliar a influência dos demais componentes bio-ópticos no desempenho do algoritmo regional proposto e dos algoritmos globais.

2. Fundamentação teórica

2.1. Oceanografia da plataforma continental sudeste

A região da plataforma continental ao largo de Santos está inserida na Plataforma Continental Sudeste (PCSE), região da plataforma continental atlântica que se estende, segundo Castro *et al*. (2006), ao longo da costa brasileira, desde Cabo Frio (RJ), até o Cabo de Santa Marta (SC). A parte mais larga da PCSE está localizada em frente a Santos, com 230 km de extensão, e as regiões mais estreitas próximas a Cabo Frio, com 50 km de extensão. A topografia da região central da PCSE é suave, com as isóbatas dispondo-se paralelamente à linha de costa e uma profundidade média de 70 m. A profundidade da quebra da plataforma continental varia de 120 m a 180 m.

Castro *et al*. (2006) sugerem uma divisão da PSCE em três regiões: interna, média e externa. A plataforma continental interna (PCI) estaria localizada entre a costa e a Frente Térmica Profunda (FTP). A PCI é mais estreita durante o verão, ficando entre 10 e 30 km (entre as isóbatas de 20 e 40 m), e mais larga durante o inverno, quando atinge 40 a 80 km (entre as isóbatas de 50 e 70 m). A PCI apresenta homogeneidade tridimensional das propriedades físicas durante todo ano. Assim, durante o verão, as temperaturas são maiores do que 21˚C, atingindo máximos de 27˚C-28˚C. As salinidades variam em geral entre 34,4 e 35,4 e as densidades convencionais situam-se entre 23,25 e 24,50 unidades de sigma-t. Durante o inverno, por outro lado, as temperaturas da PCI são em geral inferiores a 22˚C, atingindo mínimos de 19˚C. No inverno, as salinidades variam bastante, com máximos observados de 35,8 e mínimos de 33,4. Os valores de densidade variam com maior freqüência entre 23,75 e 25. Assim, durante o verão as águas da PCI são mais quentes, mais salinas e menos densas do que durante o inverno.

A plataforma continental média (PCM) localiza-se entre a FTP e a Frente Halina Superficial (FHS) e aparece de forma nítida no verão. Durante o verão a PCM estende-se desde 10-30 km da costa até distâncias de aproximadamente 60-80 km, entre as isóbatas de 20-40 m e as isóbatas de 70-90 m. No inverno, a PCM ocupa, geralmente, uma faixa delgada, quase inexistente, compreendida entre 40-60 km e 60-80 km de distância da costa. A característica física básica da PCM é a alta estratificação durante o verão, devido à presença da termoclina sazonal. As temperaturas em geral ficam

próximas a 22˚C-24˚C na superfície e 14˚C-15˚C no fundo, e as salinidades na superfície e no fundo situam-se entre 35-35,4 e 35,6-35,8, respectivamente.

A Plataforma Continental Externa (PCE) estende-se desde a FHS, ou seja, do limite externo da PCM até a quebra da plataforma continental. Em geral, o limite interno da PCE fica situado a 60-80 km da costa, entre as isóbatas de 70 e 90 m. A PCE também apresenta estratificação vertical acentuada, embora a termoclina seja um pouco mais difusa do que na PCM durante o verão, e apresenta pequena variação sazonal das propriedades físicas. A temperatura e a salinidade superficial ficam próximas de 24˚C

Forçantes dos movimentos

As correntes sobre a plataforma continental e as oscilações do nível do mar associadas a elas são manifestações da resposta das águas a diferentes forçantes. Em geral, as forçantes para estes movimentos podem ser classificadas em duas categorias: as que atuam diretamente na plataforma continental, como o vento e as variações espaciais e temporais de densidade, e as que são comunicadas desde o talude através da quebra da plataforma, como as marés, gradientes de pressão e trocas de massa. As escalas temporais e espaciais das forçantes, bem como da resposta das águas da plataforma continental apresentam grande variação. Os processos com escala temporal variando entre semidiurno (12 h) e sazonal (um ano) são determinantes nos mecanismos de transporte de água, organismos e substâncias dissolvidas ou em suspensão, naturais ou introduzidas pelo homem, na maior parte da plataforma continental. Na PCSE, onde está inserida a plataforma de Santos, os movimentos são forçados, em diferentes escalas de tempo, principalmente pelos ventos, pela ação da Corrente do Brasil e pelas marés (Castro *et al*., 2006).

Uma característica marcante das plataformas continentais é a resposta de suas águas a ventos superficiais com escala temporal sazonal e sinótica. Dependendo da combinação entre a largura e a topografia da plataforma continental, e a intensidade, a direção e a persistência da tensão de cisalhamento do vento, as correntes geradas na PCSE podem ser as mais energéticas. Essas correntes são, em geral, paralelas às isóbatas, para manter o balanço geostrófico na direção normal à topografia (Castro & Miranda, 1998). Castro & Miranda. (1998) utilizaram dados interpolados por Samuel & Cox (1987) a partir de dados de Hellerman & Rosenstein (1983) para descrever a climatologia da tensão de cisalhamento do vento na PCSE. A característica principal

observada por eles é a parte oeste do giro subtropical anticiclônico presente no Atlântico Sul em latitudes médias (alta subtropical). Em geral, este giro traz ventos provenientes de sudeste-nordeste para a costa situada entre 15°S e 25°S, e leva ventos provenientes de sudoeste-noroeste para o largo entre as latitudes de 35°S e 40°S. A posição e profundidade da alta subtropical do Atlântico Sul apresentam oscilações sazonais, afetando diretamente a intensidade e também a direção da tensão de cisalhamento do vento sobre a plataforma continental. Durante o verão, os ventos predominantes sobre a região situada entre 15 e 35°S sopram principalmente de leste-nordeste. Durante o inverno, a banda de ventos de leste-nordeste, associada à alta subtropical, fica confinada entre as latitudes de 20 e 25°S, sendo a plataforma continental localizada ao sul de 25°S forçada por ventos predominantes de oeste-sudoeste (Castro & Miranda, 1998).

Sistemas frontais (frentes frias) caracterizam-se como sendo a perturbação meteorológica em escala sinótica mais importante sobre a PCSE. Entre 20°S e 34°S, a ocorrência de sistemas frontais varia ao longo do ano entre três e seis por mês, resultando em escalas de tempo entre cinco e dez dias entre as passagens. A ocorrência mínima se dá em fevereiro, três por mês, e a máxima em outubro, cinco por mês, em média (Castro *et al*., 2006).

Corrente do Brasil

A Corrente do Brasil (CB) é a feição oceânica mais importante da borda oeste do oceano Atlântico Sul. Presente na parte mais externa da PCSE, a CB é a corrente de contorno oeste associada ao giro subtropical do Atlântico Sul (Silveira *et al*., 1994).

A CB origina-se ao sul de 10 °S, na região onde o ramo mais ao sul da corrente Sul Equatorial (CSE) se bifurca, formando também a Corrente Norte do Brasil (Stramma, 1991; Silveira *et al*., 1994) e flui para o sul, bordejando toda a costa brasileira até a região da Convergência Subtropical (33 - 38°S), onde conflui com a Corrente das Malvinas e se afasta da costa (Castro *et al*., 2006). A CB é descrita na literatura como uma corrente fraca relativamente à sua análoga no Atlântico Norte, a Corrente do Golfo (CG). Segundo Stommel (1965) apud Castro *et al*. (2006) esta diferença entre as duas correntes se deve à componente termohalina ter sentido oposto daquela gerada pelo vento no Atlântico Sul, enquanto na Corrente do Golfo estas duas componentes se somariam.

A região da CB é formada pelo empilhamento das massas de água características do Atlântico Sul. Nos três primeiros quilômetros da coluna de água encontram-se a Água Tropical (AT), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), a Água Intermediária Antártica (AIA), a Água Circumpolar Superior (ACS) e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (Silveira *et al*. 2000). Entretanto, as massas de água que compõem os três primeiros quilômetros de coluna d'água e seus padrões de escoamento no Atlântico Sul Subtropical levantam a discussão sobre o que considerar como extensão vertical da CB (Silveira *et al*., 2000; Castro *et al*., 2006).

A Corrente do Brasil é uma corrente rasa, quente e salina constituída basicamente por AT fluindo junto à quebra da plataforma. Na região em torno da latitude de 20°S, onde há maior contribuição da ACAS, a CB torna-se mais profunda e cresce em transporte. Em 28°S, no sul da Bacia de Santos, a espessura da ACAS se estende até 750 m e a corrente apresenta-se organizada até esta profundidade (Evans & Signorini, 1985; Campos *et al*., 1995). De acordo com o critério adotado pela maioria dos autores (introduzido primeiramente por Wüst em 1935), a CB é uma corrente de contorno oeste, requerida pelo transporte de Sverdrup para "fechar" a circulação gerada pelo vento no Giro Subtropical, assim, a CB está limitada apenas ao fluxo associado ao movimento da AT e ACAS (Silveira *et al*., 2000).

Campos *et al*. (1995) estimaram o transporte da CB dentro da Bacia de Santos, utilizando dados hidrográfico com alta resolução horizontal, em 7,5 Sv (8,8 Sv) relativamente ao nível de 750 db (900 db). A CB, dentro da Bacia de Santos se estende em média até 750 m, o limite estimado pelos autores entre ACAS e AIA. Segundo Silveira *et al*. (2000), a CB se torna mais profunda e com maior transporte à medida que se direciona para o sul.

As massas de água que ocupam a região da costa sudeste onde está inserida a região da plataforma ao largo de Santos foram inicialmente classificadas por Emílsson (1961) em quatro massas de água distintas: Água Tropical, Água Costeira, Água Subtropical e Água da Plataforma. Posteriormente, Miranda (1982) realizou uma análise detalhada das massas de água da região compreendida entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), sugerindo as seguintes massas definidas pelos correspondentes índices termohalinos:

Água Costeira (AC): T > 15° C; S < 35

Água Tropical (AT): T > 20°; S > 36,4.

Água Central do Atlântico Sul (ACAS): 10° < T < 20° C; 35 < S < 36,4

A ACAS corresponde à massa de água anteriormente denominada por Emílsson (1961) como Água Subtropical. A massa de água denominada por Emílsson como Água de Plataforma seria resultante da mistura vertical das três massas de água anteriores.

A região interna da plataforma é ocupada principalmente pela AC, que tende a ser verticalmente homogênea, por causa dos processos de mistura causados pelo *stress* do vento e movimento de maré. A AC é uma mistura do *run-off* do continente com a água salina da bacia, tendo baixas salinidades (S < 34), dependendo principalmente do efeito combinado de diversos estuários presentes ao longo da costa sudeste (Emílsson, 1961). Uma frente de fundo termal separa as águas mais internas das águas do meio da plataforma. A posição desta frente termal muda sazonalmente, sendo mais próxima à costa durante o verão (10-20 km) e mais distante, (40-50 km) durante o inverno (Castro & Miranda, 1998).

A ACAS é relativamente fria (temperatura inferior a 20 °C) e apresenta salinidade menor que 36,4 (Miranda, 1982). Segundo Matsuura (1986), de acordo com observações feitas em dez cruzeiros oceanográficos na plataforma continental sudeste brasileira, durante o período de janeiro de 1976 a janeiro de 1981, a ACAS penetra pela camada profunda sobre a plataforma continental, em direção ao continente. Sua penetração é mais acentuada no fim da primavera e no verão, e é menos intensa na época de outono e inverno. Devido à forte penetração dessa massa de água fria sob a água quente na superfície, forma-se uma termoclina marcante nas épocas de fim de primavera e verão. Durante o inverno, quando a massa da ACAS recua para a margem da plataforma continental, a distribuição vertical da temperatura da maior parte da plataforma continental torna-se homogênea. Segundo Matsuura (1986), este fenômeno pode contribuir para o transporte de sedimentos em suspensão que se encontram em regiões mais distantes e mais profundas para a plataforma, principalmente no fim da primavera e no verão, quando o fenômeno é mais intenso.

Castro Filho *et al.* (1987) analisaram as massas de água e suas variações sazonais na plataforma continental da região entre São Sebastião e Ubatuba em duas

épocas (verão de 1985-1986 e inverno de 1986) e mostraram que na região ocorrem os três tipos de massas de água (AC, AT e ACAS), podendo ocorrer mistura entre elas. As curvas T-S mostraram mistura da AC com AT na camada superficial, da AT com a ACAS na camada de fundo, e da AC com a ACAS nas estações mais costeiras. No inverno as misturas das massas de água se deram de maneira menos acentuada, não ocorrendo mistura entre a AC e ACAS, que se encontra recuada junto ao talude fora da região de quebra de plataforma. Entretanto, Saldanha-Corrêa & Gianesella (2004) verificaram que, em situações transientes, a ACAS pode avançar e recuar sobre a plataforma sem se misturar à AC. Neste estudo, Saldanha-Corrêa & Gianesella (2004) observaram em termos de estabilidade dinâmica, através do Número de Richardson (Ri), que a penetração da ACAS na primavera/97 aparece como um fenômeno dinamicamente estável, ou seja, uma movimentação de massa de água em direção à zona eufótica, sem turbulência, não promovendo misturas verticais. Durante este evento de ascensão da ACAS até a zona eufótica houve um aumento na biomassa fitoplanctônica desta massa. Estes resultados mostraram que, na ocasião, as forçantes vento, correntes e a penetração da ACAS não foram suficientemente intensas para promover misturas verticais.

Castro Filho *et al.* (1987) verificaram que a ACAS, que estava presente na camada de fundo das estações costeiras no verão, recuou para a plataforma externa no inverno, quando a intrusão superficial da AT da Corrente do Brasil sobre a plataforma continental é maior. Segundo os autores, este fenômeno ocorre em função dos ventos predominantes no período de março-agosto, provenientes de SW. Essa inversão da circulação normal à costa, juntamente com o resfriamento das águas superficiais durante o outono-inverno, aliada à intensificação dos processos de mistura vertical devido ao aumento da freqüência de ventos fortes, ocasiona a destruição da termoclina sazonal e torna as águas próximas à costa quasi-homogêneas. A soma desses processos permite a ocorrência de águas das camadas mais profundas mais frias durante o verão do que no inverno.

Os processos físicos sobre a plataforma continental exercem grande influência sobre os processos biológicos (Saldanha-Corrêa & Gianesella, 2004), propiciados pela tendência ao enriquecimento das águas da plataforma durante o verão, devido à penetração da ACAS até próximo à costa e sua mistura às águas superficiais. As autoras demonstraram, através de experimentos em microcosmos, o grande potencial

fertilizador de águas da ACAS coletada abaixo da zona eufótica, evidenciando que a concentração de clorofila encontrada no centro dos vórtices anticiclônicos é resultado do bombeamento da ACAS, rica em nutrientes, para a zona eufótica. Segundo as autoras, estes dois fenômenos, penetração da ACAS na região costeira e vórtice frontal, têm implicações diretas na produção primária. Supõe-se que estes vórtices frontais, que foram registrados desde Cabo Frio (RJ) até a região ao norte de Santos sejam originados pelo movimento de meandros da Corrente do Brasil, durante sua passagem ao longo da plataforma continental (Silveira *et al.*, 2000; Campos *et al.*, 1994; Matsuura, 1986). Aidar *et al.* (1993) já haviam associado a presença dos vórtices anticiclônicos frontais na região da plataforma continental entre São Sebastião e Ubatuba, ao aumento da biomassa fitoplanctônica na região interna dos mesmos.

Essa movimentação da frente oceânica paralelamente à costa, do fundo do mar à subsuperfície, influencia tanto a estrutura oceanográfica, quanto a distribuição sazonal de organismos e também a dinâmica do ecossistema da região (Pires-Vanin *et al.*, 1993).

A plataforma continental sudeste brasileira também sofre influência sazonal de águas mais frias e com baixa salinidade, provenientes do sul. Esta intrusão de águas mais frias e com baixas salinidades em direção ao norte durante o inverno tem sido descrita por diversos autores (Campos *et al*., 1996; Sunye & Servain, 1998; Stevenson *et al*., 1998; Campos *et al*., 2008).

A descarga de uma grande quantidade de água doce (média de 23 mil m^3 /s para um período de 50 anos) pelo Rio da Prata na zona costeira tem um forte impacto na dinâmica da plataforma. Por ter baixa salinidade, esta água proveniente do rio da Prata permanece nas camadas superficiais, formando uma pluma (Möller *et al.*, 2008). Segundo estes autores, ventos de sudoeste, predominantes no inverno, forçam a pluma em direção ao norte, levando a pluma a baixas latitudes, enquanto ventos predominantes de nordeste forçam a pluma em direção ao sul e as águas de baixa salinidade são então espalhadas em direção a leste, na plataforma adjacente ao estuário do rio da Prata.

Esta água fria e com baixa salinidade, associada ao gradiente de pressão horizontal e à força de Coriolis, pode alcançar a plataforma continental do Rio de Janeiro (~20°S), embora a latitute mais ao norte frequentemente descrita para o alcance da pluma seja em torno de 28°S. Campos *et al.* (1996), através de análise de séries

temporais de TSM, observaram que estas intrusões podem chegar até ao norte de 23°S.

O entendimento dos processos que controlam estes diferentes tipos de massas d´água, bem como suas variabilidades espaciais e temporais, é fundamental para a compreensão das influências naturais e antrópicas sobre o ecossistema da plataforma continental adjacente ao estuário de Santos.

2.2. Produtividade primária fitoplanctônica

A assimilação de dióxido de carbono pelo fitoplâncton é equivalente à produção de carbono orgânico e representa um dos métodos mais diretos de medida da taxa de produção primária (Ryther, 1956). O método de medida da taxa de incorporação do ^{14}C foi introduzido por Steemann-Nielsen em 1952 e é até hoje o método de medida da produção primária fitoplanctônica mais utilizado. Aidar-Aragão *et al.* (1980) realizaram um estudo pioneiro de avaliação da produção primária na plataforma continental sudeste do Brasil entre Cabo Frio e o Cabo de Santa Marta Grande, utilizando medidas de incorporação de ^{14}C associadas à medidas de biomassa fitoplanctônica. Os maiores valores de produção primária potencial (acima de 5,0 mg C m^{-3} h^{-1}) ocorreram nas estações mais próximas à costa, desde a região de Cabo Frio, área de ressurgência, até Cabo de Santa Marta, onde observou-se o enriquecimento das águas provavelmente decorrente da influência das águas continentais. Segundo os autores, a região de maior variação temporal, tanto em termos de clorofila (1,5 a 30 mg m^{-3}) quanto em termos de potencial de produção primária (3,0 a 220 mg C m^{-3} h^{-1}), foi observada próxima à baía de Santos.

Altas taxas de produtividade primária na região da baía de Santos também foram verificadas por Gianesella-Galvão (1982) que obteve valores máximos de 488,3 mg C m^{-3} h^{-1} (no verão) e 204,6 mg C m^{-3} h^{-1} (no inverno). Os maiores valores observados no verão estariam relacionados ao maior aporte de águas continentais, por ser o período de maior pluviosidade.

Brandini (1990) estudou a produção primária do fitoplâncton na região da plataforma continental sudeste do Brasil, em águas costeiras e oceânicas, através de experimentos *in situ* simulado de incorporação de ^{14}C, e obteve valores de produção primária entre 0,04 e 0,49 g C m^{-2} d^{-1} no inverno, com o valor mínimo ocorrendo em frente à Baía de Paranaguá e o máximo na região do talude continental. No outono o autor obteve um valor mínimo de 0,10 g C m^{-2} d^{-1} em região oceânica e um máximo de

0,32 g C m^{-2} dia^{-1} no litoral norte de Santa Catarina. Valores intermediários na taxa de produção primária, entre 0,13 e 0,19 g C m^{-2} d^{-1}, foram obtidos sobre a plataforma média de São Paulo. O autor também fez medidas da distribuição vertical da taxa de fotossíntese na zona eufótica e obteve as mais altas taxas de fotossíntese por unidade de volume de água na camada superficial das estações costeiras, a qual decresceu gradativamente em direção à base da zona eufótica, demonstrando melhor adaptação fisiológica do fitoplâncton às condições de luz da sub-superfície. Na região intermediária da plataforma e região oceânica as taxas foram mais baixas e a distribuição vertical mais homogênea.

Gaeta *et al.* (1995) realizaram medidas de produção primária em 5 estações oceanográficas costeiras na região de Ubatuba em novembro de 1989. Através de experimentos utilizando ^{14}C em águas de sub-superfície e na profundidade de 1% de luz, foram obtidos valores de produção primária de 1,20 a 14,67 mgC mg Cl^{-1} h^{-1}, com média de 2,58 mg C mg Chl^{-1} h^{-1}. Segundo os autores, altas taxas de produtividade na região de Ubatuba podem ser resultantes do enriquecimento e estratificação da coluna d'água, característicos da primavera com a influência da ACAS no fundo, além da influência de aportes continentais nas estações mais costeiras.

Saldanha-Corrêa & Gianesella (2004) verificaram uma variação entre 379,98 e 618,90 mg C m^{-2} d^{-1} no verão/94, e entre 191,97 e 413,53 mg C m^{-2} d^{-1} na primavera/97 na produção primária diária em uma estação fixa na região costeira de São Sebastião. Estes valores concordam com os observados na região interna de Ubatuba, durante o verão (313 a 1.058,60 mg C m^{-2} d^{-1}), com níveis de radiação semelhantes (Gianesella, comunicação pessoal).

A clorofila-*a*, presente nas espécies que realizam a fotossíntese aeróbia, tanto por sua especificidade como pela relativa facilidade de sua determinação, representa uma substância ideal para a estimativa da biomassa fitoplanctônica. Assim, nas últimas décadas, a distribuição de clorofila tem sido extensivamente estudada através de diferentes métodos, como os métodos tradicionais, espectrofotométricos e fluorímétricos, e através de cromatografia líquida de alta resolução – HPLC (*high performance liquid cromatography*) (Gianesella & Saldanha-Corrêa, 2008).

Estudos sobre a biomassa fitoplanctônica na plataforma sudeste, utilizando métodos baseados na determinação da concentração de pigmentos fitoplanctônicos, vêm

sendo realizados por diversos autores, como Aidar *et al*. (1993), que estudou a região da plataforma continental ao largo de Ubatuba, e Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003) na região de São Sebastião. Aidar *et al*. (1993) encontraram uma concentração de clorofila-*a* média de 0,65 mg m^{-3} no verão e 0,42 mg m^{-3} no inverno na plataforma ao largo de Ubatuba. Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003), por sua vez, encontraram valores um pouco superiores para a plataforma continental ao largo de São Sebastião, com uma concentração média de 1,68 mg m^{-3} na primavera e 0,62 mg m^{-3} no verão. Segundo as autoras, a região da plataforma de São Sebastião apresenta condições mais mesotróficas que a plataforma ao largo de Ubatuba, estudada por Aidar *et al*. (1993), que se caracteriza como oligotrófica.

Atualmente, medidas da radiância ascendente da água obtidas a partir de sensores a bordo de satélites têm sido utilizadas para derivar mapas de concentração de clorofila, que servem de entrada em modelos de estimativa do carbono fixado fotossinteticamente (Yoder & Kennelly, 2006; Behrenfeld *et al.*, 2002, entre outros). A concentração de pigmentos fitoplanctônicos pode ser quantitativamente relacionada à taxa fotossintética, porque a concentração de clorofila-*a* é proporcional ao número de centros de reações fotossintéticas. Entretanto, o rendimento quântico não é constante, deste modo, diversos modelos vêm sendo desenvolvidos para estimar a produtividade primária a partir de dados de concentração de clorofila obtidos de imagens de satélites (Falkowski, 1998). A estimativa da produção primária a partir de medidas de satélite de cor do oceano é de extrema importância para a compreensão de como os processos biológicos afetam e são afetados pelas mudanças na radiação atmosférica armazenada e nos ciclos biogeoquímicos globais (Falkowski, 1998).

2.3. O material em suspensão e dissolvido nos ambientes costeiros

Os sedimentos em suspensão na água podem ser oriundos da descarga de sedimentos de rios e pela ressuspensão do material de fundo, além de processos biológicos passados. O material carreado nas águas costeiras pelas plumas dos rios, rico em nutrientes, tem marcado efeito na produtividade da região ao redor da desembocadura (Mann & Lazier, 1996). Estas águas, ricas em substâncias quelantes e espécies oportunistas do fitoplâncton, ao atingirem a plataforma continental, juntamente com outros fatores físicos, químicos e biológicos, podem propiciar florações de espécies do fitoplâncton, provocando um aumento de biomassa exportável para as cadeias alimentares pelágicas e bênticas. Smith & Demaster (1996) estudaram os efeitos da

descarga do rio Amazonas e sedimentos suspensos na distribuição do fitoplâncton e produtividade primária na região da plataforma continental do Amazonas. De acordo com os resultados obtidos através de coletas realizadas entre agosto de 1989 e novembro de 1991, os autores identificaram 3 zonas: Zona I- com alta concentração de nutrientes e baixa salinidade, mas com altíssima turbidez (concentração de sedimentos > 10 mg l^{-1}) limitando a biomassa (em torno de 1 μg l^{-1}) e a produção fitoplanctônica, que apresentou uma média de 2,18 g C m^{-2} d^{-1}; Zona II- transição entre as águas puramente estuarinas e oceânicas, com salinidade abaixo de 32, menor turbidez (concentração de sedimentos < 10 mg l^{-1}) e concentrações de nutrientes suficientes para o crescimento do fitoplâncton, com concentrações de clorofila entre 1,5 e 3,6 μg l^{-1} e produção primária média de 2,61 g C m^{-2} d^{-1}, a mais alta entre as 3 zonas; e a Zona III- com salinidade > 32, baixa concentração de nutrientes e baixa produção fitoplanctônica, 0,81 gC m^{-2} d^{-1}, e concentração de clorofila entre 0,30 e 1,07 μg l^{-1}, típico de águas tropicais oligotróficas. A pluma do rio Amazonas cria condições hidrográficas altamente variáveis na plataforma continental, através da combinação do aporte de nutrientes pela descarga do rio e a disponibilidade de irradiância nas regiões mais oceânicas, forma-se uma zona de transição altamente produtiva, a Zona II.

Os constituintes das águas naturais podem ser divididos em três grupos: 1) a própria *água*, que é constituída pela água mais 35‰ de sais dissolvidos; 2) as *substâncias orgânicas dissolvidas* (que são aquelas que passam através de um filtro com diâmetro de poro de ~ 400 nm, considerado o limiar da microscopia óptica) que são compostos orgânicos produzidos durante a decomposição da matéria orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) e de coloração geralmente marrom, e; 3) as *substâncias particuladas*, que são aquelas que ficam retidas nesses mesmos filtros. As substâncias particuladas podem ser de origem biológica (partículas orgânicas): vírus, bactérias, fitoplâncton, zooplâncton vivos e seus detritos e colóides; também podem ser partículas inorgânicas provenientes do intemperismo de solos e rochas, descargas de drenagem e ressuspensão de fundo de areias quartzosas finas, minerais de argila e óxidos metálicos (Kirk, 1994).

Dependendo da concentração de substâncias dissolvidas (fitoplâncton e detritos) o coeficiente de absorção total da água pode variar de idêntico ao coeficiente de absorção da água pura até muitas ordens de magnitude maior (Mobley, 1994). Em águas costeiras turvas as partículas inorgânicas são os principais determinantes de

comportamento óptico da água (Kirk, 1994).

A matéria orgânica dissolvida, também conhecida como *gelbstoff*, substância amarela, ou *gilvin* (Otis *et al.*, 2004), tem um importante papel na ciclagem biogeoquímica induzida pela luz de muitos componentes, bem como na determinação da quantidade e qualidade espectral da luz viável para os foto-processos marinhos. A sua distribuição na zona costeira é regulada principalmente pelas interações continente-oceano, enquanto em oceano aberto, sua distribuição reflete processos locais (Siegel *et al*., 2002). Mudanças na absorção pela matéria orgânica influenciam na radiação ultra-violeta que chega nos ambientes subaquáticos e que por sua vez podem influenciar as taxas de produção fitoplanctônica e bacteriana. Estas alterações nos processos biológicos e biogeoquímicos oceânicos podem ser avaliadas através dos produtos orbitais (Siegel *et al.*, 2002).

Em águas naturais, o espalhamento total da luz é dominado pela contribuição do material particulado em suspensão sendo diretamente proporcionais. Em águas moderadamente ou muito turvas, como as águas continentais, estuarinas e costeiras, o espalhamento em todos os ângulos e todos os comprimentos de onda da região do visível é dependente das partículas presentes. Muitos trabalhos têm observado relações lineares entre o coeficiente de espalhamento e concentração de material particulado em águas naturais (Kirk, 1994).

A luz direta do sol e a espalhada pelo céu que penetra na superfície do mar pode ser absorvida ou espalhada pelas moléculas de água ou pelos vários materiais dissolvidos ou suspensos na água. Em águas menos profundas e claras uma parte da luz pode chegar ao fundo e ser refletida. Alguns dos fótons espalhados e refletidos podem ser detectados por sensores remotos (Figura 1.1). O sensoriamento remoto envolve a análise das variações na magnitude e qualidade espectral da radiação ascendente da água, com a finalidade de derivar informação quantitativa sobre estas substâncias presentes na água (IOCCG, 2000).

2.4. Sensoriamento remoto da cor do oceano

A cor do oceano pode ser medida do espaço através de sensores remotos, que fornecem informações sinópticas de variáveis oceanográficas da camada superior do oceano. A cor do oceano é a porção do espectro da radiação do sol e céu na região do visível que penetra na coluna de água e emerge da superfície do mar. Este espectro de

radiância emergente da água é função das concentrações e propriedades ópticas de vários constituintes orgânicos e inorgânicos da água do mar (Darecki & Stramski, 2004), os quais são as substâncias amarelas dissolvidas (*gilvin*), o fitoplâncton e o material particulado (Mobley, 1994).

O objetivo do sensoriamento remoto da cor da água é obter informações quantitativas sobre os tipos e as concentrações de substâncias presentes em um corpo d'água, com base em variações na forma espectral e na intensidade do sinal remoto na faixa do visível. Portanto, é desejável expressar a refletância e a refletância de sensoriamento remoto como funções das concentrações das substâncias na coluna d'água que influenciam a cor da água (IOCCG, 2000).

A capacidade dos sensores a bordo de satélites medirem a cor do mar tem sido demonstrada desde o lançamento do Coastal Zone Color Scanner (CZCS) a bordo do satélite Nimbus-7, que operou de outubro de 1978 a junho de 1986 (NASA, 2009a), sucedido pelo SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor), que foi lançado em agosto de 1997 à bordo do satélite SeaStar, e em operação até hoje, com o objetivo de fornecer à comunidade científica dados quantitativos globais das propriedades bio-ópticas do oceano (NASA, 2009b).

O sensor MODIS, lançado em dezembro de 1999 a bordo do satélite TERRA, e em maio de 2002 a bordo do satélite AQUA, fornece alta sensibilidade radiométrica em 36 bandas multiespectrais, cobrindo a faixa espectral de 0,4 μm a 14,4 μm. Os três tipos básicos de produtos para oceano, dos dados MODIS são cor do oceano, TSM (temperatura da superfície do mar) e produção primária oceânica (NASA, 2009c).

Missões como a do SeaWiFS e MODIS, têm evoluído com o objetivo de servir à comunidade científica com relação a dados da cor do oceano, através da obtenção de séries temporais de observações consistentes, úteis para o entendimento do papel da biosfera oceânica no sistema da Terra, em escalas de tempo sazonais e de décadas (Esaias *et al.,* 1998).

As águas da plataforma continental ao largo de Santos são diretamente influenciadas por aportes continentais, apresentando geralmente uma coloração mais escura, por apresentarem altas concentrações de matéria orgânica dissolvida colorida (MODC), sedimentos e fitoplâncton (Kirk, 1983). Estas características possibilitam o uso da cor do oceano para estudos dos potenciais tróficos dessas águas, através de

estimativas de concentração de clorofila e matéria orgânica dissolvida (Kahru & Mitchell, 2001).

Um dos principais objetivos do sensoriamento remoto da cor do oceano tem sido determinar a concentração de clorofila-*a* do fitoplâncton, pelo fato deste ser o mais importante pigmento envolvido na fotossíntese e as principais moléculas absorvedoras, além da própria água, em águas oceânicas (Yoder & Kennelly, 2006). Segundo Ciotti (2005), é possível obter informações, além da concentração de clorofila-*a*, baseadas em dados da cor do oceano obtidos por sensores orbitais através de:

- Modelos estatísticos empíricos ou semi-empíricos, que relacionam o valor observado *in situ* (sedimentos, substâncias amarelas) a duas ou mais bandas de refletância emergente da superfície dos oceanos, que podem ser medidas por satélite;

- Técnicas de modelagem inversa e direta, que relacionam a contribuição das diferentes substâncias coloridas e refrativas às expressões teóricas (modelos analíticos) com o uso de curvas espectrais fixas para cada um dos componentes relevantes. Faz-se um ajuste estatístico entre a magnitude destas curvas e os dados obtidos *in situ*;

- Técnicas de modelagem com o uso de redes neurais, que relaciona os dados obtidos *in situ* com uma base de referência que contém as curvas de cor do oceano construídas a partir de dados tomados *in situ*.

De modo geral, quando a concentração de fitoplâncton aumenta, a refletância na região de luz azul do espectro diminui, enquanto pouca variação ocorre nas faixas de luz verde, sendo este o fundamento dos modelos empíricos robustos mais simples para estimativa da abundância do fitoplâncton, que utilizam razões ou diferenças entre as refletâncias nestas duas regiões do espectro (Clark *et al*., 1970). Esse é o caso dos algoritmos globais atuais, OC2v4 e OC4v4, desenvolvidos para o sensor SeaWiFS (O'Reilly *et al*, 1998) e o OC3, desenvolvido para os dados do sensor MODIS (O'Reilly, 2000). O desempenho desses algoritmos é dependente do número de componentes opticamente ativos na água, de sua concentração e do modo que eles covariam no tempo e espaço.

Um esquema de classificação foi introduzido por Morel & Prieur (1977) e posteriormente refinado por Gordon & Morel (1983), em que as águas naturais são classificadas como Caso 1 ou Caso 2. As águas Caso 1 são aquelas em que o fitoplâncton é o principal responsável pelas variações nas propriedades ópticas da água,

enquanto as águas Caso 2, além do fitoplâncton, outras substâncias como as partículas inorgânicas em suspensão e as substâncias amarelas exercem influência nas propriedades ópticas da água. Assim, os modelos para estimativa da clorofila têm maior probabilidade de êxito em águas onde o material particulado, as substâncias amarelas ou os efeitos do fundo exerçam menor influência (IOCCG, 2000), ou seja, em águas Caso 1. Logicamente, esses algoritmos se tornam pouco eficientes para águas opticamente mais complexas (Caso 2), onde a refletância é igualmente influenciada pelo MPS e MODC. Propriedades ópticas da MODC e partículas não-fitoplanctônicas podem mascarar os padrões da absorção normalmente associados com a concentração de clorofila-*a*. Tais situações forçam o desenvolvimento e algoritmos regionais, onde o comportamento típico das propriedades ópticas da região investigada pode ser levado em consideração (IOCCG, 2000)

Estudos, como o de Darecki *et al*. (2005) no mar Báltico em águas de Caso 2, onde estimativas de clorofila-*a in situ* são comparadas com aquelas as derivadas pelos algoritmos globais (OC2v2 e OC4v4), sugerem que em regiões costeiras ambos algoritmos globais do SeaWiFS superestimam significativamente as concentrações de clorofila-*a*. Os autores mostram que os algoritmos padrão do SeaWiFS não são capazes de estimar concentrações de clorofila-*a* abaixo de 1,5 mg m^{-3} no mar Báltico, superestimando os valores, porque se baseiam na razão de refletância azul/verde. A concentração de clorofila-*a* é inversamente proporcional ao aumento da razão azul/verde. No mar Báltico, tais razões são significativamente reduzidas, comparadas aos observados em águas oceânicas por causa da alta absorção pela MODC no mesmo. Como alternativa a este problema, os autores propõem uma mudança na região espectral utilizada pelo algoritmo para comprimentos de onda onde a absorção pela MODC é menos significante comparada à absorção pela clorofila-*a* e outros pigmentos, como por exemplo, a razão 550/590. Em 550 nm, a absorção pela MODC é muito menor que na região do azul, e a absorção pelo fitoplâncton e pelos carotenóides é ainda mensurável. Enquanto a região de 590 nm é menos influenciada pela absorção de luz por pigmentos fitoplanctônicos. Os autores também observaram que esta razão é menos dependente sazonalmente, uma vez que na região do mar Báltico a MODC apresenta grande variabilidade sazonal. A acurácia da clorofila estimada por esta razão, através de uma equação linear simples foi muito melhor que a estimada pelos algoritmos padrão do SeaWiFS.

Garcia *et al*. (2006) comparou o desempenho dos algoritmos empíricos OC4v4 e OC2-LP (versão regional do OC2v4) e os semianalíticos (Carder e GSM01) para a estimativa de clorofila-*a* na região costeira do Atlântico sudoeste em águas altamente influenciadas pelas descargas de água doce do rio da Prata e da Lagoa dos Patos, a partir de dados radiométricos obtidos *in situ* durante dois cruzeiros na região, um no inverno de 2003 e outro no verão de 2004. Os melhores resultados foram obtidos pelo OC2-LP, que apresentou um erro de 11%, enquanto o OC4v4 apresentou um erro de 27%. Os algoritmos semianalíticos GSM01 (Maritorena *et al*., 2002) e CARDER (Carder *et al*., 1999) apresentaram erro de 39% e 70% respectivamente. Este maior erro apresentado pelos semianalíticos se deve aos valores muito baixos ou negativos em 412 nm, região em que estes algoritmos apresentam maior sensibilidade. Os autores também compararam o desempenho dos algoritmos empíricos OC4v4 e OC2-LP (versão regional do OC2v4) e os semianalíticos (Carder e GSM01) para a estimava de clorofila-*a* a partir de dados do sensor SeaWiFS obtidos para o mesmo período dos cruzeiros (inverno de 2003 e verão de 2004). Foi observada uma diferença sazonal no desempenho dos algoritmos, onde ambos, OC4v4 e OC2-LP superestimaram a concentração de clorofila-*a* no verão em maior magnitude que no inverno, possivelmente devido à inabilidade para compensar a influência da absorção pelos aerossóis nas refletâncias. Enquanto o algoritmo semianalítico GSM01 superestimou a concentração de clorofila-*a* no inverno, o que pode estar associado com a falta de co-variação entre a clorofila-*a* e os outros componentes absorvedores na água (detritos e MODC), os quais apresentam concentrações mais altas no inverno. O algoritmo CARDER apresentou um bom desempenho tanto no verão como no inverno. Os resultados mostram que o uso dos modelos semianalíticos não melhora significativamente a acurácia das estimativas de clorofila-*a* em águas costeiras se não forem apropriadamente calibrados com as propriedades ópticas inerentes medidas *in situ*.

A variabilidade sazonal da concentração de clorofila-*a* e matéria orgânica dissolvida colorida (MODC) na região da corrente da Califórnia, foi analisada por Kahru & Mitchell (1999) através de séries temporais de clorofila e MODC derivadas de dados do SeaWiFS e OCTS (*Ocean Color Temperature Sensor*), utilizando algoritmos empíricos globais (OC4v4 e OC2v2) e o regional Cal-P6. De modo geral, os resultados

apresentados mostram concordância entre as estimativas obtidas pelo SeaWiFS com as medidas *in situ*, tanto para clorofila quanto para MODC. O algoritmo regional, formulado pelos autores, Cal-P6, que utiliza a razão entre as bandas do SeaWiFS centradas em 490 e 555 nm, tendeu a produzir melhor coeficiente de determinação e menor erro (erro médio quadrado) comparado ao OC4v4 e OC2v2, que tenderam a subestimar a concentração de clorofila-*a* de 1 a 10 mg m^{-3}. O algoritmo semianalítico Carder (Carder *et al*., 1999) também foi avaliado para a série temporal, e comparado aos empíricos, o algoritmo semianalítico subestima a concentração de clorofila-*a*, e falha em moderadas a altas concentrações de clorofila-*a* (aproximadamente $\geq$ 1,5 mg m^{-3}), não sendo possível comparações para estas concentrações. Os autores observaram que diferentes padrões sazonais de clorofila-*a* e MODC são obtidos pelos diferentes algoritmos, empíricos e o semianalítico. O seminalítico Carder produziu um pronunciado máximo de inverno para a MODC, que não teve correspondência com a clorofila-*a*, onde o os empíricos produziram um máximo tanto para MODC como para a clorofila-*a*. De acordo com dados de cruzeiros realizados previamente, um máximo tanto de clorofila-*a* como de MODC, de acordo com o obtido pelos algoritmos empíricos, pode ser observado no inverno na região da corrente da Califórnia.

A inclusão de um maior número de bandas espectrais em modelos semianalíticos (e.g., Carder e GSM), pode potencialmente gerar produtos com melhor acurácia, uma vez que a parametrização dos componentes é facilitada. É importante lembrar, todavia, que qualquer modelo utilizado e independentemente de sua complexidade, assume que os dados orbitais são corretamente corrigidos do sinal proveniente da atmosfera (Kahru & Mitchell, 2001). Na verdade, erros nessa correção, afetam especialmente os comprimentos de onda mais curtos, tendendo a subestimar as medidas de cor do oceano por satélite.

Cerca de 10% da luz total detectada por um satélite no oceano é a radiância ascendente da água, enquanto os outros 90% da luz são o resultado dos efeitos atmosféricos, e desta forma, a utilização de uma correção adequada é de extrema importância. Uma vez corrigido o sinal de radiância para o espalhamento da luz pela atmosfera, o sinal é então corrigido em relação ao ângulo solar zenital, fornecendo a radiância ascendente normalizada da água, que é a radiância que deveria ser medida emergindo da superfície do oceano com o sol no zênite na ausência de atmosfera (NASA, 2009d). A radiância normalizada ascendente da água é então utilizada em

algoritmos para produzir valores geofísicos, como concentração de clorofila-*a* por exemplo. Assim, a eficiência dos algoritmos na estimativa das concentrações de clorofila, material em suspensão e MODC é fortemente influenciada pelo método de correção atmosférica utilizado para a determinação da refletância da água.

Assim como os algoritmos de cor do oceano, os métodos clássicos de correção atmosférica são menos eficientes para as regiões costeiras. As primeiras correções utilizadas, ainda utilizadas para águas oceânicas, assumiam que as águas oceânicas sempre possuem um valor nulo de radiância ascendente nas faixas próximas ao infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (e.g., Gordon & Wang, 1994; Wang, 2006). Essa suposição não é válida para águas de Caso 2, principalmente aquelas sujeitas a alta turbidez causada por altas concentrações de sedimentos em suspensão (Hu *et al*., 2000; Ruddick *et al*., 2000), como é o caso da região costeira ao largo de Santos, objeto do presente estudo.

Ruddick *et al*. (2000) propuseram uma adaptação ao método de Gordon & Wang (1994) para regiões costeiras, o modelo de correção MUMM, ("*The Management Unit of the North Sea Mathematical Models and the Scheldt estuary*"). Nessa correção, a refletância entre os comprimentos de 748 e 869 nm, que pode ser atribuída à atmosfera de acordo com o tipo de aerossóis, é inicialmente calculada a partir de um pixel da imagem característico de água clara (i.e., sem influência dos sedimentos). A partir da definição de um tipo característico de aerossol para a região de interesse, o método assume que a variabilidade do tipo de aerossol é espacialmente limitada (aproximadamente 200 km). Como identificado através de modelos bio-ópticos, a refletância da água, $\rho_w(\lambda)$, em dois comprimentos de onda no IVP mantém uma razão constante, α, em águas túrbidas (Eq. 1.1). Ruddick *et al*. (2006) encontrou um valor aproximado igual a 1,945 para esta razão para os dados do sensor MODIS Aqua, que pode ser utilizado amplamente para diversas regiões costeiras.

$$\alpha = \frac{\rho_w(748)}{\rho_w(869)} \tag{1.1}$$

Outra abordagem é a utilização de comprimentos de onda na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR – *Short-wave Infrared*) como uma alternativa ao IVP. Como a radiância ascendente da superfície da água é igual ou muito próxima a zero entre 1000 e 2250 nm, mesmo em águas turvas, e esta faixa ainda contém

informações dos aerossóis, o SWIR pode ser bastante útil para correção atmosférica de águas costeiras.

A região da plataforma continental em frente ao estuário e baía de Santos recebe uma grande carga de sedimentos de origem continental e possivelmente também de origem remota. Assim, essa área exige uma correção atmosférica específica, a fim de se obter as refletâncias da superfície da água o mais próximas possível das reais e algoritmos de cor do oceano mais eficientes para estimativas de concentração de biomassa fitoplanctônica.

3. Material e métodos

O presente trabalho está integrado ao projeto "A Influência do Complexo Estuarino da Baixada Santista sobre o Ecossistema da Plataforma Adjacente (ECOSAN)", desenvolvido por uma equipe multidisciplinar do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO/USP). Assim, as etapas de coleta de amostras *in situ* foram realizadas junto aos demais subprojetos. O presente subprojeto foi desenvolvido no laboratório PROFITO, coordenado pela Dra. Sônia M. F. Gianesella. Nosso grupo colabora com aquele coordenado pela Dra. Áurea Ciotti, da Universidade Estadual Paulista – Campus do Litoral Paulista, com o subprojeto "Bio-óptica" dentro do ECOSAN, o qual contribuiu com os resultados das análises da absorção de luz pela matéria orgânica dissolvida colorida (MODC), utilizados neste trabalho.

3.1. Área de estudo

A área de estudo abrange toda a plataforma continental interna e média adjacente à Baixada Santista, estendendo-se de São Sebastião, a nordeste, a Peruíbe, a sudoeste, até a isóbata de 200 m (Figura 3.1). A maior parte das estações está localizada até a isóbata de 100 m, com apenas alguns pontos na porção externa da plataforma. Esta região da plataforma caracteriza-se por apresentar maior alargamento da PCSE, com 230 km, e topografia suave (Castro *et al*., 2006). Adjacente à plataforma continental está a baía e o estuário de Santos. O sistema estuarino de Santos é alimentado pelos rios que nascem na Serra do Mar, que apresentam um regime torrencial no trecho da serra, mudando de regime na baixada, formando canais e meandros. Assim, a baía de Santos sofre tanto a influência das águas costeiras, quanto das provenientes dos canais de Santos e São Vicente (Moser, 2002).

A costa sudeste de São Paulo caracteriza-se pelo afastamento das escarpas da Serra do Mar em relação ao Oceano Atlântico, ocasionando a formação de três baixadas: a de Iguape-Cananéia, a de Itanhaém e a de Santos, sendo a última diferenciada pela presença das ilhas de São Vicente e Santo Amaro e intensa urbanização nas cidades de São Vicente, Santos, Cubatão e Guarujá.

O Sistema Estuarino de Santos e São Vicente apresenta um dos mais significativos exemplos de degradação ambiental por poluição hídrica e atmosférica de origem industrial em ambientes costeiros (CETESB, 2001). A região abriga o maior porto da América Latina (o Porto de Santos) e o maior pólo industrial do país, em

Cubatão, dos quais recebe uma grande contribuição de resíduos, além do esgoto doméstico. Este grande aporte de resíduos, associado às características eutróficas naturais, aumenta a velocidade dos processos de eutrofização e contribui significativamente para a poluição do ambiente (Gianesella-Galvão, 1982).

A região da Baixada Santista é uma área de transição entre o litoral norte, com planície costeira muito estreita e o litoral sul, com planície mais desenvolvida, formadas por deposição marinha. As ilhas dessa unidade juntamente com as do litoral sul, são predominantemente sedimentares (CETESB, 2003). O clima é quente e úmido na maior parte do ano, com média anual superior a 20ºC de temperatura e pluviosidade anual em torno de 2000 a 2500 mm, com maior incidência nos meses de verão porém, não há uma estação considerada realmente seca na região (CETESB, 2003). A insolação é alta o ano todo, com as maiores médias ocorrendo entre os meses de dezembro e março, e as menores entre agosto e outubro (CPTEC/INPE, 2004)

Os ventos na PCSE, onde está inserida a área de estudo, entre as latitudes 20°S e 25°S, são predominantemente de leste-nordeste durante o ano todo (Castro *et al*., 2006). Sistemas frontais (frentes frias) caracterizam-se como sendo a perturbação meteorológica em escala sinóptica mais importante na PCSE (Castro *et al*., 2006), e a sua ocorrência varia de 3 a 6 por mês, com média de 3 em fevereiro e 5 em outubro (Oliveira, 1986 *apud* Castro *et al*., 2006).

Segundo Castro *et al*. (2006), no verão, a maior parte das temperaturas médias das águas superficiais na PCSE situa-se entre 25°C e 27°C, e no fundo, entre as latitudes 24°S e 26°S, são superiores à 23°C. Durante o inverno, as temperaturas apresentam valores entre 20°C e 23 °C, sendo mais homogêneas verticalmente do que durante o verão. Durante o verão salinidades maiores que 36 podem ser observadas, com os menores valores (< 34) nas regiões mais costeiras da PCSE. No inverno observa-se o aporte de águas relativamente mais frias (< 18°C) e com salinidades mais baixas oriundas do sul, entre as isóbatas de 50 e 100, que chega a alcançar a ilha de São Sebastião.

São registradas para a área de estudo a presença de três massas de água: Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), já descritas anteriormente no item 2.1. deste trabalho.

Segundo Moser (2002) a região da baía de Santos apresenta altas taxas de produção primária. A autora identificou maiores taxas de produtividade primária na Baía, mesmo na área sob influência do emissário submarino de esgoto urbano e no canal de Santos em comparação com as áreas mais internas do estuário e estuário de São Vicente. Estas regiões apresentam altas concentrações de material em suspensão que limitam a produtividade primária do fitoplâncton, apesar das altas concentrações de nutrientes disponíveis. Nas regiões influenciadas por águas mais salinas, com menor concentração de material em suspensão, apesar da menor concentração relativa de nutrientes, há uma maior profundidade da zona eufótica, em comparação com as áreas mais internas do estuário, fator preponderante para a produtividade da região.

Moser (2002) observou que a comunidade fitoplanctônica na região da baía de Santos é dominada por fitoflagelados e diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas. Em condições de chuvas intensas, devido à intensa mistura vertical, há o predomínio de flagelados na zona eufótica. Gianesella-Galvão (1982), também observou predomínio de espécies de diatomáceas, seguidas pelos fitoflagelados, na população fitoplânctonica da baía de Santos, com a dominância da espécie de diatomácea *Skeletonema costatum* (99% do fitoplâncton total).

Aidar-Aragão *et al*. (1980), estudaram a biomassa fitoplanctônica em toda a PCSE entre maio de 1976 e janeiro de 1978, e observaram grande variabilidade temporal na região próxima à baía de Santos (1.5 a 30 mg m^{-3}, inverno e verão respectivamente) e baixos valores (entre 0 e 1.5 aproximadamente) na plataforma média.

Em relação à comunidade fitoplanctônica, Gaeta *et al*. (1999), em levantamentos realizados na plataforma continental, abrangendo a região de Ubatuba, São Sebastião e Santos, durante o projeto COROAS (1993), verificaram uma variação de densidade fitoplanctônica de 0,89 a 3,42 x 10^6 cels.L^{-1} nas estações sobre a plataforma média. Desses totais, 46% a 65% foram constituídos por fitoflagelados e 12% a 22% por diatomáceas. Do total de fitoflagelados, 94 a 97% foram representados por formas muito pequenas (< 2,5 e 2,5-5,0μm).

3.2. Coleta de dados *in situ* – Desenhos amostrais

As coletas foram realizadas na região da plataforma continental adjacente à Baixada Santista, aproximadamente entre as latitudes 23.8° S e 26° S e longitudes 44.8° e 47° O, até aproximadamente a isóbata de 200 m, durante quatro cruzeiros a bordo do N./Oc. "Prof. W. Besnard". Foram utilizados dois desenhos amostrais distintos, denominadas aqui como "rede hidrográfica" e "rede radiométrica", adaptados a diferentes objetivos.

As redes hidrográficas, realizadas entre 19 e 26 de setembro de 2005 e entre 12 e 17 de março de 2006, com 50 estações dispostas em radiais perpendiculares à linha de costa (Figuras 3.2a e 3.2b) tiveram como objetivo a caracterização oceanográfica deste trecho da plataforma continental. Para essa caracterização, foram coletadas amostras de água com garrafas de Van Dorn em profundidades padrão de hidrografia e realizados perfis verticais de temperatura, salinidade e pressão com um CTD (Falmouth®).

As redes radiométricas, realizadas entre 12 e 15 de outubro de 2005 e entre 23 e 26 de março de 2006 tiveram por objetivo determinar as características ópticas da superfície do mar na plataforma continental de Santos. Nestas etapas foi utilizada uma rede de 40 estações distribuídas em 8 radiais partindo sempre de um ponto central no interior da baía de Santos em direção a plataforma média (Figura 3.3), de modo a amostrar o maior número possível de estações durante o período de iluminação solar.

Nessas etapas foram feitas medidas do fator de refletância bidirecional espectral (FR) da superfície da água, utilizando um espectroradiômetro Spectrom SE590, provido de polarizador de luz, gentilmente cedido pela Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE. Em todas as estações foram feitas perfilagens com um CTD. Em outubro de 2005, foram coletadas amostras discretas com garrafas de Niskin apenas da superfície. Na etapa de março de 2006, também foi coletada água na profundidade do máximo de fluorescência, escolhida de acordo com o perfil de fluorescência *in situ* obtido pelo CTD. Essas amostras discretas foram utilizadas para a determinação de material em suspensão total e frações orgânica e inorgânica (mg l^{-1}), quantificação de pigmentos fotossintéticos (mg m^{-3}) e nutrientes inorgânicos dissolvidos - nitrato, nitrito, amônia, fosfato e silicato (μM).

Na rede radiométrica realizada em setembro de 2005, amostras discretas para determinação da salinidade foram coletadas com garrafas de Nansen. Posteriormente, a

razão de condutividade ($R_{S,T,p}$) foi determinada pelo método indutivo com um salinômetro Beckman modelo RS-7C, calibrado com água do mar normal (Grasshoff *et al.*, 1983). A salinidade foi obtida a partir dos valores de razão de condutividade de acordo com as Tabelas da UNESCO (1981).

O coeficiente de atenuação da luz na água foi determinado a partir de medidas com um disco de Secchi (Poole & Atkins, 1929)

Em todas as estações foram feitos arrastos verticais com rede de malha 20 µm para análise qualitativa do microfitoplâncton. As amostras foram mantidas em formol neutro à 4% c.f.

Foram adquiridos dados de direção e intensidade do vento (nós) para cada estação, nos quatro cruzeiros, através do anemômetro (Navman®) instalado no N. OC. Prof. W. Besnard. Os valores de velocidade foram convertidos de nós para m s^{-1} e plotados como gráficos do tipo "*stickplot*", que serviram como dados auxiliares nas análises das demais variáveis.

A seguir serão descritos os métodos de análise utilizados para cada variável.

3.3. Análise dos dados coletados *in situ*

Pigmentos Fotossintéticos do Fitoplâncton

As amostras de água foram filtradas em filtros de fibra de vidro AP-40 Millipore (Saldanha-Corrêa *et al.*, 2004), com 47 mm de diâmetro sob pressão negativa máxima de 0,5 atm. Os filtros foram guardados em envelopes identificados, e mantidos a - 20 °C, em frascos escuros com sílica-gel, até o momento da análise. A extração dos pigmentos das células retidas nos filtros foi feita em acetona 90% (v/v) por 18 h, a -4 °C, no escuro. Após a centrifugação das amostras a 2000 rpm por 15 minutos, as absorbâncias dos extratos foram determinadas em um espectrofotômetro Hitachi U2000, em cubetas de 5 cm de caminho óptico. As concentrações dos pigmentos foram determinadas de acordo com as equações propostas por SCOR-UNESCO (1966) para clorofila-*a* e feopigmentos e Parsons *et al.* (1984a) para os carotenóides.

Fitoplâncton de rede

Como a análise quali-quantitativa do fitoplâncton não era o objetivo do presente trabalho, foram analisadas apenas as amostras correspondentes às coletas de 23 a 26 de março de 2006, período em que foi observada uma floração da cianobactéria

Trichodesmium erythraeum. A densidade relativa do microfitoplâncton foi determinada através de contagens em câmaras tipo hemocitômetro em microscópio óptico Zeiss, com aumento de 400x.

Material em suspensão (mg.L^{-1})

O material em suspensão foi determinado nas amostras coletadas *in situ* de acordo com o método gravimétrico (APHA, 1985). Alíquotas de amostras de água foram filtradas em filtros AP-40 Millipore ® (poro 0,45 μm), pré-calcinados, pesados e acondicionados em envelopes de alumínio. Foram determinadas as frações orgânicas e inorgânicas do material em suspensão total, através das equações:

$$MST = \frac{P2 - P1}{V} \times 1000 , \qquad (3.1)$$

onde MST é o material em suspensão total (mg L^{-1}), P1 é o peso inicial do filtro (g), P2 é o peso do filtro com o material filtrado após secagem na estufa (g) e V o volume de amostra de água filtrado (L).

$$MSI = \frac{P3 - P1}{V} \times 1000 , \qquad (3.2)$$

onde MSI é o material em suspensão inorgânico (mg.L^{-1}) e P3, o peso do filtro após queima da matéria orgânica em mufla (g).

$$MSO = MST - MSI , \qquad (3.3)$$

onde MSO é material em suspensão orgânico (mg.L^{-1}).

Coeficiente de atenuação da água (Kd)

O coeficiente de atenuação da água foi estimado a partir da profundidade de desaparecimento do Disco de Secchi, de acordo com a equação:

$$Kd = \frac{1,7}{Secchi(m)} \qquad (3.4)$$

Matéria Orgânica Dissolvida Colorida (MODC)

Os dados de absorção de luz pela MODC utilizados neste trabalho foram processados pelo Laboratório DiPeCO, da UNESP, Campus do Litoral Paulista. A metodologia utilizada segue a proposta por Babin *et al*. (2003). As amostras foram

filtradas durante as campanhas, em filtros de fibra de vidro GF/F com 25 mm de diâmetro, em baixa pressão. Os filtrados foram mantidos em frascos âmbar, em geladeira, até sua análise. Em laboratório, as amostras foram levadas à temperatura ambiente, e suas absorbâncias foram registradas, em varredura, para os comprimentos de onda entre 350 e 800 nm, utilizando-se um espectrofotômetro Hitachi U2000 e cubetas de quartzo de 10 cm de caminho óptico. As absorbâncias foram convertidas para coeficientes de absorção por ajuste dos valores a uma curva exponencial. Reportamos aqui, os valores medidos para 443 nm, que inferem na magnitude desse componente.

Nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM)

As amostras de água para análise dos nutrientes inorgânicos, coletadas com garrafas de Niskin, foram pré-filtradas em filtros de fibra de vidro tipo AP-40 Millipore ®, armazenadas em frascos plásticos e mantidas a –20°C, até o momento das análises. As concentrações dos nutrientes inorgânicos nas amostras foram determinadas espectrofotometricamente (em cubetas de 5 cm de caminho óptico), utilizando os seguintes métodos:

- N-Nitrato: Morris & Riley (1963) modificado por Wood *et al.* (1967) e Grasshoff (1964).
- N-Nitrito: Shinn (1941) modificado por Bendschneider & Robinson (1952).
- N-amônia: Koroleff (1970).
- P-Fosfato inorgânico: (Murphy & Riley, 1962).
- Silicato: (Koroleff,1971).
- Nitrogênio Inorgânico Total (NIT): obtido a partir da soma das concentrações de N-nitrato, N-nitrito e N-amoniacal, em cada amostra.

As metodologias de análise das formas nitrogenadas estão descritas em Aminot & Chaussepied (1983) e as de fosfato e silicato encontram-se em Grasshoff *et al.* (1983).

Os dados obtidos *in situ* de temperatura, salinidade, nutrientes, pigmentos fitoplanctônicos, MST (MSO e MSI) e MODC foram espacializados em gráficos de superfície, utilizando interpolação do tipo *krigeagem*. Apesar dos dados terem sido

coletados em um intervalo de até 6 dias, a representação horizontal é a melhor forma de representar as variações que ocorrem na região, uma vez que não é possível obter dados sinópticos para todas as variáveis analisadas.

3.4. Radiometria

3.4.1. Coleta de dados radiométricos *in situ*

Nas etapas de radiometria, utilizou-se um espectroradiômetro Spectrom SE 590, provido de polarizador de luz, que faz medidas de radiância emergente da superfície da água ($w.sr^{-1}.m^{-2}$) em modo de varredura, entre os comprimentos de onda 400 a 1100 nm. A resolução espectral média das varreduras é de 3 nm, e o campo de visada (*Field of View*, FOV) possui 25º. As medidas foram feitas a partir do convés, sendo o sensor posicionado a uma altura média de 3 m em relação à superfície da água, onde medidas intercaladas da superfície da água, de uma placa de referência e do céu foram obtidas. As medidas da radiância emergente da superfície do mar e da placa de referência foram adquiridas pelo sensor posicionado com uma inclinação de 45° em relação à vertical, para minimizar a influência da refletância especular (Steffen, 1996) (Figura 3.4). As medidas de radiância do céu foram feitas com o sensor direcionado para cima, com uma inclinação de 135° em relação à superfície do mar. As placas de referência foram calibradas no Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Em nossas observações, utilizamos na etapa de outubro de 2005 uma placa de espectralon® com aproximadamente 12 cm de diâmetro e em março de 2006 foi utilizada uma placa de sulfato de bário prensado, com aproximadamente 12 cm de diâmetro. Para remoção da interferência da luz difusa (*skylight*) na refletância medida da água utilizou-se um filtro polarizador acoplado em frente ao sensor. Apesar de o sensor fornecer uma média de várias medidas sucessivas, foram feitas 3 medidas de cada superfície (3 medidas do céu, 3 medidas da água e 3 medidas da placa), e utilizada a média dos três valores. A aquisição de cada conjunto de medidas foi feita em aproximadamente 15 segundos.

As medidas radiométricas foram feitas apenas no período entre 07:00 e 17:00 horas (hora local), exceto quando as condições de nebulosidade foram muito intensas, impossibilitando a coleta, resultando num total de 49 observações independentes para as duas coletas.

3.4.2. Cálculo dos espectros de refletância da superfície da água

Os dados radiométricos adquiridos *in situ* com o espectroradiômetro, foram transferidos e armazenados através do programa Espectro (Steffen, 1996), desenvolvido pelo LARAD/INPE. Os valores de radiância medidos na água, no céu e nas placas de referência, juntamente com o fator de refletância da placa de referência medida em laboratório foram utilizados no cálculo da refletância de sensoriamento remoto (R_{rs}) da água (eq. 3.5)

$$R_{sr} = \frac{L_w}{L_p} \times \frac{1}{\pi} \times k \quad , \qquad (3.5)$$

onde, L_w é a radiância da água, L_p, a radiância da placa de referência e k o fator de refletância da placa de referência. O fator de refletância da placa de referência (k) foi obtido em laboratório, com outra unidade do mesmo instrumento (Spectrom SE590), através da calibração da placa utilizada em campo (L_p) em relação à refletância de uma placa de espectralon com valores conhecidos (L_l).

O efeito especular foi removido através da subtração da radiância do céu (L_c) pela refletância da interface ar-água (ρ) da radiância total da água, como o recomendado por Mueller & Austin (1995) (Eq. 3.6).

$$L_w = L_t - \rho \times L_c \qquad (3.6)$$

O fator ρ relaciona a radiância medida do céu com a radiância do céu refletida na água. Além do ângulo de visão do sensor, ρ depende do comprimento de onda, velocidade do vento, FOV (*Field of View*) do detector e da distribuição da radiância do céu. Assumindo uma superfície do mar e distribuição da radiância do céu uniformes, ρ se aproxima da refletância de Fresnel, a qual é função do ângulo de elevação solar (hora do dia) e latitude (Mobley, 1999). Um valor de ρ igual a 0,022 foi determinado pela média dos valores obtidos para o período do dia em que foram realizadas as medidas, de acordo com as equações apresentadas por Kirk (1994).

Devido à correção acima ainda não remover totalmente os efeitos especulares residuais, além dos efeitos da espuma na superfície da água, a refletância em 869 nm (para as bandas simuladas do MODIS) e 865 nm (para as bandas simuladas do SeaWiFS) foi subtraída da refletância das demais bandas, seguindo o proposto por Fougnie *et al.,* (1999). Essa correção, todavia, apesar de necessária, assume que não

existe refletância emergente da água nessa banda, o que deve ser levado em consideração na análise dos resultados aqui apresentados.

Para suavização do "ruído" e melhor visualização dos resultados, foi aplicado um filtro de média móvel de 3 pontos nos espectros de refletância.

3.4.3. Simulação de bandas espectrais dos sensores

As bandas de refletância nos intervalos de comprimento de onda correspondentes às bandas do sensor MODIS e do sensor SeaWiFS (Tabela 3.1) foram simuladas através da média dos valores de refletância medidas com o espectroradiômetro *in situ* dentro destes intervalos (NASA, 2009c; NASA, 2009b)).

3.4.4. Comparação dos dados obtidos *in situ* com os dados globais

Foram obtidos dados globais de clorofila-*a* e refletância, na base de dados NOMAD (NASA, 2009e), disponível em <http://seabass.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/nomad.cgi>. A base de dados NOMAD é composta por dados obtidos por diversos cruzeiros oceanográficos, em diversas províncias biogeográficas do mundo. A partir destes dados foi construído um diagrama de dispersão entre a clorofila-*a* e a razão 530/551 (ou bandas muito próxima a estas), o qual foi comparado ao diagrama de dispersão entre os dados de concentração de clorofila-*a* obtida *in situ* e a razão de bandas 531/551 obtida a partir dos dados radiométricos. O objetivo da comparação foi avaliar a qualidade dos dados e se estes seguem o padrão de distribuição dos dados globais.

3.4.5. Estimativa de concentração de clorofila-*a* através de algoritmos globais: OC3 (MODIS), OC2v4 e Oc4v4 (SeaWiFS)

Os valores de comprimento de onda indicados representam o valor central da largura das bandas (vide Tabela 3.1).

As bandas simuladas nos intervalos do sensor MODIS e SeaWifS foram utilizadas nos algoritmos globais OC3 (MODIS) e OC2v4 e OC4v4 (SeaWiFS). O algoritmo OC3 estima a concentração de clorofila-*a* a partir de razões entre bandas, relacionadas através de uma única função polinomial de quarta ordem, na qual R representa a razão máxima entre bandas que apresenta o maior valor, entre as razões Rsr443/Rsr551 ou Rsr488/Rsr551 (O' Reilly *et al*, 2000) :

$$C_a = 10^{(0,283-2,753R+1,457R^2+0,659R^3-1,403R^4)}$$

$$R = \log_{10}\left(\frac{R_{sr}443 > R_{sr}488}{R_{sr}551}\right) \quad (3.7)$$

De forma similar, o algoritmo OC4v4, desenvolvido para os dados do sensor SeaWiFS também relaciona razões de bandas com a clorofila-*a* através de uma única função polinomial de quarta ordem, mas emprega a razão máxima entre as razões de bandas *Rrs*(443)/*Rrs*(555), *Rrs*(490)/*Rrs*(555) e *Rrs*(510)/*Rrs*(555) (O'Reilly *et al*. 2000):

$$C_a = 10^{(0,366-3,067R+1,930R^2+0,649R^3-1,532^4)}$$

$$R = \log_{10}\left(\frac{R_{sr}443 > R_{sr}490 > R_{sr}510}{R_{sr}555}\right) \quad (3.8)$$

O algoritmo OC2v4 estima a clorofila-*a* da superfície do mar a partir da razão de bandas Rrs(490)/Rrs(555) utilizando uma função polinomial cúbica (O'Reilly *et al*. 2000):

$$C_a = 10^{(0,319-2,336R+0,879R^2+0,135R^3)-0,071}$$

$$R = \log_{10}\left(\frac{R_{sr}490}{R_{sr}555}\right) \quad (3.9)$$

O desempenho dos algoritmos globais, OC2v4, OC4v4 e OC3 foi investigado através de comparações estatísticas entre concentrações de clorofila-*a* superficiais obtidas *in situ* e aquelas estimadas pelos algoritmos globais, através de análise de regressão simples, onde foram analisados os coeficientes de determinação e o erro médio quadrático (EMQ) (Equação 3.10 e 3.11).

$$SQE = \sum\left[Log(Cla\ a\lg oritmo) - Log(Cla\ insitu)\right]^2 \quad (3.10)$$

$$EMQ = \frac{SQE}{n-1} \quad (3.11)$$

Nessa formulação, EMQ representa, o quanto o algoritmo se distancia dos valores reais de clorofila, independentemente de sua magnitude.

Estes parâmetros estatísticos fornecem um índice quantitativo dos desempenhos. Já tendências e importantes feições foram investigadas por diagramas de dispersão. Os dados foram transformados logaritmicamente. Foram investigadas possíveis correlações entre os resíduos das equações e outras variáveis no desempenho dos algoritmos, como a MODC, o MST, os carotenóides, além da própria clorofila-*a*, com a finalidade de investigar a possível interferência dos demais componentes opticamente ativos na água na estimativa da clorofila-*a*.

3.4.6. Desenvolvimento de um algoritmo empírico regional para estimativa de clorofila-*a* na plataforma continental de Santos

Como não foi possível realizar um novo cruzeiro para aquisição de uma base de dados independente daquela através da qual os algoritmos foram desenvolvidos, para posterior avaliação dos algoritmos, optou-se por separar o conjunto de dados total, com 49 estações em dois subconjuntos. Um conjunto de dados ficou, inicialmente, com 32 estações, preservando assim um número significativo de amostras, e estas, representativas da região, garantindo a confiabilidade do algoritmo para este intervalo de dados. E outro conjunto com as estações restantes, 17, para a avaliação dos algoritmos. A base de dados foi separada de modo que os dois conjuntos apresentassem aproximadamente o mesmo intervalo de concentrações, para isso, o intervalo de concentração total foi dividido em intervalos menores de concentrações, e estações dentro destes intervalos foram escolhidas aleatoriamente para formar o conjunto de 17 estações.

Primeiramente, para avaliação das razões usualmente utilizadas pelos algoritmos empíricos, foram conduzidas análises de correlação e regressão entre as razões de bandas 412/551, 443/551, 488/551, 531/551, e a razão máxima entre as razões 488/551 e 531/551, e a concentração de clorofila-*a* obtida *in situ*, sempre com os valores transformados logaritmicamente, para as 32 estações. Apenas uma estação, a estação 17, amostrada em março de 2006 foi identificada como *outlier*, apresentando um valor de refletância fora da amplitude apresentada por todo o conjunto de dados, sendo assim removida do conjunto utilizado para o desenvolvimento do algoritmo.

A razão melhor correlacionada com a concentração de clorofila-*a*, a razão 531/551, foi utilizada na construção do algoritmo empírico regional. Para isso, foram feitos ajustes lineares e polinomiais de segunda, terceira e quarta ordem, onde foram comparados os coeficientes de correlação e determinação. A análise de regressão com ajuste linear também foi conduzida separadamente para cada etapa de coleta, outubro de 2005 e março de 2006, com a finalidade de se identificar variações sazonais.

O desempenho dos quatro algoritmos obtidos (linear, polinomial de segunda ordem, polinomial de terceira ordem e polinomial de quarta ordem) e do algoritmo global OC3 foi testado na base de dados (separada na etapa anterior) com 17 estações amostrais. O desempenho foi avaliado através de comparações entre as concentrações de clorofila-*a* estimadas pelos algoritmos e aquelas medidas *in situ*, através dos seus coeficientes de correlação e regressão e o EMQ (Erro Médio Quadrático).

Para identificar possíveis interferências das demais variáveis, além da própria variável independente, a clorofila-*a*, foram feitas análises de correlação entre os resíduos da regressão (Equação 3.9) e a própria clorofila-*a* medida *in situ*, e entre os resíduos e os demais componentes opticamente ativos na água: carotenóides, MST (MSI e MSO) e MODC.

$$\mathrm{Re}\,síduos = Cla \cdot estimada(\log) - Cla \cdot medida(\log) \qquad (3.12)$$

O desempenho dos algoritmos regionais foi ainda testado diretamente nas imagens MODIS obtidas durante o cruzeiro de hidrografia realizado de 12 a 17 de março de 2006. A metodologia desta etapa será detalhada posteriormente no ítem 3.5, e os resultados apresentados no ítem 4.3.

3.5. Imagens MODIS

3.5.1. Aquisição e processamento das imagens MODIS

As imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) - radiâncias não calibradas em nível 1A, com 1 km de resolução espacial - foram adquiridas via FTP, diretamente do DAAC/GSFC/NASA, através da homepage http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/, e manipuladas com o programa SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*), obtido gratuitamente na página http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/. Foram adquiridas imagens referentes aos mesmos períodos dos cruzeiros de hidrografia, de 19 e 26 de setembro de 2005 e entre 12 e 17 de

março de 2006, e de radiometria, de 12 e 15 de outubro de 2005 e entre 23 e 26 de março.

3.5.2. Processamento das imagens: nível 1 (L1) para nível 2 (L2)

As imagens nível 1A (L1A) foram processadas para o nível 2 (L2) utilizando o programa e arquivos de georeferenciamento, correspondentes a cada imagem, e que contém além das coordenadas geodésicas de cada pixel, dados sobre a elevação do terreno, ângulos solar e zenital do satélite e ângulo azimutal para os mesmos. O processamento para nível 2 segue o passo intermediário para nível 1B (L1B), que corresponde às radiâncias calibradas e geolocalizadas (unidade: W $m^{-2}.m^{-1}.sr^{-1}$). A partir do nível 1B, a refletância da superfície do mar foi obtida para as bandas refletivas (bandas de 8 a 16, de interesse em cor do oceano) além de outros produtos L2:

- Refletâncias da superfície do mar (412, 443, 488, 531, 551, 667, 678, 748 e 869 nm) em sr^{-1};
- Clorofila da superfície do mar (mg m^{-3}) utilizando o algoritmo OC3;
- Coeficiente de atenuação difusa da água - K488 (m^{-1});
- Material em Suspensão Total (MST) (mg l^{-1}), segundo Clark (1999);

Correção atmosférica

Uma vez que estamos tratando de águas sobre plataforma continental, optamos por verificar a correção atmosférica aplicada às imagens, sendo testados dois diferentes métodos: o modelo padrão para correção de imagens SeaWiFS, que utiliza as bandas do IVP para calcular a refletância dos aerossóis em cada pixel da imagem (Gordon & Wang, 1994) e o modelo para águas túrbidas, o MUMM, proposto por Ruddick *et al*. (2000; 2006), ambos implementados no Seadas 5.2. Enquanto o método padrão do Seadas assume um valor nulo de radiância ascendente nas faixas próximas ao infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (e.g., Gordon & Wang, 1994; Wang, 2006), o método MUMM, como visto anteriormente no item 2.2, assume que a variabilidade do tipo de aerossol é espacialmente limitada (aproximadamente 200 km) e a variabilidade do espalhamento pelo particulado é espectralmente limitada no IVP e dominada pela absorção da água. Então, a refletância dos aerossóis é estimada para um pixel de água clara e aplicada a toda imagem. A razão, α, entre o espalhamento pelos aerossóis nas bandas do IVP (748, 869) é um parâmetro a ser calculado para cada

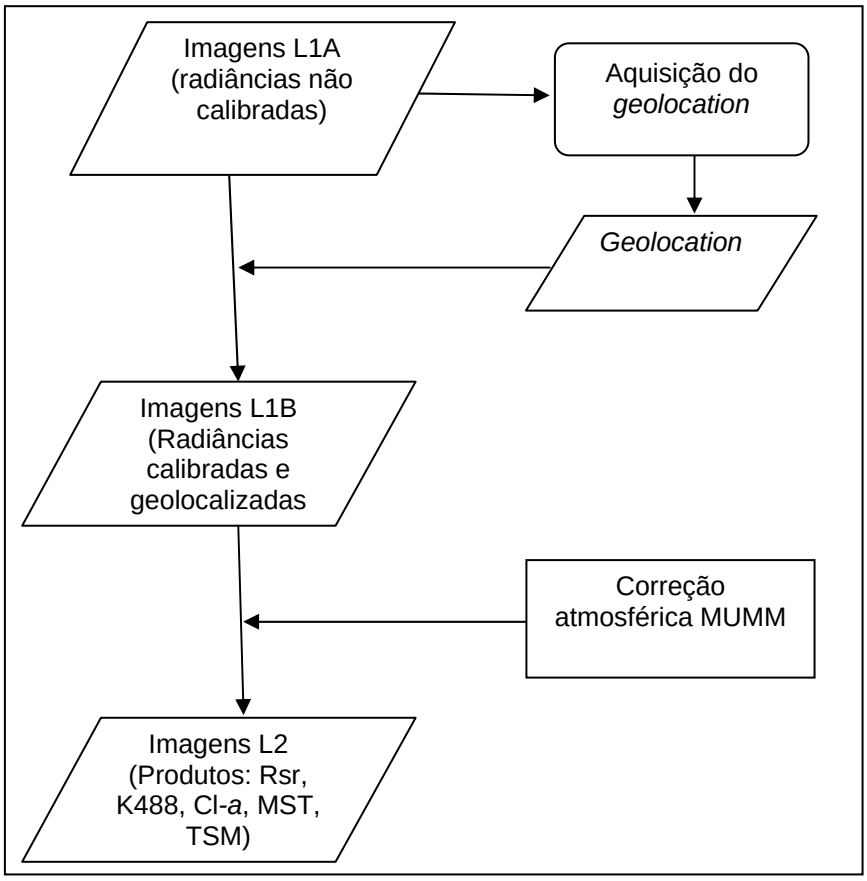
imagem, entretanto, um valor considerado universal, igual a 1,945 foi calculado por Rudick *et al*. (2006) para os dados do sensor MODIS, e utilizado no processamento das imagens do nível 1A para nível 2.

Como parâmetro para comparação, utilizou-se o coeficiente de atenuação difusa da água em 488 nm (correspondente ao K490 do SeaWiFS) estimado utilizando os dois modelos de correção atmosférica. O K488 indica a turbidez da coluna de água, ou seja, como a luz visível na região azul/verde do espectro eletromagnético penetra na água, estando diretamente relacionado com o espalhamento por partículas na coluna de água (NASA, 2009d).

O coeficiente de atenuação difusa da água obtido *in situ* através do disco de Secchi (veja eq. 3.4) foi utilizado como variável para a comparação, por ser uma medida confiável e bem correlacionada com o obtido através das imagens. Apesar de incluir todo o espectro do visível, nas imagens, o coeficiente de atenuação difusa em 488 nm (K488) é estimado através de uma relação entre as bandas centradas em 488 e 551 nm (Eq. 3.13), que são afetadas pelo método de correção atmosférica utilizado (Wang *et al*., 2007).

$$K(488) = K_w(488) + A\left[\frac{L_w(488)}{L_w(551)}\right]^B, \qquad (3.13)$$

O modelo que obteve o produto (K488) com menor erro (EMQ – Erro Médio Quadrado) em relação aos dados *in situ* foi adotado no processamento de todas as imagens.



Quadro 1 – Fluxograma das etapas do processamento das imagens do nível 1A (L1A) para o nível 2 (L2).

3.5.3. Extração das informações

Os dados dos produtos L2 das imagens (refletância espectral, concentração de clorofila, K488 e material em suspensão total) foram extraídos para cada estação de coleta *in situ* em janelas espaciais de 3 x 3 pixels centradas nas coordenadas das estações realizadas *in situ*. Foram consideradas passagens "simultâneas" aos dados *in situ*, aquelas que aconteceram em janela temporal de 24 horas centrada no horário da coleta. Para extração destes dados, para todos os produtos e todas as datas foi utilizada uma rotina em MATLAB.

Os produtos obtidos, utilizando algoritmos globais para clorofila, material em suspensão, coeficiente de atenuação difusa da água e temperatura, foram comparados àqueles obtidos *in situ,* através de análises de regressão, a fim de avaliar o desempenho dos algoritmos globais.

3.5.4 Análise dos algoritmos regionais aplicados às imagens MODIS

Os valores de refletância das imagens para cada estação foram aplicados nos algoritmos empíricos regionais obtidos na etapa anterior, com a finalidade de se avaliar o desempenho destes na estimativa de clorofila-*a*. As concentrações de clorofila-*a* estimadas pelos algoritmos regionais e pelo algoritmo global OC3 foram comparadas às obtidas *in situ*, através de análises de regressão e avaliação do EMQ. Também foram analisados os desvios de estimativa da clorofila-*a* em relação às demais variáveis opticamente ativas na água, como a MODC, os carotenóides, MST, MSO e MSI, através de diagramas de dispersão e comparação dos coeficientes de correlação e regressão obtidos.

3.5.5. Aquisição de imagens de TSM - MODIS

Foram adquiridas imagens de TSM médias semanais (8 dias) do sensor MODIS referentes à (aproximadamente) a semana de coleta dos cruzeiros de hidrografia (setembro de 2005 e março de 2006) e para as duas semanas que as antecederam. Essas imagens foram recortadas para uma região mais ampla que a área de estudo, com o objetivo de se analisar as condições de contorno no período das coletas e semanas anteriores, para melhor entendimento da condição oceanográfica verificada através dos dados *in situ* obtidos.

4. Resultados

4.1. Oceanografia Regional

Os resultados a seguir estão divididos de acordo com os cruzeiros realizados na plataforma continental de Santos, na primavera – Etapa de Hidrografia de Setembro de 2005 e Etapa de Radiometria de Outubro de 2005, e no verão – Etapa de Hidrografia de Março de 2006 e Etapa de Radiometria de Março de 2006.

4.1.1. Primavera - Etapa de Hidrografia – Setembro de 2005

As temperaturas média, mínima e máxima, para toda a coluna de água durante a etapa de hidrografia de setembro de 2005 são apresentadas na Tabela 4.1.1. Nesta etapa, a temperatura média nas águas superficiais da plataforma foi de 20,48 °C, variando de 19,60 a 22,14 °C, enquanto a média junto ao fundo foi de 18,63°C, variando entre 10,87 a 20,68 °C. A distribuição horizontal da temperatura na superfície apresentou um núcleo de águas com temperatura inferior a 20°C na região da isóbata de 50 m, na porção central da área de estudo (Figura 4.1.1 a). Na região mais costeira, as temperaturas superficiais ficaram próximas a 21°C. As isotermas obtidas junto ao fundo (temperaturas referentes à última profundidade de registro do CTD) apresentaram uma distribuição diferente da obtida na superfície, com um gradiente decrescente em direção o mar aberto, chegando a temperaturas inferiores a 13°C (Figura 4.1.1 b).

A salinidade apresentou um padrão de distribuição semelhante na superfície e no fundo (Figura 4.1.2 a e b), com um gradiente decrescente em direção à costa sendo mais conspícuo na superfície, onde se pode observar águas com salinidades inferiores a 32 junto a costa, até superiores a 36 nas regiões mais distantes.

A distribuição vertical das temperaturas e salinidades das radiais 1, 5 e 9 é apresentada nas Figuras 4.1.3 a 4.1.5. A entrada de águas mais salinas parece ocorrer à meia água na faixa em torno dos 50 m de profundidade vinda da porção norte. Por outro lado, a isoterma de 20°C e as isohalinas de 33 e 33,5 indicam a presença de água mais fria, que chega à área oriunda da porção sul pela região da plataforma média.

A região em frente ao estuário de Santos apresentou as salinidades mais baixas. Através dos perfis batimétricos das radiais 1, 5 e 9, fica evidente que a coluna de água apresentava-se verticalmente pouco estratificada nos 30 m superiores, tanto em termos de temperatura quanto salinidade. Gradientes nesta camada superior foram mais evidentes horizontalmente.

O diagrama T-S para os pares de pontos obtidos em setembro/2005 apresentou um triângulo de mistura bem definido (Figura 4.1.6), indicando a presença de três massas de água: Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1982), descritos no item 2.1. As misturas entre essas massas de água, entrentanto, foram detectadas apenas entre AC e AT, e entre AT e ACAS, não tendo sido detectada mistura entre AC e ACAS.

Os vetores de velocidade e direção dos ventos sobre a plataforma no período de 20 a 25 de setembro de 2005 são apresentados na Figura 4.1.7, onde observa-se que predominam ventos de nordeste, com a ocorrência eventual de ventos de sudeste.

Através das imagens de TSM médias semanais para aproximadamente o período que foi realizado o cruzeiro de setembro de 2005 (Figura 4.1.8 a e b), pode-se observar temperaturas médias baixas para este período, com intrusão de águas mais frias oriundas de regiões mais ao sul da área de estudo. A mesma situação foi observada para as duas semanas que antecederam o cruzeiro de setembro de 2005, como pode ser visto na Figura 4.1.8 c e d, uma semana antes, e na Figura 4.1.8 e e f, duas semanas antes da realização do cruzeiro de setembro de 2005.

As concentrações de amônia na superfície variaram entre zero e 2,22 μM (Tabela 4.1.1) com os valores mais altos ocorrendo na porção norte da área, próximo à costa de São Sebastião, na radial 1, e em frente à baía de Santos, na radial 3 (Figura 4.1.9a). No fundo, as concentrações mais altas ocorreram também na radial 1 próximo à costa de São Sebastião e na radial 5, próximo a Santos (Figura 4.1.9b). A concentração média de amônia obtida para o conjunto de dados (todas as profundidades) foi de 0,35 (±0,30) μM.

As concentrações de nitrato apresentaram-se mais elevadas no fundo (Figura 4.1.9c), claramente associadas à ACAS, que na superfície (Figura 4.1.9d). A região costeira em frente à baía de Santos apresentou concentrações mais elevadas na superfície, bem como nas águas de fundo nessa mesma região, indicando alguma contribuição proveniente da região estuarina. Tanto a amônia quanto o nitrato apresentaram as menores concentrações na região sul da área de estudo.

O padrão de distribuição do nitrogênio total (NIT) (Figura 4.1.9 e, f) é bastante semelhante ao do nitrato, uma vez que as concentrações de amônia (Figura 4.1.0 a, b)

foram muito inferiores às de nitrato. Nas águas superficiais, observa-se uma maior concentração de nitrato junto à entrada da baía de Santos, e em uma porção mais ao sul. Foi observado um núcleo na porção mais externa da radial 1 com concentração de nitrato acima de 3,0 µm. Este núcleo coincide com valores mais altos de amônia e MST. No fundo, dois núcleos de concentração mais alta de nitrato, e consequentemente de NIT, se destacam, um próximo à baía de Santos e outro mais ao largo na plataforma, este relacionado à águas mais frias, com forte influência da ACAS (Figura 4.1.9 d e f).

Com relação ao fosfato, a água superficial também apresentou baixas concentrações, com núcleos de maior concentração na região do entorno da baía de Santos, e no fundo na região da plataforma média, associado às águas mais frias, da ACAS (Figura 4.1.10 a e b). Núcleos de concentração mais alta foram observados na superfície ao norte da baía de Santos, estendendo-se até Bertioga (Figura 4.1.10 a). Junto ao fundo, a disponibilidade de fosfato foi maior (Figura 4.1.10 b), indicando que a ACAS é uma importante fonte desse nutriente, visto que a maior concentração foi observada no ponto onde a temperatura foi inferior a 13 °C. Um núcleo de alta concentração (1,39 µM) na radial 9 indica que a ACAS é uma importante fonte desse nutriente visto que ocorreu no mesmo ponto onde a temperatura foi inferior a 13°C (Figura 4.1.1 b).

O silicato apresentou uma distribuição horizontal (Figura 4.1.10 c e d) intimamente ligada à proximidade da costa. Embora, tanto no fundo quanto na superfície, concentrações mais altas foram observadas mais distantes, na radial 9, na região sul da área, associado às águas mais frias observadas na superfície nessa região. No fundo, observa-se também núcleos de alta concentração de silicato: um entre as radiais 1 e 2, próximo à entrada do canal de São Sebastião; outro na radial 2, e; na radial 9 próximo à isóbata de 50m (Figura 4.1.10 d).

Considerando a distribuição do MST e de sua fração orgânica (MSO), apresentadas nas Figuras 4.1.11 (a e b) e Figuras 4.1.11 (c e d) respectivamente, as maiores concentrações em águas superficiais foram observadas no eixo perpendicular à baía de Santos, especialmente junto ao fundo, sugerindo o aporte de material do complexo estuarino para a área da plataforma, (Figura 4.1.11 b). Os valores médios, mínimos e máximos de MST, e das frações inorgânicas e orgânicas são apresentados na Tabela 4.1.1. A fração orgânica representou em média 30 % do MST (com desvio padrão de 27 %). No entanto, quando altas concentrações de MST são detectadas elas

estão invariavelmente ligadas ao aumento da fração orgânica, que chegou a representar 94% do total.

O MSI (material em suspensão inorgânico) apresentou concentrações mais baixas, com concentração média de 14,38 mg l^{-1} na superfície e 15,96 mg l^{-1} no fundo. Os núcleos relativamente mais altos, tanto no fundo quanto na superfície, estão próximos à costa e ao estuário (Figura 4.1.11 e e f), sendo provavelmente reflexo do aporte de material da região estuarina para a área costeira. Contudo, vale ressaltar duas feições interessantes: um núcleo de MSO na estação mais externa da radial 1 (Figura 4.1.11 c), que encontra-se no domínio das águas mais salinas e quentes registradas na área (Figuras 4.1.1 a e 4.1.2 a), e outra feição interessante na região das estações 24 e 25 da radial 5, com máximos sub-superficiais e junto ao fundo, compostos basicamente por material orgânico (Figuras 4.1.11 d).

A distribuição da absorção pela MODC na superfície apresentou um gradiente decrescente perpendicular à costa, com valores mais altos ocorrendo na porção costeira sudoeste da área de estudo e em frente à baía de Santos (Figura 4.1.12).

A profundidade da zona eufótica estimada a partir de medidas da profundidade do disco de Secchi, variou de 4,06 a 55,53 m, com um valor médio de 26,68 m (Tabela 4.1.1). Como pode se observar na Figura 4.1.13, a profundidade da zona eufótica apresentou um gradiente crescente da região bem próxima à costa em direção ao largo da plataforma (Figura 4.1.13).

As concentrações de Cl-*a* variaram entre 0,05 e 8,28 mg m^{-3} (Tabela 4.1.1). A distribuição horizontal mostra que a porção costeira norte da área de estudo apresentou uma maior abundância em biomassa fitoplanctônica em comparação à área restante, tanto na superfície quanto no fundo (Figuras 4.1.14. a e b). Os pontos mais ricos localizaram-se ao sul do canal de São Sebastião, próximo à região do canal de Bertioga e na estação mais externa da radial 3. Com exceção desses pontos, pode-se afirmar que a área apresenta características oligotróficas.

Assim como a clorofila-*a*, os carotenóides apresentaram maiores concentrações na região costeira ao norte da área de estudo, próximo à baía de Santos e Canal de Bertioga (Figura 4.1.14 c). As concentrações variaram de 0,01 a 6,13 mg m^{-3} (Tabela 4.1.1) e os valores mais altos foram observados no fundo próximo à entrada do canal de São Sebastião (Figura 4.1.14 d).

A razão 480:665 apresentou valores entre 0,57 e 3,0, com média de 1,60 (Tabela 4.1.1). Observa-se pelas Figuras 4.1.15 (a e b) que a maior parte da área apresenta valores superiores a 2, tanto na superfície como no fundo.

4.1.2. Primavera - Etapa de Radiometria – Outubro de 2005

Na etapa de 12 a 15 de outubro houve uma maior amplitude de variação térmica e halina nas águas superficiais do que a verificada em setembro. As médias de temperatura e salinidade foram, respectivamente, de 22,14 °C e 31,46 (Tabela 4.1.2). Neste período, verificou-se a presença de um núcleo com temperatura bastante elevada (26,2^{o}C) na estação 9, associado a águas ligeiramente mais salinas que penetravam na área a partir das estações 6 e 7, na radial B (Figura 4.1.16 a e b). Outro núcleo de alta temperatura pode ser identificado na estação 27 (radial E), também associado a águas ligeiramente mais salinas. Apenas as estações mais externas (Figura 3.3) apresentaram salinidades acima de 32, indicando a presença da pluma estuarina em toda a região adjacente à entrada da baía de Santos.

O diagrama T-S obtido para os pares de pontos a partir das perfilagens realizadas com o CTD em cada estação de coleta mostra a predominância da AC sobre a plataforma neste período (Figura 4.1.17), segundo os índices termohalinos sugeridos por Miranda (1982), sofrendo mistura com águas com influência da AT. Valores de salinidade ligeiramente superiores a 36 foram observados somente na estação 17, a mais distante da costa, onde registrou-se junto ao fundo (cerca de 50 m de profundidade) salinidade de 36,2.

O perfil vertical de temperatura da radial D, aproximadamente perpendicular à linha de costa e a mais extensa das radiais (Figura 4.1.18 a), mostra pequena variação vertical, com uma intrusão de água mais fria do fundo em direção à superfície entre 60 a 70 km da baía. O perfil correspondente de salinidade (Figura 4.1.18 b) indica que águas de origem estuarina dominaram praticamente toda a área, com um fraco gradiente vertical. Neste período a profundidade média da zona eufótica foi de 21,49 m.

Os vetores de velocidade e direção dos ventos sobre a área de estudo no período de coleta de 12 a 15 de outubro de 2005 são apresentados na Figura 4.1.19, podendo se observar que no período ocorreram ventos de nordeste alternados por ventos de sudeste, e de modo geral foram ventos de baixa intensidade.

Em outubro, a concentração média de amônia foi 0,28 µM e o desvio padrão bastante elevado, 0,55 µM (Tabela 4.1.2). A distribuição horizontal mostrou alguns núcleos de concentrações mais elevadas (Figura 4.1.20a), com valores de até 0,84 µM, que não estiveram associados aos núcleos de MST. No primeiro dia, a estação 1, na entrada da baía de Santos apresentou concentração de 3,64 µM, que foi considerado um valor anômalo em relação a todo o conjunto de dados, embora seja um valor normal para águas estuarinas. A distribuição das concentrações de amônia não se apresentou correlacionada à temperatura, salinidade, MSO ou clorofila-*a*.

Embora as concentrações de nitrato e nitrito tenham sido relativamente baixas em todos os cruzeiros, em outubro de 2005 pode-se observar um grande núcleo com concentração mais alta na região central entre as radias D, E e F (Figura 4.1.20 b e c). A concentração média de nitrito foi de 0,03 µM, com máxima de 0,42µM na estação 19, localizada na radial D (Tabela 4.1.2). Embora a concentração média de nitrato em outubro tenha sido 0,14 (±0,31) µM, com um valor máximo de 1,48 µM na estação 25, localizada próxima à baía de Santos, em diversas estações as concentrações de nitrato estiveram abaixo do limite de detecção, confirmando a característica oligotrófica das águas costeiras.

Em outubro de 2005, a concentração média de fosfato na superfície foi 0,53 µM, com a concentração máxima de 0,82 µM na estação 13, próxima à baía de Santos, na radial C, e a mínima de 0,31 µM na estação 8, na radial B, um pouco mais distante da baía (Figura 4.1.21 a).

O silicato variou entre 0,61 e 13,52 µM, sendo que ambos os valores foram registrados na mesma estação, localizada bem próxima à baía de Santos, em dias subseqüentes (Figura 4.1.21 b), mostrando assim a grande variabilidade diária nas concentrações de nutrientes na região da baía de Santos.

A concentração média de MST foi de 85,79 (± 100,98) mg l^{-1} (Tabela 4.1.2). A menor concentração de MST foi registrada na estação 8, radial B, com 14,85 mg l^{-1}, e a concentração máxima, de 443,4 mg l^{-1} na estação 11, da mesma radial, localizada próximo à entrada da baía. A região mais costeira, ao norte, apresentou concentrações elevadas de MST na superfície, bem como nas estações mais externas das radiais B, C e E (Figura 4.1.22 a). A distribuição das concentrações de MST apresentou-se inversamente associada à temperatura (Figura 4.1.22 a), podendo-se associar os dois

núcleos de altas concentrações das radias B, C e E a núcleos de temperaturas mais baixas. Águas costeiras com temperaturas mais baixas podem, eventualmente, estar associadas a águas de origem continental. O núcleo de altas concentrações de MST observado na estação 2 (Figura 4.1.22 a) esteve associado a águas com temperatura de 22,6^{o} C e salinidade 29,98, indicando que seu aporte foi provavelmente da baía de Santos.

A distribuição do MST e sua fração orgânica (MSO) apresentaram padrão praticamente idêntico, tendo em vista que os aumentos da MSO foram responsáveis pelos aumentos do MST. A mais baixa concentração de MSO (2,75 mg l^{-1}) também foi observada na estação 8, radial B, e a máxima na estação 11 (408,70 mg l^{-1}) dessa mesma radial. Assim como para o MST, um núcleo de alta concentração de MSO foi observado na estação 2 (Figura 4.1.22 b). A grande variabilidade do MSO fica evidente pelo alto desvio padrão da média 60,85(±101,53) mg l^{-1}.

O MSI, ao contrário, apresentou pequena variabilidade em toda a área (Tabela 4.1.2), com núcleo de máxima concentração (44,0 mg l^{-1}) na estação 31, na radial F, (Figura 4.1.22 c) e outro núcleo na entrada da baía com 54,0 mg l^{-1}. Neste período, a zona eufótica apresentou profundidade média de 21,49 m.

Durante o período de 12 a 15 de outubro observou-se um gradiente decrescente nos valores de absorção pela MODC na superfície, da costa em direção a regiões mais distantes da plataforma continental, com os mais altos ocorrendo na região próxima à baía de Santos (Figura 4.1.23).

A clorofila-*a* nas águas de superfície foi a variável que apresentou distribuição mais regular, com um gradiente decrescente da baía em direção às estações mais afastadas da costa (Figura 4.1.24a). Nesta etapa, as concentrações na entrada da baía estiveram em média, acima de 14 mg m^{-3}, o que representa um valor bem elevado, característico de regiões eutróficas. A concentração média de clorofila-*a* para toda a área de estudo foi 3,39 mg m^{-3}, embora este valor tenha sofrido grande influência dos valores altos encontrados na estação 1, localizada na baía, posto que o desvio padrão foi 6,01 mg m^{-3} (Tabela 4.1.2). A menor concentração foi encontrada na estação 7, na parte externa da radial B, ao sul da baía de Santos (0,26 mg m^{-3}). Em toda a região, tanto ao sul como ao norte da área de estudo, concentrações abaixo de 1,5 mg m^{-3} já foram observadas a cerca de 20-25 km a partir da costa.

A concentração de carotenóides apresentou distribuição horizontal superficial muito similar à clorofila-*a*, com exceção de um núcleo com concentração mais alta um pouco mais distante da costa na radial F (Figura 4.1.24b). As concentrações médias, mínimas e máximas dos carotenóides são apresentadas na Tabela 4.1.2.

Como pode ser visto na Figura 4.1.25, nesta etapa, a razão 480:665 apresentou em geral valores inferiores a 2 na superfície. Os valores médio, mínimo e máximo da razão 480:665 são apresentados na Tabela 4.1.2.

4.1.3. Verão – Etapa de Hidrografia – Março de 2006

Neste cruzeiro as coletas foram iniciadas pela porção sul para se evitar o encontro com sistemas frontais previstos no decorrer do período de coleta. Assim, a numeração das secções transversais foi invertida em relação à etapa de setembro de 2005.

Os mapas de distribuição horizontal da temperatura e salinidade na superfície e junto ao fundo (Figuras 4.1.26 a e b e 4.1.27 a e b, respectivamente) indicam, que a coluna de água apresentava-se fortemente estratificada: na superfície as temperaturas oscilaram entre 25,5 e 28° C, enquanto que junto ao fundo verificou-se a presença de águas frias com forte influência da ACAS, avançando até bem próximo à costa, especialmente na porção norte, com a isoterma de 18°C (considerada como limite de águas com influência da ACAS) atingindo o sul da ilha de São Sebastião. A temperatura média observada para o período foi de 23,97 (± 3,92)°C. Foi possível observar novamente um núcleo de temperaturas mais baixas em águas de superfície na porção central da área, próximo às isóbatas de 50 e 70m, de modo similar ao observado em setembro de 2005 (Fig. 4.1.26).

A salinidade na superfície (Figura 4.1.27 a) demonstra influência da AC e AT, enquanto junto ao fundo (Figura 4.1.27 b), verifica-se maior homogeneidade e influência mais forte da ACAS. Nesta etapa, os valores de salinidade foram superiores aos observados em setembro de 2005, com a mínima de 33,9 e máxima de 37.

Os perfis batimétricos das radiais 1, 5 e 9 (Figuras 4.1.28, 4.1.29 e 4.1.30, respectivamente) mostram a progressiva elevação da isoterma de 18°C do sul para o norte. Na radial 1, as águas com 18°C estiveram abaixo dos 70 m ao passo que nas radiais 5 e 9 elas se elevaram para 40 e 30 m aproximadamente. Na radial 9 foi possível observar também a presença de águas com forte influência da AT, nas águas superficiais

da área ao largo. Essa influência também foi perceptível através das isohalinas acima de 36,5 em todo o limite externo da radial 9. As menores salinidades foram observadas nas águas costeiras da radial 9, junto a São Sebastião. A salinidade média para o período foi de 35,27± 0,69 (Tabela 4.1.3).

Nos perfis batimétricos de salinidade, verificou-se maior influência da AT na superfície da radial 1, uma ocupação maior da coluna com água tropical no limite entre a plataforma média e externa nas radiais 5 e 9, com águas de salinidade típica da ACAS penetrando sobre a plataforma bem junto ao fundo até a plataforma interna.

O diagrama T-S para os pares de pontos obtidos (Figura 4.1.31) apresenta um triângulo de mistura bem definido com a presença de águas típicas da AC, ACAS e AT. Nessa ocasião, ao contrário de setembro de 2005, foi detectada intensa mistura entre a AC e ACAS.

As imagens médias semanais de TSM para, aproximadamente, a semana da coleta, (Figura 4.1.32 a e b), mostram que as temperaturas da superfície foram mais altas nesta etapa, apresentando uma distribuição mais homogênea. O mesmo padrão de distribuição foi observado para as semanas que antecederam a coleta em março de 2006 (Figuras 4.1.32 c e d, e Figura 4.1.32 e e f).

A Figura 4.1.33 apresenta os vetores de velocidade e direção do vento para as estações de coleta durante a etapa de 12 a 17 de março de 2006, podendo ser verificado que aproximadamente durante a primeira metade do cruzeiro predominaram ventos de sudeste, enquanto na segunda metade predominaram ventos de nordeste, ambos com pouca intensidade.

Na etapa de março de 2006, as concentrações de amônia foram ainda mais baixas (Tabela 4.1.3) que em setembro de 2005. Nesta etapa, não foram observadas altas concentrações próximas à costa que indicassem aporte originário do estuário. Um núcleo de maior concentração na superfície ocorreu distante da costa, na penúltima estação da radial 9, coincidentemente no mesmo ponto onde foram verificados altos valores de nitrato na coleta de setembro de 2005 (Figuras 4.1.34 a). Estes núcleos de alta concentração distantes da costa ocorreram nas mesmas áreas onde foram observados aumentos no MST (Figura 4.1.36 a e b), podendo assim ter origem comum, possivelmente a partir da fração orgânica.

As concentrações de nitrato observadas na superfície da área de estudo mostram novamente o caráter oligotrófico da região que apresentou apenas um núcleo com concentrações pouco mais elevadas ao largo na radial 5 (Figuras 4.1.34 c). Junto ao fundo, as maiores concentrações observadas estão relacionadas à influência da ACAS. Com relação ao NIT (Figura 4.1.34 e e f), as concentrações estão refletindo principalmente as concentrações de nitrato semelhante ao que ocorreu em setembro de 2005 (Figura 4.1.9 e e f).

Em março de 2006, as concentrações de fosfato foram baixas, com média de 0,30 (± 0,19) μM. Nas águas superficiais os valores situaram-se por volta de 0,2 μM (Figura 4.1.35 a). Junto ao fundo, o padrão de distribuição esteve relacionado com presença de águas da ACAS, com concentrações acima de 0,5 μM (Figura 4.1.35 b) principalmente na porção norte da área.

As concentrações de silicato também foram mais baixas do que as verificadas em setembro de 2005 (Tabela 4.1.3). Na superfície, as concentrações mais altas ocorreram próximas à baía de Santos e à desembocadura do canal de Bertioga (Figura 4.1.35 a), indicando a influência do aporte terrígeno na distribuição deste nutriente. Um núcleo de concentração mais alta também pode ser observado na radial 5, na mesma região onde foi observado um núcleo de alta concentração de MST (Figura 4.1.36 a). No fundo também foram observadas concentrações mais altas próximo à baía de Santos, além de um núcleo na porção central da radial 5 próximo à isóbata de 100 m (Figura 4.1.35 b), onde a concentração máxima foi 15,3 μM. Esse núcleo de silicato coincide com máximos de amônia, fosfato e MST, podendo indicar ressuspensão de material do sedimento devido ao deslocamento da ACAS junto ao fundo (Figura 4.1.36 b).

As concentrações médias de MST na superfície também foram superiores às de setembro de 2005 (Tabela 4.1.3) e os núcleos de maior concentração ocorreram mais distantes da costa, nas radiais 1 e 5 (Figura 4.1.36 a). Altas concentrações também ocorreram próximo à costa de São Sebastião, na radial 1. A concentração média de MST obtida para esta etapa na plataforma foi de 87,30 (±61,58) mg L^{-1}, sendo que cerca de 63% correspondeu à fração orgânica. No fundo, as concentrações mais altas ocorreram próximo à costa, ao longo de toda a paralela 1, com alguns núcleos de concentração um pouco mais alta em estações mais distantes nas radiais 1 e 5 (Figura 4.1.36 b). Na superfície (Figura 4.1.36 a) foi observado um claro gradiente crescente de

sul para norte com valores máximos na penúltima estação da radial 9, coincidindo com o máximo de amônia anteriormente relatado.

A distribuição da absorção pela MODC na superfície é apresentada na Figura 4.1.37, onde pode-se observar maiores valores de absorção na região costeira próxima à baía de Santos e na porção mais a nordeste, próximo à Ilha de São Sebastião. A absorção pela MODC apresenta um gradiente decrescente da costa em direção ao largo na plataforma.

O coeficiente médio de atenuação da luz na coluna de água em março foi cerca da metade do observado em setembro: 0,13 m^{-1}, e a profundidade média da zona eufótica, estimada a partir de medidas da profundidade do disco de Secchi, foi mais elevada, cerca de 40 m (Tabela 4.1.3), refletindo a condição ainda mais oligotrófica da área nesta ocasião. A profundidade da zona eufótica apresentou um gradiente crescente da costa em direção à plataforma continental média e externa (Figura 4.1.38).

Os dados de Cl-*a* total na superfície confirmam esta condição oligotrófica na plataforma adjacente à baixada Santista, já indicada pela distribuição dos nutrientes nessa etapa. As concentrações mais altas de clorofila-*a* na superfície ocorreram próximas a Peruíbe e ao canal de São Sebastião (Figura 4.1.39 a) e, assim como em setembro, o restante da área apresentou biomassa fitoplanctônica bastante baixa. Junto ao fundo, concentrações estiveram acima de 1 mg m^{-3} em toda a área mais interna, com núcleos de até 5 mg m^{-3} verificados nas porções norte e sul, não havendo relação direta com a presença da ACAS (Figura 4.1.39 a), A concentração de clorofila nessa época do ano foi bastante semelhante a setembro, variando de 0,05 a 7,99 mg Cl-*a* m^{-3}, com um valor médio de 0,90 mg Cl-*a* m^{-3}.

As Figuras 4.1.39 c e d, mostram a distribuição das concentrações de carotenóides nas águas superficiais e junto ao fundo, respectivamente. O padrão apresentado pelos carotenóides é idêntico ao observado para a Cl-*a* indicando que as concentrações desses pigmentos acessórios tiveram uma relação direta com a variação na concentração de Cl-*a* total.

A Figura 4.1.40 apresenta a razão 480:665 para esta etapa, onde observa-se grandes áreas com valores acima de 2 ou menores que 1. Os valores médio, mínimo e máximo observados para a razão 480:665 são apresentados na Tabela 4.1.3.

4.1.4. Verão – Etapa de Radiometria – Março de 2006

No período de 23 a 26 de março a temperatura foi mais homogênea em toda área estudada (Figura 4.1.41 a), com média de 28,11°C (Tabela 4.1.4). A salinidade apresentou menores valores próximo à entrada da baía de Santos (Figura 4.1.41 b), porém a média foi mais alta do que a observada em outubro, quando o máximo foi de de 33,4 (Tabelas 4.1.2.e 4.1.4).

Em março de 2006, a ACAS também alcançou a plataforma, chegando próxima à costa em profundidades de até 18 m na estação mais distante, a cerca de 70 km da baía de Santos, como pode ser visto também no perfil vertical da radial D (Figura 4.1.42 a). Através do diagrama T-S (Figura 4.1.44), observa-se que neste período também não foi verificada a presença da AT na área estudada, mas foi observada um volume ainda maior de água provavelmente resultante da mistura entre as massas (AC+ACAS, AC+AT e AT+ACAS).

Os perfis verticais de temperatura e salinidade da radial D (Figuras 4.1.42 a e b) mostram uma coluna d'água mais estratificada, com temperaturas mais homogêneas na superfície e a intrusão da ACAS pelo fundo. Observa-se um forte gradiente vertical de salinidade bem próximo à baía e até aproximadamente 10 km em direção ao mar aberto, a partir de onde a salinidade é mais alta e há pouca variação horizontal e vertical da salinidade.

Esta estratificação ocorrida em março também pode ser observada através dos perfis verticais de temperatura e salinidade da estação 17, a mais externa da radial D (Figura 4.1.43 a e b), onde uma termoclina bastante pronunciada formou-se na ocasião.

De acordo com os vetores de velocidade e direção do vento para as estações de coleta (Figura 4.1.45), durante este período houve uma alternância de ventos de nordeste e sudeste, ambos com fraca intensidade.

Em março de 2006 as concentrações de amônia também foram inferiores às das etapas de primavera, com média de 0,11 μM (Tabela 4.1.4). A concentração mais alta na superfície foi observada próximo à baía de Santos, 0,53 μM, e a mais baixa (0,00 μM) nas estações, 3, 12 e 26, todas localizadas próximas à baía de Santos (Figura 4.1.45 a). Na profundidade do máximo de fluorescência as maiores concentrações ocorreram próximo à baía de Santos, mais distante, na radial D, e na região ao norte da baía, ainda próximo à costa, sugerido origem continental. Um núcleo, possivelmente de origem

remota, entretanto, pode ser observado na estação mais distante da radial B (Figura 4.1.46 b). Assim como em outubro de 2005, em março de 2006 também não foi verificada relação entre os núcleos de mais alta concentração de amônia e altas concentrações de MST.

Em março de 2006 a concentração média de nitrito na superfície foi 0,03 µM, com concentração máxima de 0,42µM na estação 41, localizada na baía de Santos, seguida de 0,40 µM na estação 6, na extremidade da radial A (Figura 4.1.46 e). Na maior parte da área, as concentrações de nitrito foram muito baixas, ou este não foi detectado. A concentração média de nitrato na superfície em março de 2006 foi 0,19 µM (Tabela 4.1.4). Na maior parte das estações as concentrações de nitrato estavam abaixo do limite de detecção (Figura 4.1.46 c e d). A concentração máxima de nitrato em março foi de 1,33 µM na estação 39, localizada na radial H. Mas, de modo geral, os maiores valores foram registrados em toda a radial E, desde a baía até a última estação desta radial, a estação 29. Na profundidade do máximo de fluorescência, tanto o nitrito quanto o nitrato tiveram concentrações um pouco mais altas que na superfície (Figura 4.1.46 d e f), com núcleos de maior concentração ocorrendo próximo à baía, mas também em regiões mais distantes, como na radial E, onde também foram observados núcleos de maior concentração de MST (Figura 4.1.48 a).

A concentração média de fosfato foi 0,30 µM (Tabela 4.1.4), com máxima de 1,42 µM na estação 41, próximo à baía de Santos (Figura 4.1.47 a). Na profundidade do máximo de fluorescência (Figura 4.1.47 b) as concentrações de fosfato foram inferiores às da superfície, com maior concentração na baía e ao longo da radial C e na porção nordeste da área.

A concentração média de silicato na superfície foi 3,54 µM. Assim como o fosfato, a concentração mais alta de silicato ocorreu na estação 41, próxima à baía, com 9,06 µM e a mais baixa na estação 16, a mais profunda da radial C (Figura 4.1.47 c). Na profundidade do máximo de fluorescência (Figura 4.1.47 d) as concentrações foram mais altas que na superfície, com núcleos na estação 1, na baía de Santos, na última estação da radial G e na porção central da área. A concentração média de silicato foi mais baixa neste período, que em relação a outubro de 2005 (Tabela 4.1.2).

As concentrações de MST na superfície foram em geral mais baixas e mais variáveis que em outubro, apresentando média de 55,58 (±60,28) mg l^{-1} (Tabela 4.1.4).

A maior concentração foi registrada na estação 31, na radial F, e a menor concentração foi observada na estação 14, na radial C (Figura 4.1.48 a). Altas concentrações de MST foram observadas distantes da baía e estuário, podendo assim ser de origem remota ou desconhecida. A Figura 4.1.48 b apresenta a distribuição horizontal da concentração do MST na profundidade de máxima fluorescência, indicada pelo o perfil do CTD. As maiores concentrações na profundidade de máxima fluorescência foram observadas nas radiais G e H, mais distantes da baía de Santos, na região mais próxima ao canal de Bertioga.

A maior contribuição no material em suspensão total na superfície é dada pela fração orgânica (MSO), que apresenta o mesmo padrão de distribuição que o MST na área (Figura 4.1.49 a). A concentração média de MSO foi 40,80 mg l^{-1}. Assim como para MST, a concentração máxima ocorreu na estação 31, com 217,75 mg l^{-1} e a mínima na estação 14, com 1,45 mg l^{-1} (Tabela 4.1.4). A contribuição da fração inorgânica na superfície foi bem menor que a fração orgânica (Figura 4.1.49 b), apresentando média de 15,70 mg l^{-1} e concentração máxima de 24 mg l^{-1} na estação 40, na radial H, próxima à baía de Santose mínima de 11,95 mg l^{-1} na estação 21, na radial D, também localizada próxima à baía.

A distribuição da absorção pela MODC na superfície é apresentada na Figura 4.1.50, onde pode-se observar maiores valores de absorção na região costeira próxima à baía de Santos, ao sul na radial A, e na porção nordeste, principalmente na radial E.

Em relação à concentração de clorofila-*a*, similarmente a outubro, em março também foi observado um gradiente bastante regular decrescente da baía em direção às estações mais distantes da costa (Figura 4.1.51 a), com a concentração mais alta de 14,50 mg m^{-3} na estação 1, na baía, e mínima de 0,14 mg m^{-3} na estação 10, na radial B, ainda próximo à baía. Assim como em outubro, pode-se observar que as concentrações mais altas limitam-se às regiões bem próximas à baía. Quando se observa a distribuição da clorofila na profundidade do máximo de fluorescência, em março, (Figura 4.1.51 b), nota-se a ocorrência de um núcleo de alta concentração mais distante da costa, na radial E, associada à alta concentração de nitrito e nitrato (Figura 4.1.46 a e b). Também pode se observar altas concentrações nas estações 2 e 4, na radial A, em direção ao sul da baía.

A concentração dos carotenóides seguiu o mesmo padrão de distribuição da clorofila-*a*, tanto na superfície (Figura 4.1.51 c), quanto na profundidade máxima de clorofila-*a* (Figura 4.1.51 d), com maiores concentrações próximo à costa na superfície, e com núcleos de maior concentração mais distantes, nas radiais C, D, E e G, na profundidade máxima de clorofila. Nesta etapa, na superfície, as concentrações de carotenóides foram inferiores às etapas de primavera, assim como as concentrações de clorofila-*a*.

A razão 480:665 apresentou valores superiores a 2 na superfície para praticamente toda a área (Figura 4.1.52 a) e entre 1 e 2 na profundidade máxima de clorofila-*a* (Figura 4.1.52 b).

4.1.4.1. Abundância fitoplanctônica

Através da contagem do fitoplâncton de rede da etapa de 23 a 26 de março de 2007 foi possível confirmar a ocorrência da floração de *T. erythraeum* observada durante os três primeiros dias do cruzeiro, formando uma extensa mancha "parda" na superfície do mar (Figura 4.1.53 a). Foram consideradas como floração, as estações em que os filamentos de *T. erythraeum* representaram mais que 50% do número total de células. Assim, foi registrada floração em 14 estações oceanográficas (7, 8, 10, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 28, 31, 36 e 37), localizadas na região central da rede de amostragem, correspondendo a uma área de cerca de 1100 km^2. A maior concentração de filamentos por litro foi observada na estação 19, com 113,2 10^{-6} filamentos/l (99%) (Tabela 4.1.5). Na ocasião da floração a superfície da água se encontrava calma e "lisa", com temperaturas entre 27°C e 29°C, mas com forte estratificação vertical (Figura 4.1.41 a), com a presença da ACAS nas camadas de fundo.

Outras florações ocorreram nas estações próximas à baía, onde concentrações de diatomáceas estiveram acima de 7,16 10^{-6} cel l^{-1}, chegando a 221,865 10^{-6} cel l^{-1}. Nas estações 21, 22, 26, 32, 35, 38 e 40 foi observada predominância de *Nitzchia sp,* enquanto nas estações 27 e 30 foram predominantes os gêneros *Rhizosolenia sp*. e *Coscinodiscus sp.*

4.2. Radiometria

4.2.1. Análise dos espectros de refletância da água

Foram obtidos dados simultâneos de refletância pelo espectroradiômetro *in situ*, e remotamente pelo sensor MODIS (em um intervalo de 24 horas da passagem do sensor) apenas para as estações 16, 17 e 18, coletadas em março de 2006, devido à cobertura de nuvens que ocorreu na maior parte do tempo nas duas etapas de coleta (Figura 4.2.1). A figura ilustra, apesar do número reduzido de pontos para comparação, a necessidade de aplicações dos métodos de correção de radiância especular. Nota-se que a subtração da refletância de Fresnel (ρ), foi bastante eficiente, mas a subtração da refletância em 869 nm, para as bandas simuladas do MODIS, e 865 nm, para as bandas simuladas do SeaWiFS, ainda foi necessária, a fim de se alcançar a remoção do efeito especular residual.

Os parâmetros estatísticos descritivos das medidas de refletância obtidas pelo radiômetro *in situ* e pelo sensor MODIS são apresentados na Tabela 4.2.1. De modo geral, observa-se que a refletância nas bandas da região do azul obtidas *in situ,* são em média, mais baixas que as obtidas pelo sensor MODIS, enquanto a partir de 531 nm, os valores obtidos *in situ* são mais altos que os obtidos pelo sensor remoto (Tabela 4.2.1).

Tanto em outubro de 2005 quanto em março de 2006, os espectros mostraram baixos valores de refletância para toda a faixa espectral do visível, como pode ser visto nas Figuras 4.2.1 e 4.2.2, dos espectros de refletância agrupados por dia de coleta. Em outubro de 2005 (Figuras 4.2.2a a 4.2.2d) apresentaram, de modo geral, valores um pouco superiores aos obtidas em março de 2006 (Figuras 4.2.3a a 4.2.3d).

Nos espectros de refletância das estações mais costeiras, tanto em outubro de 2005 quanto em março de 2006, pode-se observar uma diminuição nos valores de refletância entre 400 e 450 nm, ao mesmo tempo em que se observa um aumento da refletância na região do verde (entre 540 e 570 nm). Na maior parte das estações foi observada refletância crescente a partir de 450 nm, e uma queda abrupta da refletância a partir de 551 nm.

As estações mais distantes da costa apresentaram curvas típicas de águas mais oceânicas, com baixa refletância em todo o espectro, diminuindo exponencialmente do azul até a região do IVP, como pode ser visto nos espectros das estações 16, 17, 18 nas duas etapas (Figura 4.2.2b e 4.2.3b).

A Figura 4.2.4 apresenta o diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-*a* (*log*) e a razão Rsr531/551 (*log*) global, obtidas na base de dados do NOMAD, e entre as concentrações de clorofila-*a* (*log*) e a razão Rsr531/551 (*log*) medidas *in situ* durante os cruzeiros de outubro de 2005 e março de 2006 de radiometria, na plataforma continental de Santos. Como pode ser observado, os dados coletados *in situ* mostram concordância com os dados globais, e ambos apresentam uma curva com forma sigmoidal.

4.2.2. Estimativa da clorofila-*a* através de algoritmos globais: OC3, OC2v4, OC4v4

A concentração da clorofila-*a* *in situ* observada nas duas campanhas para as estações com dados simultâneos de refletância da água (n = 49), ficou distribuída entre 0,26 e 16 mg m^{-3} (Tabela 4.2.2), com a maior parte das estações (78%) apresentando concentrações entre 0 e 2 mg m^{-3} (Figura 4.2.4). A concentração de clorofila-*a* estimada pelos algoritmos globais a partir dos dados de refletância obtidos *in situ* se distribuiu entre 0,27 e 5,58 mg m^{-3}, com a maior parte das estações entre 0 e 2 mg m^{-3} (Figura 4.2.5), assim como a clorofila medida *in situ*. O algoritmo OC3 obteve concentrações distribuídas num intervalo um pouco maior que o OC2v4 e OC4v4 (0,30 a 5,58 mg m^{-3}). Enquanto o OC2v4 obteve valores num intervalo mais restrito que os demais (0,42 a 4,69 mg m^{-3}).

Os três algoritmos avaliados tiveram bom desempenho para todo o conjunto de dados (Figura 4.2.6), sendo o melhor ajuste obtido pelo algoritmo OC2v4, seguido pelo OC3 e OC4v4 (Tabela 4.2.3). O menor EMQ (Erro Médio Quadrático) foi obtido pelo OC3 seguido pelo OC4v4 e OC2v4 (Tabela 4.2.3).

Os três algoritmos apresentam melhor desempenho para concentrações de clorofila-*a* entre 0 e 2,5 mg m^{-3}, embora tenham superestimado as concentrações de clorofila-*a* neste intervalo de valores, e subestimado as concentrações superiores a 2,5 mg m^{-3} (Figura 4.2.6).

Foi observada uma diferença significativa no desempenho dos algoritmos para cada época de coleta (outubro de 2005 e março de 2006), sendo que os três algoritmos avaliados tiveram melhor ajuste e menores erros em março de 2006 em relação a outubro de 2005 (Figuras 4.2.6b e 4.2.6c). Em março de 2006 o OC4v4 foi o que

alcançou melhores resultados, com um r^2 de 0,9193, e um EMQ de 0,0772, enquanto em outubro de 2005, o mesmo obteve um r^2 de 0,7443 e um EMQ de 0,1079 (Tabela 4.2.3).

Os resíduos das estimativas de clorofila-*a* pelos algoritmos globais (desvios entre as concentrações de clorofila-*a* estimadas pelos algoritmos e as medidas *in situ*) apresentaram-se relacionados aos demais componentes ópticos presentes na água (Carotenóides, MODC, MST, MSO e MSI), além da própria variável independente, no caso, a clorofila-*a* (Figuras 4.2.7 a 4.2.12). O algoritmo OC2v4 é o mais afetado pelas variações dos demais componentes ópticos da água.

O diagrama de dispersão entre a clorofila-*a* medida *in situ* e os resíduos das estimativas dos algoritmos globais (Figura 4.2.7a) mostra que os erros de estimativa são dependentes da concentração de clorofila-*a* e são, de modo geral, positivos para clorofila entre 0 e 2,5 mg m^{-3}, ou seja, o algoritmo superestima, como visto anteriormente, e subestima para concentrações de clorofila-*a* superiores a 2,5 mg m^{-3}. O algoritmo OC2v4 é o mais dependente da concentração de clorofila-*a in situ*. Também pode-se observar que, com exceção do algoritmo OC4v4, esta relação é maior em março de 2006 (Figura 4.2.7b) que em outubro de 2005 (Figura 4.2.7c). A concentração de clorofila-*a* variou pouco entre as duas etapas de coleta, mas a relação entre a clorofila-*a* e os demais componentes ópticos (carotenóides, MODC, MST, MSO e MSI) sofreu alterações entre as duas etapas de coleta.

Observamos também uma relação positiva entre os resíduos dos algoritmos e a proporção Carotenóides/Clorofila-*a* (Figura 4.2.8a). Assim como para a clorofila-*a*, esta relação é muito mais evidente em março de 2006, que em outubro de 2005 (Figuras 4.2.8b e 4.2.8c). Observa-se uma tendência dos algoritmos superestimarem a concentração de clorofila-*a* quanto maior a proporção carotenóides/clorofila-*a*, e subestimarem quanto menor esta proporção. A proporção carotenóides/clorofila foi maior em março de 2006 que em outubro de 2005. Em março de 2006 também foi observada uma intensa floração de *Trichodesmium erythraeum* durante os três primeiros dias de coleta (Carvalho *et al*., 2008), o que pode ter contribuído para o aumento da concentração de carotenóides neste período, além da interferência de pigmentos como a ficocianina e ficoeritrina, que possuem picos de absorção em torno de 495, 545 e 565 nm .

O MST e suas frações orgânica e inorgânica (MSO e MSI respectivamente), também apresentaram relação com os resíduos das estimativas de clorofila-*a* pelos algoritmos globais (Figuras 4.2.9 a 4.2.11). Quanto maior a proporção MST/Clorofila-*a*, MSO/Clorofila-*a* e MSI/Clorofila-*a*, maiores são os erros de superestimativa pelos algoritmos. A fração inorgânica (MSI) do MST é a que mais interferiu na estimativa da clorofila-*a* pelos algoritmos (Figura 4.2.11), apresentando maior relação com os erros de estimativa que a fração orgânica (Figura 4.2.10), para os três algoritmos testados. Observa-se uma forte tendência dos algoritmos superestimarem a concentração de clorofila-*a* quanto maior a proporção MSI/clorofila-*a* na água. Essa relação entre os erros e a concentração de MST, MSI e MSO foi muito mais evidente em março de 2006 que em outubro de 2005, embora a concentração destas variáveis tenha sido maior em outubro de 2005 que em março de 2006.

Os resíduos das estimativas também se mostraram dependentes da proporção entre a MODC e a concentração de clorofila-*a* (Figura 4.2.12). Os erros de superestimativa se tornam maiores quanto maior a razão MODC/Clorofila-*a*. Esta dependência dos erros em relação à razão MODC/Clorofila-*a* é mais evidente em outubro de 2005 do que em março de 2006. Em outubro de 2005 a concentração de MODC foi maior que em março de 2006, e a concentração de clorofila-*a* levemente menor (Tabela 4.2.4).

4.2.3. Algoritmo Regional para estimativa de clorofila-*a*

Das 32 estações utilizadas para o desenvolvimento do algoritmo regional, apenas uma foi identificada como *outlier* e eliminada das análises posteriores, a estação 17. A Tabela 4.2.5 apresenta os coeficientes de correlação, determinação, p-*value* e a equação da regressão entre a concentração de clorofila-*a* (*log* transformada) e as razões de bandas azul/verde e verde/verde: 412/551, 443/551, 488/551, 531/551; e a razão máxima entre as razões 488/551 e 531/551. A Figura 4.2.13 apresenta os diagramas de dispersão entre as razões de bandas (*log*) e a concentração de clorofila-*a* ajustados linearmente. A distribuição dos pontos (*log* Cl-*a* – *log* Razão) apresenta claramente um padrão sigmoidal, principalmente para as razões 488/551, 531/551 e a razão máxima entre as razões 488/551 e 531/551 (Figura 4.2.13 c, d e e), que apresentam distribuição menos dispersa.

A melhor correlação com a clorofila-*a* (*log*) foi obtida pela razão 531/551 (*log*) (Figura 4.2.13d), com um coeficiente de determinação de 0,7988 (Tabela 4.2.5), sendo assim utilizada para o desenvolvimento de um algoritmo regional.

Quando foram analisadas as relações entre a razão 531/551 (*log*) e concentração de clorofila-*a* (*log*) separadamente, para cada etapa de coleta, observou-se um melhor ajuste estatístico para o conjunto de dados de março/2005, com um $r^2 = 0,94$ (Tabela 4.2.5 e Figuras 4.2.14a e 4.2.14b). Isto pode ser decorrente da maior concentração dos demais componentes ópticos na água em outubro de 2005 que em março de 2006.

Os ajustes polinomiais mostram ser mais adequados à relação concentração de clorofila-*a* (*log*) e razão 531/551 (*log*) que o linear. Entre eles, o melhor ajuste foi obtido com a utilização do polinômio de quarta ordem (r^2=0,88) (Figuras 4.2.15a 4.2.15b e 4.2.15c).

Quando foram testadas as equações obtidas anteriormente (linear e polinomiais de segunda, terceira e quarta ordem) para a estimativa de clorofila-*a* (Tabela 4.2.6) com os dados das 17 estações, o melhor desempenho foi obtido pelo algoritmo linear (r^2=0,8461), resultado muito próximo ao obtido pelo polinômio de quarta ordem (r^2 = 0,8424) (Tabela 4.2.6). Apesar de o algoritmo linear apresentar melhor coeficiente de determinação, o polinômio de quarta ordem apresentou o menor EMQ (0,0418), seguido dos polinômios de terceira e segunda ordem, enquanto o algoritmo linear apresentou o maior EMQ entre os algoritmos regionais.

Os algoritmos globais OC4v4, OC2v4 e OC3 também foram avaliados no conjunto de dados com 17 estações. Entre os três, o OC4v4 foi o que apresentou melhor desempenho, com menor EMQ e maior coeficiente de determinação, enquanto o OC2v4, apesar de ter obtido um coeficiente de determinação um pouco superior ao OC3, apresentou o maior EMQ (Tabela 4.2.6).

Os diagramas de dispersão entre a concentração de clorofila-*a* medida *in situ* e as estimadas pelos algoritmos regionais e globais, a partir dos dados de refletância obtidos *in situ*, são apresentados na Figura 4.2.16.

A variável independente, a clorofila-*a*, não esteve relacionada aos erros de estimativa do algoritmo regional polinomial de quarta ordem (Figura 4.2.17b), assim como os demais componentes ópticos da água (carotenóides, MODC, MST, MSO e MSI), que apresentam um padrão mais "espalhado" que os diagramas de dispersão entre os erros

do algoritmo OC3 e os componentes ópticos da água. O algoritmo global, OC3, mostrou ter seus erros de estimativa dependentes da variável independente, a clorofila-*a* (Figura 4.2.17a) e da razão entre os demais componentes e a clorofila-*a*, principalmente a razão MODC/Clorofila-*a* (Figura 4.2.17e), e a razão MSI/Clorofila-*a* (*log*) (Figura 4.2.18e). Assim como visto anteriormente para todo o conjunto de dados, os erros de subestimativa são maiores quando as concentrações de clorofila-*a in situ* são mais altas, enquanto os erros de superestimativa são maiores quando as concentrações de clorofila-*a* medidas *in situ* são mais baixas. Em relação à MODC, os erros de superestimativa são maiores quanto maior a concentração de MODC (Figura 4.2.17e), assim como para o MST, principalmente a fração inorgânica (Figura 4.2.18e).

4.3. Imagens MODIS

4.3.1. Aquisição das imagens MODIS

Uma imagem do sensor MODIS, nível 1A - radiâncias não calibradas, com 1 km de resolução, como é adquirida diretamente do DAAC/GSFC/NASA, é apresentada como exemplo na Figura 4.3.1. A figura corresponde à radiância ascendente da água nas bandas 10, 11 e 12, centradas em 488, 531 e 551 nm respectivamente (a, b e c, respectivamente), adquirida em 17 de março de 2006 às 16:30 horas (GMT), para a região da plataforma continental em frente à Santos.

4.3.2. Processamento das imagens: L1 para L2

4.3.2.1. Correção atmosférica

A correção atmosférica utilizando o método MUMM, desenvolvido por Ruddick *et al*. (2000) apresentaram melhores resultados para a área de estudo que a correção padrão do Seadas. As imagens de refletância obtidas pelos dois métodos são apresentadas na Figura 4.3.3 (bandas centradas em 412, 488, 531 e 551 nm). A diferença entre as imagens produzidas pelos dois algoritmos é sutil, mas é possível observar valores de refletância um pouco mais altos para as bandas corrigidas pelo método MUMM, especialmente nas regiões próximas à costa (Figura 4.3.3). O algoritmo padrão para correção das imagens SeaWiFS, implementado no Seadas, resultou em valores de refletância mais baixos e algumas vezes negativos, principalmente para as bandas do azul, não sendo possível calcular a concentração de

clorofila-*a* pelo algoritmo global OC3 para estes pixels, aos quais são atribuídas "máscaras" (Figura 4.3.4).

Embora o coeficiente de determinação entre o coeficiente de atenuação da água estimado pelo MODIS em relação ao medido *in situ* (Kd *in situ* – K488 MODIS) tenha sido maior para o método de correção padrão do SeaWiFS, o critério adotado, menor EMQ foi menor quando se utilizou o método MUMM, como pode ser visto na Tabela 4.3.1 e no diagrama de dispersão (Figura 4.3.2).

4.3.2.2. Produtos Nível 2

Foi possível obter dados de refletância do sensor MODIS "simultâneos" aos dados de clorofila-*a in situ* para 26 estações de coleta, utilizando a janela temporal de 24 horas (± 24 horas do horário da coleta *in situ*). Entre estas 26 estações, 23 correspondem ao cruzeiro de hidrografia e 3 estações correspondem ao cruzeiro de radiometria, ambos realizados em março de 2006. Para as demais estações, destes e dos outros dois cruzeiros realizados na plataforma continental de Santos não foi possível obter dados do sensor MODIS devido à cobertura de nuvens.

As curvas de refletância para cada estação, obtidas em cada imagem são apresentadas na Figura 4.3.5 (Figuras 4.3.5a a 4.3.5e). Grande parte das curvas apresenta forma típica de águas oceânicas (Caso I), com alta refletância na região do azul, diminuindo exponencialmente em direção aos comprimentos de ondas mais longos. Algumas exceções são as curvas referentes às estações 11, 12 e 13 (Figuras 4.3.5a e 4.3.5b), localizadas próximas à costa, na região em frente a Itanhaém, e as estações 35, 39 e 40 (Figuras 4.3.5c), localizadas próximas ao Canal e Ilha de São Sebastião, que exibem maior refletância nas bandas do verde (531 e 551).

Os produtos obtidos no processamento das imagens de nível 1A para nível 2, utilizando algoritmos globais (Clorofila-*a*, coeficiente de atenuação difusa da água - K488 e Material em Suspensão Total – MST) são apresentados na Figura 4.3.6 (Figuras a, b e c, respectivamente), para a imagem adquirida no dia 17 de março de 2006 às 16:30 horas (GMT).

Entre as variáveis obtidas pelos algoritmos globais a partir dos dados MODIS, as mais correlacionadas com os dados obtidos *in situ* foram, a clorofila (r = 0,79) e o

coeficiente de atenuação da água (r = 0,77). O MST não apresentou nenhuma correlação (Tabela 4.3.2).

4.3.3. Análise dos algoritmos regionais aplicados às imagens MODIS

Dos algoritmos regionais para estimativa de clorofila-*a* propostos no item anterior (4.2), o que apresentou melhor desempenho foi o algoritmo polinomial de quarta ordem (Figura 4.3.7d), que obteve um coeficiente de regressão com as concentrações de clorofila medidas *in situ* de 0,68 e um EMQ de estimativa de 0,0285. Este resultado obtido pelo algoritmo polinomial de quarta ordem, utilizando a razão 531/551 foi apenas um pouco superior ao obtido pelo algoritmo global para as imagens MODIS, o OC3 (r^2=0,62 e EMQ=0,0361) (Figura 4.3.7e), como pode ser visto na Tabela 4.3.3.

O algoritmo linear, apesar de ter obtido um bom ajuste na regressão com a clorofila-*a* medida *in situ* (0,5314), apresentou um maior EMQ (0,5904).

A maior parte dos valores de concentração de clorofila-*a* medidos *in situ* para este conjunto de dados (n = 26) está entre 0 e 1 mg m^{-3}, no qual há apenas uma estação com concentração de clorofila-*a* superior a 1 mg m^{-3}, a estação 11, da etapa de hidrografia de março de 2006, com 1,03 mg m^{-3} (Figura 4.3.8). As concentrações de clorofila-*a* estimadas pelos algoritmos regionais linear, polinomial de terceira e polinomial de quarta ordem também estiveram dentro deste intervalo. O algoritmo global OC3 também estimou a maior parte das concentrações de clorofila neste intervalo, com exceção de uma estação, a estação 11, com 1,03 mg m^{-3} de clorofila-*a* medida *in situ* e estimada pelo OC3 como acima de 3 mg m^{-3} de clorofila-*a* (Figura 4.3.8). Isto indica que o OC3 não apresenta bom desempenho em médias e altas concentrações de clorofila-*a*, superiores a 1 mg m^{-3}. Também foi observado que para uma estação com concentração de clorofila-*a* superior a 3 mg m^{-3} o algoritmo não obteve valor de concentração de clorofila-*a*, atribuíndo "máscara" ao pixel correspondente à estação (valor nulo).

Para os dados de refletância das imagens, a razão 488/551 (*log*) foi mais correlacionada com a concentração de clorofila-*a* (*log*) que a razão 531/551 (*log*) (Figura 4.3.9). Em baixas concentrações de clorofila (inferiores a 1,0 mg m^{-3}), como é o caso da base de dados utilizadas nesta análise (n = 26), a razão 488/551 apresenta melhor desempenho que a 531/551.

Os erros de estimativa dos algoritmos não apresentaram relação com a clorofila-*a* e com nenhum dos demais componentes opticamente ativos na água, como carotenóides, MODC, MST, MSO e MSI, ou com as razões entre os componentes e a clorofila-*a* (proporção do componente em relação à concentração de clorofila-*a*).

5. Discussão

Apesar dos dados de campo não serem sinópticos, a apresentação dos resultados em forma de mapas de distribuição horizontal e vertical permitiu uma interpretação a respeito das principais feições oceanográficas em mesoescala espacial e escalas temporais de semana para temperatura e clorofila, (tais como gradientes horizontais perpendiculares à costa ou a intrusão de massas de água superficiais), que foram confirmadas através de imagens sinóticas destas variáveis obtidas por sensores remotos para o período de estudo. Assim, a interpretação das demais variáveis através de mapas de distribuição horizontal também foi admitida para essa escala temporal.

A estrutura hidrográfica da plataforma apresentou diferenças sazonais bem acentuadas. No início da primavera (setembro e outubro de 2005) a temperatura média da superfície esteve relativamente baixa e a coluna de água homogênea, característica de um predomínio da AC na Plataforma Continental Sudeste, conforme descrito por Miranda, 1982, Matsuura (1986), Aidar *et al*. (1993), Castro *et al.*, (1987), Campos *et al*. (1996), Gianesella (2000), Castro *et al*. 2006, entre outros. Como pode ser visto no diagrama T-S e nos mapas de distribuição de temperatura e salinidade houve o predomínio da AC sobre a região costeira mais interna, embora tenha sido verificada também a presença da ACAS na região profunda, nas estações mais externas da plataforma, tendo em vista que a temperatura mínima registrada foi 10,87°C, no fundo, na estação 50 (Figura 3.2a), ao sul da área de estudo (Figura 4.1.5). Também foi observada a presença da AT na região mais externa (últimas estações das radiais 1 e 9, que se misturou com a AC, nas camadas superficiais e meio da coluna de água em direção à costa. O que se observa nos perfis verticais de temperatura e salinidade das radiais perpendiculares à linha de costa é a intrusão da AT no meio da coluna de água, se misturando com a AC, mas criando uma barreira para a mistura entre a ACAS e a AC. Esta situação é bem clara nos perfis verticais das radiais 1 e 9, enquanto sobre a radial 5 não é possível afirmar, devido a ausência de pontos na região central da rede de amostragem. Esta ausência de mistura entre AC e ACAS também é evidenciada no diagrama TS dessa ocasião. Neste período, a ACAS não chegou muito próxima à costa e também não alcançou a zona eufótica, não exercendo seu papel eutrofizador sobre produtividade primária da região, como evidenciado pelos resultados de biomassa fitoplanctônica em termos de clorofila-*a*.

Os resultados de temperatura e salinidade obtidos na coleta de setembro de 2005 (início da primavera), associados às imagens de TSM obtidas pelo sensor MODIS na semana da coleta, bem como nas duas semanas anteriores (Figura 4.1.8), mostram que a região sofria influência de um aporte costeiro de águas superficiais mais frias, que são também menos salinas. Estas águas são provenientes do sul, conforme reportado por diversos autores (Campos *et al*., 1996; Sunyé & Servain, 1998; Stevenson *et al*., 1998; Lentini *et al*., 2001; Campos *et al*., 2008), e apresentam caráter sazonal. Segundo Campos *et al*. (1996), através de análise de séries temporais de imagens de TSM, estas intrusões de águas mais frias sobre a plataforma continental sudeste, no inverno, são provenientes da plataforma argentina e uruguaia, impulsionadas pelos ventos de quadrante sul/sudoeste e podem chegar até o norte do Estado de São Paulo. Esta hipótese é reforçada pelas imagens TSM apresentadas na Figura 5.1 e pelos dados de salinidade e temperatura obtidos em campo. As imagens de TSM (Figura 5.1) mostram um padrão bastante similar ao obtido *in situ*, indicando que essa situação não foi uma condição de transição, mas sim característica do período: águas mais frias (temperaturas < 20 ^{o}C) provenientes do sul próximas à costa alcançaram a porção sul/sudoeste da área de estudo, enquanto temperaturas ligeiramente mais elevadas foram observadas na área costeira principalmente mais ao norte da área de estudo, próximo à Ilha de São Sebastião.

Durante as coletas de março de 2006, as temperaturas superficiais se apresentaram bastante elevadas, com maior influência da AT na superfície e a presença ACAS nas camadas mais inferiores, com a coluna de água bem estratificada, situação típica de verão, conforme já detectado por outros autores na plataforma continental sudeste (Miranda, 1982; Matsuura, 1986; Castro Filho *et al.*, 1987; Saldanha-Corrêa, 1999, Gianesella, 2000; Castro Filho *et al.*, 2006, dentre outros). Neste período, a ACAS alcançou regiões bem próximas à costa, chegando a cerca de 20 km da baía de Santos e atingindo profundidades de até 20 m. Neste período foi observada mistura entre as três massas d´água presentes (AT+ACAS, AC+ACAS e AT+AC), como pode ser visto no diagrama T-S do período (Figura 4.1.6). Em março de 2006, além das altas temperaturas superficiais (máxima de 28,3 ^{o}C), observou-se um gradiente decrescente de temperatura perpendicular à costa na região próxima ao fundo, onde as mínimas chegaram a 9,9^{o}C. A imagem de TSM média semanal (Figura 5.2) para o período da coleta e também para as semanas que a antecederam, evidenciam as altas temperaturas

superfíciais em toda a plataforma continental, maiores na região da PCI, decrescendo em direção à PCM. Neste período, as imagens também não indicam a intrusão de águas mais frias e menos salinas na região, provenientes do sul, como o observado no início da primavera.

A intrusão da ACAS sobre a plataforma continental tem sido apontada como o mais significativo processo para a fertilização da zona eufótica nas águas da plataforma sul e sudeste do Brasil durante o verão, como observado por diversos autores (Aidar *et al*., 1993; Gaeta *et al*, 1999; Gianesella, 2000) e confirmado por Saldanha-Corrêa & Gianesella (2004) através de bioensaios com águas da AC e ACAS sob distintas condições de luz. Entretanto, Saldanha-Corrêa (1999) também verificou que nem sempre a mera presença da ACAS sobre a plataforma é suficiente para promover o processo de eutrofização, sendo que duas condições são necessárias: que a ACAS seja encontrada dentro da zona eufótica por um período de alguns dias, para permitir o desenvolvimento de suaspopulações sob ação da luz ou que sofra um processo de mistura turbulenta com a AC. De acordo com Saldanha-Corrêa (1999), o maior incremento de biomassa fitoplanctônica é resultado da mistura da ACAS com AC. Nesta etapa de coletas, em diversas estações de amostragem, a ACAS foi observada dentro da zona eufótica. Mas sua influência não foi perceptível sob o aspecto nutricional ou de desenvolvimento fitoplanctônico nas águas superficiais durante o verão de 2006, apesar de sua aproximação da costa da costa,. Apenas na região bem costeira junto ao fundo foram observados valores mais elevados de clorofila, em função de ainda estar na zona eufótica. Na região mais externa, a ACAS permaneceu em geral abaixo da zona eufótica. Segundo Gianesella & Saldanha-Corrêa (2008), quando sob forte estratificação, o enriquecimento das camadas superficiais ocorre por meio de difusão molecular através do gradiente de densidade entre camadas, um processo lento. Ao contrário, na presença de processos turbulentos, o contato entre as massas de água intensificam as trocas de propriedades, tornando a intrusão de nutrientes na camada de mistura mais significativa. Saldanha-Corrêa (1999) verificou uma forte advecção da ACAS, ao sul da Ilha de São Sebastião, durante uma estação fixa de primavera. Neste evento, a ACAS ocupou a metade inferior da coluna de água, porém não foi verificada instabilidade dinâmica e não houve mistura entre águas da camada de mistura e ACAS, portanto, sem efeito fertilizador. Desta forma, conclui-se que mesmo quando a ACAS atinge áreas mais rasas da plataforma, o aporte de nutrientes novos para a camada de

mistura pode ser limitado apenas aos processos difusivos, sendo portanto pouco significativos.

De modo geral, a plataforma continental ao largo de Santos apresentou baixas concentrações de praticamente todos os nutrientes analisados, com forte limitação de nitrogênio, tanto na primavera como no verão.

As concentrações de amônia na primavera estiveram ligeiramente mais elevadas que no verão. Na primavera, as mais altas concentrações foram observadas nas regiões próximas à baía de Santos e ao canal de São Sebastião, e um núcleo com concentração mais elevada na superfície foi observado na estação mais distante da radial mais ao norte, que pode ser relacionado à presença de MSO. Este aporte de nutrientes e material em suspensão em regiões mais distantes, na plataforma continental média pode ser decorrente da recirculação entre as águas da PCI e a PCM, como verificado por Castro *et al*. (2008). Segundo os autores, a direção da corrente na Plataforma Continental Interna (PCI) é predominantemente para NE, devido à ação da forçante baroclínica (descarga de água com baixa salinidade). As inversões de direção de corrente de NE para SW só ocorrem quando há ventos intensos de NE-E soprando por períodos relativamente longos (> 1-2 dias). Ao contrário, a direção das correntes na Plataforma Continental Média (PCM) ao largo da Baía de Santos é predominantemente para SW, devido à ação dos ventos de NE-E. Essa circulação inverte para NE imediatamente após a passagem de frentes frias intensas e persistentes. Quando as correntes na plataforma interna (PCI) fluem para NE e na plataforma média (PCM) para SW, pode haver recirculação imediatamente ao sul e a leste da Ilha de São Sebastião. Nessa recirculação, águas que se deslocam para NE na PCI defletem e passam a deslocar-se para SW mais ao largo, já na PCM. Essa recirculação pode explicar as maiores concentrações de alguns nutrientes (amônia, fosfato e silicato) e MST em regiões mais distantes, já na plataforma média.

A concentração média de amônia na primavera foi próxima à observada na região mais ao norte, em Ubatuba (Aidar *et al*., 1993), mas superior à observada em São Sebastião (Gianesella & Saldanha-Corrêa., 2003) (Tabela 5.1).

No verão, foram detectados alguns núcleos de concentrações ligeiramente mais altas próximo à baía de Santos e canal de São Sebastião, na superfície e fundo. Um núcleo de concentração mais alta foi observado na superfície, na estação mais externa

da radial 1, que, assim como na primavera, esteve associada a um núcleo de maior concentração de MSO, possivelmente decorrente da recirculação entre as águas da PCI e PCM, como visto na etapa anterior. No verão, a concentração média de amônia foi inferior à observada na região mais ao norte da plataforma, em Ubatuba e São Sebastião (Tabela 5.1).

As concentrações de amônia observadas na área de estudo foram baixas, indicando que, em termos de N-*a*moniacal, ainda que alguns núcleos de maiores concentrações tenham sido verificados na superfície bem próximo à entrada da baía de Santos e ao sul do Canal São Sebastião, as águas apresentaram uma característica oligotrófica.

As concentrações de nitrato estiveram na maior parte das estações abaixo de 1 µM, na superfície, durante a primavera e o aporte de nitrato esteve fortemente vinculado à influência da ACAS nas camadas mais profundas. As exceções foram a região em torno da entrada da baía de Santos, que apresentou uma concentração de nitrato um pouco mais alta, refletindo um possível aporte da baía, e um núcleo com concentração de nitrato mais elevada na superfície, em uma região mais distante da costa, na radial mais ao norte, o qual é coincidente com maior concentração de amônia e de MSO, sugerindo um possível processo de nitrificação, como já observado por Gianesella *et al*. (1996) na mesma região. Nesta ocasião não foi verificada mistura com AC.

No verão, toda a superfície apresentou concentrações de nitrato inferiores a 1 µM, enquanto no fundo foram observadas concentrações entre 1 e 6 µM, num gradiente crescente de concentração em direção a maiores profundidades e menores temperaturas do fundo, claramente relacionadas à intrusão da ACAS.

Em ambas as épocas, as concentrações médias de nitrato observadas foram inferiores às observadas em trabalhos anteriores na plataforma ao largo de São Sebastião e Ubatuba (Tabela 5.1).

A distribuição nitrogênio inorgânico total refletiu principalmente as concentrações de nitrato em ambas as ocasiões, posto que as concentrações de amônia foram relativamente muito baixas. Esta situação também foi semelhante à observada por Aidar *et al.* (1993) e Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003).

Durante a coleta da primavera foram observadas baixas concentrações de fosfato tanto na superfície quanto no fundo, e apenas um único núcleo com

concentração superior a 1 μM foi observado na estação mais distante da costa, na radial ao sul, fundo, associado às águas mais frias da ACAS, que é também uma importante fonte de fósforo. As concentrações de fosfato foram baixas também no verão, com as maiores concentrações ocorrendo na estação mais profunda da radial norte, fundo, também associado à presença da ACAS. As concentrações médias de fosfato tanto na primavera como no verão são muito próximas às observadas para a região da plataforma ao largo de Ubatuba e São Sebastião (Tabela 5.1).

O silicato apresentou núcleos de altas concentrações na primavera. Na superfície, em frente à baía de Santos, e na região bem costeira na região norte da área de estudo, sugerindo aporte continental. Observa-se também um núcleo com maiores concentrações de silicato na porção sudeste da área de estudo, concordante com valores mais baixos de salinidade e de temperatura da superfície, embora essas altas concentrações de silicato também tenham ocorrido no fundo. Esse padrão de distribuição do silicato está de acordo com a hipótese da intrusão de águas mais frias e menos salinas provenientes do sul, com grande contribuição da água doce proveniente do rio da Prata e da Lagoa dos Patos (Campos *et al*., 2008). De acordo com Braga *et al*. (2008), o silicato foi o principal traçador do aporte de água doce na região compreendida entre o Mar da Prata e Itajaí (SC), na plataforma continental do Atlântico Sul-Sudoeste. No verão, as concentrações de silicato foram inferiores às da primavera, com maiores concentrações na superfície próximo à baía de Santos e canal de São Sebastião, originárias do estuário, e em regiões mais distantes, reforçando a hipótese de recirculação das águas da plataforma interna para a plataforma média, nesse período mais chuvoso. Junto ao fundo foi observado um núcleo de mais alta concentração em uma região mais distante, na plataforma média, relacionado às águas mais frias da ACAS.

As concentrações de silicato na região ao largo da plataforma de Santos foram superiores às verificadas em estudos anteriores na porção norte do litoral de São Paulo, tanto na primavera como no verão (Tabela 5.1), o que deve ser decorrente da maior contribuição local de água doce e também à intrusão da pluma do Rio da Prata, conforme discutido acima (Campos *et al*., 2008, Braga *et al*., 2008).

É provável que a ocorrência de afloramentos da ACAS seja mais esporádica na área de estudo que na região mais ao norte decorrência da maior largura da plataforma nesta região.

Nos trabalhos de Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003, 2008), na região da plataforma de São Sebastião, e de Aidar *et al*. (1993) na região da plataforma continental de Ubatuba, as concentrações médias de nitrato, cuja principal fonte é a ACAS, foram superiores às encontradas na região de Santos, em todas as épocas estudadas (Tabela 5.1) e as concentrações de fosfato foram similares. Em relação ao silicato, entretanto, que tem como importante fonte a drenagem continental, maiores concentrações são observadas na plataforma de Santos. Observa-se assim, que na região da plataforma em frente a Santos, a ACAS, apesar de ser detectada, não exerceu tanta influência na concentração de nutrientes sobre a plataforma. Entretanto, o desenvolvimento do fitoplâncton comparado às regiões adjacentes, como em São Sebastião e Ubatuba, foi maior no inverno em Santos que nessas duas regiões e no verão, maior do que em Ubatuba. É possível que a explicação para este desenvolvimento ligeiramente maior esteja associado às altas concentrações de matéria orgânica presentes em Santos, que podem ter um papel bioestimulante para o fitoplâncton. De fato, Saldanha-Corrêa & Gianesella (2004) verificaram que a mistura de AC com ACAS apresentou maior desenvolvimento do fitoplâncton do que a própria ACAS em condições similares de iluminação e temperatura. Tais resultados seriam decorrentes da presença de micronutrientes bioestimulantes presentes na água costeira.

É interessante lembrar que os valores de concentração de clorofila-*a* e carotenóides podem ter sido subestimados nas águas superficiais, já que nas duas etapas foram visíveis *in situ* florações de *Trichodesmium erythraeum* (Figura 4.1.59). Estes organismos, quando em floração, se agregam formando uma "nata" na superfície da água que se rompe quando os amostradores tradicionais atingem a superfície da água, impossibilitando uma coleta adequada, provocando a subestimativa da biomassa real. Diversos autores discutem a melhor forma de amostrar nessas condições, mas nenhuma delas é considerada totalmente eficiente (Tyrrel *et al*, 2003). A floração observada na etapa de radiometria de março de 2006 foi quantificada no presente estudo a fim de se tentar correlacionar a floração com os dados de refletância da água. A clorofila-*a*, que representa o principal pigmento desse organismo, é acompanhada por pigmentos acessórios, tais como carotenóides, ficobilinas, ficocianinas e ficoeritrinas, similares às algas rodofíceas, o que confere uma cor marrom à floração (Sarangi *et al.*, 2004). A freqüência de florações de *Trichodesmium sp* na região costeira de Santos é outro aspecto que deve ser melhor investigado, uma vez que florações foram registradas nas

duas etapas e anteriormente por outros autores na plataforma continental sudeste (Gianesella-Galvão *et al*.,1995; Siqueira *et al*., 2006).

Na etapa da primavera de 2005, a razão 480/665 indicou condições de boa disponibilidade nutricional intracelular para o fitoplâncton na porção central da área de estudo, enquanto nas porções sul e externa da radial 1 houve pontos com valores bem próximos ou até superiores a 2, indicando que algum estresse nutricional estava ocorrendo. Segundo Heath *et al*. (1990), de acordo com experimento de campo e laboratório, valores entre 0,5 e 1,5 para a razão 480/665 indicam que as células fitoplanctônicas se encontram em bom estado fisiológico. Enquanto células submetidas a alguma deficiência nutricional apresentam razões por volta de 2,0 e quando sob depleção de algum nutriente, estes valores se apresentam acima de 2,4. Esta razão foi calculada a partir das absorbâncias a 480 e 665 nm determinadas por ocasião das análises de clorofilas e carotenóides.

Na etapa do verão de 2006, observou-se grandes áreas com valores acima de 2, assim como inferiores a 1, indicando alguma deficiência nutricional na região, neste período. Da mesma forma, durante a etapa de radiometria, em março de 2006, a razão 480:665 apresentou valores superiores a 2 na superfície para praticamente toda a área (Figura 4.1.52 a) e entre 1 e 2 na profundidade do máximo de clorofila-*a* (Figura 4.1.52 b), indicando que neste período, houve algum estresse nutricional na superfície, o que não ocorreu na profundidade do máximo de clorofila.

A quantidade de MST foi cerca de quatro vezes mais elevada no verão que no inverno, associado à maior pluviometria. As concentrações de MSI são pouco variáveis, uma vez que os aumentos do MST são sempre relacionados ao aumento da fração orgânica. Entretanto, este material em suspensão orgânico não foi constituído fundamentalmente pelo fitoplâncton, como geralmente ocorre em águas do Caso 1, pois não foi observado aumento correspondente na clorofila-*a*. Tal resultado é muito provavelmente reflexo do aporte de material em suspensão da região estuarina para as águas costeiras, como verificado também pelas altas concentrações de silicato na região, em decorrência da presença do estuário de Santos. Os teores de MOS foram cerca de cinco vezes mais elevados do que na região de São Sebastião, mais ao norte. Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003), em estudo realizado na plataforma continental de São Sebastião não observaram tão notável variabilidade sazonal na concentração de MST (Tabela 5.1). Mas, da mesma forma que em Santos, as autoras observaram uma variação

sazonal maior do MSO, que apresentou média de 15,35 mg l^{-1} no verão e 3,15 mg l^{-1} na primavera, atribuindo esta variação à maior drenagem continental ocorrida na época do verão, de acordo com dados climatológicos obtidos para o período, <http://www.tutiempo.net/clima/Santos_Aeroporto/838180.htm>, referentes a uma estação meteorológica localizada no aeroporto de Santos.

Tanto na primavera como no verão, altas concentrações de MST, na maior parte composto por MSO, foram observadas também em regiões mais distantes da costa, na plataforma continental média. Como já visto anteriormente, é possível que a recirculação entre a plataforma continental interna e média descrita por Castro *et al*. (2008), esteja transportando águas com altas concentrações de material em suspensão, originárias da região próxima à baía de Santos e canal de São Sebastião para regiões mais distantes, já na plataforma média.

A distribuição do material em suspensão e da Cl-*a* na área de estudo têm padrões distintos: enquanto o MST apresenta indicações também de aportes remotos, a Cl-*a* tem uma relação direta com a área estuarina, que atua como exportadora de nutrientes e biomassa. Os máximos de MSO não coincidem com os máximos de Cl-*a*, portanto, o MSO não é composto principalmente por fitoplâncton, embora não tenha sido possível determinar sua composição específica no presente estudo.

As observações realizadas no presente estudo permitem concluir que a apenas a região muito próxima à entrada da Baía de Santos apresenta condições mesotróficas. O restante da plataforma adjacente à região estuarina de Santos apresenta condições oligotróficas em termos de disponibilidade nutricional, com alguma contribuição de MOS bioestimulante em direção à porção norte e mais pobre em sua porção sul. Com base nas duas épocas de coleta, primavera de 2005 e verão de 2006, verificou-se que a influência da pluma estuarina sobre a plataforma adjacente é aparentemente pouco significativa tanto em termos de aporte de nutrientes como de biomassa fitoplanctônica. A área mais susceptível à influência da pluma de sedimento seria a porção norte, bem junto à costa.

Gianesella & Saldanha-Corrêa (2008), realizando amostragens mensais na baía e canal de Santos, verificaram que, apesar dos canais e região interna do estuário apresentarem eventualmente concentrações de nutrientes muito elevadas (máximo de 35,1 μM de nitrogênio inorgânico, com predomínio de amônia), a Baía de Santos atua

como uma “caixa de diluição” para os materiais provenientes dos canais de Santos e São Vicente e mesmo para o Emissário Submarino de Esgotos, onde estes nutrientes também são transformados em biomassa fitoplanctônica. Assim, a ação da pluma estuarina sobre a plataforma apresenta um sinal enfraquecido e muito localizado ao redor da entrada da baía em termos de exportação de nutrientes. Alguns indícios de que possa estar havendo uma contribuição do estuário para a plataforma são sugeridos pelos valores mais elevados de amônia, clorofila e MST observados na região ao norte da área de estudo. Entretanto, não foi verificada uma pluma contínua a partir da baía em relação a nenhuma destas variáveis. Segundo as autoras, a falta de continuidade da pluma pode ser decorrência tanto do sinal fraco da mesma como da ação intermitente da maré, bloqueando a saída das águas da Baía de Santos durante a enchente. Esta hipótese é sugerida pelos resultados das medidas de transporte de materiais realizadas diversas vezes ao longo de um ciclo de maré de 13 horas na entrada do canal de Santos, durante marés de sizígia, pois verificou-se um predomínio de transporte no sentido estuário acima (Ancona, 2007). Apenas em outubro as medidas de transporte indicaram saída de materiais em direção à Baía de Santos.

Os espectros de refletância obtidos *in situ*, apresentam uma diminuição da refletância entre 400 e 450 nm, nas estações mais costeiras em relação às mais oceânicas, tanto em outubro quanto em março, evidenciando a presença de maiores concentrações de clorofila-*a* (e.g. Rundquist *et al.,* 1996) e/ou MODC (e.g. Dekker *et al.*, 1992) que absorve nos comprimentos de onda na região azul do espectro visível. O aumento da refletância observado na região do verde (515 a 600 nm), também é indicativo dapresença de Cl-*a.* O aumento da refletância na região do verde pode ser atribuído ao fato que o fitoplâncton aumenta o espalhamento em todos os comprimentos de onda, mas absorve pouco nesta região (Kirk, 1994; O’Reilly *et al*., 1998).

A presença de material particulado na água provoca uma refletância crescente a partir de 450 nm (Dekker *et al.*, 1992), sendo mais intensa entre 500 e 520 nm (Kahru & Mitchell, 2001). Apesar de terem sido verificadas altas concentrações de material particulado na água, os espectros de refletância obtidos não evidenciaram isso. De modo geral, a literatura aponta a região do vermelho e infravermelho do espectro eletromagnético como a mais correlacionada com o MST (orgânico e inorgânico) (Dekker *et al*., 2001; Ammenberg *et al*., 2002; Mikkelsen, 2002; Nechad *et al*, 2003; Binding *et al*.,2003; Miller & McKee, 2004). Os dados de MST e MSO da plataforma continental de

Santos, não apresentaram correlações significativas com os espectros de refletância obtidos pelo radiômetro *in situ* (inferiores a 0.2 para todas as bandas simuladas do sensor MODIS), e portanto não serão apresentados aqui. É possível que este fato seja devido às características granulométricas e o tipo do sedimento em suspensão, os quais não foram analisados neste projeto. Mikkelsen (2002) demonstrou que a Rsr (refletância de sensoriamento remoto) e outros parâmetros ópticos como o coeficiente de atenuação, são dependentes da área da superfície das partículas, e que, para uma mesma concentração, é possível que as partículas sejam maiores ou menores. A área da superfície da partícula pode variar em até três ordens de magnitude para um valor constante de concentração de MST. Assim, a determinação do MST através da Rsr ou do coeficiente de atenuação da água é dificultada. O autor mostrou, através de experimentos, que o coeficiente de atenuação diminui com o aumento das partículas, ou seja, pequenas partículas atenuam mais luz por unidade de massa que partículas grandes.

Novo *et al*. (1989) também observaram que, para o material em suspensão constituído basicamente por argila, as correlações foram mais altas em toda a região do visível e infravermelho próximo (r = 0,98), enquanto para o material em suspensão constituído por silte a correlação foi mais baixa na região do azul (r = 0,8), aumentando na região do azul/verde (r = 0,98) e em direção aos comprimentos de ondas mais longos.

Os resultados obtidos mostram que apenas a medida da concentração do MST não é suficiente para explicar os espectros de refletância obtidos, indicando a necessidade do conhecimento do tipo de sedimento existente na área. Entretanto, há múltiplas fontes de sedimentos, e suas características granulométricas e mineralógicas não foram investigadas por este trabalho, impossibilitando tal avaliação.

O MST da plataforma continental de Santos também não apresentou correlações com o coeficiente de atenuação difusa da água (Kd), calculado com base nas medidas do disco de Secchi. No verão, a maior parte deste MST foi de origem orgânica (MSO), e também não apresentou relações com a concentração de clorofila-*a* e com a MODC. O metódo gravimétrico utilizado para determinação de MST e suas frações orgânicas e inorgânicas tem sido utilizado por diversos autores para o desenvolvimento de algoritmos de MST baseado em dados de satélites (Dekker *et al*., 2001; Miller e McKee, 2004; Moore *et al.*, 1999), além de ser o método utilizado para validação dos produtos nível 2 do MODIS, que contempla também Total de Sólidos em Suspensão (Carder *et al*., 1999).

Segundo Kirk (1994), o pico de fluorescência da clorofila em torno de 685 nm pode ser detectado como um pico distinto na curva de refletância aparente da água. Este pico também pode ser detectado na distribuição espectral do fluxo emergente. Cálculos indicam que o aumento da fluorescência associado a um aumento de 1 mg m^{-3} de clorofila na água pode produzir um aumento adicional de 0,03 W m^{-2} sr^{-1} na radiância ascendente da água (Kirk, 1994). Esta feição, típica da clorofila-*a*, em torno de 685 nm foi observada apenas em alguns espectros, nas estações onde as concentrações de clorofila-*a* foram mais altas, como por exemplo, a estação 1 em outubro de 2005 e março de 2006 (Figura 4.2.2 a e Figura 4.2.3 a, respectivamente), com concentrações de Cl-*a* de 12,80 mg m^{-3} e 14,5 mg m^{-3}, respectivamente. A mesma estação também apresentou uma feição de refletividade proeminente em 693 nm, possivelmente causada pelo retro-espalhamento causado pela presença de MODC (Rundquist *et al.*, 1996). As estações 40 e 41 (Figuras 4.2.3 d), amostradas em março de 2006 apresentaram altas concentrações de clorofila (6,73 e 11,58 mg m^{-3}, respectivamente), apresentando também a feição de absorção em torno de 680 nm. Apesar disso, outras estações, com concentrações de clorofila relativamente altas (superiores a 2 mg m^{-3}) apresentaram curvas espectrais típicas, com diminuição da absorção na região do azul e aumento da refletância na região do verde, mas foi verificada a feição de absorção em 680 nm.

As estações mais distantes da costa, com baixa concentração de clorofila e MODC apresentaram curvas típicas de águas claras, com maior refletância na região do azul que no verde, diminuindo exponencialmente do azul até a região do infravemelho próximo (IVP), como pode ser observado, por exemplo, nos espectros das estações 16, 17, 18 e 29, nas duas etapas, que apresentam curvas bem características de águas oceânicas.

A correção atmosférica utilizando o método MUMM, desenvolvido por Ruddick *et al*. (2000), indicada para regiões costeiras com maior influência de MODC e material em suspensão, como a região da plataforma de Santos, apresentou melhores resultados para a área de estudo que a correção padrão do Seadas. O melhor resultado do método MUMM se deve a presença dos demais componentes presentes na coluna de água (MST, MODC), que interferem na correção atmosférica baseada nas bandas espectrais do infravermelho próximo (IVP), 748 e 869 nm, como é o caso da correção padrão do Seadas (Hu *et al.*, 2000). O método MUMM, apesar de também utilizar as bandas do IVP, calcula a refletância dos aerossóis em um pixel da imagem característico

de água clara (i.e., sem influência dos sedimentos), e, a partir da definição de um tipo característico de aerossol para a região, é assumido que a variabilidade do tipo de aerossol é espacialmente limitada (aproximadamente 200 km), fixando então um valor para a correção de toda a imagem (Ruddick *et al.*, 2000).

O conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento do algoritmo empírico é consistente, e apresenta um padrão de distribuição similar ao dos dados globais, como pode ser visto no diagrama de dispersão entre as medidas de concentração de clorofila-*a* e refletância obtidas *in situ*, na plataforma continental de Santos e os dados globais (Figura 5.1). Estes dados globais foram adquiridos em diversos cruzeiros, realizados entre 1995 e 2003 em diversas províncias biogeográficas, obtidos através da base de dados da NASA, o NOMAD (*NASA Bio-Optical Marine Algorithm Data Set*) (NASA, 2009e).

O desempenho geral dos algoritmos da NASA, OC2v4, OC4v4 e OC3 para os dados *in situ* (a partir das refletâncias obtidas pelo radiômetro *in situ*) pode ser considerado satisfatório, não havendo diferenças significativas entre eles. Embora o melhor desempenho dos algoritmos se dê para baixas concentrações de Cl-*a* (abaixo de 2,5 mg m^{-3}), os três algoritmos superestimam a concentração de clorofila entre 0 e 2,5 mg m^{-3} aproximadamente, e subestimam as concentrações acima desse valor, com erros maiores quanto maior a concentração de Cl-*a*. Isto se de deve, provavelmente, ao fato dos três algoritmos terem sido desenvolvidos a partir de uma base de dados globais, originária do SeaBAM (*SeaWiFS Bio-optical Algorithms Mini-workshop*), a qual armazena dados de concentração de Cl-*a* e outros pigmentos, e dados de refletância e radiância da água, de diversos cruzeiros realizados em diferentes províncias biogeográficas. Entretanto, apesar do grande número e diversidade de origem das amostras, foi verificado por O'Reilly *et al*. (2000) que a maior parte dos dados do SeaBAM, utilizados para o desenvolvimento dos algoritmos corresponde a águas Caso 1, contudo esta base de dados contempla poucos dados de valores extremos, como os de regiões muito oligotróficas (Cl-*a* < 0,05 mg m^{-3}) e eutróficas (Cl-*a* > 3 mg m^{-3}). Segundo O'Reilly *et al*.(1998) algoritmos desenvolvidos para uso em escala global são menos acurados em escalas locais ou regionais que aqueles desenvolvidos para regiões ou condições bio-ópticas particulares. Eventos como florações de cianobactérias em águas Caso 1 e a presença de outros componentes bio-ópticos, como acontece em águas

Caso 2, são situações em que os algoritmos globais podem falhar. Assim, para estudos regionais e locais, os algoritmos globais devem ser parametrizados regionalmente.

Outros autores também observaram que o algoritmo OC4v4 subestima as concentrações de clorofila em águas com altas concentrações de pigmentos e superestima as concentrações de Cl-*a* em águas com baixas concentrações de pigmentos (Fuentes-Yaco *et al*., 2005; Darecki & Stramski, 2004; Garcia *et al*, 2005).

Fuentes-Yaco *et al.* (2005) demonstraram que o algoritmo do SeaWiFS, OC4, aplicado à região costeira do Atlântico Noroeste resultou em um erro sistemático na estimativa da concentração de clorofila-*a*. Em comparações com medidas *in situ*, mostraram que o algoritmo OC4 superestima a concentração de clorofila-*a* em águas com baixa concentração de pigmentos e subestima em altas concentrações de pigmentos. Os autores atribuíram estes erros de estimativa às variações locais nas propriedades ópticas do material particulado e dissolvido.

Garcia *et al*. (2005), observaram que o algoritmo OC4v4, subestima a concentração de clorofila para o intervalo de 0,2 a 1 mg cl-*a* m^{-3}, com erro médio quadrático linearmente transformado (*rmse-l*) de 0,475, embora um bom coeficiente de determinação tenha sido alcançado, 0,87. Os autores testaram um algoritmo regional baseado em uma equação polinomial de quarta ordem (FURG OC4 – OC4v4 modificado regionalmente), para um conjunto de dados do Atlântico Sudoeste, em águas influenciadas pelo Rio da Prata, obtendo um coeficiente de determinação de 0,89, apenas um pouco superior ao do OC4v4. Mas em relação aos erros de estimativa este algoritmo regional também subestima a concentração de clorofila no mesmo intervalo, com um rmse-l igual a 0,426. Tendo um desempenho apenas um pouco melhor que o algoritmo da NASA.

Os erros de estimativa dos algoritmos OC2v4 e OC3 mostraram ter maior relação com a variável independente, a clorofila-*a*, e com a razão carotenóides/clorofila-*a* que os erros do OC4v4. De modo geral, quanto maior a proporção carotenóides/clorofila-*a*, maiores são os erros de superestimativa dos algoritmos. Em relação à MODC, o OC2v4 e o OC3 apresentam menor correlação e o OC4v4 maior correlação. Como foi visto, o OC2v4 utiliza a razão 490/555, o OC3 a maior razão entre 443/555 e 488/555, e o OC4v4 utiliza a maior razão entre 443/555, 488/555 e 510/555. Segundo O'Reilly *et al*. (1998), a banda centrada em 443 nm é mais próxima do pico de

absorção da clorofila-*a* que a banda centrada em 490 nm, mas ela também é mais influenciada pela MODC, que diminui exponencialmente com o comprimento de onda. Por isso a banda centrada em 490 nm pode funcionar no OC2v4, quando ocorre forte correlação entre a Cl-*a* e pigmentos acessórios como os carotenóides, isto é quando são co-variantes e influenciam a refletância nesta faixa espectral. Entretanto, esta co-variância nem sempre ocorre, como em finais de floração, por exemplo. Segundo o autor, a acurácia do OC2v4 é reduzida em altas concentrações de Cl-*a*, quando há alterações na composição de pigmentos (mudança na proporção), efeito de "empacotamento" de pigmentos ou variações nas condições bio-ópticas em relação aos dados do SeaBAM, a partir do qual o algoritmo foi desenvolvido. Analisando o desempenho do OC2v4 separadamente, para os dados de outubro de 2005 e março de 2006, apesar de ter sido verificado melhor desempenho em março de 2006, verificou-se também que seus erros estiveram mais relacionados à variação na concentração de clorofila-*a* e com a proporção carotenóides/clorofila-*a* em março de 2006 que em outubro de 2005. Este resultado está de acordo com o observado (item 4.1), que a proporção carotenóides/clorofila-*a* foi maior em março de 2006 que em outubro e setembro de 2005. Diferenças na composição taxonômica do fitoplâncton também podem explicar as diferenças observadas nas refletâncias (Kirk, 1994; Cota *et al*., 2003), como a ocorrência de floração de *Trichodesmium* na segunda etapa, que pode ter causado modificação na proporção entre a concentração de carotenóides/clorofila-*a*. Além dos carotenóides que absorvem em torno de 490 nm (Subramanian & Carpenter 1994; Subramanian *et al*., 1999, 2002), o *Trichodesmium* possui ficobilipigmentos com picos de absorção em 495, 545 e 565 nm (Fujita & Shimura, 1974 apud Subramanian *et al*., 1999), o que pode explicar alterações no espectro de refletância.

Além da composição taxonômica do fitoplâncton, o tamanho das células também pode explicar diferenças na refletância (e.g. Cota *et al*., 2003). Um aumento no tamanho da célula ou na concentração de pigmento intracelular pode resultar na correspondente diminuição da eficiência de absorção do fitoplâncton (Morel & Bricaud, 1981; Sathyendranath *et al*., 1987; Ciotti *et al*., 2002). Segundo Morel & Bricaud (1981), a magnitude do coeficiente de absorção específica do fitoplâncton é influenciada pela concentração relativa de pigmentos acessórios, o chamado "empacotamento de pigmento". Esta diminuição da absorção específica *in vivo* de pigmentos agregados,

comparados com a mesma quantidade de pigmentos em solução é chamada de "efeito de empacotamento" (Kirk, 1994).

Variações no desempenho dos algoritmos podem ter sido causadas pela concentração de material particulado em suspensão e MODC na água. Observou-se também que os erros de estimativa dos algoritmos, principalmente do OC2v4, estão relacionados com a variação na concentração de MSI, nas duas épocas. A influência do material em suspensão no desempenho do algoritmo OC4v4 também foi verificada por Lavender *et al*. (2004), para a Baía de Biscaia, no Atlântico Norte. O OC4v4 superestimou a concentração de Cl-*a*, apresentando erros de estimativa em relação aos dados *in situ* de mais de 250%. Segundo os autores esta superestimativa é consistente com o efeito de espalhamento pelo material inorgânico em suspensão, que aumenta a refletância em todo o espectro visível, tendendo a diminuir a razão azul/verde, e aumentar a clorofila-*a* estimada. Os autores observaram que o desempenho foi muito melhor em outras 26 estações, típicas de águas Caso 1, com baixas concentrações de clorofila-*a* (inferiores a 1 mg m^{-3}), com erro de estimativa de cerca de 150% em relação aos dados *in situ*. Para estes dados, os erros de superestimativa apresentam uma fraca correlação com o material em suspensão medido *in situ*.

Gregg & Casey (2004), analisaram o desempenho do algoritmo OC4v4 para diversas províncias oceanográficas, costeiras e oceânicas, a partir dos dados globais do projeto SeaWiFS e verificaram um melhor desempenho para o oceano aberto (r^2=0,72) do que para águas costeiras (r^2 = 0,60). Verificaram também que a variabilidade regional no desempenho do algoritmo do SeaWiFS é principalmente causada pela absorção de aerossóis e influência de plumas de sedimentos, como no caso da região oeste do Atlântico equatorial, que recebe grandes descargas de água doce, e poeira proveniente do deserto do Saara na região leste do Atlântico equatorial. Nestes casos, foram observados erros de superestimativa da concentração da clorofila-*a* pelo algoritmo do SeaWiFS, o OC4v4.

A razão de bandas melhor correlacionada com a clorofila-*a* para a plataforma continental de Santos foi 531/551 (*log*) (r^2 = 0,79). Altas concentrações de clorofila-*a*, associadas aos pigmentos acessórios levam a alta absorção na região do azul (412, 443 e 488 nm), resultando em baixos valores de refletância e tendendo a razão azul/verde a zero (Lavender *et al*., 2004), o que não acontece com a razão 531/551. A absorção pela MODC na região do azul (bandas centradas em 412, 443 e 488 nm) também leva a

baixos valores para as razões azul/verde (Darecki *et al*., 2005). Esta situação, com altas concentrações de clorofila-*a*, pigmentos acessórios e MODC, é típica de águas Caso 2, como a plataforma continental em frente a Santos. Tendência similar foi observada por Jorgensen (2004), que analisou o desempenho das razões de bandas do SeaWiFS (443/555, 488/555 e 510/555, entre outras) para a estimativa de clorofila-*a* em águas costeiras do mar Báltico e observou que a razão 443/555, utilizada nos algoritmos do CZCS, do SeaWiFS e do MODIS, foi a menos correlacionada com a clorofila-*a*, enquanto a razão 510/555 foi a melhor correlacionada. Ele atribuiu este resultado à influência da MODC nas águas costeiras que mascaram a absorção da clorofila na região do azul.

Segundo O'Reilly *et al*. (2000), a razão 443/555 fornece estimativas de clorofila-*a* mais precisas em concentrações menores que 0,4 mg m^{-3}, enquanto as razões 510/555 e 490/555 fornecem melhores estimativas para águas com maiores concentrações de clorofila-*a*.

Observa-se que para todos os algoritmos, assim como para a relação entre a razão 510/551 e a clorofila-*a*, melhores ajustes são alcançados para os dados de março de 2006 que para outubro de 2005. Como visto anteriormente, as concentrações de MODC, carotenóides e da própria clorofila-*a* foram mais altas em setembro e outubro de 2005 que em março de 2006. Em março de 2006, a plataforma estava dominada pela AT na superfície, com intrusão da ACAS pelo fundo, chegando bem próximo à costa e até 18 m de profundidade. A ACAS pode ser a responsável por estas maiores concentrações de MODC e clorofila-*a*, e como visto, as bandas centradas em 443 e 488 nm sofrem maior interferência da MODC e dos demais pigmentos acessórios do fitoplâncton.

Foi visto que entre os ajustes testados para a relação R531/551 e concentração de clorofila-*a*, em escala logarítmica, o melhor resultado foi obtido pelo polinômio de quarta ordem. Os algoritmos globais OC4v4 e OC3, desenvolvidos a partir de uma base de dados global também utilizam uma relação polinomial de quarta ordem (O'Reilly *et al*., 2000).

Quando os algoritmos regionais foram testados com os dados de refletância obtidos *in situ*, verificou-se que o algoritmo regional polinomial de quarta ordem foi o que melhor estimou a concentração de clorofila-*a*, apresentando o menor EMQ. Embora

o algoritmo linear tenha obtido um coeficiente de determinação um pouco superior ao algoritmo polinomial de quarta ordem, ele apresentou erros muito maiores. O OC3 foi o algoritmo que apresentou o pior desempenho. Como visto anteriormente, o OC3 foi desenvolvido a partir de uma base de dados com pouca representação de águas oligotróficas e eutróficas, além de utilizar o valor máximo entre as razões 443/551 e 488/551. Estas razões foram menos correlacionadas com a concentração de clorofila-*a* para todo o conjunto de dados, devido às altas concentrações de clorofila-*a*, além de influência de MST e MODC. A interferência destes outros componentes opticamente ativos na água no desempenho do OC3 ficou evidente quando se analisou os desvios de estimativa em relação às proporções de MODC, carotenóides e MST em relação à concentração de clorofila-*a* para as 17 estações utilizadas para avaliação dos algoritmos.

Quando os algoritmos regionais e o global, OC3, foram avaliados com as refletâncias obtidas pelo sensor MODIS, o que se observou foi o melhor desempenho do algoritmo regional polinomial de quarta ordem, desenvolvido a partir dos dados radiométricos obtidos *in situ*. Nesta análise foram utilizados dados de 26 estações, obtidas dentro de uma janela temporal de 24 horas (antes e depois do horário de coleta) em relação ao horário de aquisição pelo sensor MODIS. Praticamente todas as estações foram referentes ao cruzeiro de hidrografia de março de 2006 (23 estações) e outras três referentes ao cruzeiro de radiometria de março de 2006 (que não foram utilizadas no desenvolvimento dos algoritmos). Devido à cobertura de nuvens, não foi possível obter dados simultâneos, *in situ* e pelo sensor, para os outros cruzeiros. Este conjunto de dados apresentou um intervalo de baixas concentrações de clorofila-a (0 a 1 mg m^{-3}), com a predominância de estações mais oceânicas, com baixa concentração de MODC e MST, enquanto o conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento do algoritmo apresentou um intervalo mais amplo de concentrações de clorofila-*a*, além de mais altas concentrações de MODC e MST (MSI e MSO). Assim, para esta base de dados, o algoritmo regional polinomial de quarta ordem foi apenas um pouco superior ao algoritmo global OC3. A única estação em que a concentração de clorofila foi mais alta (3,54 mg m^{-3}) o algoritmo OC3 não conseguiu estimar, atribuindo "máscara" ao pixel, embora as bandas do sensor MODIS tenham apresentado valores positivos de refletância.

A utilização de algoritmos semi-analíticos para a estimativa de clorofila-*a* pode ser uma alternativa aos algoritmos empíricos, em águas opticamente complexas, como a

região da plataforma adjacente a Santos. Os algoritmos semi-analíticos apresentam a vantagem de possibilitarem a derivação de outros constituintes ópticos (como por exemplo MODC, MP além da própria clorofila) (O'Reilly *et al*., 1998; Kahru & Mitchell, 2001). Por outro lado, os algoritmos semi-analíticos são de difícil parametrização, e requerem dados com alta fidelidade espectral para que se obtenha melhor desempenho que simples algoritmos empíricos baseados em razões de bandas (O'Reilly *et al*., 1998). Os modelos semi-analíticos fazem uso de aproximações para reduzir o número de variáveis desconhecidas, resultando em um conjunto de equações através das quais se pode obter cada componente desconhecido do modelo. A confiabilidade dos resultados é comprometida quanto maior o número de componentes desconhecidos e aproximações (IOCCG, 2000).

Kahru & Mitchell (2001) compararam o desempenho do algoritmo semi-analítico Carder com os algoritmos empíricos do SeaWiFS (OC2v4 e OC4v4) para a região da corrente da Califórnia, e observaram que o algoritmo semi-analítico Carder subestimou a concentração de clorofila-*a* e superestimou a concentração de MODC, produzindo um máximo de MODC no inverno, sem correspondência com um máximo de clorofila-*a*. Diferente do semi-analítico, os empíricos produziram um máximo de inverno para clorofila-*a* e MODC, que concorda com dados de cruzeiros anteriores que apontam para um máximo de inverno de clorofila-*a* e MODC. Esse tipo de discordância pode gerar padrões sazonais errôneos.

Garcia *et al*. (2006) também compararam o desempenho dos algoritmos empíricos (OC2v4-LP e O4v4) e dos semi-analíticos (GSM01 e Carder) na região do Atlântico Sudoeste, em águas costeiras, sujeitas a influência de águas provenientes do rio da Prata e Lagoa dos Patos. Os resultados obtidos mostraram que nenhum dos algoritmos avaliados mostrou resultados realmente consistentes para a região. Os melhores resultados foram obtidos pelos algoritmos semi-analítico GSM01 e o empírico OC2v4-LP. Assim como Kahru & Mitchell (2001), os autores também observaram diferentes padrões sazonais obtidos por cada algoritmo. Os algoritmos empíricos superestimaram a concentração de Cl-*a* no verão em uma maior magnitude que no inverno, possivelmente devido à inabilidade para compensar a absorção pelos aerossóis na refletância. Por outro lado, o semi-analítico GSM mostrou uma tendência negativa no inverno, que não foi observada no verão, que pode estar associada à falta de co-variação entre a Cl-*a* e os outros componentes ópticos, que foi muito mais acentuada no

inverno. O'Reilly *et al*. (1998) também verificaram, de modo geral, melhor desempenho dos algoritmos empíricos (Morel-3 e CalCOFI) em relação aos semi-analíticos (Carder e GSM), para a base de dados global (SeaBAM).

Apesar do algoritmo regional polinomial de quarta ordem apresentar melhor desempenho, ainda que em baixas concentrações de clorofila-*a* (0 a 1 mg m^{-3} aproximadamente), um conjunto de dados mais heterogêneo e representativo da plataforma continental de Santos, com dados simultâneos *in situ* e do sensor MODIS, seria adequado para se testar realmente o desempenho do algoritmo regional obtido frente aos algoritmos globais empíricos disponíveis para um mais amplo intervalo de concentrações de clorofila-*a* que o utilizado aqui, similar ao conjunto a partir do qual foi desenvolvido o algoritmo e condizente com a realidade da região.

6. Conclusões e considerações finais

Os resultados mostraram que a região da plataforma ao largo de Santos apresenta acentuada variabilidade sazonal. Essa variabilidade se dá principalmente pelo grau de intrusão da ACAS, que apesar de ser observada nas duas épocas estudadas, no verão atingiu regiões mais próximas à costa, se misturando com a AC.

Além da influência sazonal da ACAS, a região sofre influência sazonal de um aporte costeiro de águas superficiais menos salinas e mais frias provenientes do sul, principalmente no início da primavera.

A intrusão tanto da ACAS no verão, como dessa água menos salina e mais fria proveniente do sul, verificada no início da primavera, não se traduziram em efeitos claros no aspecto nutricional ou de produtividade biológica da área. Essa água menos salina encontra-se bastante empobrecida ao alcançar a área de estudo, e a ACAS, mesmo chegando a atingir a zona eufótica no verão, não teve um papel fertilizador significativo.

A menor ação da ACAS como agente fertilizador na plataforma ao largo de Santos se deve provavelmente à grande extensão da plataforma nessa região, o que provoca maior diluição da ACAS nas águas costeiras e dificulta sua intrusão até regiões mais rasas da zona eufótica.

Uma forte variabilidade sazonal na concentração de material em suspensão foi observada, com concentrações médias de MST e MSO cerca de 4 vezes mais elevadas no verão, decorrente da maior drenagem continental neste período. A distribuição espacial do MST é determinada pela proximidade da fonte, o estuário de Santos. A maior parte do MST é representada pelo MSO, que não está relacionado à biomassa fitoplanctônica. Além disso, a MODC tinge regiões bem mais ao largo durante o verão. Há fortes indícios de processos de recirculação na PCI e PCM, baseado nos dados de MST, amônia, fosfato e silicato.

A influência da pluma estuarina sobre a plataforma adjacente é pouco significativa em termos de aporte de nutrientes e de biomassa fitoplanctônica.

A região da plataforma ao largo de Santos apresentou-se oligotrófica. A biomassa fitoplanctônica foi baixa, exceto nas porçõesbem próxima à entrada da baía de Santos e bem costeira na região nordeste da área.

Os dados de clorofila-*a* e refletância obtidos *in situ* permitiram chegar ao seguinte algoritmo regional polinomial de quarta ordem:

$$Cla = 10^{(0,2102-18,5984*R+154.0355*R^2+45,3839*R^3-3786,8821*R^4)}, \quad (6.1)$$

em que $R = \log_{10}\left(\frac{Rsr531}{Rsr551}\right)$

Em relação aos dados radiométricos obtidos *in situ*, pode-se concluir que a clorofila-*a* pode ser estimada com uma confiabilidade superior a dos algoritmos globais utilizando esse algoritmo regional. O algoritmo regional polinomial obtido se mostra menos suscetível a erros de superestimativa e subestimativa causados pelos demais componentes ópticos presentes na água que os algoritmos globais.

Os componentes que mais interferiram na estimativa da clorofila-*a* pelos algoritmos globais tanto para os dados radiométricos *in situ* quanto para os dados do sensor MODIS foram a MODC, o MSI e a proporção carotenóides/clorofila. Todos estes componentes levam a superestimativa da concentração de clorofila-*a* quanto maior suas concentrações.

A variabilidade sazonal destes componentes também interfere de modo mais negativo nos algoritmos globais do que no algoritmo regional proposto.

Devido às características da região, com a presença significativa de outros componentes bio-ópticos além da própria clorofila, a utilização da razão verde/verde (531/551) no algoritmo regional para a plataforma de Santos é mais adequada que a razão azul/verde, freqüentemente utilizada nos algoritmos globais.

No caso das estimativas a partir das refletâncias obtidas pelo sensor MODIS, o algoritmo regional polinomial apresentou um desempenho apenas um pouco superior ao do algoritmo global OC3 (MODIS) em termos de coeficiente de determinação e EMQ. Entretanto, o algoritmo regional sofreu menor influência dos demais componentes ópticos da água (MODC, carotenóides e MSI) que o OC3.

A base de dados utilizada para avaliação do algoritmo regional, com dados "simultâneos" de clorofila-*a in situ* e refletâncias do sensor MODIS, difere daquela em que o algoritmo foi desenvolvido, apresentando um intervalo de concentrações mais restrito (de 0 a 1 mg Cl-*a* m^{-3} aproximadamente). Foi observado neste trabalho, e por outros autores, que o OC3 atua melhor dentro deste intervalo, falhando com

concentrações de clorofila-*a* mais altas. Assim, pelos aspectos apresentados acima, acredita-se que o algoritmo regional desenvolvido neste estudo seja capaz de estimar com melhor acurácia um intervalo de concentração de clorofila-*a* mais amplo que o algoritmo global. Mas, de qualquer forma, uma base de dados simultâneos de clorofila-*a* *in situ* e imagens do sensor MODIS para a plataforma continental de Santos (que não puderam ser obtidas no presente trabalho em função da cobertura de nuvens) permitiria a avaliação do desempenho do algoritmo obtido para um intervalo mais amplo de concentrações de clorofila-*a*, como o observado de fato para a região.

Referências bibliográficas

AIDAR, E.; GAETA, S.A.; GIANESELLA-GALVÃO, S.M.F.; KUTNER, M.B.B; TEIXEIRA, C.1993. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-*a* e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. Publicação especial do Instituto Oceanográfico, v.10, p. 9-43.

AIDAR-ARAGÃO, E.; TEIXEIRA, C.1980. Produção primária e concentração de clorofila-*a* na costa brasileira (Lat. 22° 31'S – Long. 41° 52'W a Lat. 28° 43'S – Long. 47° 57'W). Boletim do Instituto Oceanográfico, v.29(2), p. 9-14.

AMINOT, A.; CHAUSSEPIED, M.1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Brest, C.N.E.X.O. 395 p.

AMMENBERG, P.; FLINK, P.; LINDELL, T.; PIERSON, D.; STROMBECK, N. 2002. Bio-optical modelling combined with remote sensing to assess water quality. International Journal of Remote Sensing, v. 23(8), p. 1621 – 1638.

ANCONA, C. M. 2007. Aspectos da variação espacial e temporal da biomassa e produção fitoplanctônica e parâmetros correlatos no estuário e baía de Santos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 229p.

APHA (American Public Health Association). 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th ed. Washington, APHA, 1288 p.

BABIN, M.; STRAMSKI, D.; FERRARI, G.M.; CLAUSTRE, H.; BRICAUD, A.; OBOLENSKY, G.; HOEPFFNER, N. 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton,nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. Journal of Geophysical Research, v. 108, n. C7, p. 3211.

BEHRENFELD, M.J.; ESAIAS, W.E.; TURPIE, K.R. 2002. Assessment of Primary Production at the Global Scale. In: WILLIAMS, P.; THOMAS, D.; REYNOLDS, C., (ed). Phytoplankton Productivity – Carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems. Blackwell Science, 386p.

BEHRENFELD M.; FALKOWSKI, P. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. Limnology Oceanography, v.42, p.1-20.

BENDSCHNEIDER, K.; ROBINSON, R.J. 1952. A new spectro photometric method for determination of nitrite in sea water. Journal of Marine Research, v.11, p.87-96.

BINDING, C.E.; BOWERS,D.G.; MITCHELSON-JACOB. 2003. An algorithm for the retrieval of suspended sediment concentrations in the Irish Sea from SeaWiFS ocean colour satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, v. 24, n.19, 3791–3806.

BRAGA, E.S.; CHIOZZINI, V.C.; BERBEL, G.B.B.; MALUF, J.C.C.; AGUIAR, V.M.C.; CHARO, M.; MOLINA, D.; ROMERO, S.I.; EICHLER, B.B. 2008. 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, 1649-1661.

BRANDINI, F.P.1990. Produção primária e características fotossintéticas do fitoplâncton na região sueste do Brasil. Boletim do Instituto Oceanográfico, v. 38, n. 2, p. 147-159.

CAMPOS, E.J.D.; LORENZZETTI, J.A.; STEVENSON, M.R.; STECH, J.L.; DE SOUZA, R.B. 1996. Penetration of waters from the Brazil–Malvinas Confluence region along the South American continental shelf up to 231S. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.68(1), p. 49–58.

CAMPOS, E.J.D.; GONÇALVES, J.E.; IKEDA, Y.1995. Water mass structure and geostrophic circulation in te South Brazil Bigth – summer of 1991. Journal of Geophysical Research, v.100 (C9), p. 18537-18550.

CAMPOS, E.J.D.; GODOI, S.S.; IKEDA, Y.; NONATO, L.V.; GONÇALVES, J.E. 1994. Summertime thermohaline structure of the Brazil Current Region between Santos (SP) and Rio de Janeiro (RJ). Boletim do Instituto Oceanográfico, v. 42(1/2), p. 1-18.

CARDER, K.L.; CHEN, F.R.; LEE, Z.; HAWES, S.T.; CANNIZZARO, J.P. 2003. Case 2: Chlorophyll *a.* MODIS Ocean Science Team Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD MOD-19, NASA Goddard Space Flight Cent. Greenbelt, Md. Version 7, 24 p.

CARDER, K.L.; CHEN, F.R.; LEE, Z.; HAWES, S.T.; KAMYKOWSKI, D. 1999. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. Journal of Geophysical Research, v.104, C3, p. 5403-5421.

CARVALHO, M.; GIANESELLA, S.M.F.; SALDANHA-CORRÊA, F.M.P. 2007. *Trichodesmium erythraea* bloom in the continental shelf off Santos, Southeast Brazil. In: Plankton Symposium, 2007. João Pessoa, PB.

CASTRO, B.; LORENZETTI, J.A.; SILVEIRA, I.C.A.; MIRANDA, L.B. 2006. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: ROSSI-WONGTSHOWSKI, C.L.; MADUREIRA, L.S. (org) O Ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil. p.11-120.

CASTRO, B. M.; MIRANDA, L.B.1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf Located Between 4ºN and 34ºS - Coastal Segment (4,W). *In*: ROBINSON, A. R.; BRINK, K. H., (ed).The Sea. John Wiley & Sons, Inc., New York, v.11, p.209-251.

CASTRO FILHO, B.M.; MIRANDA, L.B.; MIYAO, S.Y.1987. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala, Boletim do Instituto Oceanográfico, v. 35(2), p. 135-151.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). 2003. Relatório de qualidade das águas litorâneas do Estado de São Paulo: Balneabilidade das praias. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo.72p.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). 2001. Sistema Estuarino de Santos e São Vicente, São Paulo, BR, 178p.

CIOTTI, A. M. 2005. Fundamentos e aplicações de dados bio-ópticos em oceanografia biológica. *In*: SOUZA, R.B. (org.), (ed). Oceanografia por Satélite. Oficina de Textos. São Paulo, p. 205-218.

CIOTTI, A.M; LEWIS, M.R.; CULLEN, J.J. 2002. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton comunities and the spectral sape of the absorption coefficient. Limnology and Oceanography, v. 47, n. 2, 404-417.

CLARK, G.L.; EWING, G.C.; LORENZEN, C.J.1970. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. Science, v.167, p.1119-1121.

COTA, G. F.; HARRISON, W.G.; PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S.; STUART, V. 2003. Bio-optical properties of the Labrador Sea. Journal of Geophysical Research, v.108(C7), p.3228.

CPTEC-INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2004. < http://www.cptec.inpe.br/>

DARECKI, M; KACZMAREK, S.; OLSZEWSKI, J. 2005. SeaWiFS ocean colour chlorophyll algorithms for the southern Baltic Sea. International Journal of Remote Sensing, v. 26, n. 2, 247-260.

DARECKI, M.; STRAMSKI, D. 2004. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. Remote Sensing of Environment, v. 89, p. 326-350.

DEKKER, A.G.; VOS, R.J., PETERS, S.W.M. 2001. Comparison of remote sensing data, model results and *in situ* data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes. The Science of the Total Environment, v. 268, 197-214.

DEKKER, A.G.; MALTHUS, T.J.; WIJNEN, M.M.; SEYHAN, E.1992. The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signature analysis of inland waters. Remote Sensing of Environment, v. 41, p. 211-255.

EMÍLSSON, I.1961. The shelf and coastal waters off southern Brazil. Publicação do Instituto Oceanográfico, n. 144.

ESAIAS, W.E.; ABBOT, M.R.; BARTON, I.; BROWN, O.B.; CAMPBELL, J.W.; CARDER, K.L.; CLARK, D.K; EVANS, R.H.; HOGE, F.E.; GORDON, H.R.; BALCH, W.M.; LETELIER, R.; MINNETT, P.J. 1998. An overview of MODIS capabilities for ocean science observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 36, p. 1250-1265.

EVANS, D.L.; SIGNORINI, S.R. 1985. Vertical structure of the Brazil current. Nature, v. 135 (6014), p. 48-50.

FALKOWSKI, P.G.1998. Using satellite data to derive primary productivity in the world ocean. In: HOOKER, S.B. and FIRESTONE, E. R. (eds). SeaWiFS Technical Report Series, v. 42, Satellite Primary Productivity Data and algorthm development: A Science Plan for Mission to Planet Earth. NASA, p. 2-17.

FUENTES-YACO, C.; DEVRED, E.; SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T.; PAYZANT, L.; CAVERHILL, C.; PORTHER, C.; MAASS, H.; WHITE G. N. 2005. Comparison of *in situ* and remote sensing-derived (SeaWiFS) chlorophyll-a in the Northwest Atlantic, Indian Journal of Marine Sciences, 34(4), Special issue, p. 341-355.

GAETA, S.A.; RIBEIRO, S. M. M. S.; METZLER, P.M.; FRANCOS, M.S.; ABE, D. S. 1999. Environmental forcing on phytoplankton biomass and primary productivity of the coastal ecosystem in Ubatuba region, southern Brazil. Revista Brasileira de Oceanografia, São Paulo, v. 47, n. 1, p. 11-27.

GAETA, S.A.; ABE, D.S.; METZLER, P.M.; TEIXEIRA, C.1995. Photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton from the Ubatuba region, Brazil. Publicação especial do Instituto Oceanográfico, v. 11, p. 163-169.

GARCIA, V.M.T.; SIGNORINI, S.; GARCIA, C.A.E.; McCLAIN, C.R. 2006. Empirical and semi-analytical chlorophyll algorthms in the south-western Atlantic coastal region (25-40°S and 60-45°W). International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 8, p.1539-1562.

GARCIA, C.A.E.; GARCIA, V.M.T.; MCCLAIN, C.R. 2005. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. Remote Sensing of Environment, v. 95, p. 125-137.

GIANESELLA, S.M.F. 2000. Variabilidade da camada de clorofila máxima na região de quebra da plataforma continental sudeste brasileira. Tese de livre-docência. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 92p.

GIANESELLA-GALVÃO, S.M.F.1982. Standing-stock and potencial of phytoplankton production in the bay of Santos, Brazil. Bolm. Inst. Oceanogr. v. 31(2), p. 85-94.

GIANESELLA, S.M.F.; SALDANHA-CORRÊA, F.M.P. 2008. Variabilidade e distribuição de séston e da biomassa fitoplanctônica. In: PIRES-VANIN, A.M.S. (org.). Oceanografia de um ecossistema tropical: Plataforma de São Sebastião. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p.205-222.

GIANESELLA, S.M.F.; SALDANHA-CORRÊA, F.M. P. 2003. Nutrientes, séston e biomassa fitoplantônica na plataforma interna de São Sebastião-verão de 1994 e primavera de 1997. Bol. Inst. Pesca, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 161-172.

GIANESELLA, S.M.F., SALDANHA-CORRÊA, F.M.P., MESQUITA, H.S.L.; AIDAR, E. 1996. Primary nitrite maximum and inorgenic nitrogen changes in a coastal water system. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.68(1), p.117-127.

GIANESELLA-GALVÃO, S. M. F.; COSTA, M. P. F.; KUTNER, M. B. B. Bloom of *Oscillatoria* (*Trichodesmium*) *erythraeum* (Her.) Kutz. in coastal waters of the Southwest Atlantic. Publicação especial do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, v. 11, p. 133-140, 1995.

GORDON, H.R.; WANG, M. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. Applied Optics, v. 33, n. 3, 443-452.

GORDON, H.R.; MOREL, A. 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. In: Barber, R.T; Mooers, N.K.; Bowman, M.J; Zeitzschel (eds.). A Review, Lecture notes on coastal and estuarine studies. Springer-Verlag, New York, 114 p.

GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M.; KREMLING, K. 1983. Methods of seawater analysis. 2nd ed. Basel, Verlag Chemie. 419 p.

GREGG, W.W.; CASEY, N.W. 2004. Global and regional evaluation of the SeaWIFS chlorophyll data set. Remote Sensing of Environment, 93: 463-479.

HEATH, M.R.; RICHARDSON, K.; KIORBOE, T. 1990. Optical assessment of phytoplankton nutrient depletion. Journal of Plankton Research, v.12(2), p.381-396.

HU, C.; CARDER, K. L.; MULLER-KARGER, F. E. 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: A practical method. Remote Sensing of Environment, v.74 (2), p.195-206.

INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). 2000. Remote sensing of ocean colour in Coastal, and other optically-complex, waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordenating Group, Dartmouth, Canada, n. 3, 2000. 140 p.

JORGENSEN, P.V. 2004. SeaWiFS data analysis and match-ups with *in situ* chlorophyll concentrations in Danish waters. International Journal of Remote Sensing, v. 25, n. 7, 1397-1402.

KAHRU, M.; MITCHELL BG. 2001. Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and colored dissolved organic matter concentration in the California Current Journal of Geophysical Research, v.106 (C2), p. 2517-2529.

KIRK, J.T. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 2nd ed. Cambridge, Cambridge Univ. Press. 509 p.

KOROLEFF, F. 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. Information on tecniques and methods for seawater analysis. Interlab. Rep. Cons. int. explor. Mer., v.3, p.19-22.

KOROLEFF, F. 1971. ICES C.M. C:43 (mimeo).

LAVENDER, S.J; PINKERTON, M.H.; FROIDEFOND, J.M.; MORALES, J.; AIKEN, J.; MOORE, G.F. 2003. SeaWiFS validation in European coastal waters using optical and bio-geochemical measurements. International Journal of Remote Sensing, v. 25, p.1481:1488.

LENTINI, C.A.D.; PODESTA, G.G.; CAMPOS, E.J.D.; OLSON, D.B. 2001. Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. Continental Shelf Research, v. 21, 89-112.

MANN, K.H.; LAZIER, J.R.N. 1996. Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans. Blackwell Scientific Publications, Oxford. p.111-158.

MARITORENA, S., SIEGEL, D.A.; PETERSON, A.R. 2002. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. Applied Optics, v.41, p. 2705-2714. 2002.

MATSUURA, Y. 1986. Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta Grande (SC). Ciência & Cultura, São Paulo, v.38(8), p.1439-1450.

MIKKELSEN, O.A. 2002. Variation in the projected surface area of suspended particles: Implications for remote sensing assessment of TSM. Remote Sensing of Environment, v.79, p.23-79.

MILLER, R.L.; MCKEE, B.A. 2004. 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.

MIRANDA, L.B. 1982. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) a Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre-Docência. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 123p.

MOBLEY, C.D. 1994. Light and water: radiative transfer in natural waters. San Diego, Academic Press. 592p.

MOBLEY, C.D. 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. Applied Optics, v. 38, n. 36, 7442-7455.

MÖLLER, A.JR.; PIOLA, A.R; FREITAS, A.C.; CAMPOS, E.J.D. 2008. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. Continental Shelf Research, v.28, 1607-1624.

MOORE, G., AIKEN, J. AND LAVENDER, S. J. 1999. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters: application to MERIS.. International Journal of Remote Sensing, v. 20, p. 1713-1733.

MOREL, A.; BRICAUD, A. 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. Deep-Sea Research, v. 28, p. 1375-1393.

MOREL, A.; PRIEUR, L. 1977. Analysis of variations in ocean color. Limnology and Oceanography, v. 22, p. 709-722.

MORRIS, A.W.; RILEY, J.P. 1963. The determination of nitrate in sea water. Analytica Chimical Acta., v.29, p.272-279.

MOSER, G.A.O. 2002. Aspectos da Eutrofização no Sistema Estuarino de Santos: Distribuição Espaço-Temporal da Biomassa e Produtividade Primária Fitoplanctônica e Transporte Instantâneo de Sal, Clorofila-*a*, Material em Suspensão e Nutrientes. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 410p.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimical Acta., v. 27, p.31-36.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009a. The Coastal Zone Color Scanner Experiment. Data Access. < http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS/ >. Acesso em janeiro de 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009b. SeaWiFS Project. < http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>. Acesso em janeiro de 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009c. MODIS. <http://modis.gsfc.nasa.gov/> Acesso em janeiro de 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009d. Ocean Color Products. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/PRODUCTS/k490.html> Acesso em janeiro de 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009e. NOMAD: the NASA bio-Optical Marine Algorithm Data set < http://seabass.gsfc.nasa.gov/restrict/nomad.cgi> Acesso em janeiro de 2009.

NECHAD, B.; CAUWER, V.DE, PARK, Y.; RUDDICK, K.G. 2003. Suspended particulate matter (SPM) mapping from MERIS imagery: Calibration of a regional algorithm for the Belgian coastal waters. Proceedings of MERIS User Workshop 10-13 November 2003 ESA-ESRIN, Frascati, Italy. ESA Special Publications, v. 549, p. 1-6.

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

O'REILLY, J.E., and 24 Coauthors. 2000. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. *NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11,* S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 p.

O'REILLY, J.E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B.G.; SIEGEL, D.A.; CARDER, K.L.; GARVER, S.A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C.1998. Ocean Color chlorophyll algotithms for SeaWiFS. Journal of Geophysical Research, v. 103, n. C11, 24,937-24,953.

OTIS, D.B.; CARDER, K.L.; ENGLISH, D.C.; IVEY, J.E.2004. CDOM transport from the Bahamas Banks. Coral Reefs, v. 23(1), p. 152-160.

PARSONS, T.R.;TAKAHASHI, M.; HARGRAVE, B. 1984. Biological oceanographic processes. Oxford, Pergamon Press.

PARSONS, T.R.; MAITA, Y ; LALLI, C.M. 1984a. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, Oxford, 173p.

PIRES-VANIN, A.M.S.; ROSSI-WONGTGTSCHOWSKI, C.L.D.B; AIDAR, E.; MESQUITA, H. de S.L.; SOARES, L.S.H.; KATSUGAWA, M.; MATSUURA, Y. 1993. Estrutura e função do ecossistema de plataforma continental do Atlântico Sul brasileiro: síntese dos resultados. Publicação Especial do Instituto Oceanográfico. São Paulo, v.10, p.217-231.

PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S. 1993. Fundamental issues in measurement of primary production. In: Measurement of primary production from the molecular to the global to scale. ICES Marine Science Symposia. Li, W.K. ; Maestrini, S.Y., eds. Actes du Symposium. La Rochelle, 21-24 /04/1992. ICES, v.19,p. 3-6.

POOLE, H.H.; ATKINS, W.R.G. 1929. Photo-eletric measurements of submarine illumination throughout the year. Journal of Marine Biology Assessment of United Kingdom, v.16, p.297-324.

REDFIELD, A.C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *In*: DANIEL, R.J., ed. Liverpool, Liverpool University Press. p. 176-192.

RUDDICK, K. G.; CAUWER, V. D.; PARK, Y. J.; MOORE, G. 2006. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. Limnology and Oceanography, v. 51 (2), p. 1167-1179.

RUDDICK, K.G.; OVIDIO, F.; RIJKEBOER, M. 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. Applied Optics, v. 39, n. 6, 897-912.

RUNDQUIST, D.C.; HAN, L.; SCHALLES, J.F.; PEAKE, J.S., 1996. Remote Measurement of Algal Chlorophyll in Surface Waters: The Case for the First Derivative of Reflectance Near 690 nm. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 62(2), p. 195 – 200.

RYTHER, J.H. 1956.The measurement of primary production. Limnology and Oceanography, v. 1(2), p. 72-84.

SALDANHA-CORRÊA, F.M.P. 1999. Aspectos da variação vertical e temporal da produção primária e biomassa fitoplanctônica, em uma estação fixa na região costeira de São Sebastião. Tese de doutorado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 99p.

SALDANHA-CORRÊA, F.M.P.1993. Simulação da mistura vertical de massa d'água da região costeira de Ubatuba (SP): efeitos sobre a produção primária e biomassa fitoplanctônica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2 vol, 250p.

SALDANHA-CORRÊA, F.M.P.; GIANESELLA, S.M.F. 2004. A microcosm approach on the potential effects of the vertical mixing of water masses over the primary productivity and phytoplankton biomass in the southern brazilian coastal region. Brazilian Journal of Oceanography, v. 52(3/4), p. 167-182.

SALDANHA-CORRÊA, F.M.P.; GIANESELLA, S.M.F.; BARRERA-ALBA, J. J. 2004. A comparison of the retention capability among three different glass-fiber filters used for chlorophyll determinations. Brazilian Journal of Oceanography, v.52, p. 245-249.

SARANGI, R.K.; CHAUHAN, P. NAYAK, S.R. 2004. Detection and monitoring of *Trichodesmium* blooms in the coastal waters off Saurashtra coast, India, using IRS-P4 OCM data. Current Science, v. 86, n.12, p.1636-1641.

SATHYENDRANATH, S.; LAZZARA, L.; PRIEUR, L. 1987. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. Limnology and Oceanography, v. 32, p. 403-415.

SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on Oceanographic Methodology**.** UNESCO Publications. v.1, p. 11-18, 1966.

SIEGEL, D.A., S. MARITORENA, N.B. NELSON, D.A. HANSELL, M. LORENZI-KAYSER. 2002. Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. Journal of Geophysical Research, v. 107 (C12), 3228p.

SILVEIRA, I.C.A.; SCHMIDT, A.C.K.; CAMPOS, E.J.D; GODOI, S.S.; IKEDA, Y. 2000. Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. Revista Brasileira de Oceanografia, v. 48(2), p. 171-183.

SILVEIRA, I.C.A. 1994. On the origin of the North Brazil Current. Journal of Geophysical Research, v. 99, n. C11, 22501-22512.

SIQUEIRA, A.; KOLM, H.E.; BRANDINI, F.P. 2006. Offshore distribution patterns of the cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* ehrenberg and associated phyto- and bacterioplankton in the southern Atlantic coast (Paraná, Brazil). Braz. arch. biol. technol., Mar., v. 49, p. 323-337.

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

SMITH, V.H.; TILMAN. G.D.; NECOLA, J.C. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Environmental Pollution, 100:179-196.

STEEMANN-NIELSEN, E. 1952. The use of radio-active carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. J.Cons. perm. int. Explor. Mer., v.18, p.117-140.

STEFFEN, C.A. 1996.Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto , 1996, Salvador. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos: INPE, p. 969-975.

STEVENSON, M.R.; DIAS-BRITO, D.; STECH, J.L.; KAMPEL, M. 1998. How do cold water biota arrive in a tropical bay near Rio de Janeiro, Brazil? Continental Shelf Research, v.18, p.1595-1612.

STRAMMA, L. 1991. Geostrophic Transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. Journal of Marine Research, v. 49, p.281-294.

STRAMSKI, D.; REYNOLDS, R.A.; KAHRU, M.; MITCHELL, B.G. 1999. Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing. Science, v. 285, p.239-242.

SUBRAMANIAN, A.; BROWN, C.W.; HOOD, R.R.; CARPENTER, E.J.; CAPONE, D.G. 2002. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery. Deep-Sea Research II, v. 49, p. 107-121.

SUBRAMANIAM, A.; CARPENTER, E.J.; FALKOWSKI, P.G. 1999. Optical properties of the marine diazotrophic cyanobacterium *Trichodesmium*; II A reflectance model for remote sensing. Limnology and Oceanography , v. 44, p.618-627.

SUBRAMANIAN, A.; CARPENTER, E.J. 1994. An empirically derived protocol for the detection of blooms of the marine cyanobacterium *Trichodesmium* using CZCS imagery. Int. J. Remote Sensing. v. 15, p. 1559-1569.

SUNYÉ, P.S.; SERVAIN, J. 1998. Effects of seasonal variations in meteorologyand oceanography on the Brazilian sardine fishery. Fisheries oceanography, v.7, n.2, 89-100.

TYRREL T.; MARANÕN, E.; POULTON, A. J.; BOWIE, A.R.; HARBOUR, D.S.; WOODWARD, M.S. 2003. Large-scale latitudinal distribution of *Trichodesmium* spp. In the Atlantic Ocean. Journal of Plankton Research, v. 25, p. 405-416.

UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura). 1981. Background papers and supporting data on the Pratical Salinity Scale 1978. UNESCO, Technical Papers in Marine Science, v. 37, p. 1-144.

UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura). 1973. International oceanographic tables. Tables of oxygen. National Institute of Oceanography of Great Britain and UNESCO. Vol. 2.

WANG, M.H. 2007. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations. Applied Optics, v. 46, n. 9, 1535-1547.

WANG, M.; TANG, J.; SHI, W. 2007. MODIS-derived ocean color products along China east coastal region. Geophysical Research Letters, v. 34, L06611.

WANG, M. 2006. Aerosol polarization effects on atmospheric correction and aerosol retrievals in ocean color remote sensing. Applied Optics, v. 45, n. 35, 8951-8963.

WOOD, E.D.; ARMSTRONG, F.A.J.; RICHARDS, F.A. 1967. Determination of nitrate in sea water by cadmium copper reduction to nitrite. Journal of Marine Biology Assessment of United Kingdom, v.47, p.23-31.

WOOD, E.J.F. 1968. Dinoflagellates of the Caribbean Sea and adjacent areas. Coral Gables, University of Miami Press. 142p.

YODER, J.; KENNELY, M.A. 2006.Ocean Variability. *Oceanography*, v. 19 (1), p. 152-171.

Anexo 1 – Tabelas

Tabela 3.1 – Intervalos de comprimentos de onda das bandas dos sensores MODIS e SeaWiFS. Fonte: NASA (2009c); NASA (2009b).

MODIS				SeaWiFS			
Banda	**Centro da banda (nm)**	**Comp. de onda (nm)**	**Largura da banda (nm)**	**Banda**	**Centro da banda (nm)**	**Comp. de onda (nm)**	**Largura da banda (nm)**
8	412	405 – 420	15	**1**	412	402 - 422	20
9	443	438 – 448	10	**2**	443	433 - 453	20
10	488	483 – 493	10	**3**	490	480 - 500	20
11	531	526 – 536	10	**4**	510	500 - 520	20
12	551	546 – 556	10	**5**	555	545 - 565	20
13	667	662 – 672	10	**6**	665	660 - 680	20
14	678	673 – 683	10	**7**	765	745 - 785	40
15	748	743 – 753	10	**8**	865	845 - 885	40
16	869	862 – 877	15				

Tabela 4.1.1 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de hidrografia, de 20 a 25 de setembro de 2005.

	Média	**Mínimo**	**Máximo**	**DP.**
Secchi (m)	9,85	1,50	20,50	6,36
Prof. da Zeu (m)	26,68	4,06	55,53	17,23
Kd (m^{-1})	0,35	0,08	1,13	0,37
T (°C)	20,18	10,87	22,14	1,38
Sal	33,99	30,97	36,75	1,32
Amônia (µM)	0,35	0,00	2,22	0,30
Nitrato (µM)	0,48	0,00	3,70	0,70
Nitrito (µM)	0,05	0,00	1,04	0,11
NIT (µM)	0,88	0,07	5,17	0,82
Fósforo inorgânico (µM)	0,40	0,06	1,39	0,17
Silicato (µM)	9,31	0,59	46,99	6,13
480:665	1,60	0,57	3,00	0,40
MST (mg l^{-1})	32,12	7,35	205,13	37,02
MSI (mg l^{-1})	14,63	-2,05	56,90	6,78
MSO (mg l^{-1})	17,49	0,55	187,93	35,36
MSO (%)	30,15	5,67	112,46	26,96
MODC (m^{-1})	0,12	0,02	0,43	0,87
Cl-*a* (mg m^{-3})	1,04	0,05	8,28	1,10
Carotenóides (mg m^{-3})	1,06	0,01	6,13	0,94
Carotenóides/Cl-*a*	1,17	0,20	2,84	0,40

Tabela 4.1.2 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de radiometria de 12 a 15 de outubro de 2005 (superfície).

	Média	**Mínimo**	**Máximo**	**DP.**
Secchi (m)	7,93	1,50	19,00	4,75
Prof. da Zeu (m)	21,49	4,06	51,47	12,86
Kd (m^{-1})	0,31	0,09	1,13	0,23
T (°C)	22,14	20,94	23,50	0,73
Sal	31,46	29,20	33,20	1,11
Amônia (µM)	0,40	0,14	3,64	0,55
Nitrato (µM)	0,14	0,00	1,48	0,31
Nitrito (µM)	0,03	0,00	0,42	0,09
NIT (µM)	0,57	0,14	3,72	0,66
Fósforo inorgânico (µM)	0,53	0,31	0,82	0,13
Silicato (µM)	5,84	0,61	13,52	3,22
480:665	1,55	0,81	2,17	0,33
MST (mg l^{-1})	85,79	14,85	433,40	100,98
MSI (mg l^{-1})	24,95	11,30	54,00	10,13
MSO (mg l^{-1})	60,85	2,75	408,70	101,53
MSO (%)	41,53	15,79	94,30	30,78
MODC (m^{-1})	0,20	0,02	0,43	0,10
Cl-*a* (mg m^{-3})	3,39	0,26	25,65	6,01
Carotenóides (mg m^{-3})	2,73	0,39	21,22	4,21
Carotenóides/Cl-*a*	1,14	0,52	1,75	0,31

Tabela 4.1.3 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas analisadas durante o cruzeiro de hidrografia, de 12 a 17 de março de 2006.

	Média	**Mínimo**	**Máximo**	**DP.**
Secchi (m)	15,12	5,00	32,00	5,34
Prof. Da Zeu (m)	40,95	13,54	86,68	0,15
Kd (m^{-1})	0,13	0,05	0,34	0,06
T (°C)	23,98	9,96	28,32	3,92
Sal	35,31	33,90	37,03	0,73
Amônia (µM)	0,18	0,00	1,43	0,19
Nitrato (µM)	0,52	0,01	6,14	0,95
Nitrito (µM)	0,08	0,00	0,74	0,12
NIT (µM)	0,79	0,07	6,75	0,79
Fósforo inorgânico (µM)	0,30	0,10	1,79	0,19
Silicato (µM)	5,87	0,70	18,64	3,36
480:665	1,64	0,77	12,90	0,95
MST (mg l^{-1})	88,44	7,35	264,58	62,35
MSI (mg l^{-1})	19,18	4,70	104,90	10,25
MSO (mg l^{-1})	68,50	0,01	219,85	61,32
MSO (%)	63,29	0,09	94,76	26,12
MODC (m^{-1})	0,14	0.05	0.32	0,05
Cl-*a* (mg m^{-3})	0,90	0,05	7,99	1,21
Carotenóides (mg m^{-3})	0,76	0,13	4,72	0,80
Carotenóides/Cl-*a*	1,17	0,47	10,48	0,79

Tabela 4.1.4 – Valores médios (±DP), mínimos e máximos das variáveis físicas, químicas e biológicas, para a superfície, analisadas durante o cruzeiro de radiometria, de 23 a 26 de março de 2006 (superfície).

	Média	**Mínimo**	**Máximo**	**DP.**
Secchi (m)	12,34	1,5	22,5	6,53
Prof. da Zeu (m)	33,43	4,06	60,95	17,70
Kd (m^{-1})	0,23	0,08	1,13	0,24
T (°C)	28,11	27,10	28,96	0,41
Sal	34,44	33,10	35,20	0,52
Amônia (µM)	0,11	0,00	0,53	0,10
Nitrato (µM)	0,43	0,00	3,89	0,77
Nitrito (µM)	0,03	0,00	0,42	0,10
NIT (µM)	0,58	0,02	3,91	0,78
Fósforo inorgânico (µM)	0,30	0,00	1,42	0,29
Silicato (µM)	3,54	0,47	9,06	2,34
480:665	2,39	0,95	7,07	1,31
MST (mg l^{-1})	55,58	13,75	235,90	60,28
MSI (mg l^{-1})	15,70	11,95	24,00	2,44
MSO (mg l^{-1})	40,80	1,45	217,75	59,65
MSO (%)	44,08	10,55	92,31	30,18
MODC (m^{-1})	0,08	0,01	0,36	0,07
Cl-*a* (mg m^{-3})	2,27	0,27	14,62	3,52
Carotenóides (mg m^{-3})	2,00	0,39	8,81	2,05
Carotenóides/Cl-*a*	1,61	0,60	4,31	0,91

Tabela 4.1.5 – Abundância dos grupos fitoplanctônicos observada durante o cruzeiro de radiometria, de 23 a 26 de março de 2006.

Estação	***T. erythraeum* (%)**	**Outras Cianobactérias (%)**	**Diatomáceas (%)**	**Dinoflagelados (%)**	**Total de cel/ml**
1	1,03	13,35	**85,42**	0,21	259731
2	47,32	0,00	43,90	8,78	8200
3	26,98	32,26	34,31	6,45	13640
4	26,46	0,00	**67,15**	6,39	10960
5	25,35	0,00	**62,50**	12,15	5760
6	47,64	0,00	37,60	14,76	10160
7	**70,91**	0,00	22,73	6,36	4400
8	**80,99**	0,00	16,90	2,11	5680
9	43,43	0,00	35,35	21,21	3960
10	**68**	0,00	14,00	18,00	2000
13	**51,16**	0,00	13,95	34,88	1720
14	40,74	0,00	31,48	27,78	2160
15	**90,67**	0,00	2,22	7,11	9000
16	**63,29**	0,00	16,46	20,25	3160
17	**76**	0,00	6,67	17,33	9000
18	49,66	0,00	26,85	23,49	5960
19	**99,12**	0,00	0,35	0,53	114200
20	**51,90**	0,00	38,86	9,24	14720
21	**52,92**	1,95	37,05	8,08	14360
22	9,27	0,00	**87,71**	3,02	19200
26	0,48	0,00	**98,55**	0,96	221331
27	24,14	0,00	**63,79**	12,07	13920
28	**66,67**	0,00	22,22	11,11	1440
29	32,35	0,00	32,35	35,29	4080
30	29,57	0,00	**50,43**	20,00	2300
31	**54,34**	0,00	24,28	21,39	3460
32	9,29	0,00	**85,24**	5,48	8400
35	6,39	3,65	**88,81**	1,14	70080
36	**50,39**	0,00	41,60	8,01	12980
37	**50,00**	0,00	40,81	9,19	5440
38	1,58	12,87	**85,33**	0,23	177200
40	21,03	0,00	**74,09**	4,88	20920
Total	20,12	6,11	71,26	2,51	1059523

Tabela 4.2.1– Comparação entre as refletâncias medidas pelo sensor MODIS e pelo espectroradiômetro *in situ* após a correção (os valores de refletância em 869 nm são iguais a zero porque esta banda foi utilizada na correção das demais, através da subtração).

Rsr *in situ*	**412 (nm)**	**443 (nm)**	**488 (nm)**	**531 (nm)**	**551 (nm)**	**667 (nm)**	**678 (nm)**	**748 (nm)**	**869 (nm)**
Média	0,0059	0,0055	0,0059	0,0054	0,0052	0,0022	0,0021	0,0015	0,000
Mediana	0,0055	0,0050	0,0056	0,0055	0,0049	0,0020	0,0019	0,0010	0,000
Desv. Padrão	0,0032	0,0029	0,0027	0,0025	0,0025	0,0017	0,0017	0,0015	0,000
Mínimo	0,0008	0,0010	0,0014	0,0009	0,0007	-0,0005	0,0000	-0,0012	0,000
Máximo	0,0166	0,0151	0,0140	0,0109	0,0119	0,0067	0,0065	0,0064	0,000
Rsr MODIS	**412 (nm)**	**443 (nm)**	**488 (nm)**	**531 (nm)**	**551 (nm)**	**667 (nm)**	**678 (nm)**	**748 (nm)**	**869 (nm)**
Media	0,0070	0,0064	0,0061	0,0044	0,0035	0,0007	0,0007	0,0004	0,0002
Mediana	0,0061	0,0057	0,0059	0,0039	0,0028	0,0004	0,0005	0,0002	0,0001
Desv. Padrão	0,0034	0,0024	0,0017	0,0018	0,0017	0,0006	0,0006	0,0004	0,0002
Minimo	0,0026	0,0035	0,0036	0,0025	0,0017	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000
Maximo	0,0142	0,0123	0,0103	0,0087	0,0085	0,0021	0,0021	0,0014	0,0007

Tabela 4.2.2 – Descrição estatística da clorofila-a obtida *in situ* e pelos algoritmos globais, OC3, OC2v4 e OC4v4 (logaritmicamente transformados).

	n	**Média**	**Desv. Pad.**	**Mínimo**	**Máximo**
Cla *in situ* (mg m^{-3})	49	2,3931	3,9057	0,2630	15,9840
Cla OC3 (mg m^{-3})	49	1,7736	1,3903	0,2966	5,5849
Cla OC2v4 (mg m^{-3})	49	1,7920	1,2082	0,4205	4,6881
Cla OC4v4 (mg m^{-3})	49	1,8532	1,3913	0,2712	5,0995

Tabela 4.2.3 – Coeficiente de correlação e determinação, p-value, soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) dos algoritmos globais OC3, OC2v4 e OC4v4, para todo o conjunto de dados e para cada etapa de coleta, em relação à clorofila-a medida *in situ* (*log*).

Algoritmos	**n**	**r**	**r^2**	**p**	**EMQ**
OC3	49	0,8633	0,7453	0,0000	0,0788
OC2v4	49	0,8702	**0,7573**	0,0000	0,0967
OC4v4	49	0,8628	0,7444	0,0000	**0,0819**
OC3 – outubro/2005	27	0,8649	0,7480	0.000000006	0,0980
OC2v4 – outubro/2005	27	0,8569	0,7342	0,00000001	0,1163
OC4v4 – outubro/2005	27	0,8627	**0,7443**	0,000000007	**0,1079**
OC3 – março/2006	22	0,9449	0,8929	0,0000	0,0588
OC2v4 – março/2006	22	0,9588	**0,9193**	0,0000	0,0772
OC4v4 – março/2006	22	0,9340	0,8724	0,0000	**0,0537**

Tabela 4.2.4 – Parâmetros estatísticos da concentração de clorofila-a (Cla), carotenóides (Carot), MST, MSO, MSI e MODC, para os cruzeiros de radiometria, de 12 a 15 de outubro de 2005 e de 23 a 26 de março de 2006 na plataforma continental de Santos.

Coleta	Parâmetro	Cla (mg m^{-3})	Carot (mg m^{-3})	MST (mg l^{-1})	MSO (mg l^{-1})	MSI (mg l^{-1})	MODC (m^{-1})
Outubro/2005	Média	2,26	**2,26**	**96,27**	**73,33**	**22,94**	**0,17**
	Mediana	1,00	1,27	39,74	9,23	24,25	0,20
	Desvio padrão	3,82	4,12	97,11	97,78	7,85	0,10
	Mínimo	0,26	0,39	14,85	2,90	11,30	0,02
	Máximo	15,98	21,22	326,40	303,40	44,00	0,43
Março/2006	Média	2,56	2,10	56,88	42,05	15,77	0,10
	Mediana	0,59	1,10	20,93	6,10	15,25	0,09
	Desvio padrão	4,09	2,38	63,01	62,16	2,34	0,08
	Mínimo	0,27	0,39	15,65	1,95	12,80	0,01
	Máximo	14,62	8,81	235,90	217,75	24,00	0,36

Tabela 4.2.5– Parâmetros da regressão linear entre as razões de bandas (*log*) e a concentração de clorofila-*a in situ* (*log*): número de amostras (n), coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e a equação linear obtida por cada regressão.

Razão	n	R	R^2	Equação
Log R412/551	31	-0,6851	0,4693	*Log*Cla = 0,0944661749 - 1,75940173*R
Log R443/551	31	-0,7253	0,5261	*Log*Cla = 0,0489765934 - 2,13908158*R
Log R488/551	31	-0,8615	0,7422	*Log*Cla = 0,240834348 - 3,50874427*R
***Log* R531/551**	31	-0,8938	0,7988	*Log*Cla = 0,330312907 - 13,5220874*R
Log R443/551>R488/551	31	-0,8560	0,7328	*Log*Cla = 0,254270685 - 3,27288354*R

Tabela 4.2.6 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre o logaritmo da razão de bandas 531/551 (R) e o logaritmo da clorofila-a *in situ*, para o ajuste linear e polinomiais de segunda, terceira e quarta ordem.

Grau do polinômio	n	R^2	Equação
Linear	31	0,7988	$LogCla = 0,330312907 - 13,5220874*R$
Linear – Out/2005	18	0,7594	$LogCla = 0,220781096 - 12,9652738*R$
Linear - Mar/2006	13	0,9469	$LogCla = 0,533288197 - 15,5813174*R$
2ª ordem	31	0,8839	$LogCla = 0,2238-18,4551*x+132,6587*R^2$
3ª ordem	31	0,8839	$LogCla = 0,2077-18,0686*R+152,3734*R^2-316,8065*R^3$
4ª ordem	31	0,8854	$Log\ Cla = 0,2102-18,5984*R+154,0355*R^2+45,3839*R^3-3786,8821*R^4$

Tabela 4.2.7 – Coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2), soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) de cada algoritmo (regionais lineares e polinomiais, e OC3) em relação à clorofila-a medida *in situ* (*log*).

Algoritmo	**n**	**R**	**R^2**	**SQE**	**EMQ**
Linear	17	0,9198	**0,8461**	0,7888	0,0493
Polinômio 2ª ordem	17	0,9152	0,8375	0,6897	0,0431
Polinômio 3ª ordem	17	0,9167	0,8403	0,6786	0,0424
Polinômio 4ª ordem	17	0,9178	0,8424	0,6683	**0,0418**
OC3	17	0,8774	0,7698	1,1418	0,0714
OC4v4	17	0,8839	0,7812	1,1337	0,0709
OC2v4	17	0,8865	0,7858	1,4004	0,0875

Tabela 4.3.1 – Soma do Quadrado dos Erros (SQE) e Erro Médio Quadrático (EMQ) entre o coeficiente de atenuação da água (Kd) obtido *in situ*, e coeficiente de atenuação difusa da água em 488 nm (K490) obtido no processamento das imagens MODIS, utilizando a correção atmosférica padrão do Seadas (IVP) e a correção MUMM.

	Correção IVP padrão	**Correção MUMM**
SQE (Soma do Quadrado dos Erros)	0,0325	0,0250
EMQ (Erro Médio Quadrático)	0,0022	0,0017
R^2	0,98	0,9198

Tabela 4.3.2 – Matriz de correlação (r) entre as variáveis bio-ópticas obtidas *in situ* e as obtidas pelo satélite MODIS.

	n	**Cla-a MODIS (mg m^{-3})**	**MST MODIS (mg l^{-1})**	**K490 MODIS (m^{-1})**
Cla-a *in situ* (mg m^{-3})	26	0,7874		
MST *in situ* (mg l^{-1})	26		-0,2237	
Kd *in situ* (m^{-1})	13			0,7701

Tabela 4.3.3. - Coeficiente de correlação e determinação, soma dos quadrados dos erros (SQE) e erro médio quadrático (EMQ) de cada algoritmo, regionais lineares e polinomiais e OC3 (*log*) aplicados às refletâncias obtidas pelo sensor MODIS, em relação à clorofila-a medida *in situ* (*log*).

Algoritmo	**n**	**R**	**R^2**	**SQE**	**EMQ**
Linear	26	0,7290	0,5314	16,5324	0,5904
Polinômio 2ª ordem	26	-06579	0,4329	10,1388	0,3621
Polinômio 3ª ordem	26	-0,2825	0,0798	2,7760	0,0991
Polinômio 4ª ordem	26	0,8230	**0,6774**	0,7983	**0,0285**
OC3	26	0,7874	0,6200	1,0121	0,0361

Tabela 4.3.4 – Parâmetros estatísticos descritivos dos componentes bio-ópticos da água para o conjunto de dados de 26 estações obtidas "simultâneas" à passagem do sensor MODIS.

	N	**Média**	**Mínimo**	**Máximo**	**Desvio Padrão**
Clorofila-a (mg m^{-3})	26	0,49	0,17	1,12	0,21
Carotenóides (mg m^{-3})	26	81,72	15,75	215,05	71,52
MODC	26	19,59	11,10	48,87	9,90
MST (mg l^{-1})	26	62,13	2,20	198,30	69,31
MSI (mg l^{-1})	26	0,41	0,06	1,03	0,20
MSO (mg l^{-1})	26	0,13	0,01	0,24	0,06

Tabela 5.1 - Valores médios, mínimos e máximos das variáveis biológicas e químicas obtidas por Aidar et al. (1993) para a região da plataforma de Ubatuba (*), por Gianesella & Saldanha-Corrêa (2003) para a região da plataforma em São Sebastião (**) e pelo presente trabalho, na região de Santos (***).

		Cl-*a* (mg m^{-3})	**Nitrato (µM)**	**Nitrito (µM)**	**Amônia (µM)**	**NIT (µM)**	**Silicato (µM)**	**P-Fosfato (µM)**	**Carotenóides (mg m^{-3})**	**480/665**	**MST (mg l^{-1})**	**MSO (mg l^{-1})**
Verão - (1985 – 1988) Ubatuba *	Média	0,65	2,65	0,20	0,51	3,37	2,83	0,39				
	Mín	0,06	0,06	0,02	0,12	0,22	1,29	0,09				
	Máx	2,77	7,05	0,82	0,79	8,32	5,84	1,15				
Verão/1994 - S. Sebastião **	Média	0,62	2,30	0,20	0,74	3,24	4,59	0,26	0,58	1,94	34,55	
Verão/2006 - Santos ***	Média	0,90	0,52	0,08	0,18	0,79	5,87	0,30	0,76	1,64	88,44	68,50
	Mín	0,05	0,01	0,00	0,00	0,07	0,70	0,10	0,13	0,77	7,35	0,01
	Máx	7,99	6,14	0,74	1,43	6,75	18,64	1,79	4,72	12,90	264,58	219,85
Inverno - (1986 – 1988) Ubatuba*	Média	0,42	2,76	0,11	0,36	3,12	4,00	0,39				
	Mín	0,11	0,29	0,05	0,22	0,69	2,17	0,14				
	Máx	1,07	6,24	0,15	0,47	6,68	5,97	0,64				
Primavera/1997 - S. Sebastião **	Média	1,68	1,79	0,12	0,24	2,14	5,66	0,36	1,38	1,47	27,67	3,15
Primavera/2005 - Santos ***	Média	1,04	0,48	0,05	0,35	0,88	9,31	0,40	1,06	1,60	32,12	17,49
	Mín	0,05	0,00	0,00	0,00	0,07	0,59	0,06	0,01	0,57	7,35	0,55
	Máx	8,28	3,70	1,04	2,22	5,17	46,99	1,39	6,13	3,00	205,13	187,93

Anexo 2 – Figuras

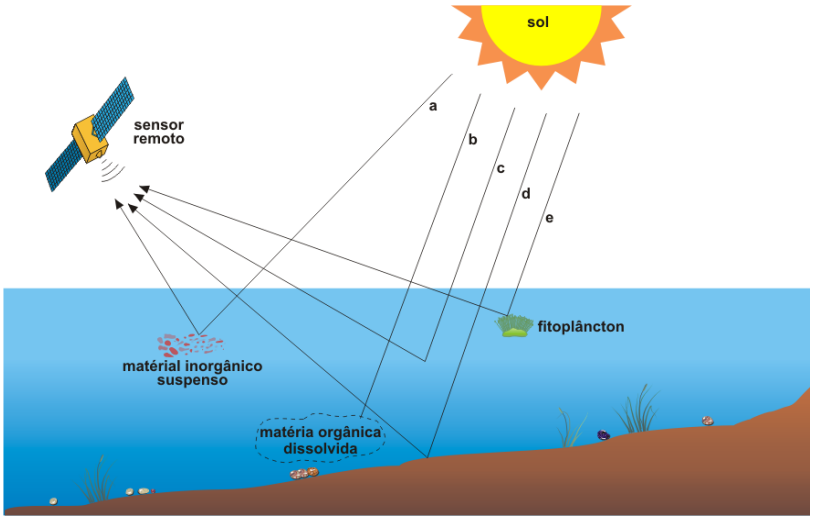


Figura 2.1 – Fatores que influenciam a radiância emergente do corpo d'água detectada pelos sensores remotos: (a) retroespalhamento pelo material inorgânico em suspensão; (b) absorção pela matéria orgânica dissolvida; (c) retroespalhamento pelas moléculas de água; (d) reflexão do fundo; (e) retroespalhamento pelo fitoplâncton. Fonte: adaptado de IOCCG (2000).

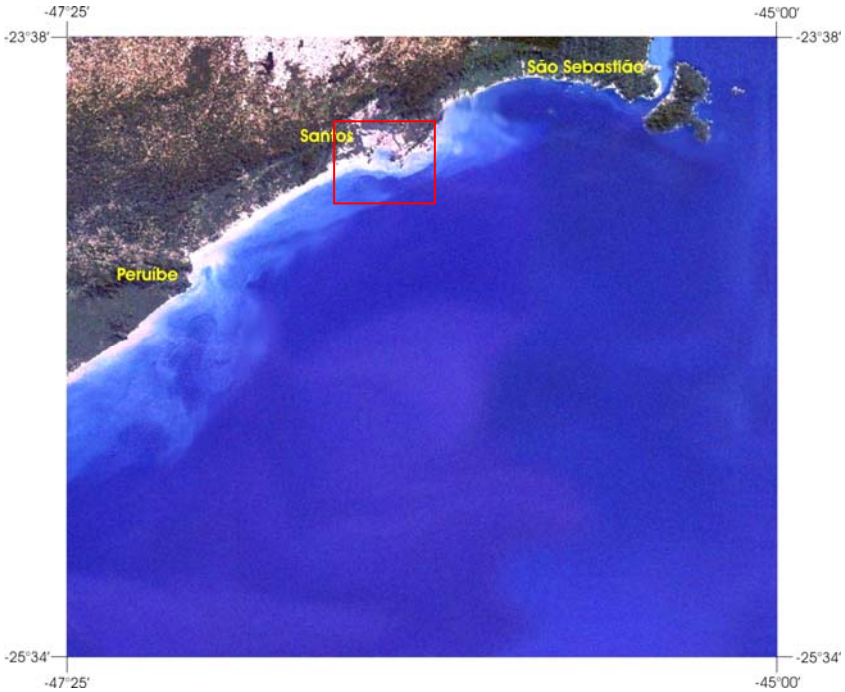
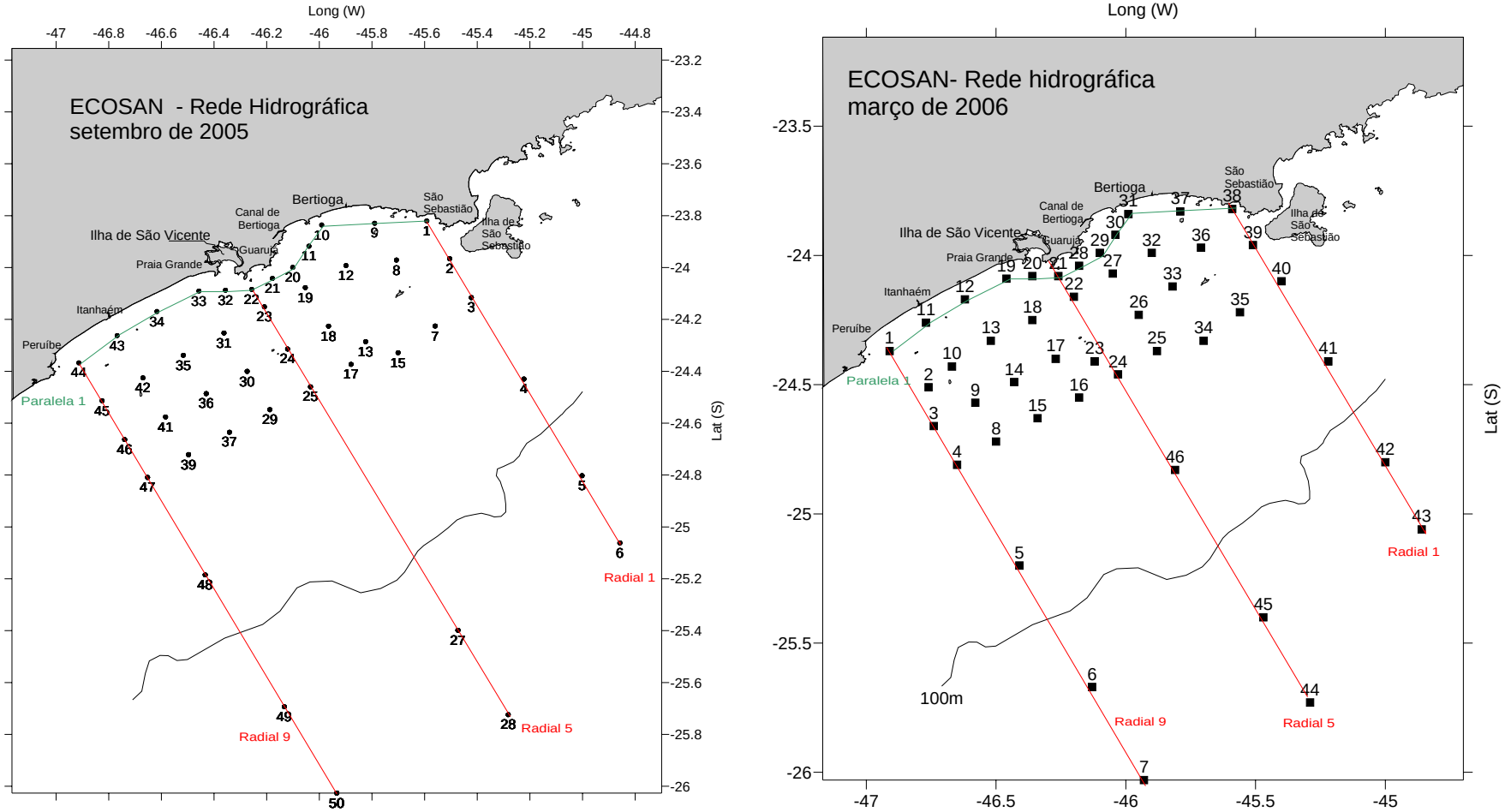


Figura 3.1 – Composição colorida, cor natural (321) ETM+/Landsat 7 de 25 de maio de 2003, mostrando a plataforma continental entre Peruíbe e São Sebastião e o estuário de Santos (detalhe).



(a) (b)

Figura 3.2 – Rede de estações oceanográficas amostradas durante as etapas hidrografia, realizadas entre 19 a 26 de setembro de 2005 (a) entre 12 a 17 de março de 2006 (b) com o N. Oc. Prof. W. Besnard.

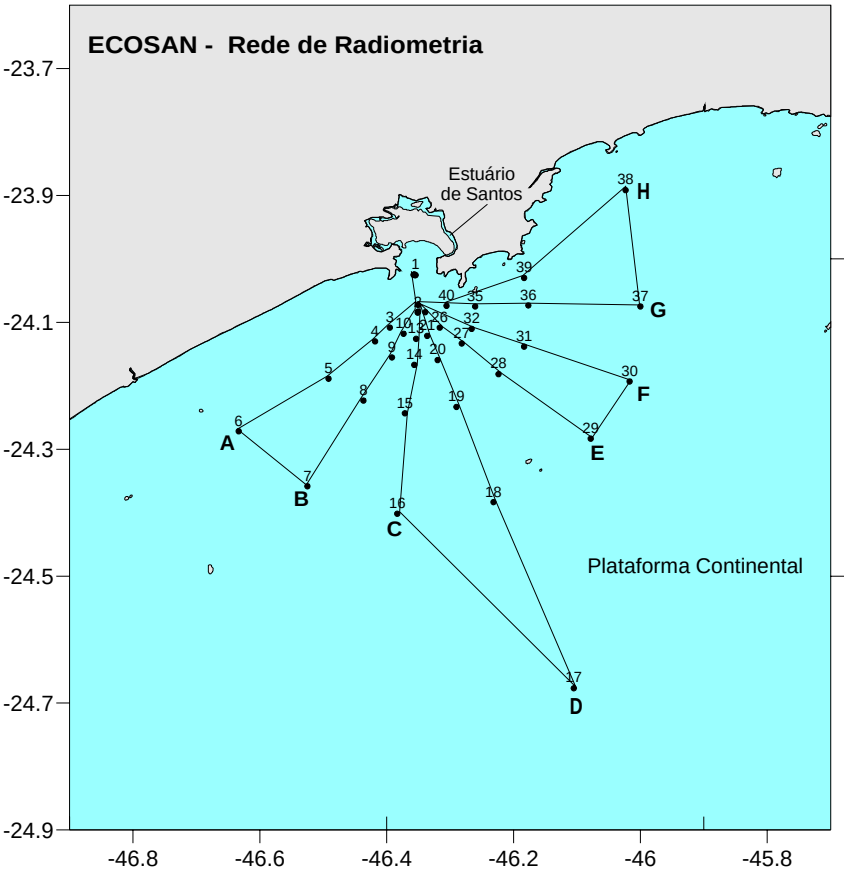


Figura 3.3 – Rede de estações oceanográficas amostradas durante os cruzeiros de 12 a 15 de outubro de 2005 e de 23 a 26 de março de 2006 com o N. Oc. Prof. W. Besnard.

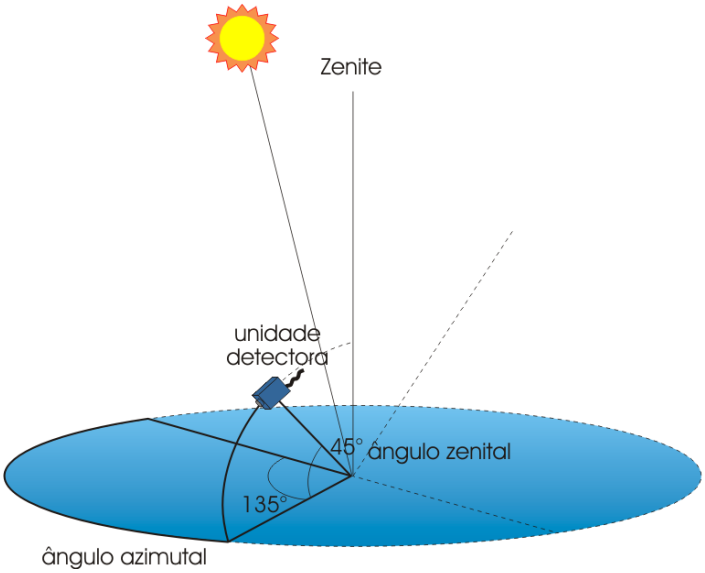
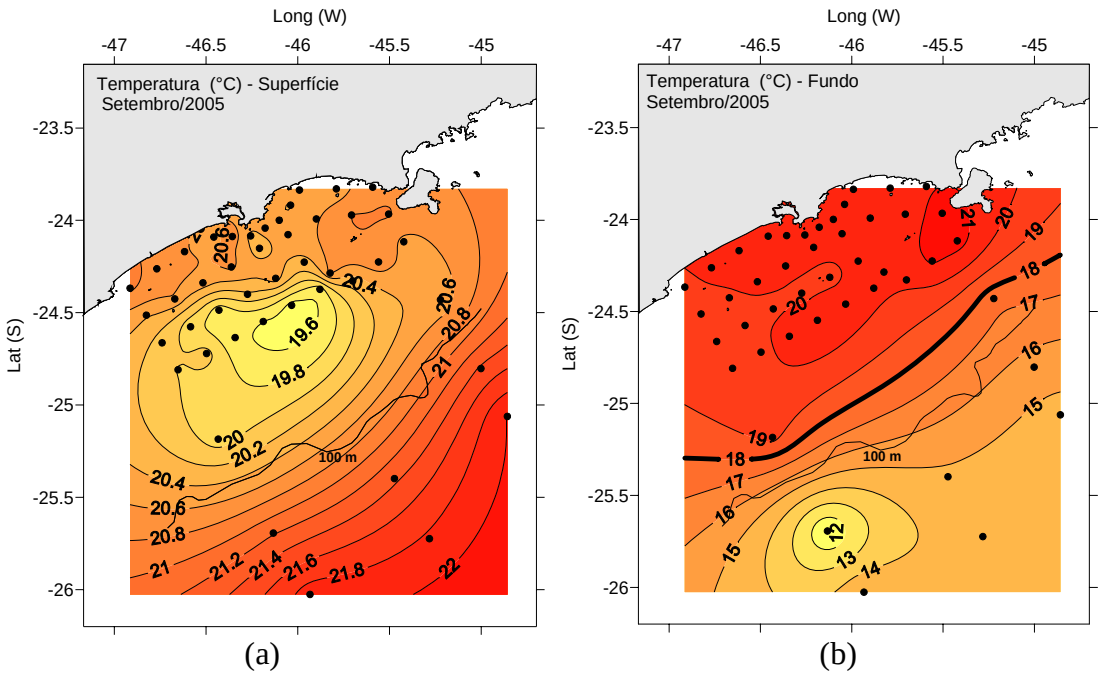
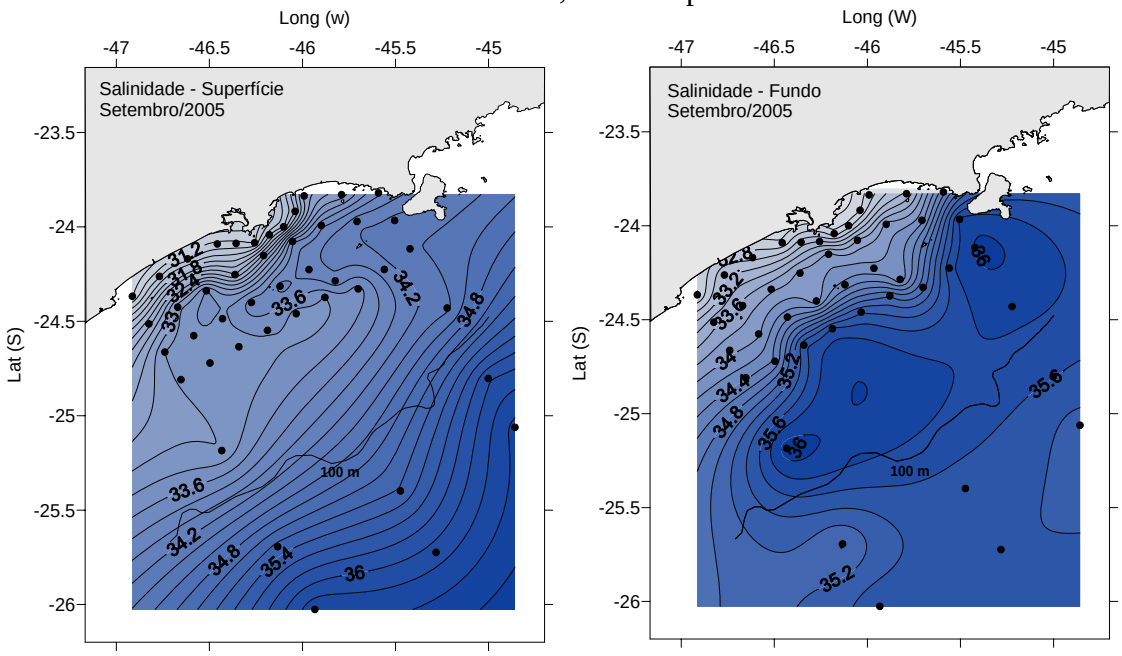


Figura 3.4 – Geometria da coleta dos dados radiométricos.



(a) (b)

Figura 4.1.1 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005. A linha mais espessa na figura b indica a isoterma de 18 °C, limite superior da ACAS.



(a) (b)

Figura 4.1.2 – Distribuição horizontal da salinidade na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

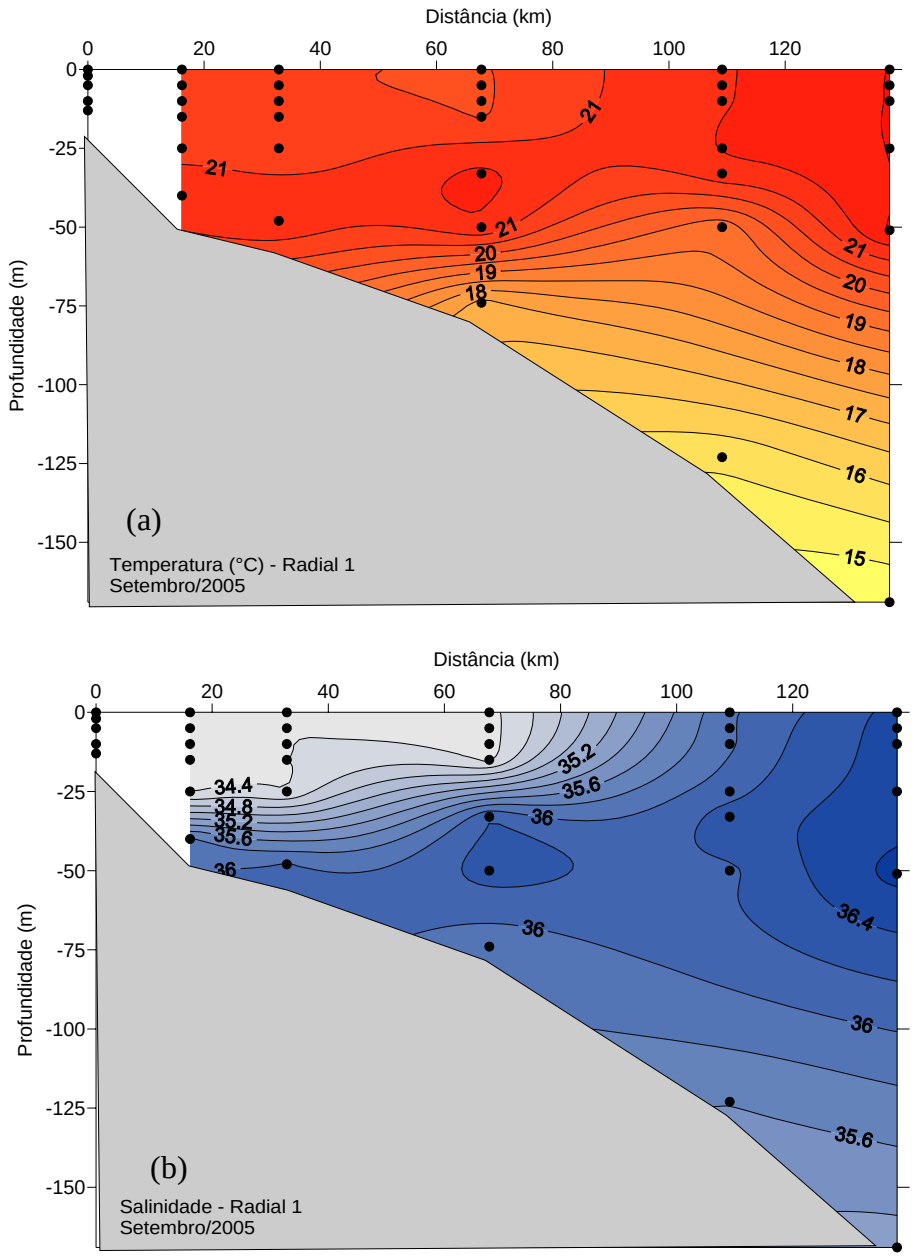


Figura 4.1.3 - Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 1 (extremo norte da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

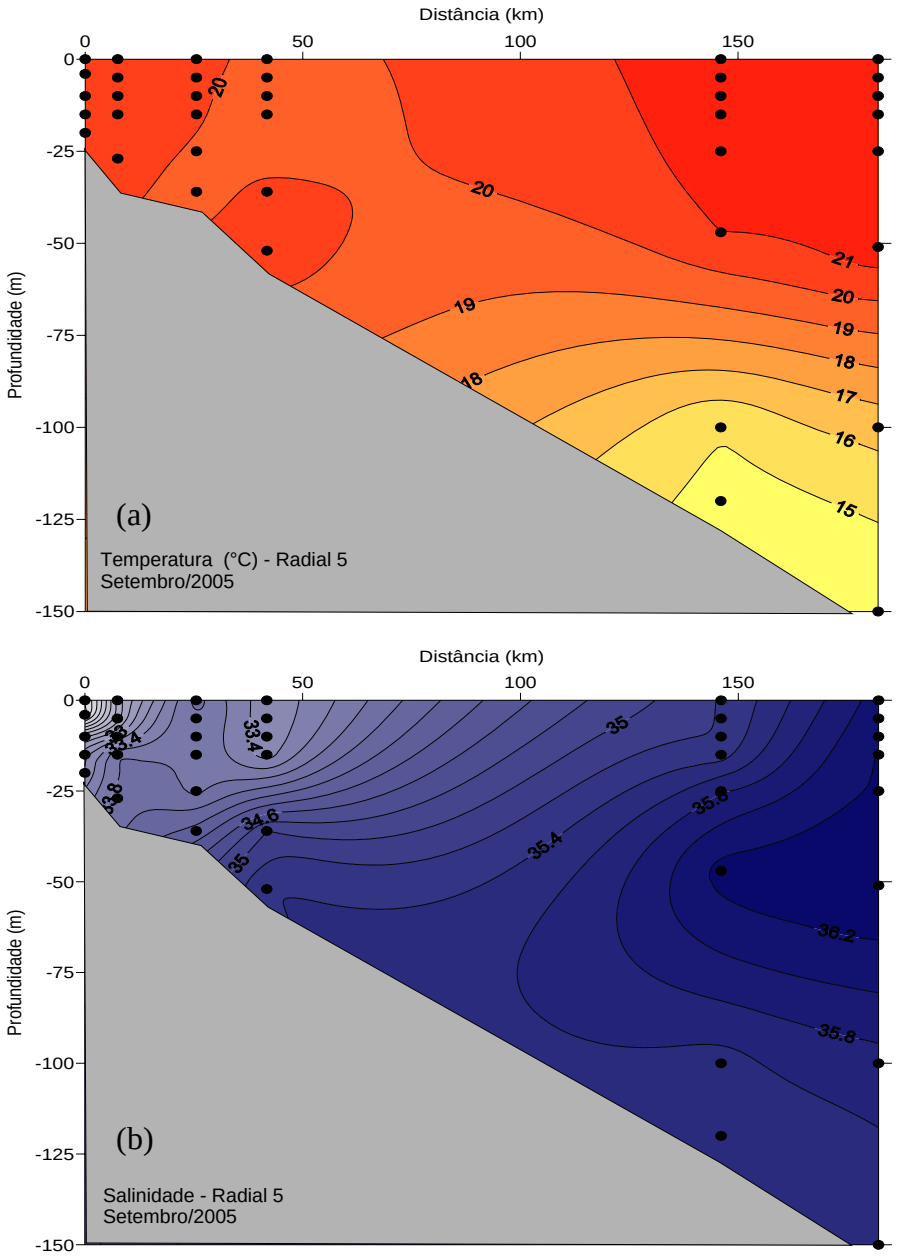


Figura 4.1.4 - Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 5 (região central da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

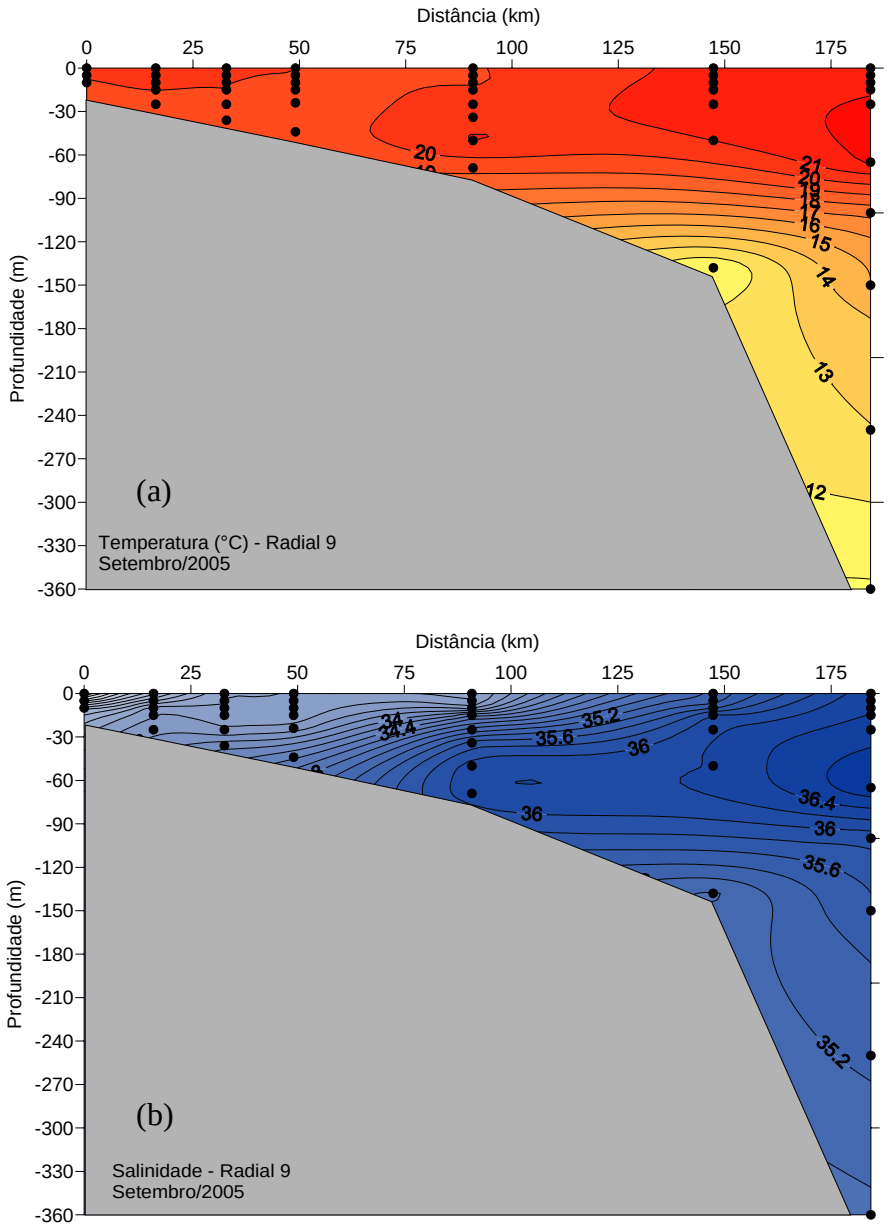


Figura 4.1.5 - Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 9 (extremo sul da área de estudo) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

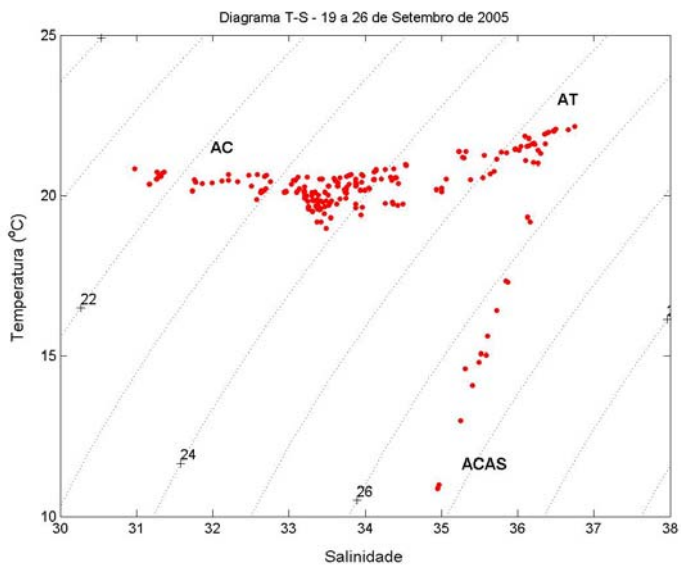


Figura 4.1.6 – Diagrama T-S: temperatura (°C) *versus* salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD na plataforma de Santos de 20 a 25 de setembro de 2005. As massas de água indicadas estão de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira); AT (Água Tropical) e ACAS (Água Central do Atlântico Sul).

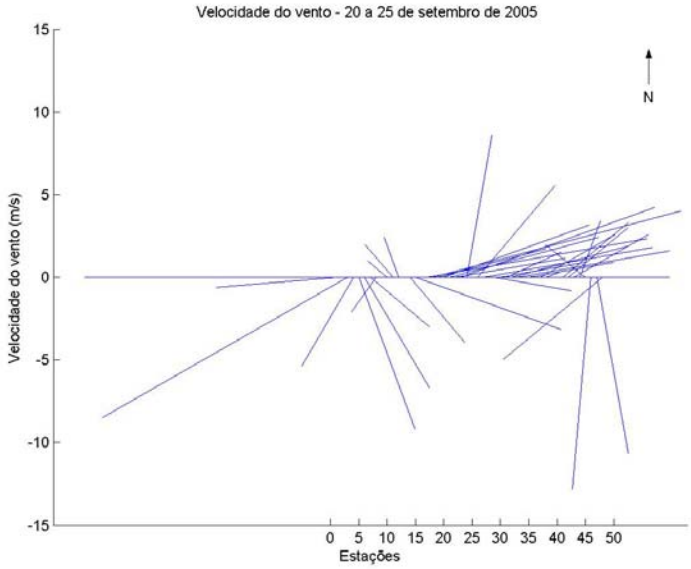
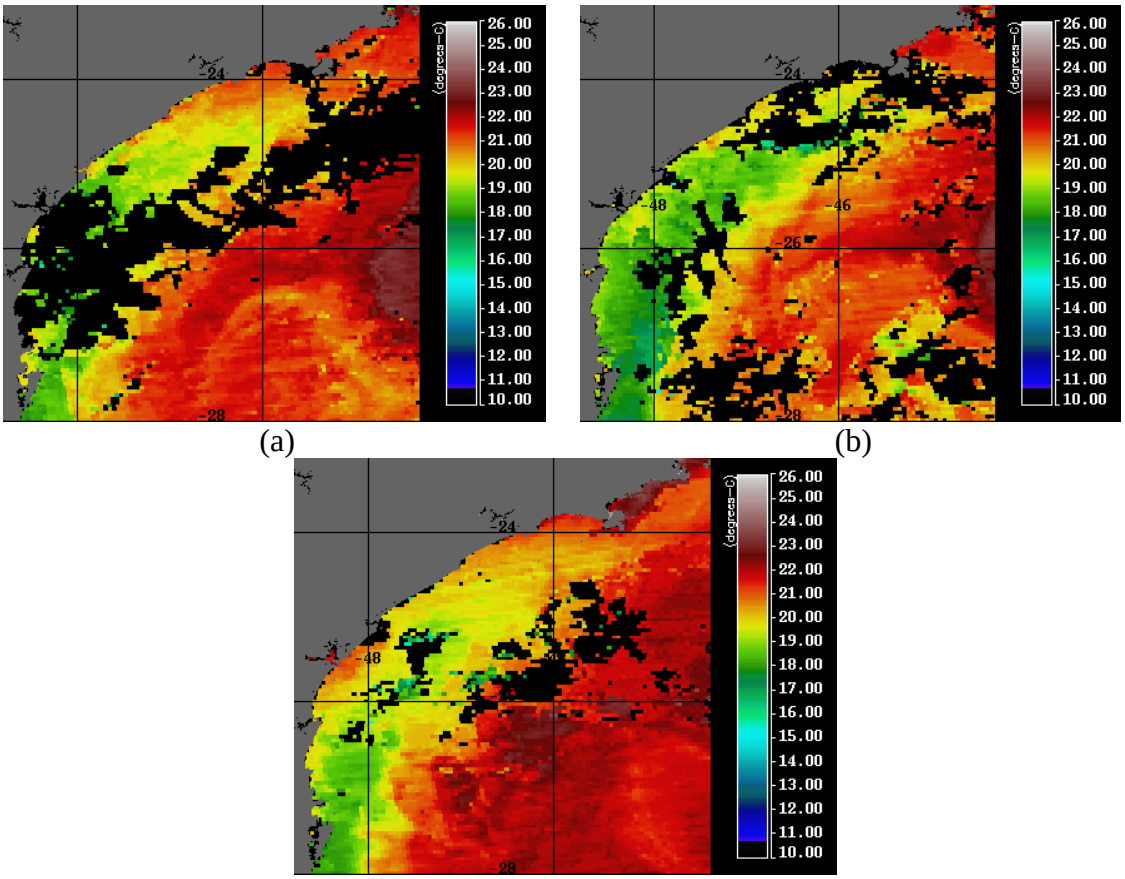


Figura 4.1.7 – Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede hidrográfica realizada de 20 a 25 de setembro de 2005. Os vetores indicam a origem do vento.



(a) (b)

(c)

Figura 4.1.8 - Distribuição da Temperatura da Superfície do Mar (°C). Valor médio de oito dias (nível 3) para Setembro de 2005, obtida pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a partir de dados fornecidos pela NASA (2008). (a) 22 a 29 de setembro de 2005; (b) 14 a 21 de setembro de 2005; (c) 6 a 13 de setembro de 2005.

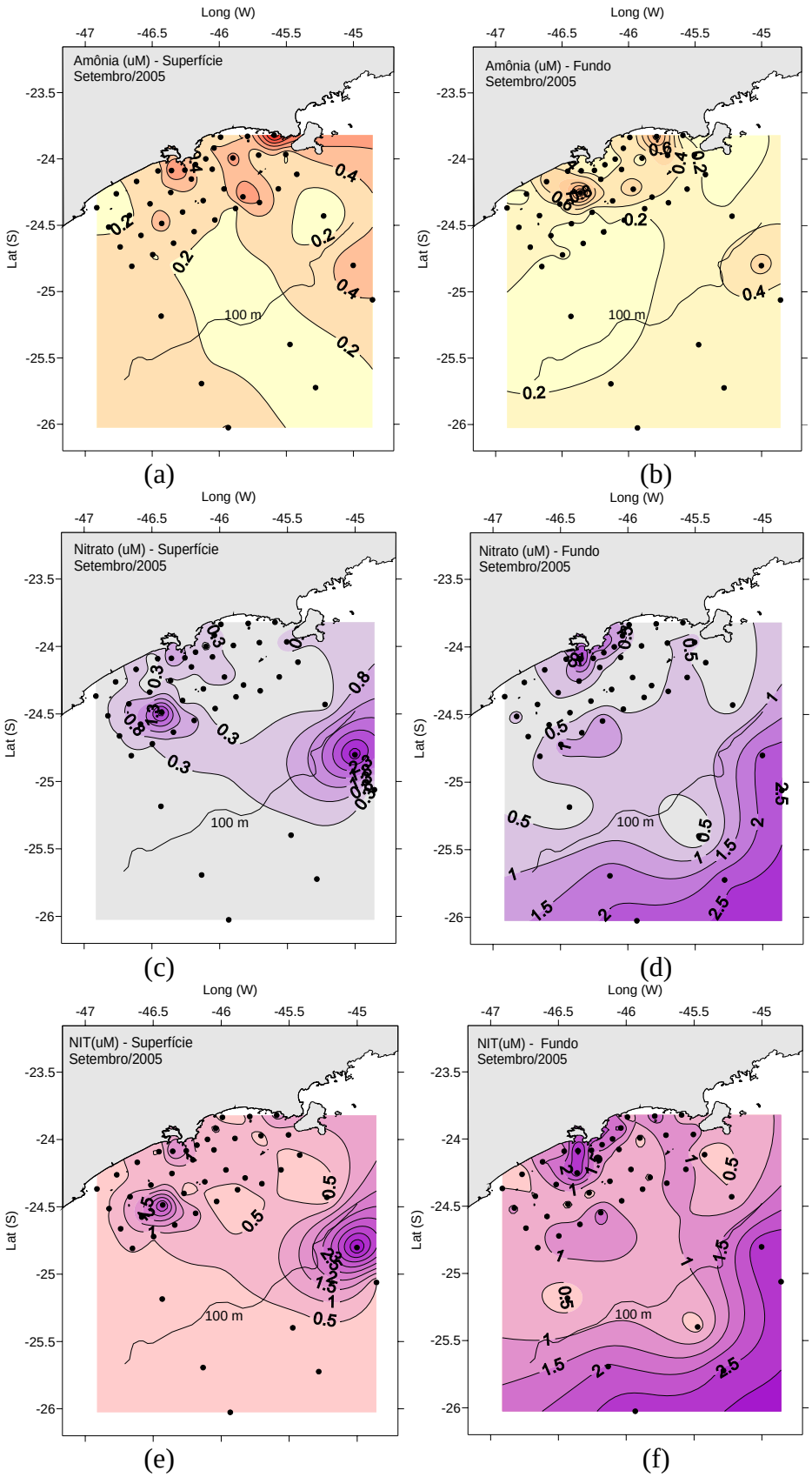


Figura 4.1.9 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d), N-nitrato (µM), e; (e e f) e N-nitrogênio inorgânico total (NIT, em µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

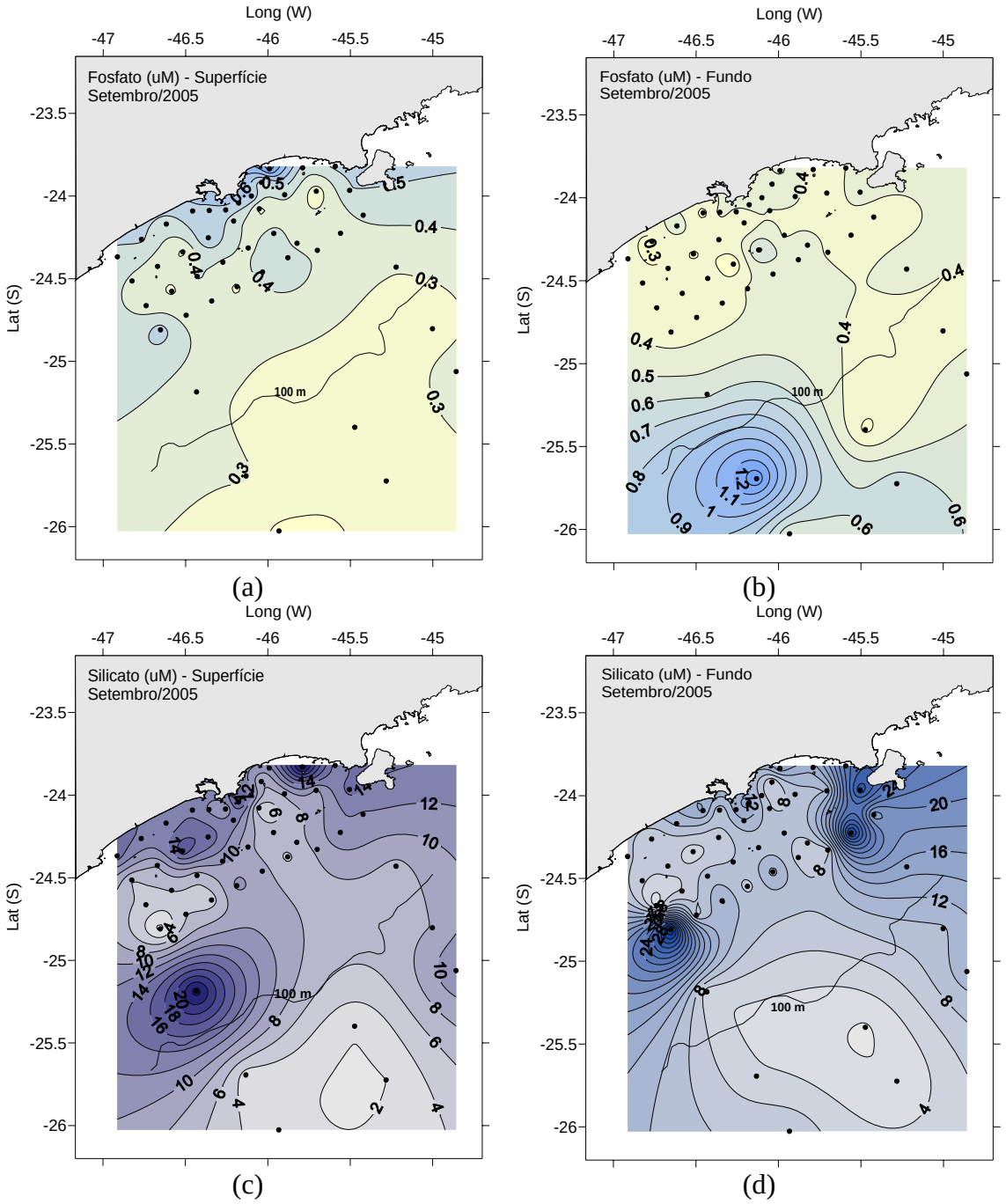


Figura 4.1.10 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-fosfato (µM); (c e d) silicato (µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

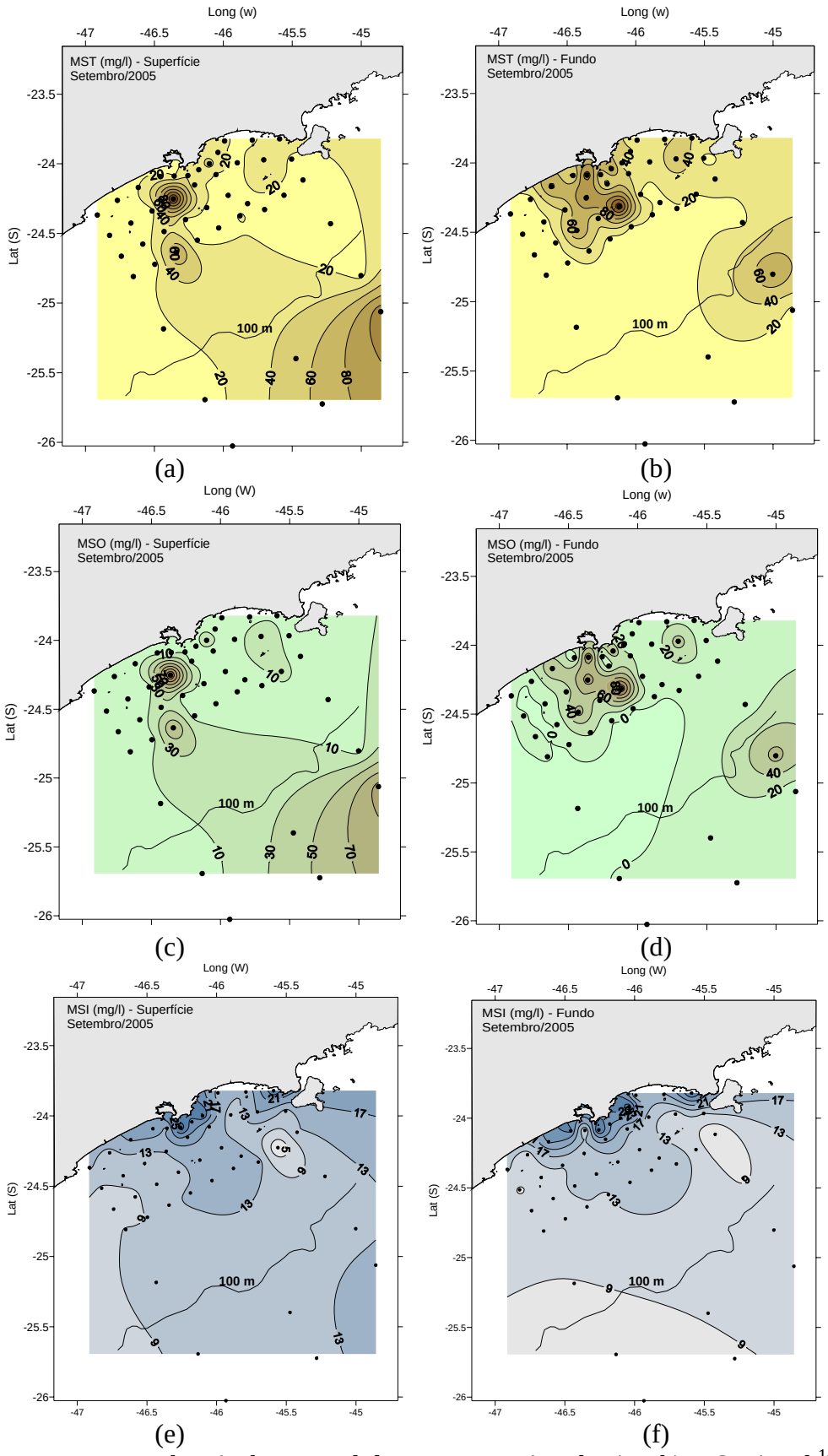


Figura 4.1.11 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) MST (mg l^{-1}); (c e d) MSO (mg l^{-1}), e; (e e f) MSI (mg l^{-1}), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

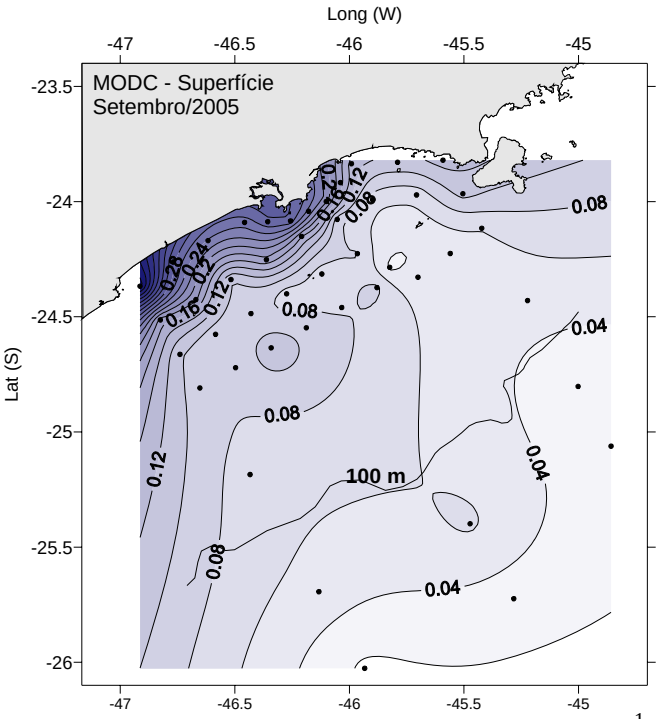


Figura 4.1.12 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

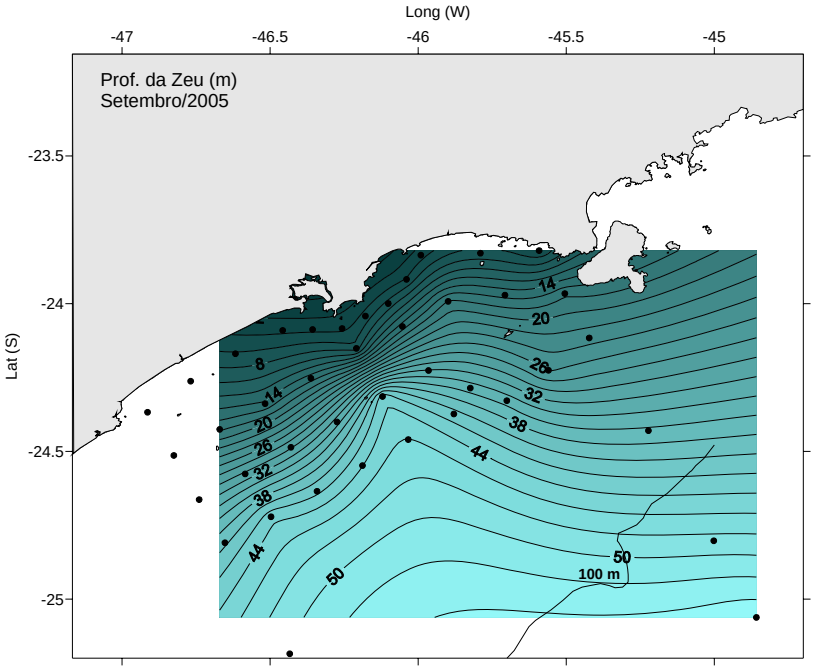


Figura 4.1.13 – Distribuição horizontal da profundidade da zona eufótica (Zeu) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

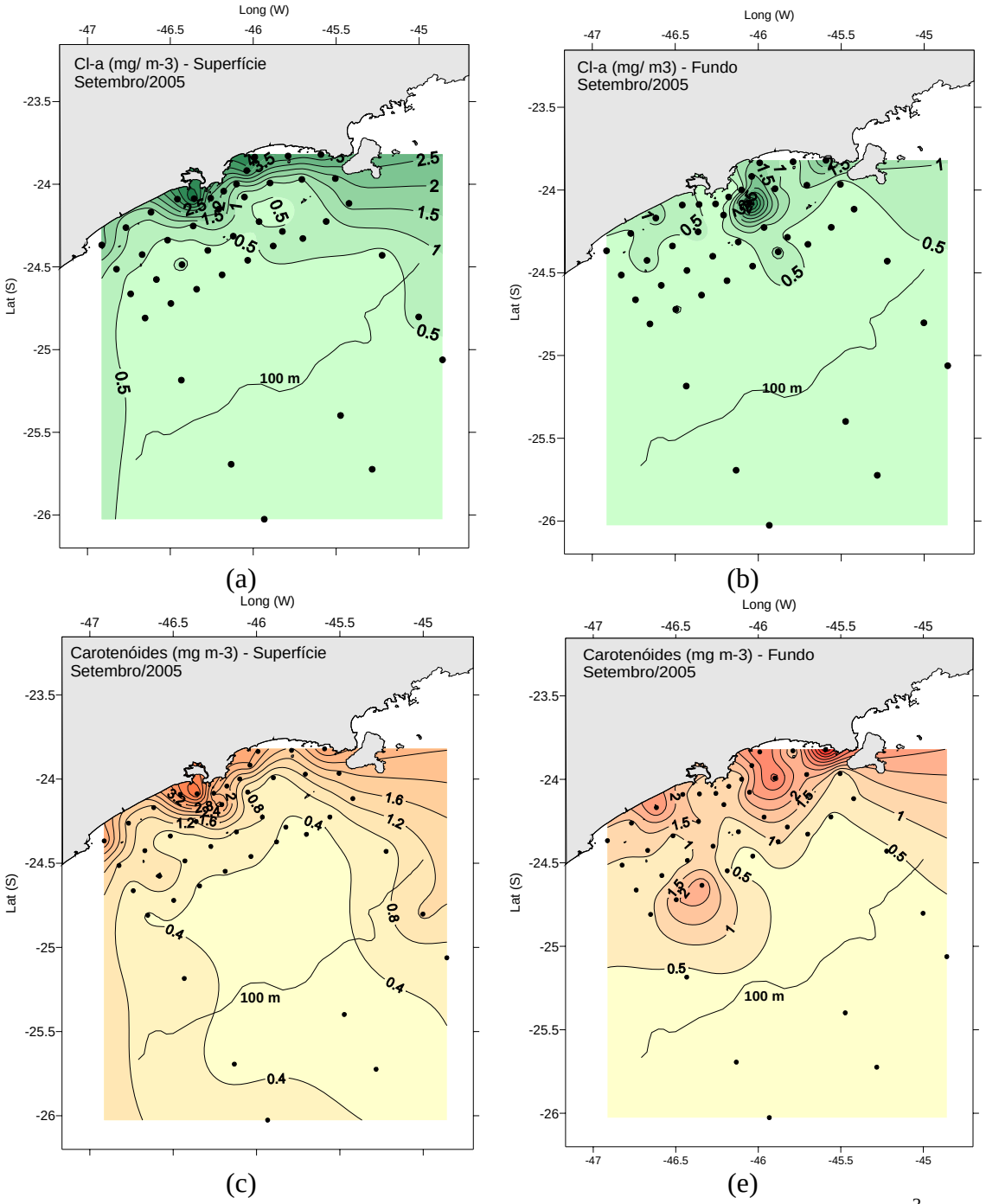
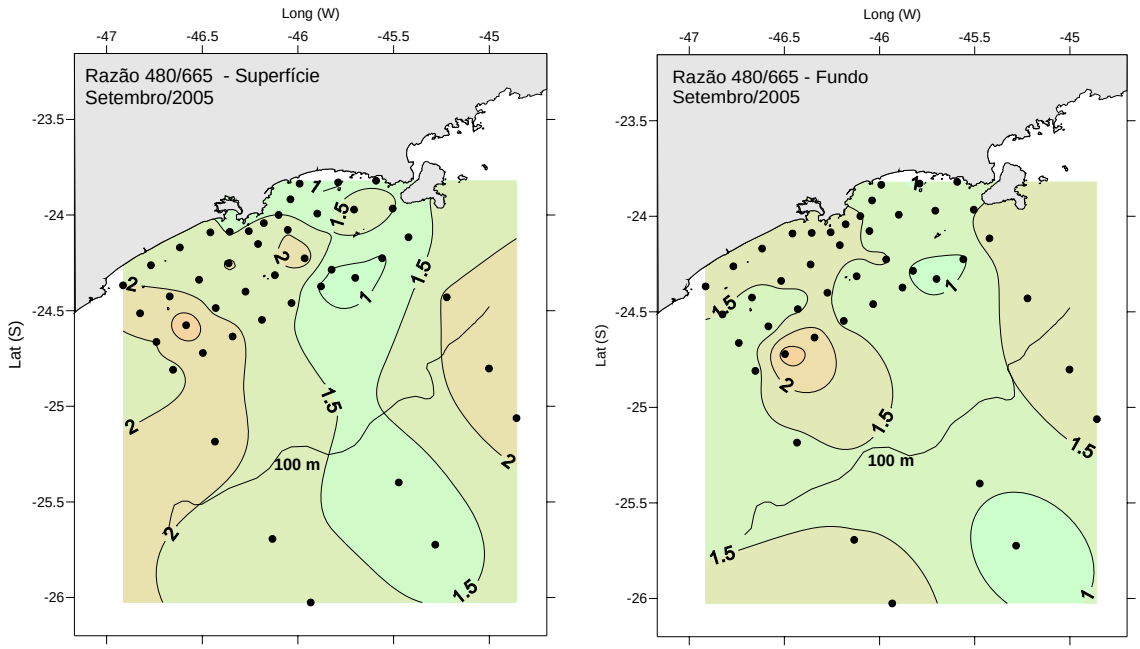
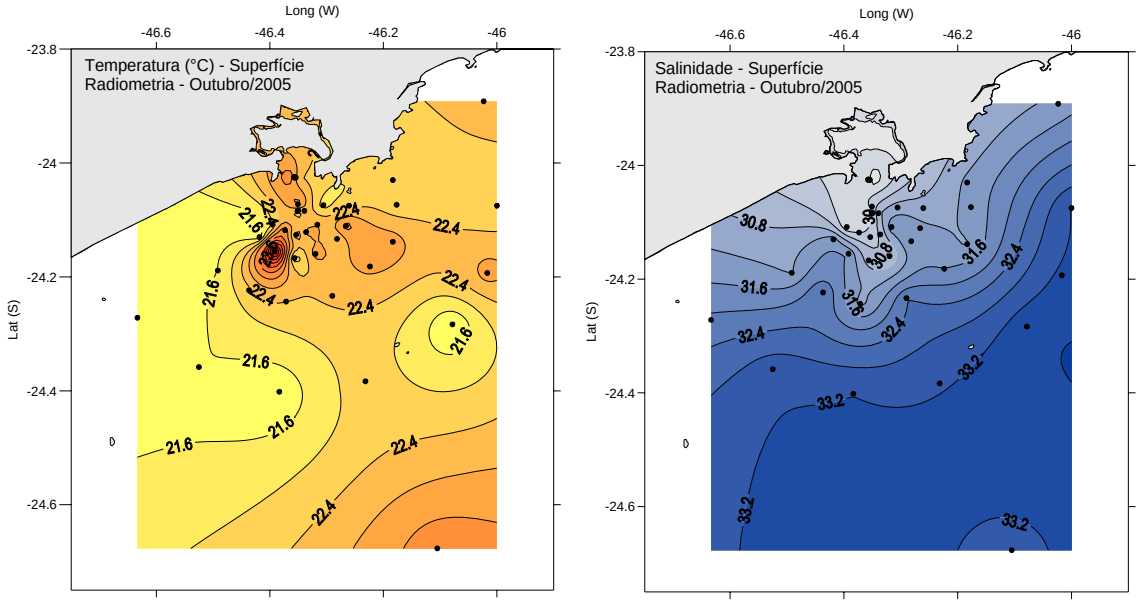


Figura 4.1.14 – Distribuição horizontal das concentrações de clorofila-*a* (mg m^{-3}) (a e b), e carotenóides (mg m^{-3}) (c e d), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.



(a) (b)

Figura 4.1.15 – Distribuição horizontal da razão 480:665, na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.



(a) (b)

Figura 4.1.16 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) (a) e salinidade (b) na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.

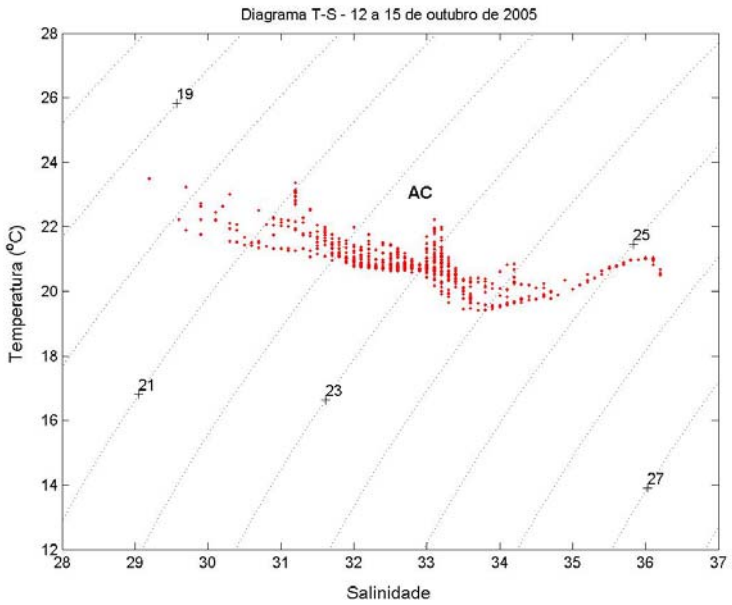
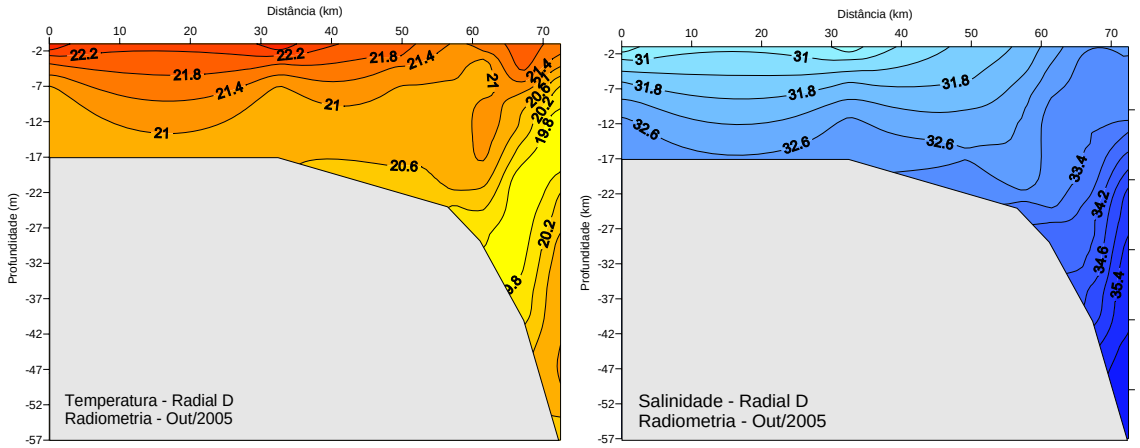


Figura 4.1.17 – Diagrama T-S, temperatura (°C) *versus* salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD de 12 a 15 de outubro de 2005. A massa de água indicada está de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira)



(a) (b)

Figura 4.1.18 – Distribuição vertical da temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) na radial D (estações 17 a 23) da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.

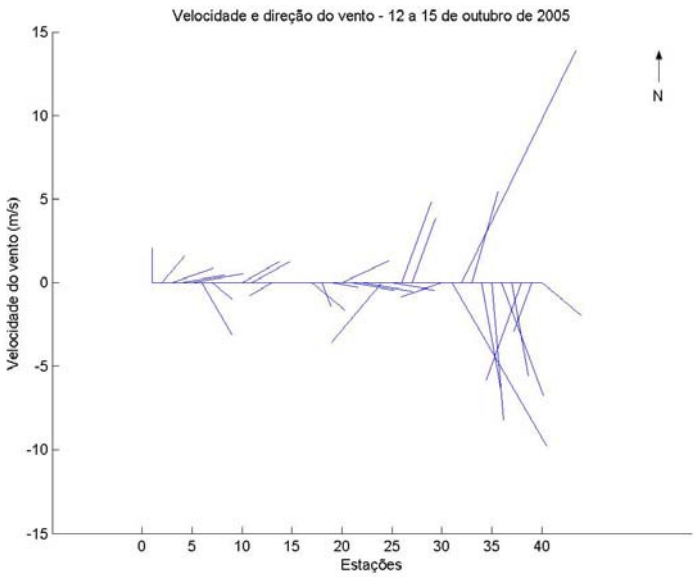


Figura 4.1.19 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede de radiometria realizada de 12 a 15 de outubro de 2005. Os vetores indicam a origem do vento.

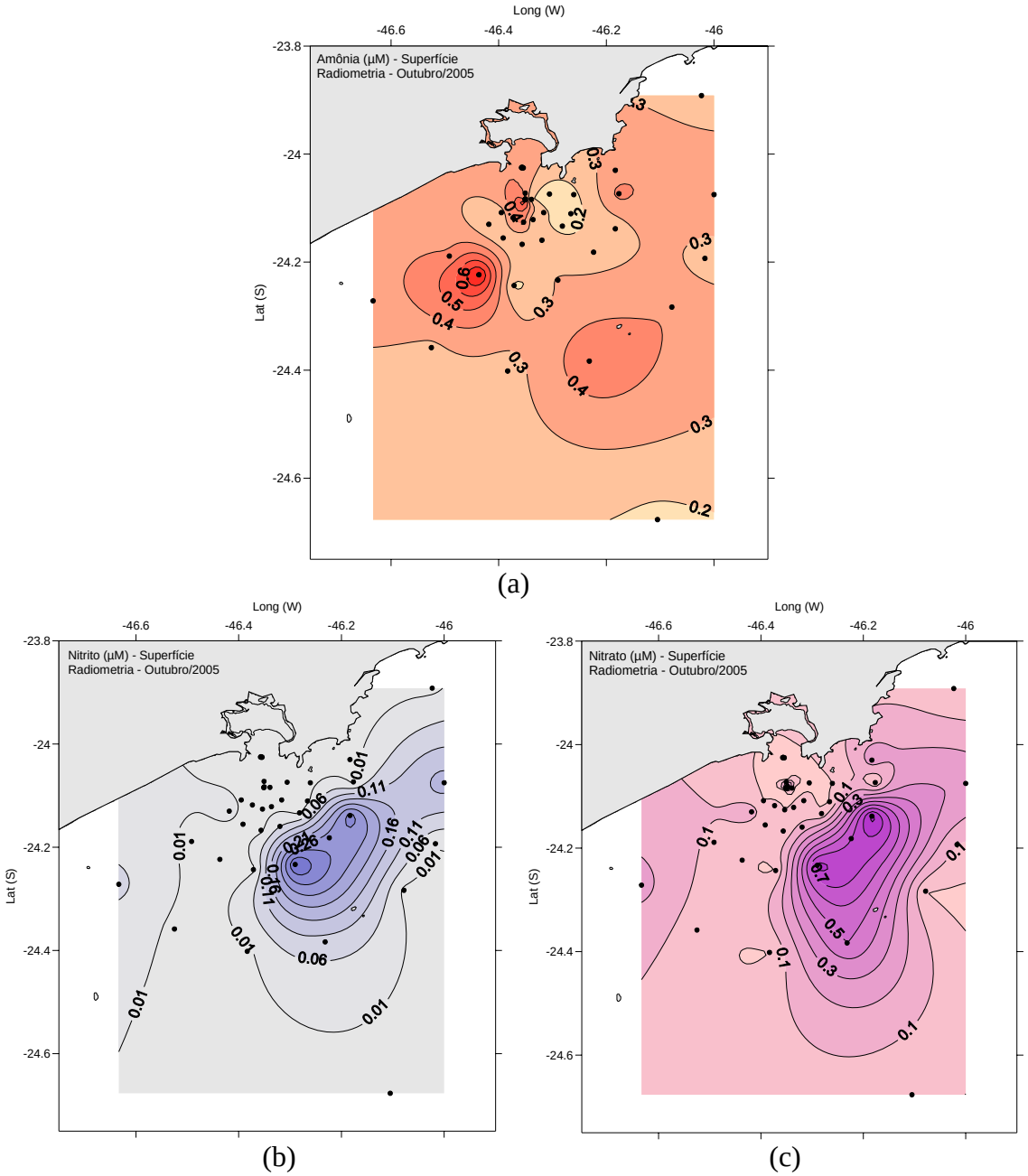
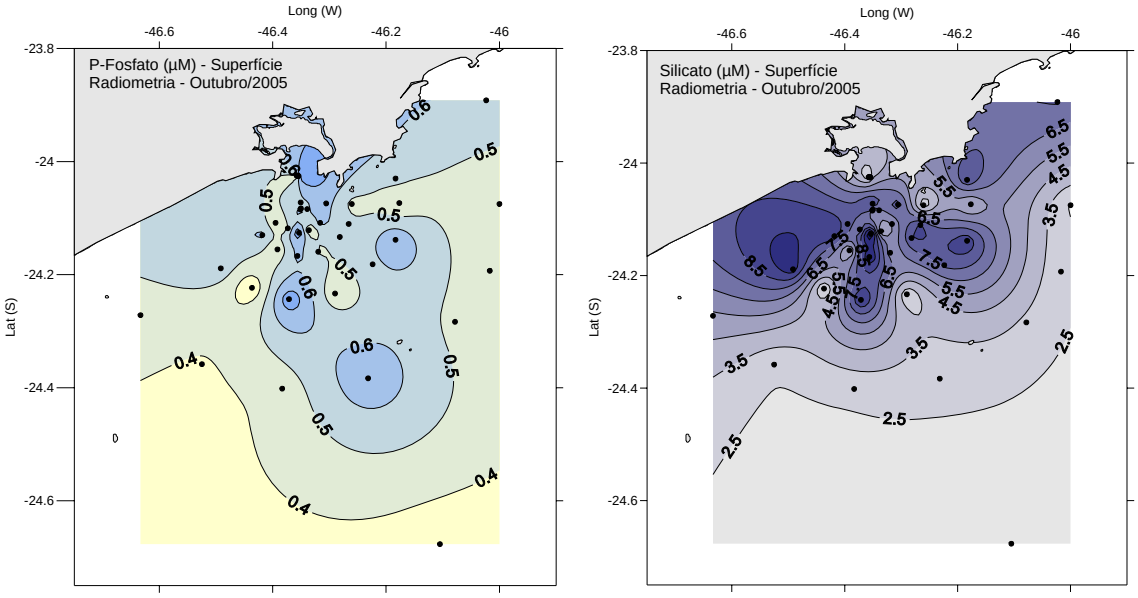


Figura 4.1.20 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a) N-amônia (µM); (b) N-nitrito (µM), e; (c) e N-nitrato (µM), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.



(a) (b)

Figura 4.1.21 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a) P-Fosfato (µM), e; (b) Silicato (µM), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.

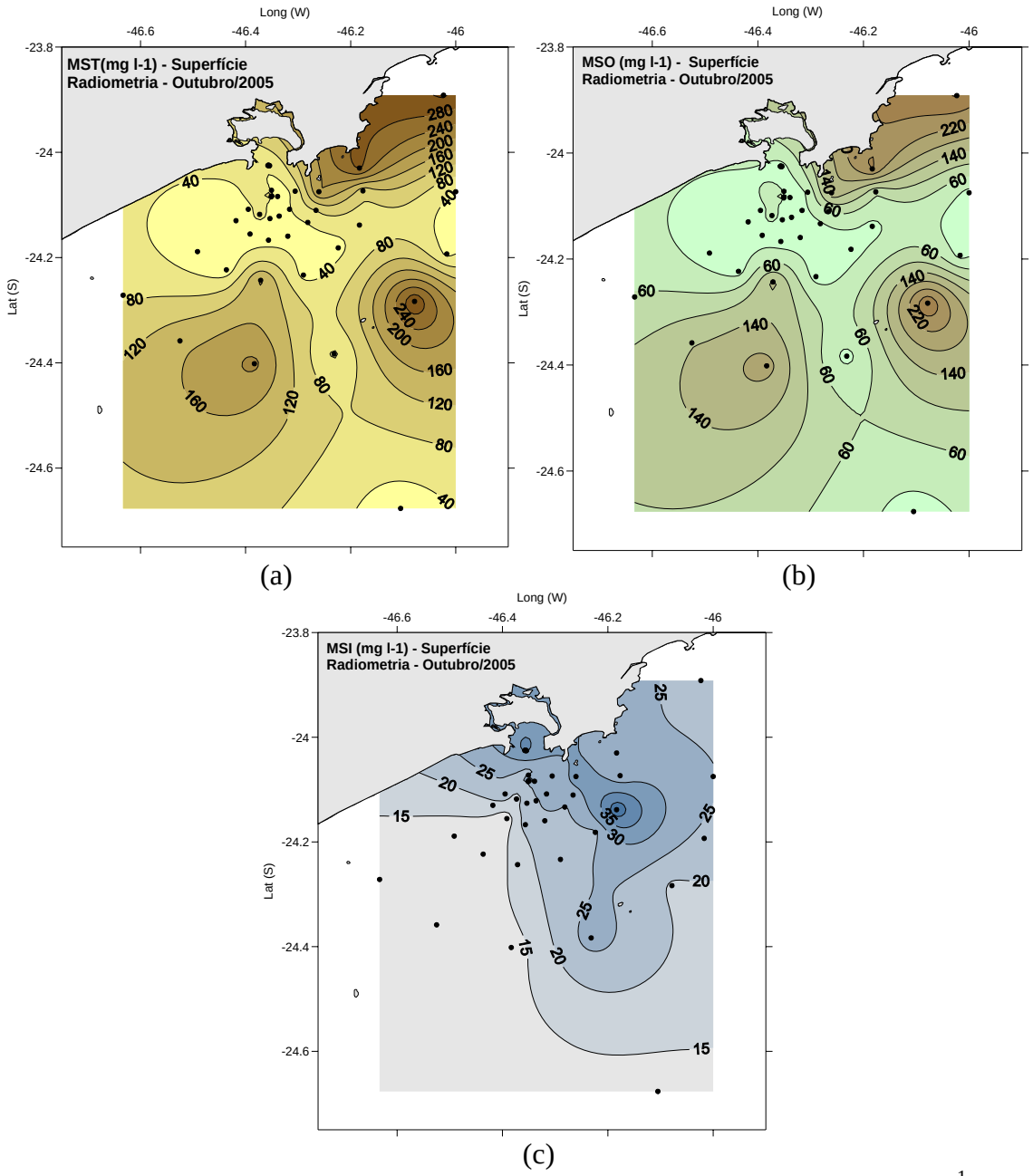


Figura 4.1.22 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a) MST (mg l^{-1}); (b) MSO (mg l^{-1}), e; (c) MSI (mg l^{-1}), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.

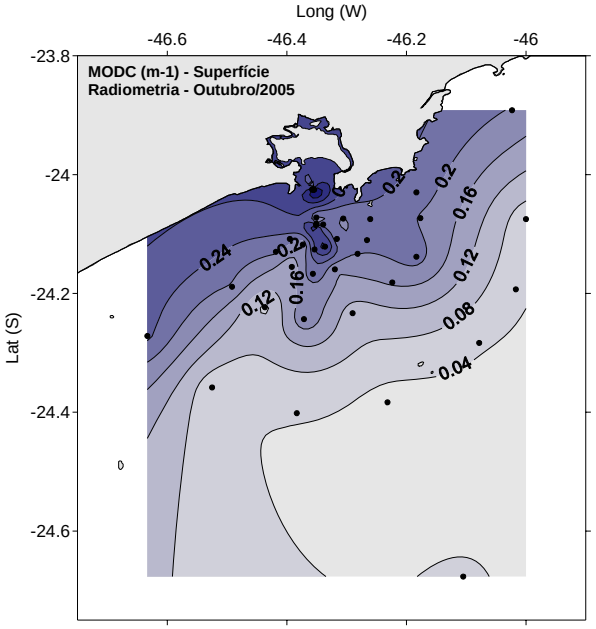
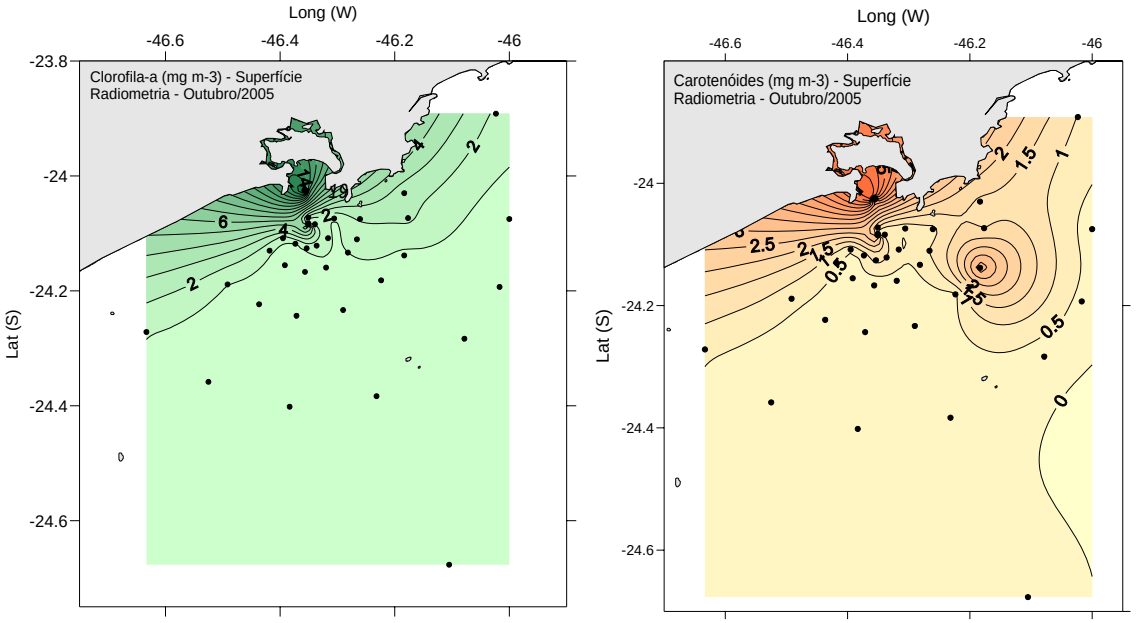


Figura 4.1.23 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.



(a) (b)

Figura 4.1.24 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a) Clorofila-*a* (mg m^{-3}), e; (b) Carotenóides (mg m^{-3}), na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.

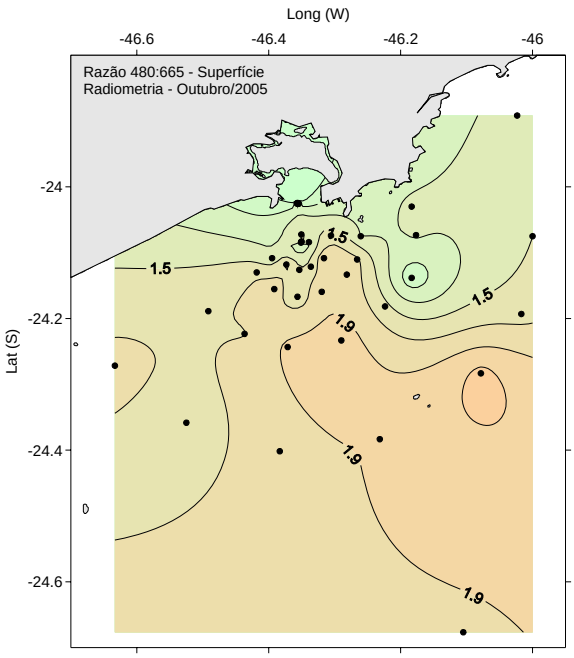
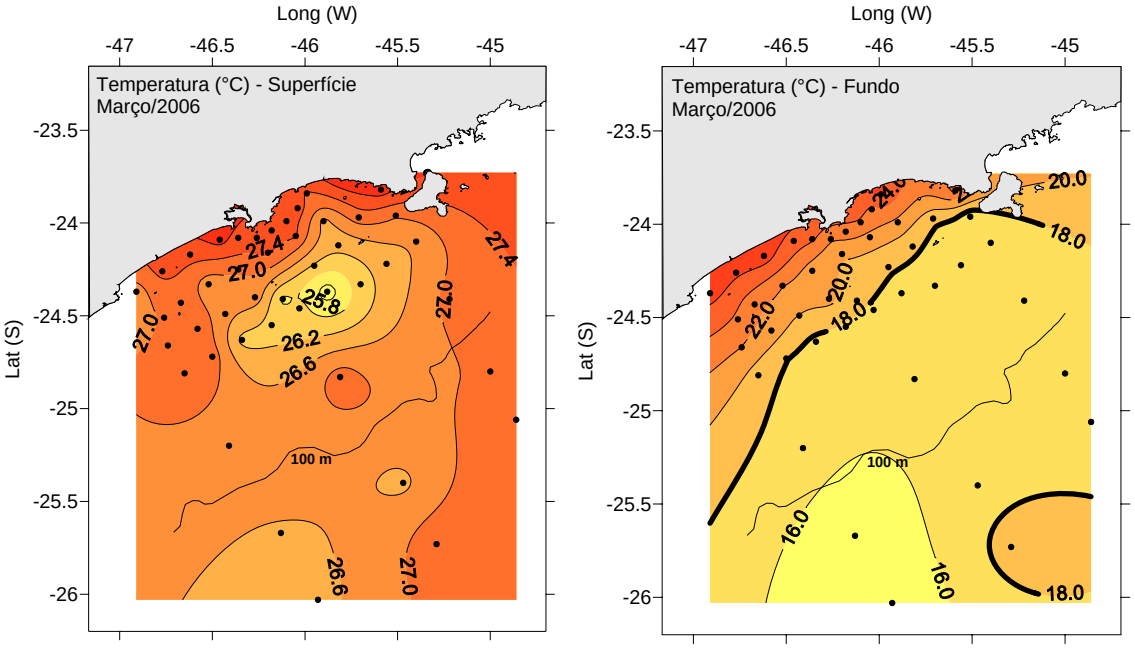
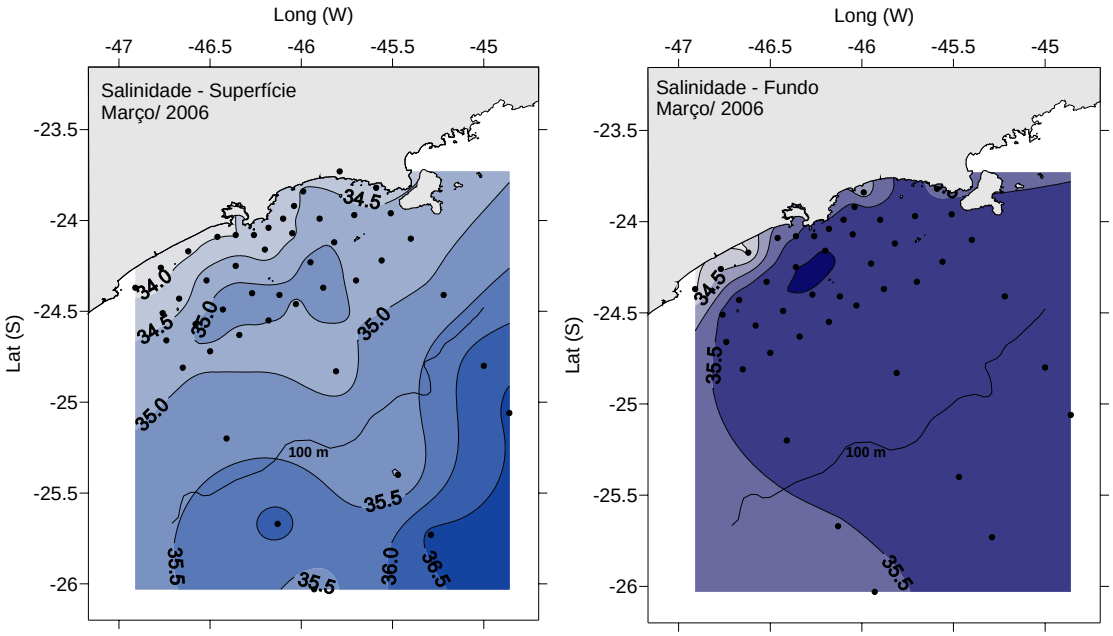


Figura 4.1.25 - Distribuição horizontal da razão 480/665, na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 12 a 15 de outubro de 2005.



(a) (b)

Figura 4.1.26 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. A linha mais espessa na figura b indica a isoterma de 18 °C, limite superior da ACAS.



(a) (b)

Figura 4.1.27 – Distribuição horizontal da salinidade na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

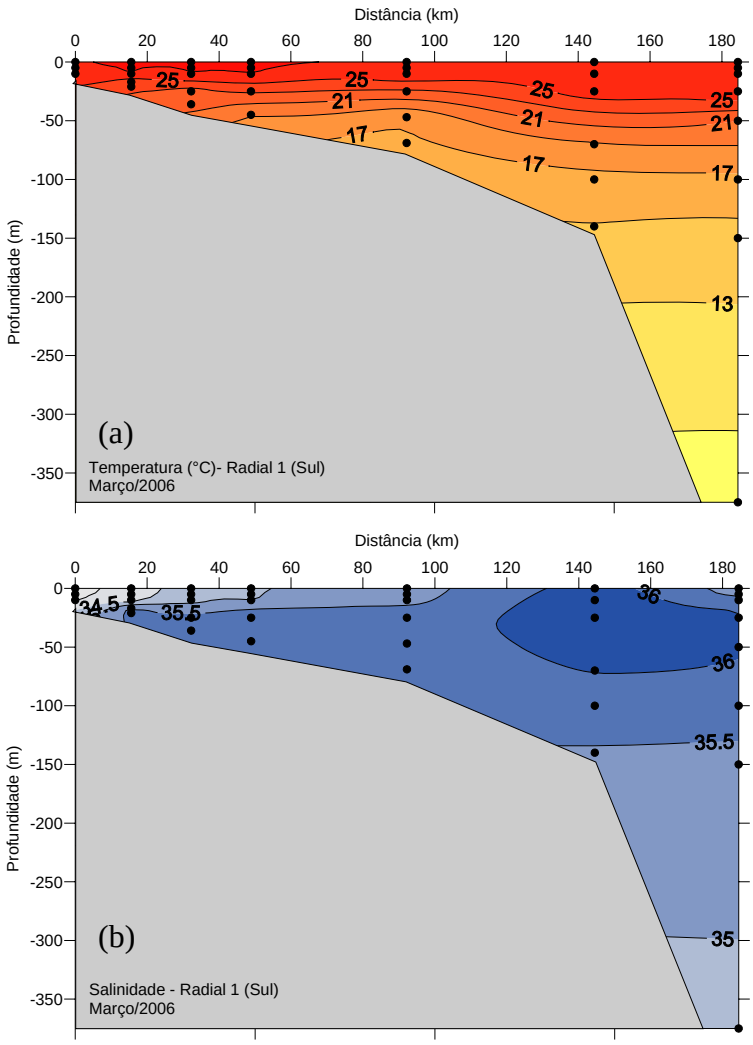


Figura 4.1.28 - Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 1 (extremo norte da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

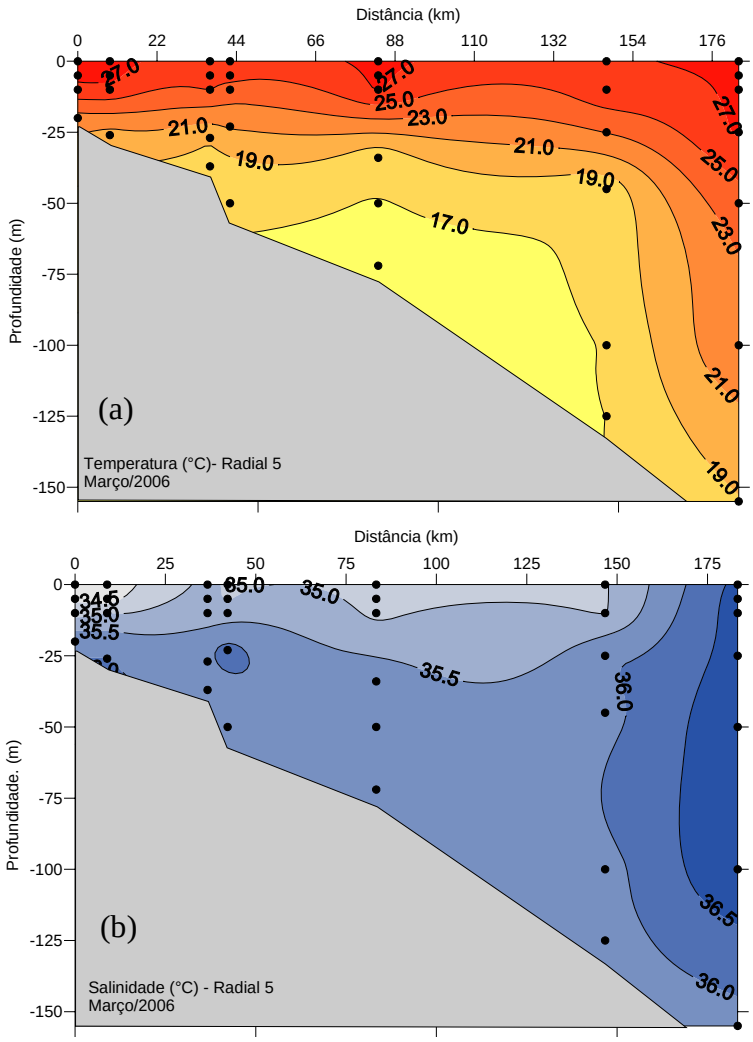


Figura 4.1.29 – Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 5 (região central) da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

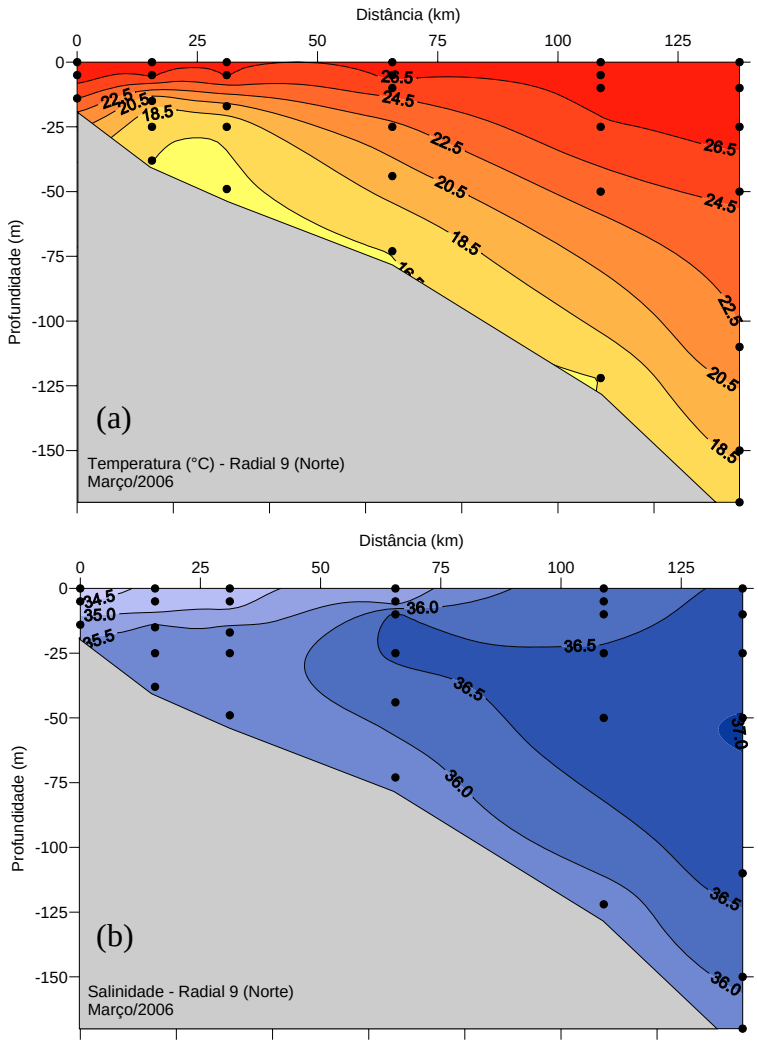


Figura 4.1.30 - Perfis batimétricos de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da radial 9 (extremo sul da área estudada) da rede hidrográfica realizada no período de 20 a 25 de setembro de 2005.

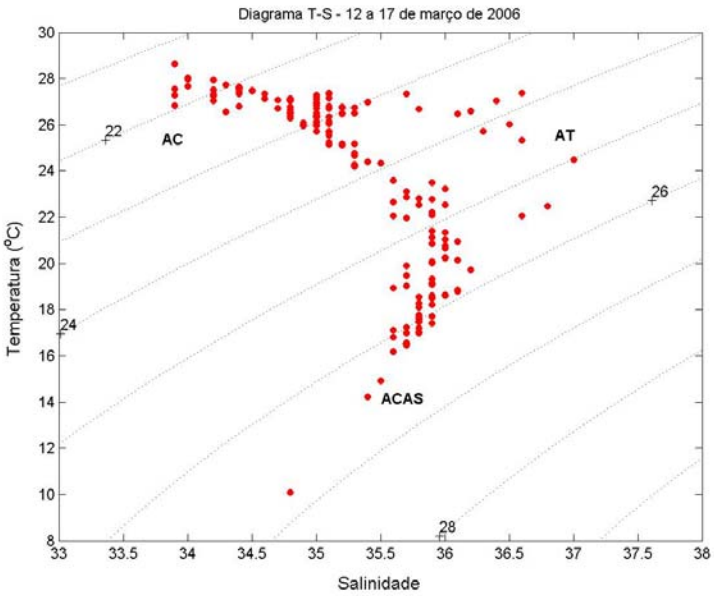


Figura 4.1.31 – Diagrama T-S: temperatura (°C) versus salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD na plataforma de Santos de 12 a 17 de março de 2006. As massas de água indicadas estão de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira); AT (Água Tropical) e ACAS (Água Central do Atlântico Sul).

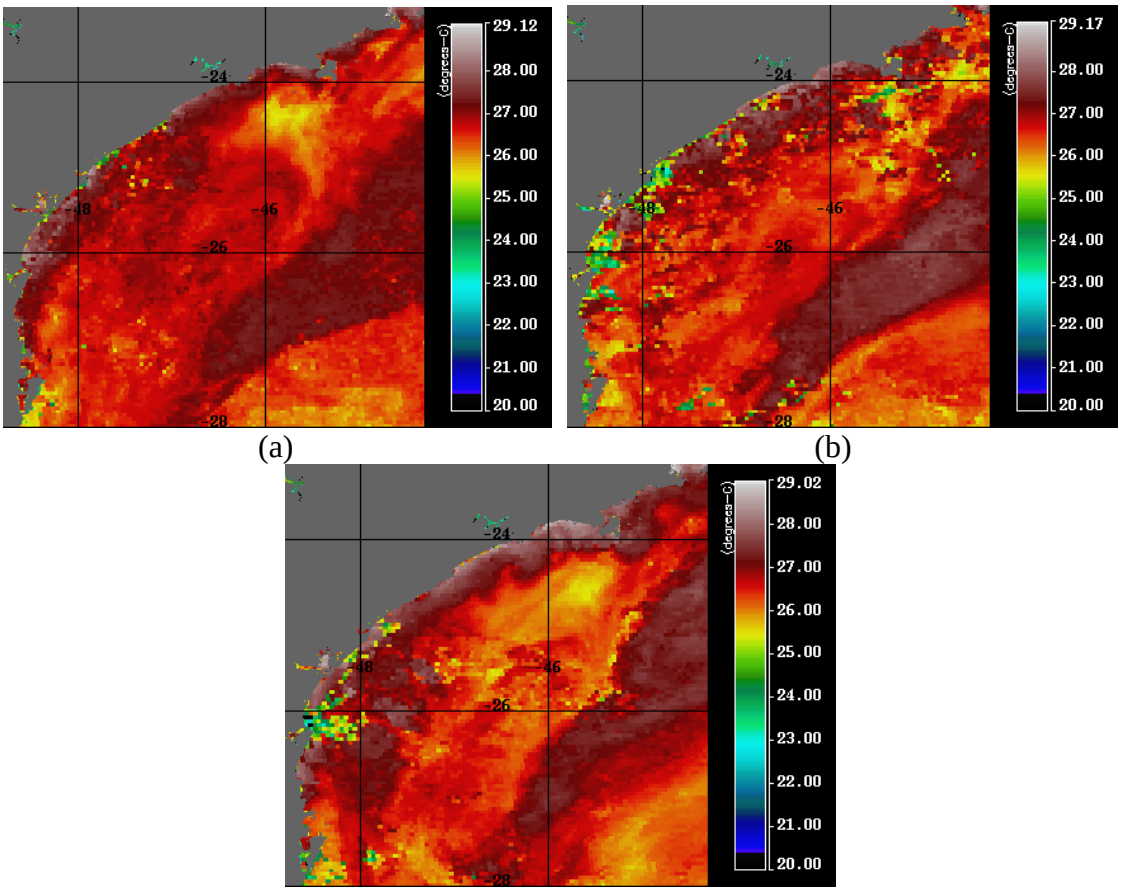


Figura 4.1.32 - Distribuição da TSM (°C). Valor médio de oito dias (nível 3) para Março de 2006, obtida pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a partir de dados fornecidos pela NASA (2008). (a) e (b) 14 a 21 de março de 2006; (c) e (d) 06 a 13 de março de 2006; (e) e (f) 26 de fevereiro a 05 de março de 2006.

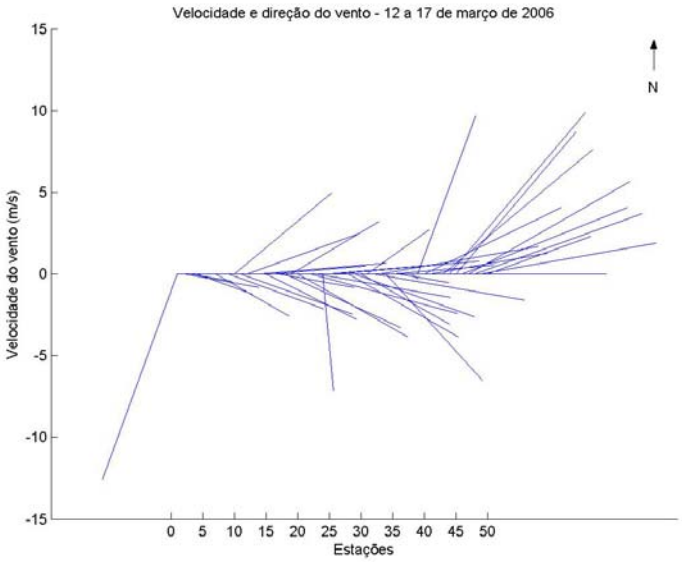


Figura 4.1.33 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede hidrográfica realizada de 12 a 17 de março de 2006. Os vetores indicam a origem do vento.

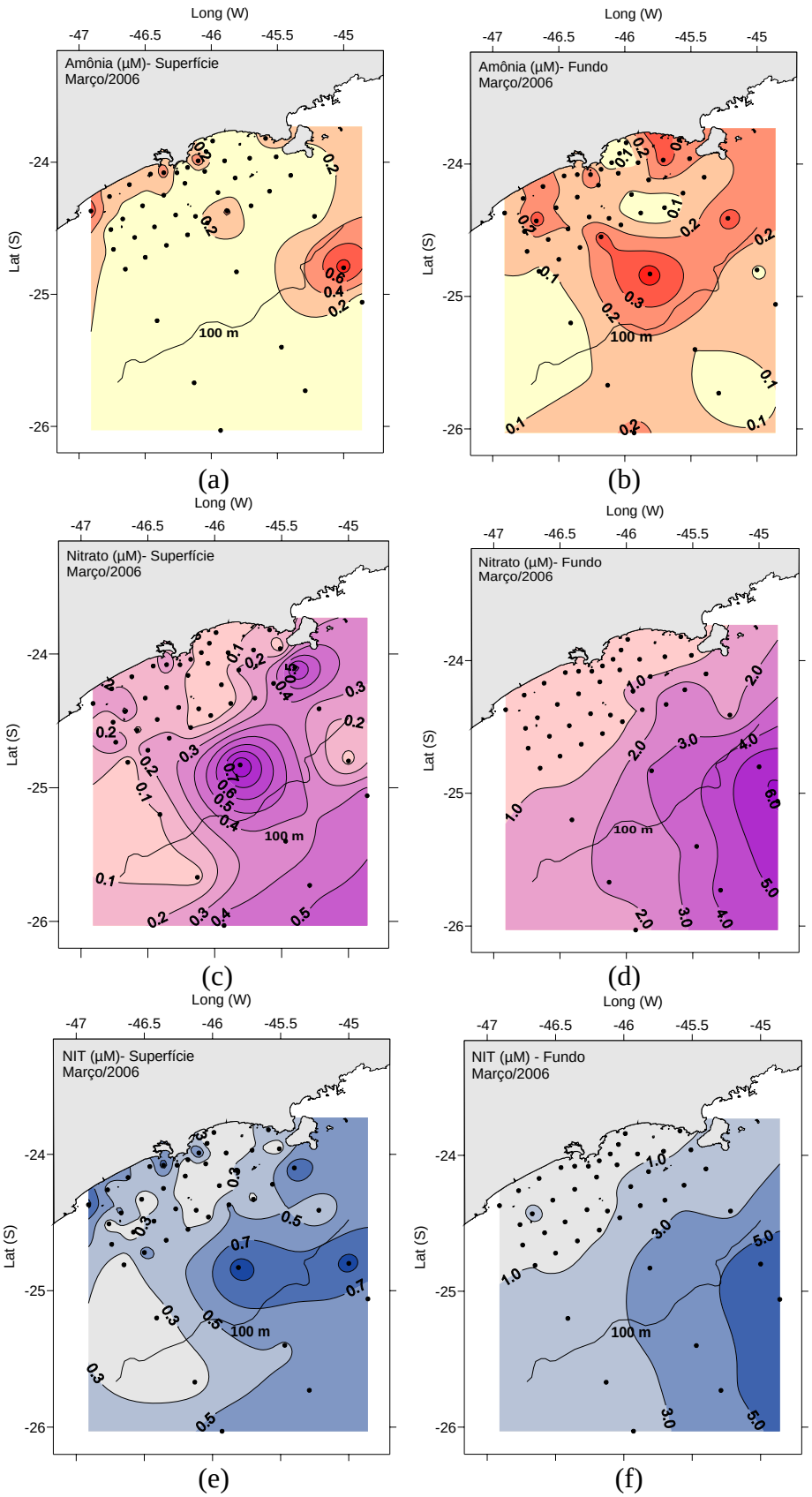


Figura 4.1.34 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d), N-nitrato (µM), e; (e e f) e N-nitrogênio inorgânico total (NIT, em µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

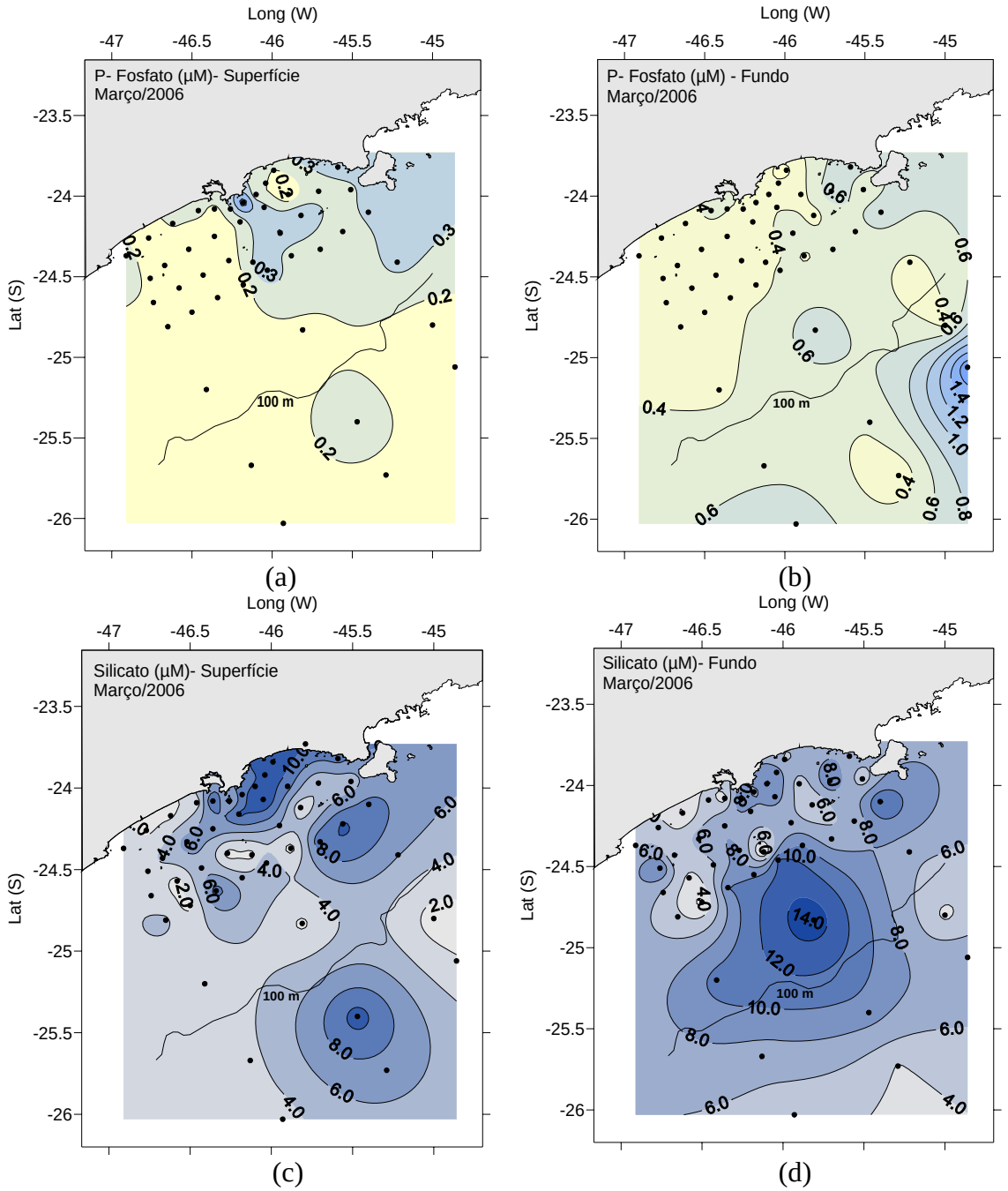


Figura 4.1.35 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-fosfato (µM); (c e d) silicato (µM), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

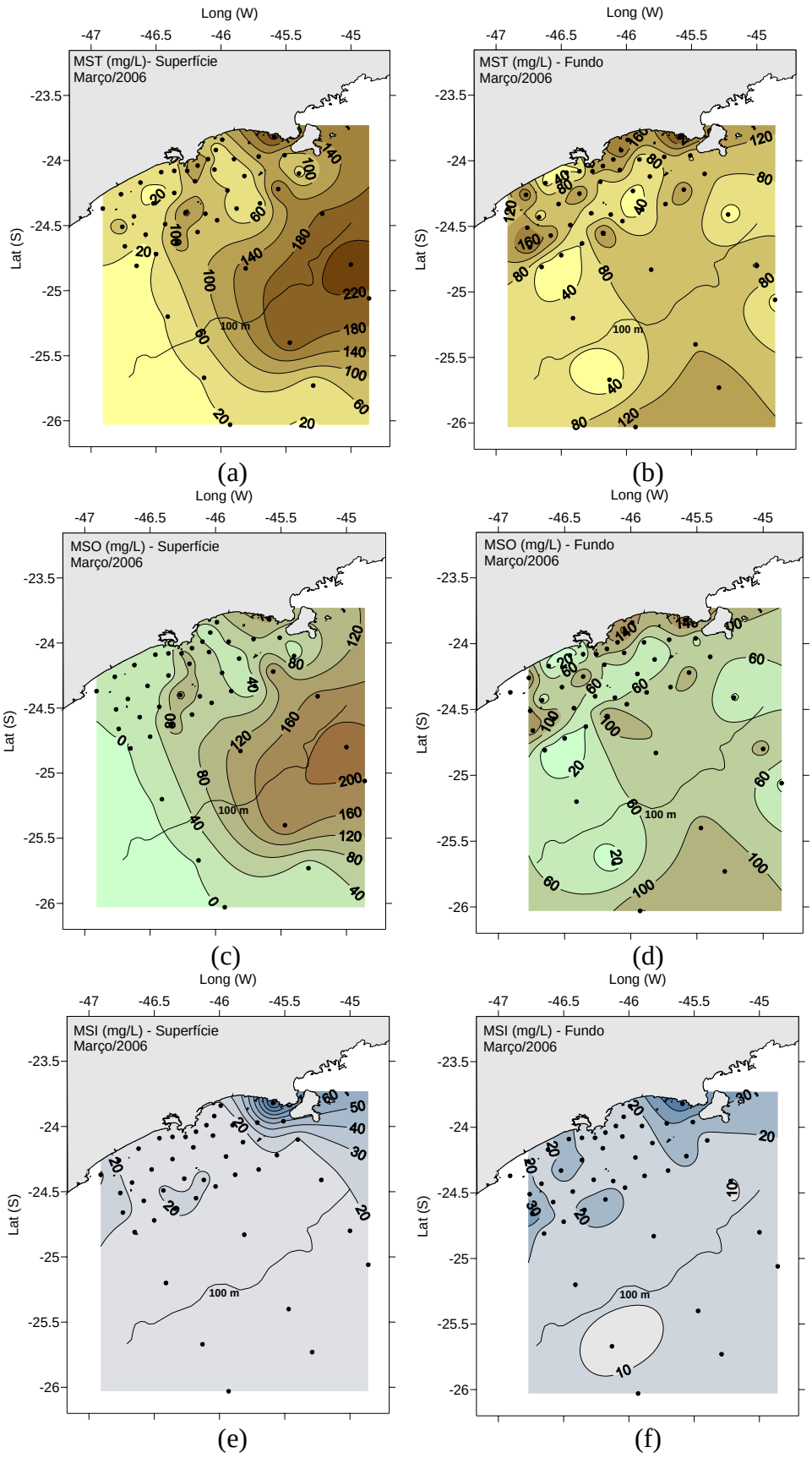


Figura 4.1.36 – Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) MST (mg l^{-1}); (c e d) MSO (mg l^{-1}), e; (e e f) MSI (mg l^{-1}), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

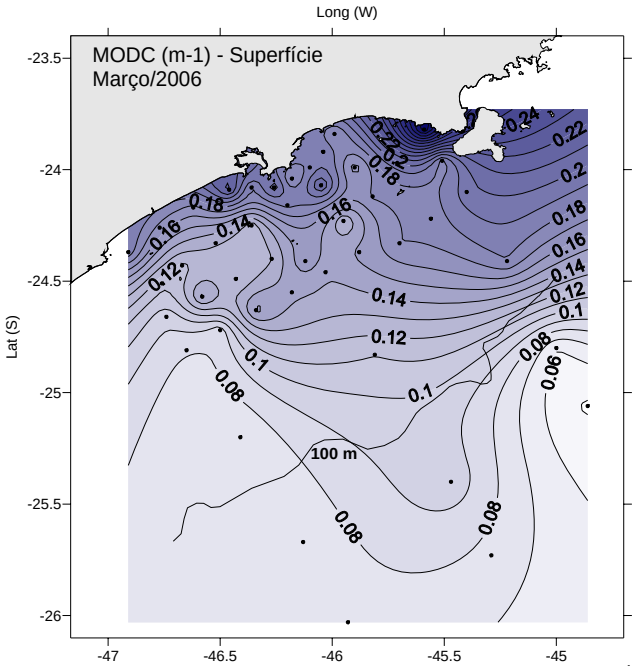


Figura 4.1.37 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.

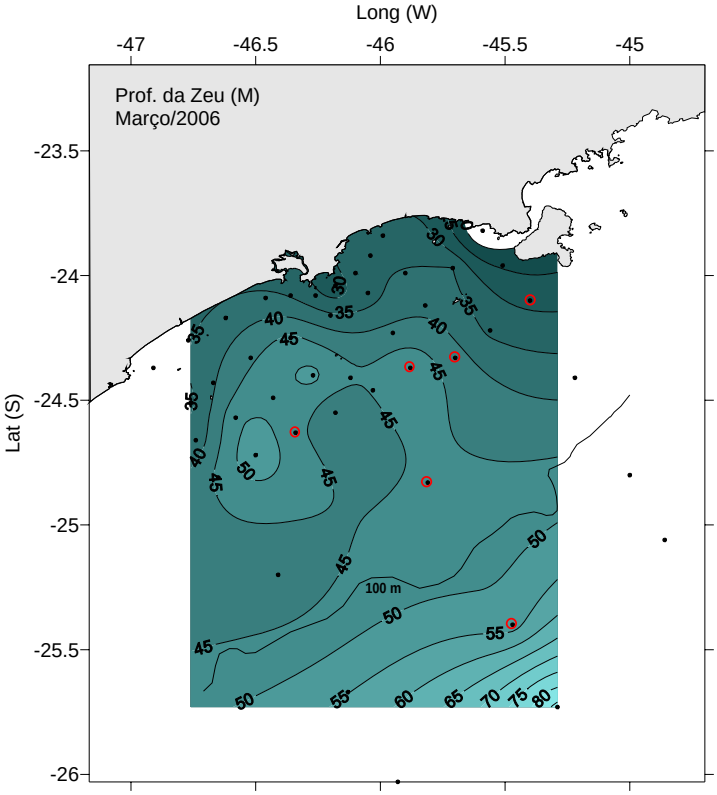


Figura 4.1.38 - Distribuição horizontal da profundidade da zona eufótica (Zeu) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006. As estações em que a ACAS atingiu a zona eufótica estão destacadas com um círculo vermelho.

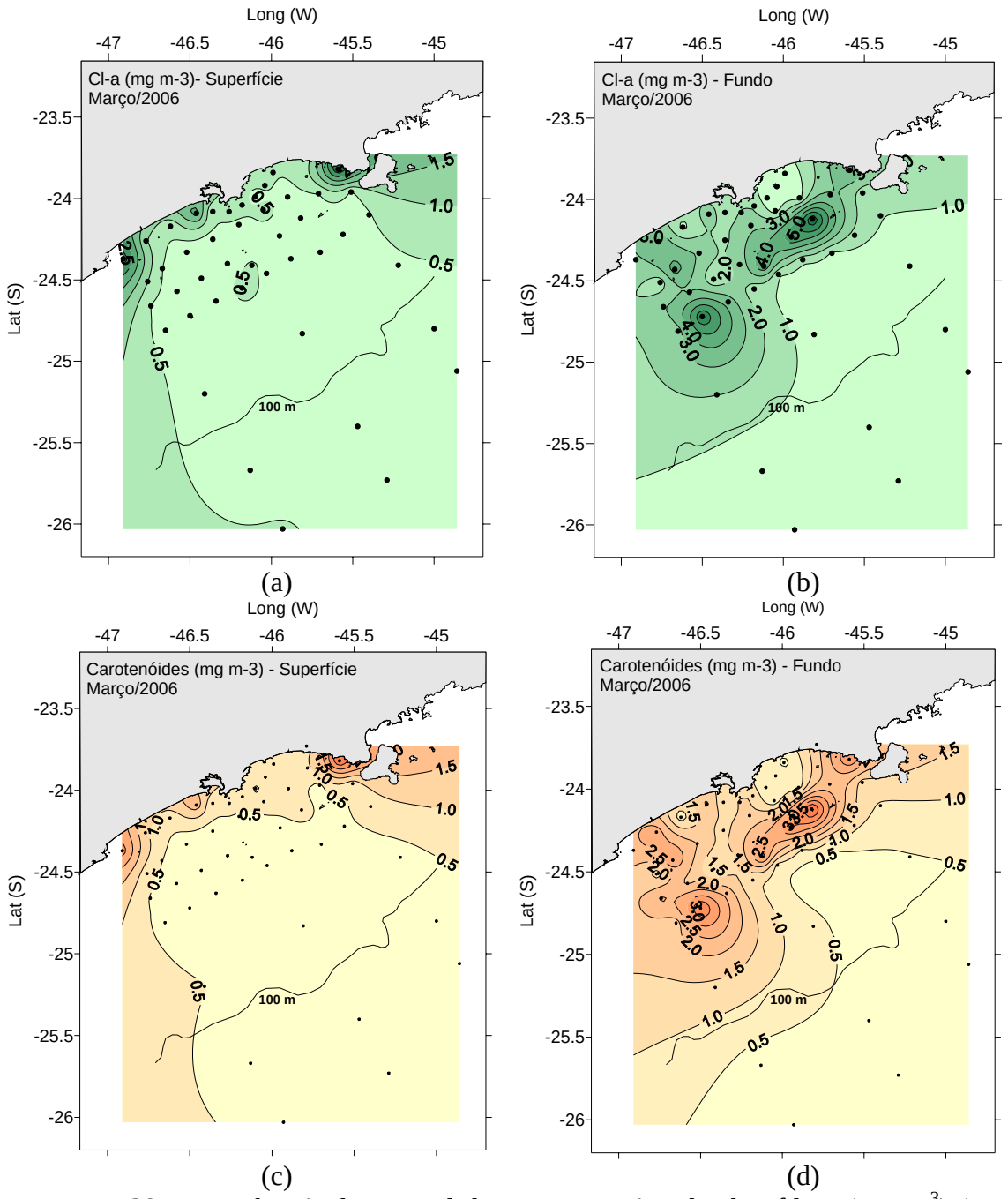
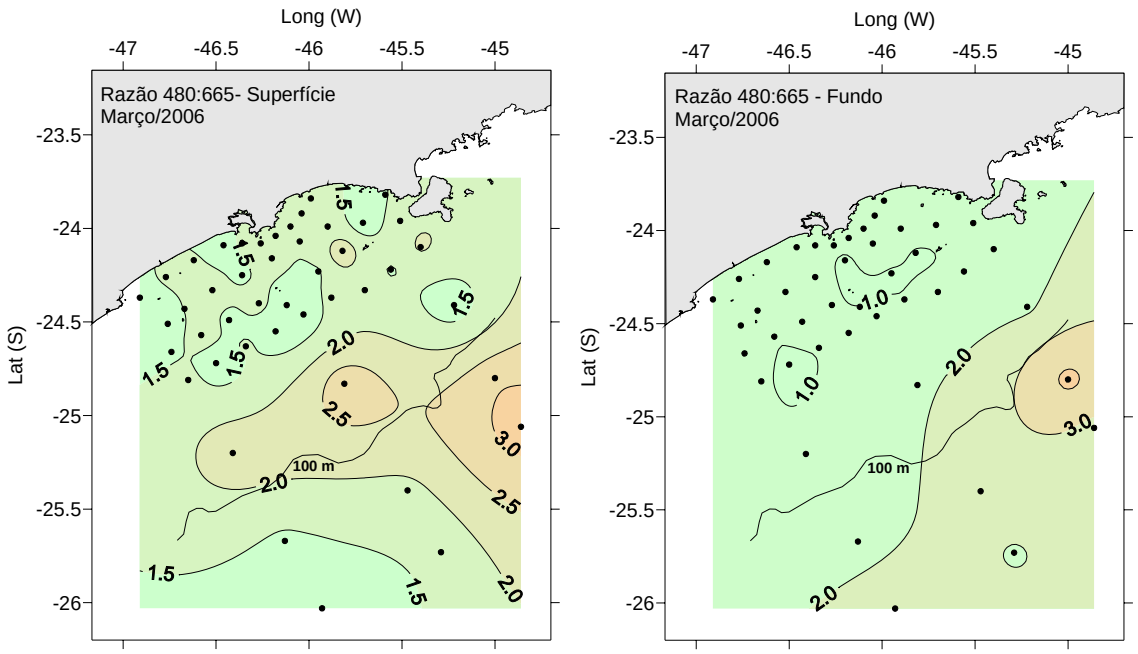
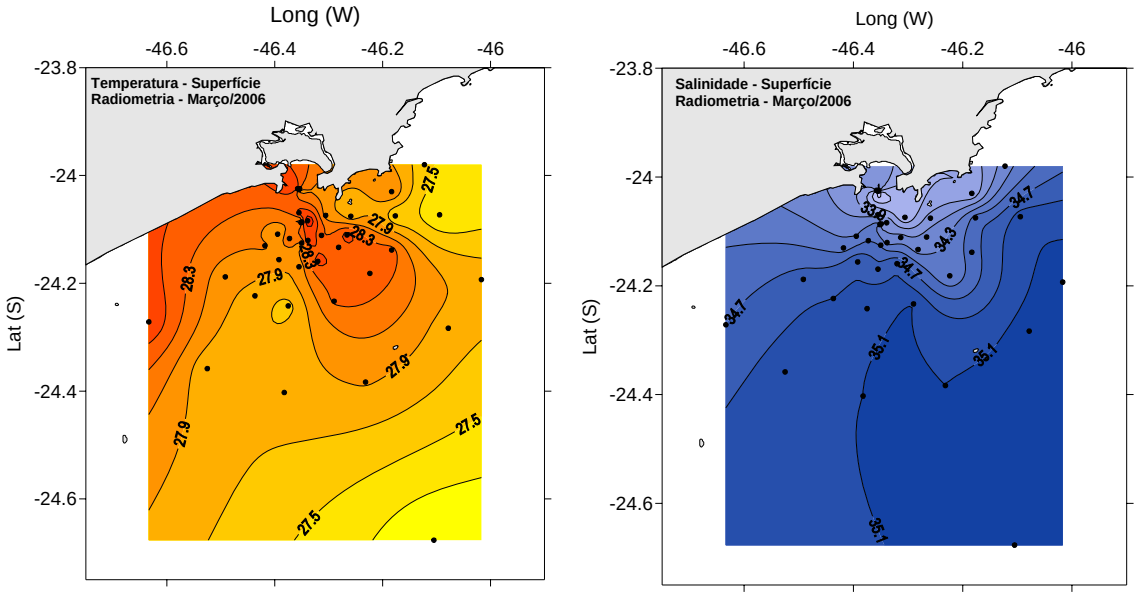


Figura 4.1.39 – Distribuição horizontal das concentrações de clorofila-*a* (mg m^{-3}) (a e b), e carotenóides (mg m^{-3}) (c e d), na superfície e junto ao fundo nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.



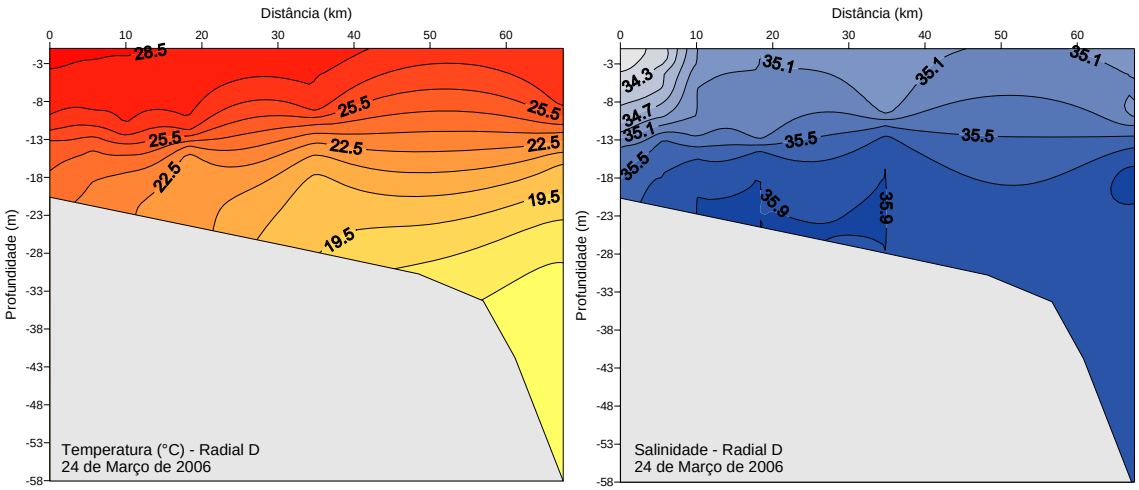
(a) (b)

Figura 4.1.40 – Distribuição horizontal da razão 480:665, na superfície (a) e junto ao fundo (b) nas estações de coleta da rede hidrográfica realizada no período de 12 a 17 de março de 2006.



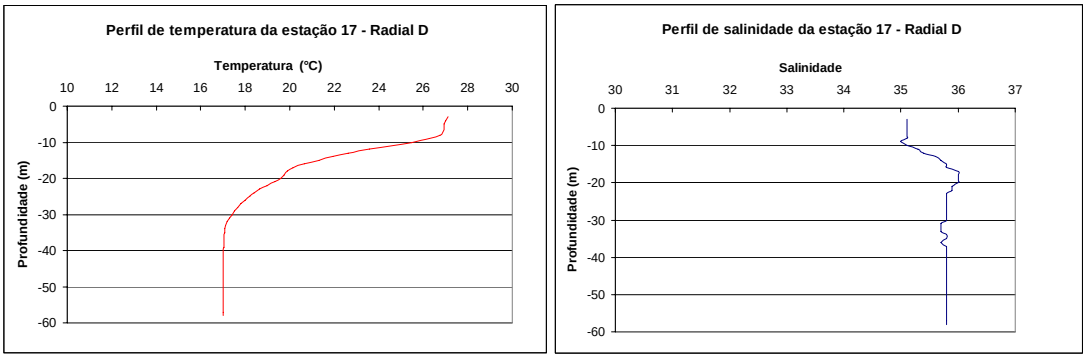
(a) (b)

Figura 4.1.41 – Distribuição horizontal da temperatura (°C) (a) e salinidade (b) na superfície nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.



(a) (b)

Figura 4.1.42 – Distribuição vertical da temperatura (ºC) (a) e salinidade (b) na radial D (estações 17 a 23) da rede de radiometria realizada no dia 24 de março de 2006.



(a) (b)

Figura 4.1.43 – Perfil vertical de temperatura (°C) (a) e salinidade (b) da estação 17, a mais externa da radial D, da rede de radiometria, realizada no dia 24 de março de 2006.

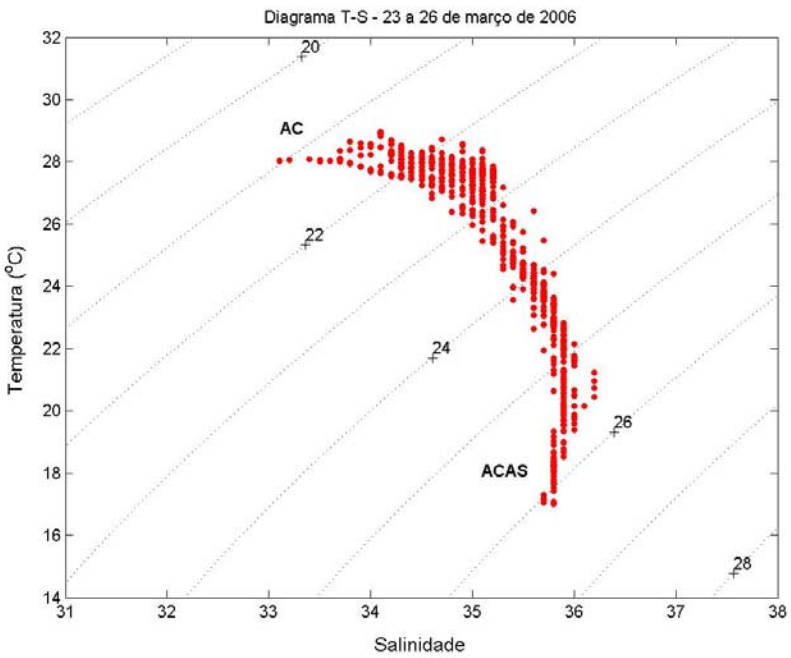


Figura 4.1.44 – Diagrama T-S, temperatura (°C) *versus* salinidade para os pares de pontos obtidos através das perfilagens verticais realizadas com CTD de 23 a 26 de março de 2006. As massas de água indicadas estão de acordo com os índices termohalinos propostos por Miranda (1985): AC (Água Costeira) e ACAS (Água Central do Atlântico Sul).

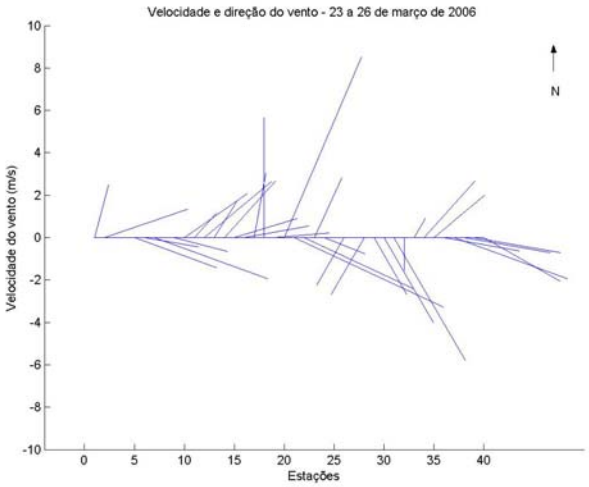


Figura 4.1.45 - Vetores de velocidade (m/s) e direção do vento em cada estação de coleta da rede de radiometria realizada de 23 a 26 de março de 2006. Os vetores indicam a origem do vento.

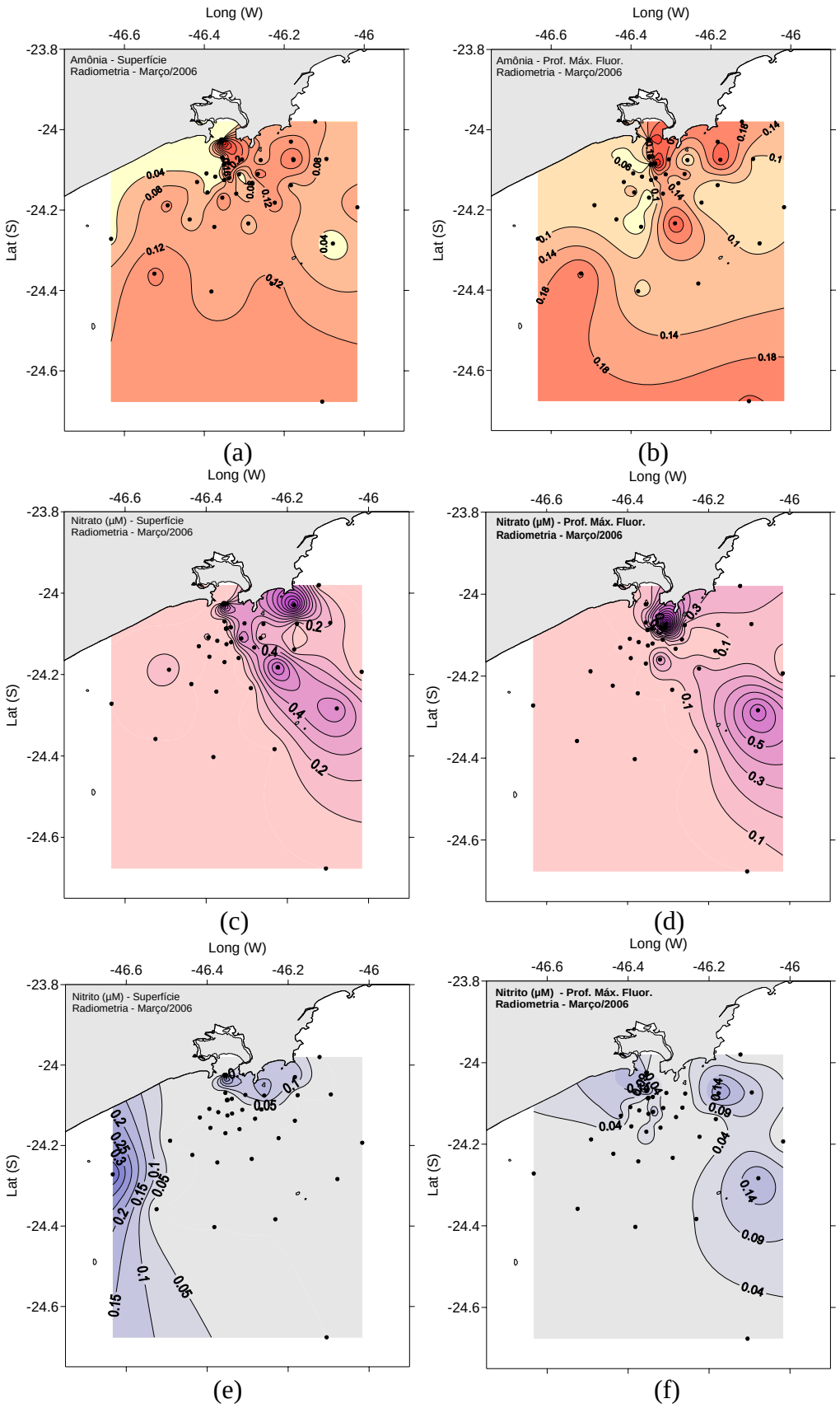


Figura 4.1.46 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) N-amônia (µM); (c e d) N-nitrito (µM), e; (e e f) e N-nitrato (µM), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.

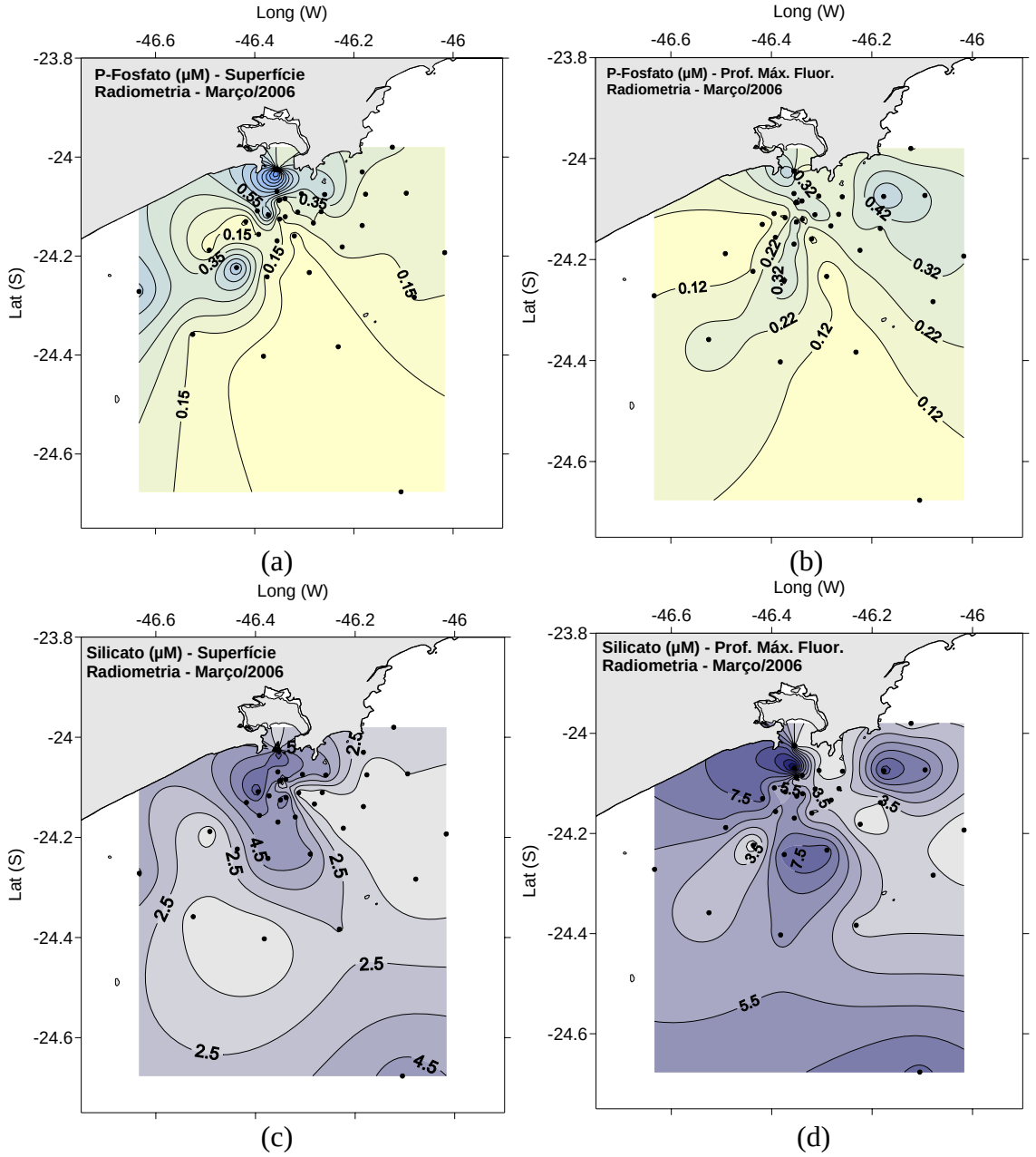
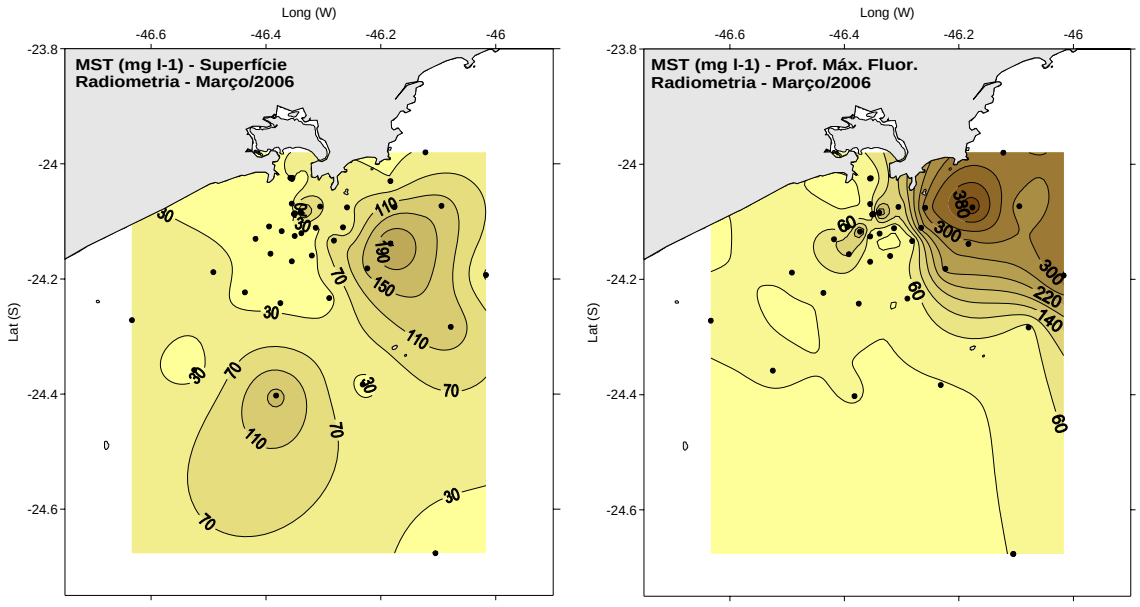
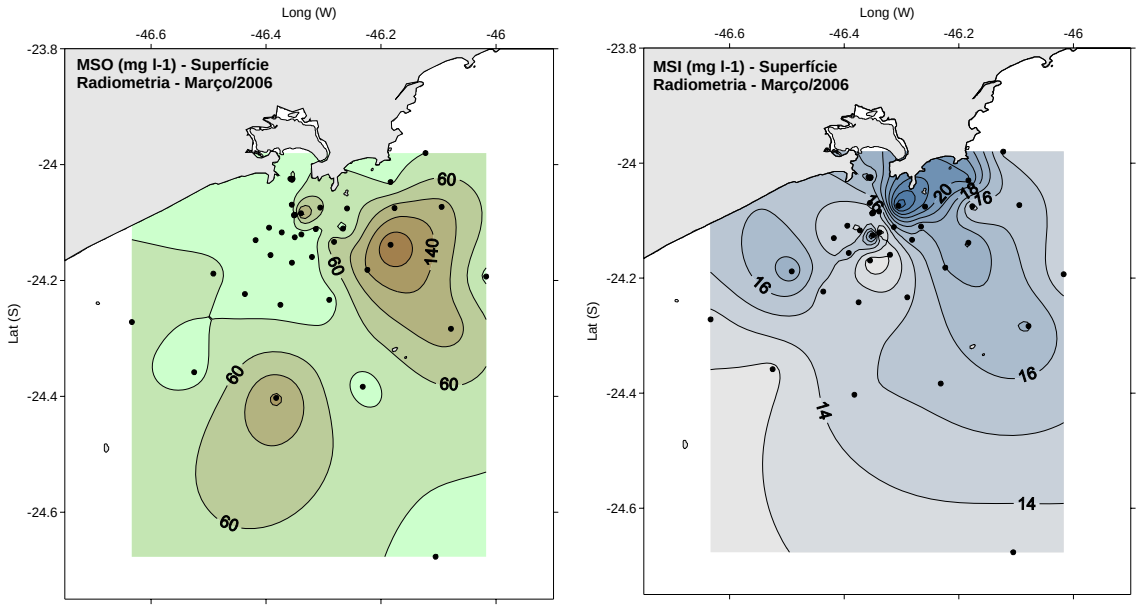


Figura 4.1.47 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) P-Fosfato (µM), e; (c e d) Silicato (µM), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.



(a) (b)

Figura 4.1.48 - Distribuição horizontal das concentrações de MST (mg l^{-1}), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.



(a) (b)

Figura 4.1.49 - Distribuição horizontal das concentrações de (a) MSO (mg l^{-1}) e (b) MSI (mg l^{-1}) na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.

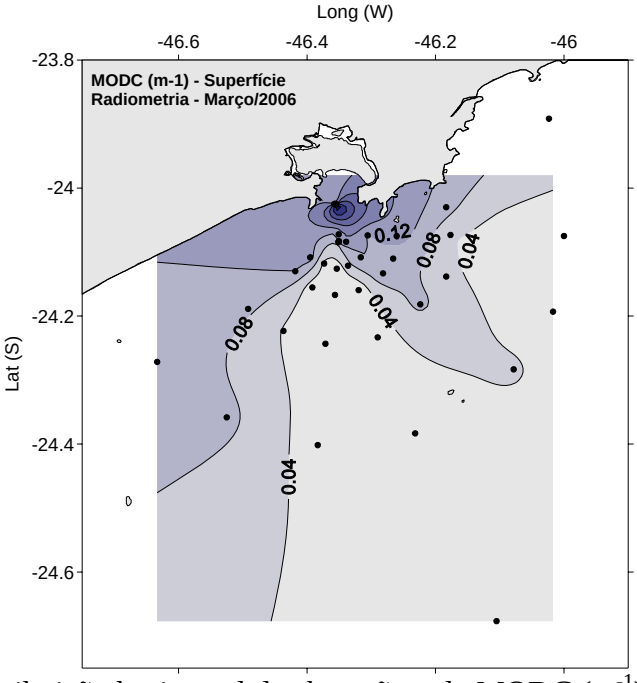


Figura 4.1.50 - Distribuição horizontal da absorção pela MODC (m^{-1}), na superfície, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.

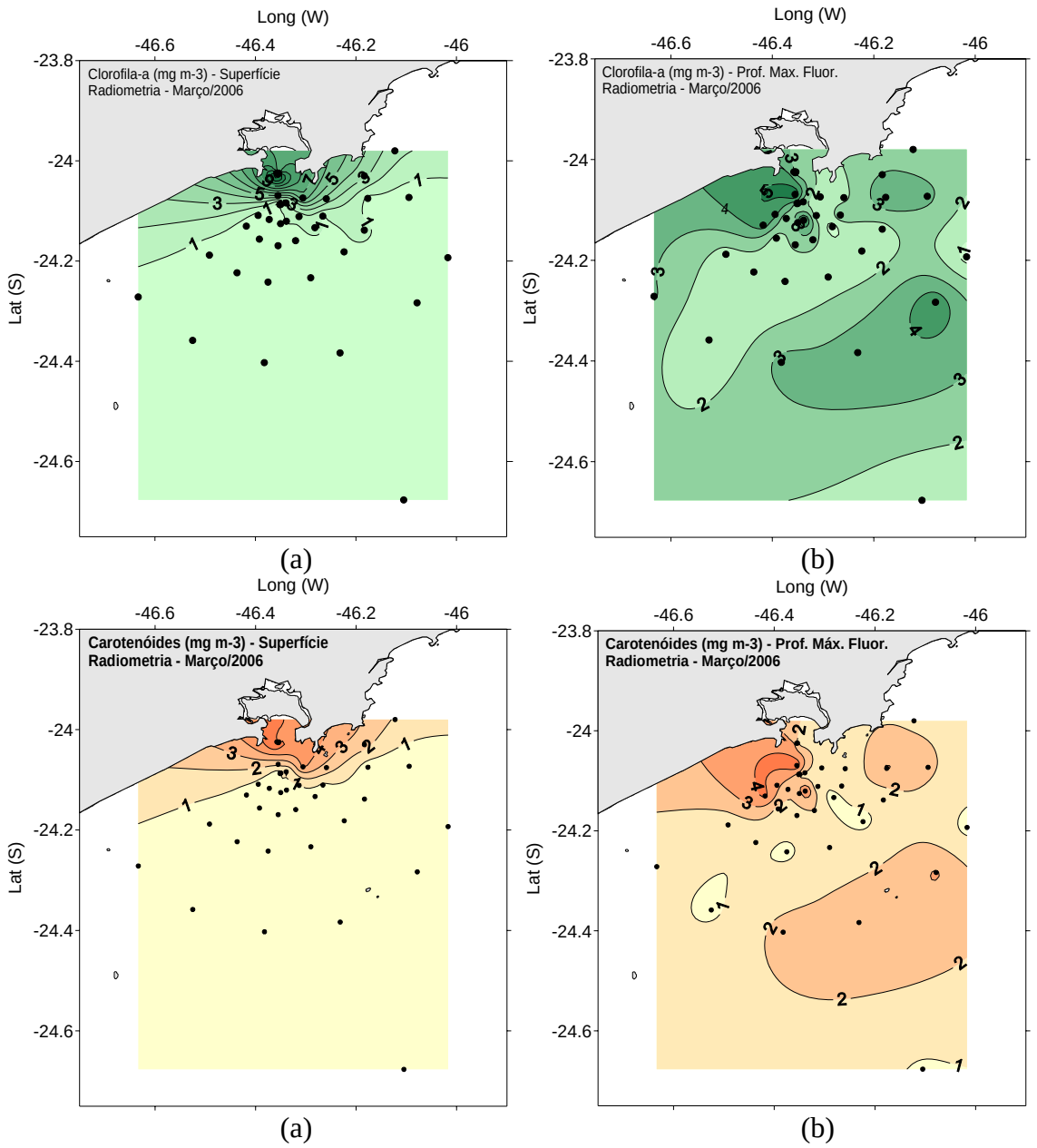


Figura 4.1.51 - Distribuição horizontal das concentrações de: (a e b) Clorofila-a (mg m^{-3}), e; (c e d) Carotenóides (mg m^{-3}), na superfície e na profundidade de máxima fluorescência, nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.

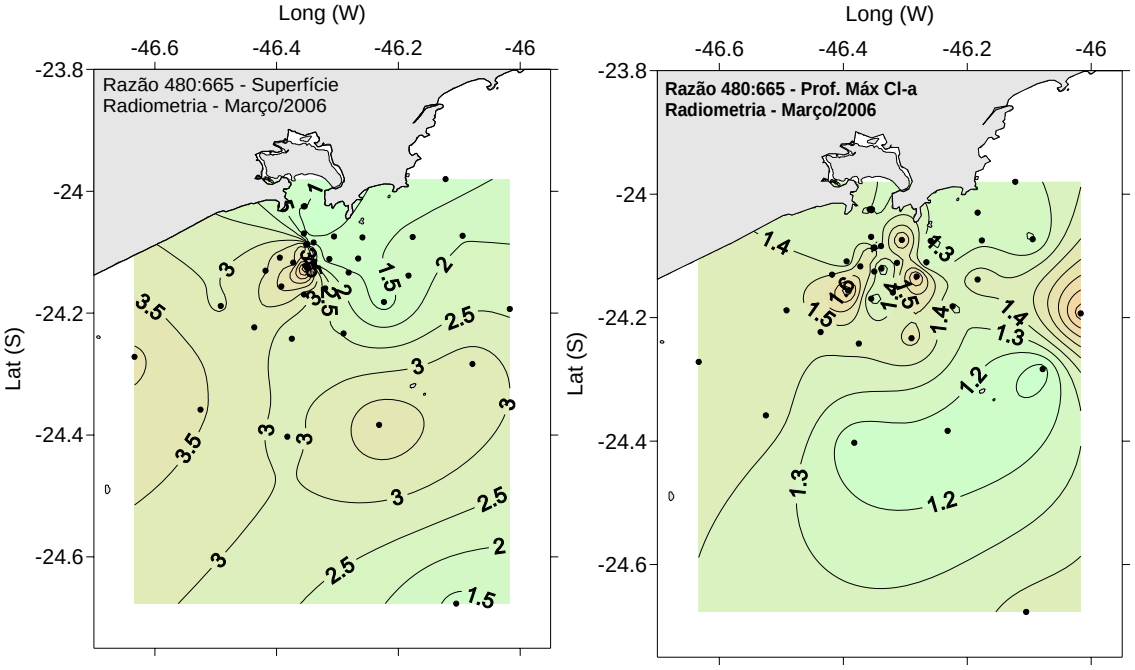
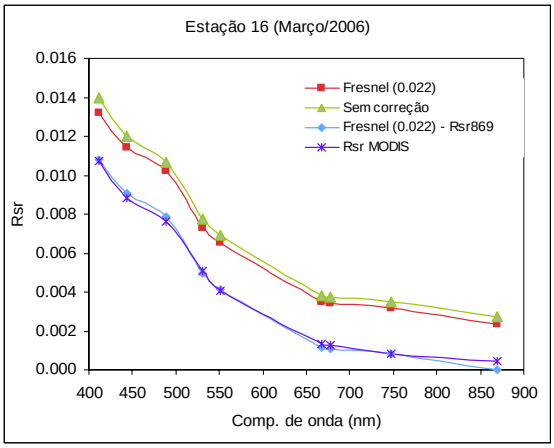
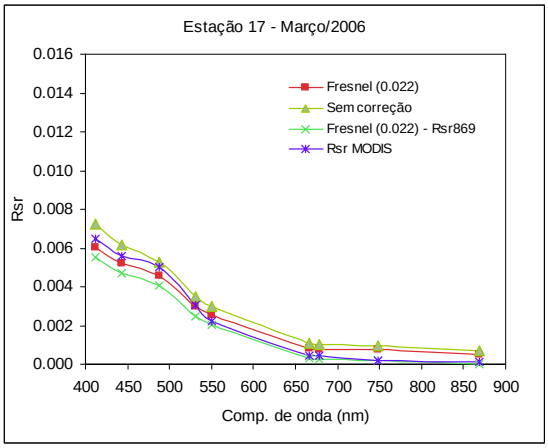


Figura 4.1.52 - Distribuição horizontal da razão 480/665, na superfície (a) e na profundidade de máxima fluorescência (b), nas estações de coleta da rede de radiometria realizada no período de 23 a 26 de março de 2006.

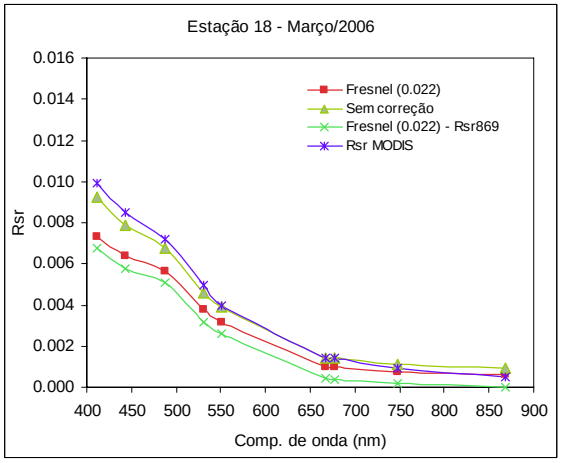
Figura 4.1.53 – Floração de *Trichodesmium erythraeum* ocorrida na etapa de 23 a 26 de março de 2006. Foto: Poliana Carvalho em 24/03/2006.



(a)



(b)



(c)

Figuras 4.2.1 – Espectros de refletância obtidos pelo sensor MODIS (Rsr MODIS) e medidos *in situ*, sem correção (sem correção); com correção da refletância de Fresnel (Fresnel 0.022); com correção da refletância de Fresnel e subtração da refletância em 869 nm (Fresnel (0.022- Rsr 869): (a) estação 16, (b) estação 17 e (c) estação 18, coletadas em março/2006.

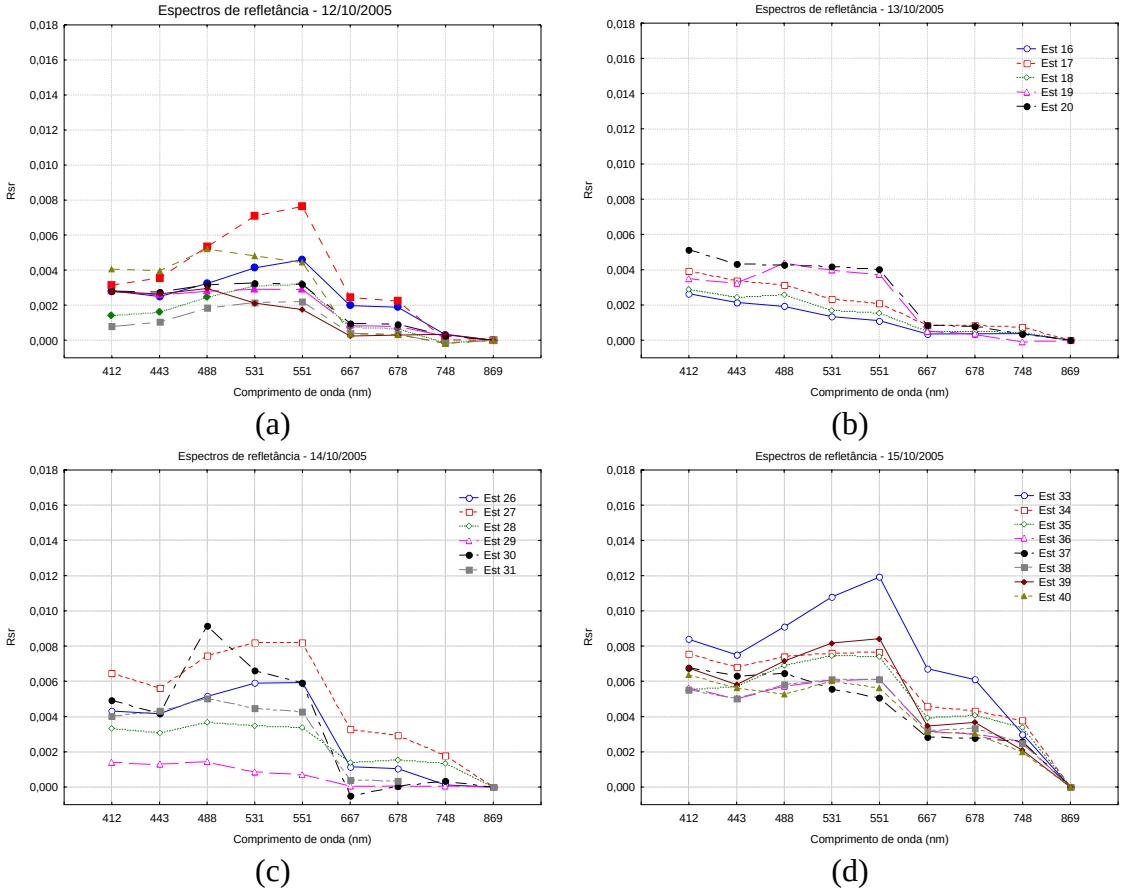


Figura 4.2.2 – Espectros de refletância coletados em outubro/2005, agrupados por dia de coleta: a) Estações 1 a 8, coletados em 12 de outubro/2005; b) Estações 16 a 20, coletados em 13 de outubro/2005; c) Estações 26 a 31, coletados em 14 de outubro/2005, e; d) Estações 33 a 40, coletados em 15 de outubro/2005.

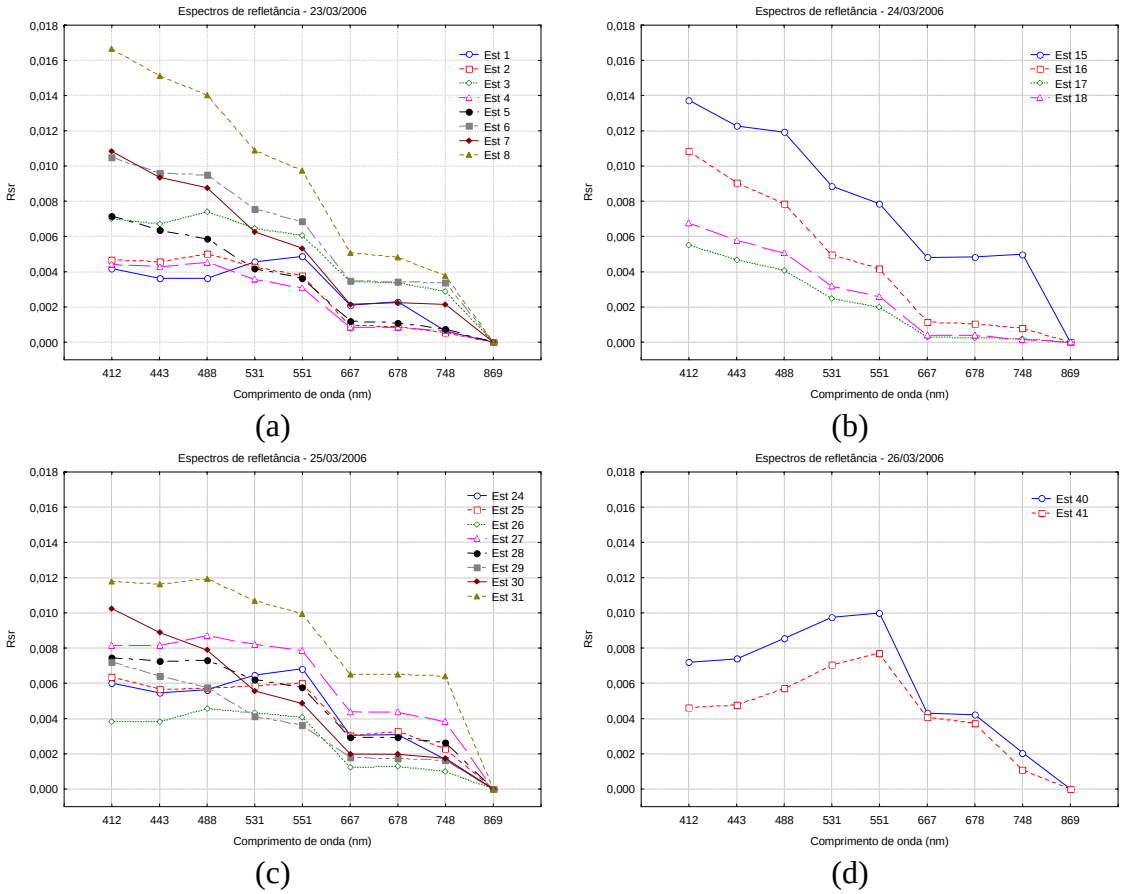


Figura 4.2.3 – Espectros de refletância coletados em março/2006, agrupados por dia de coleta: a) Estações 1 a 8, coletados em 23 de março de 2006; b) Estações 15 a 18, coletados em 24 de março de 2006; c) Estações 24 a 31, coletados em 25 de março de 2006, e; d) Estações 40 e 41, coletados em 26 de março de 2006.

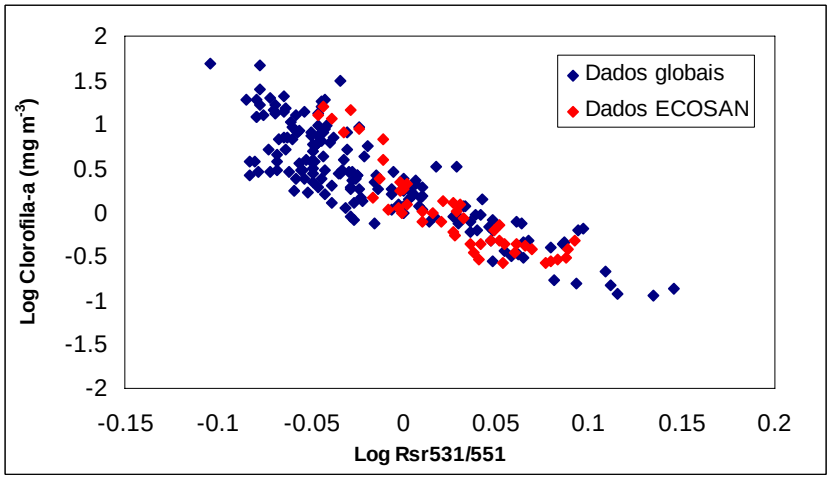


Figura 4.2.4 – Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a (*log*) e a razão Rsr531/551 (*log*) global, obtidas na base de dados do NOMAD, e entre as concentrações de clorofila-a (*log*) e a razão Rsr531/551 (*log*) medidas *in situ* durante os cruzeiros de outubro de 2005 e março de 2006 de radiometria, na plataforma continental de Santos.

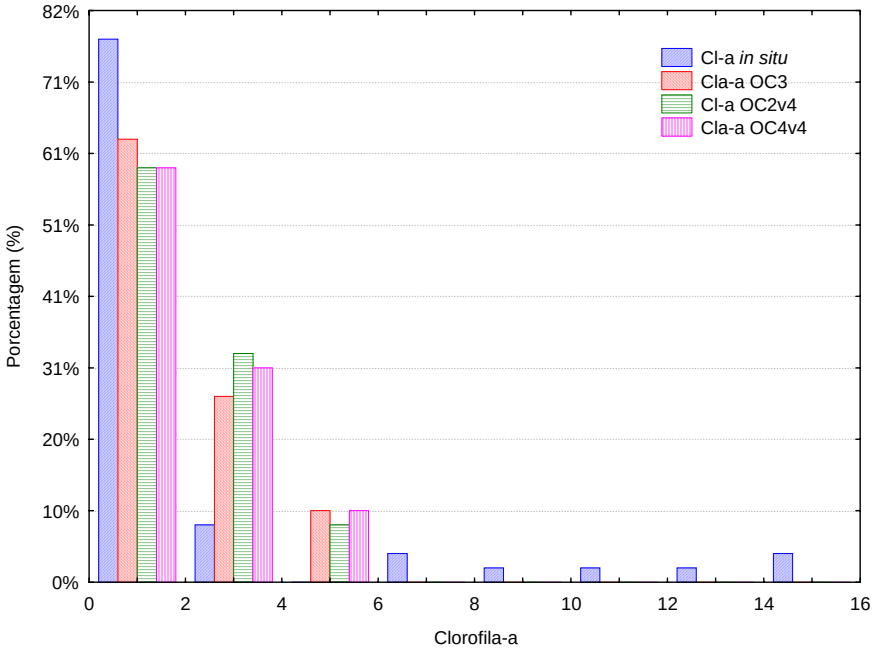
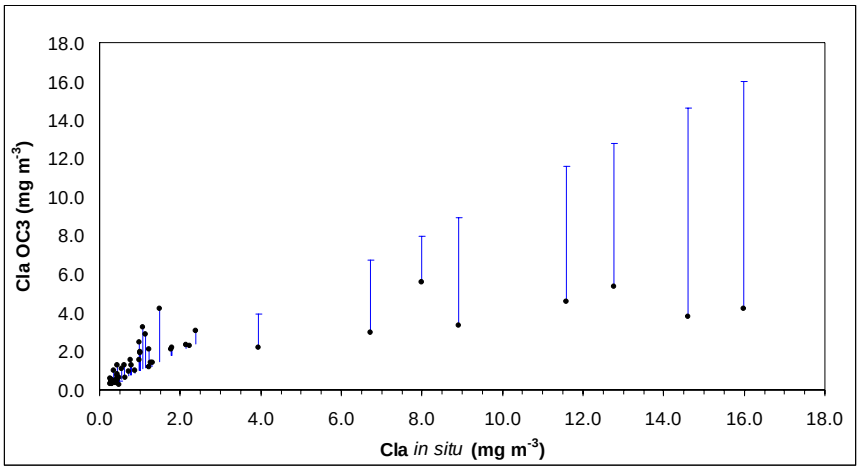
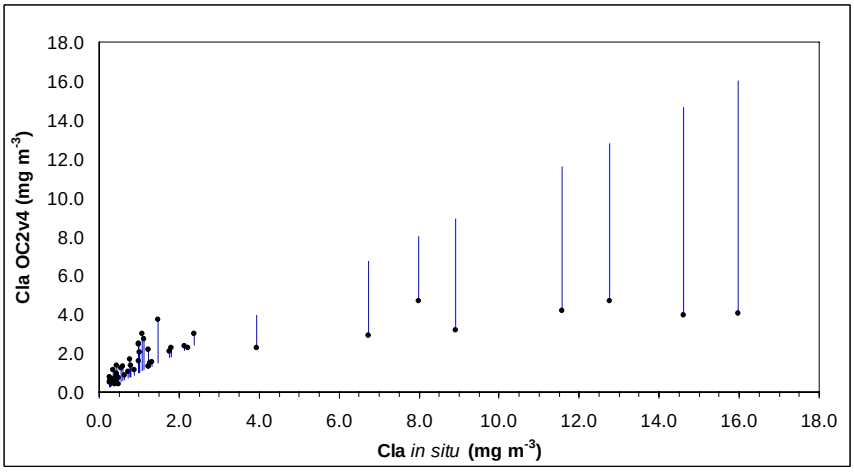


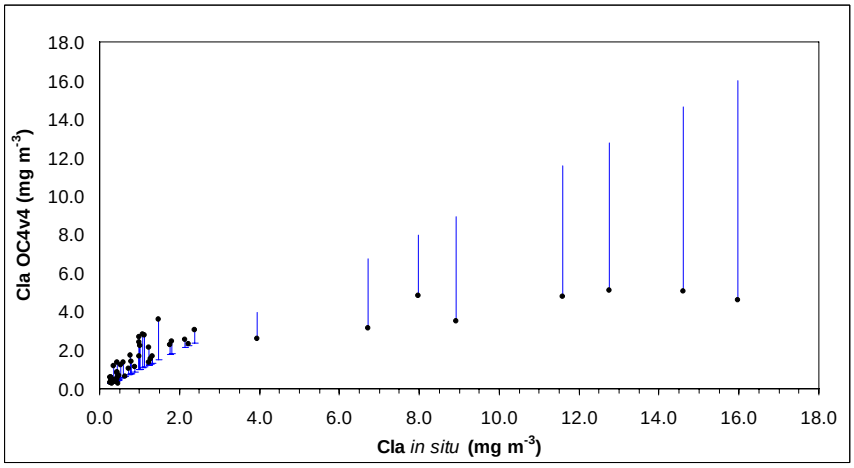
Figura 4.2.5 – Histograma de frequência de observação (%) da concentração de clorofila-a obtida *in situ* e pelos algoritmos globais, OC3, OC2v4 e OC4v4.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2.6 – Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida *in situ* e a clorofila-a estimada pelos algoritmo OC3 (a), OC2v4 (b) e OC4v4 (c), e suas respectiva barra de erros (Cla estimada – Cla observada).

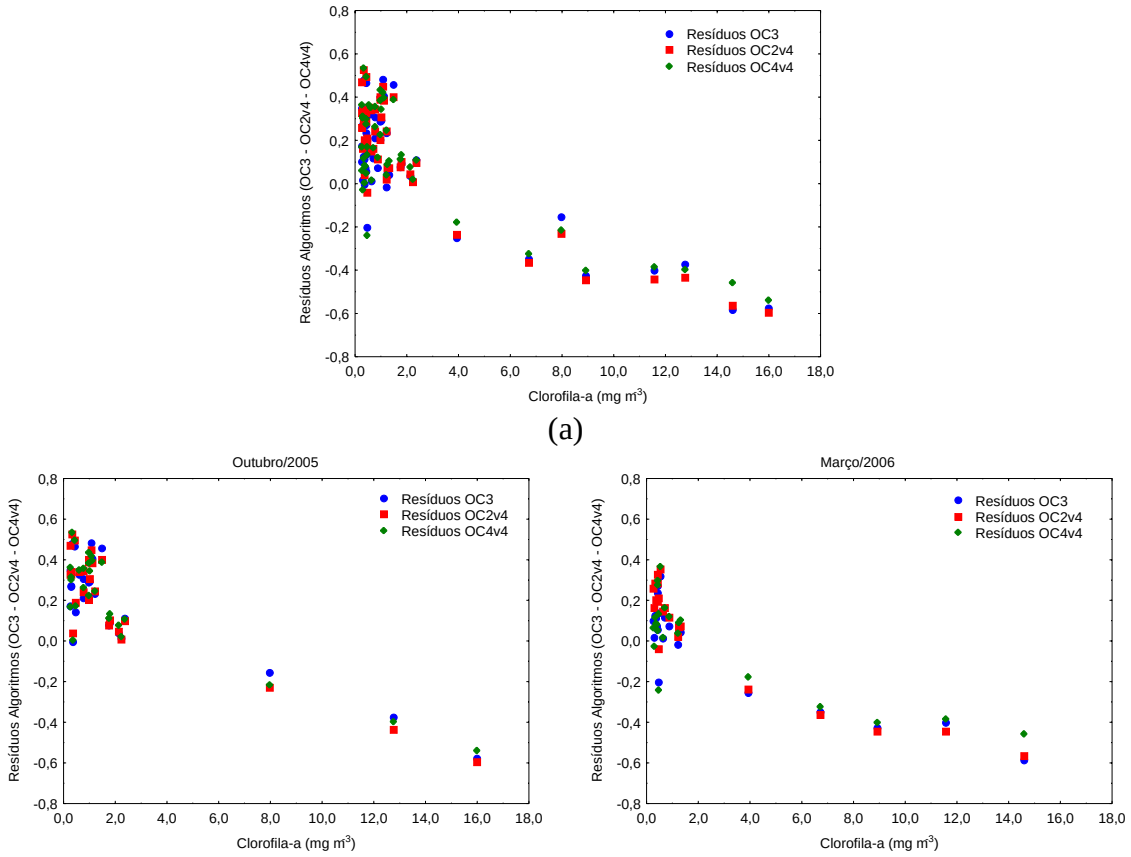
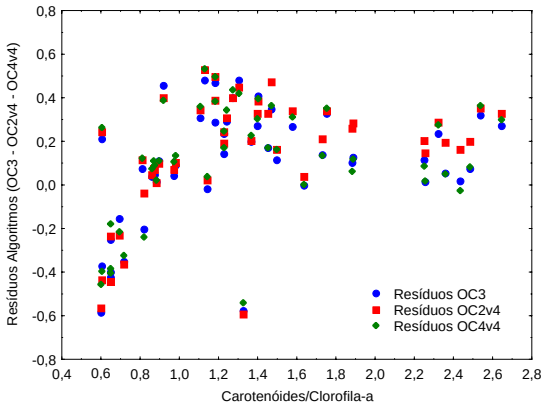
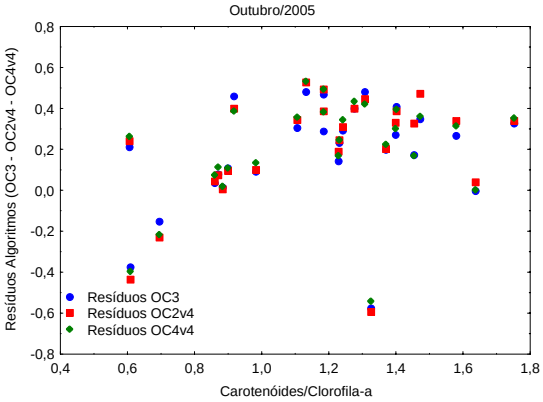


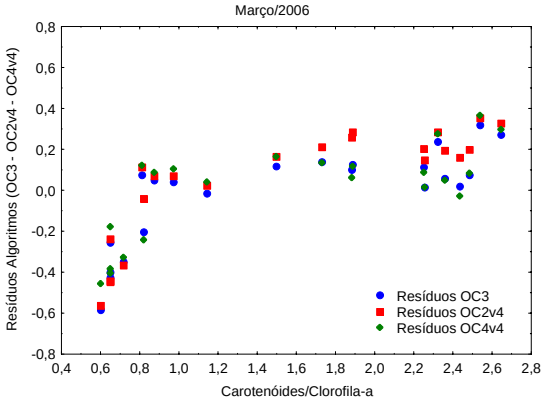
Figura 4.2.7– Diagramas de dispersão entre as concentrações de clorofila-a estimada pelos algoritmos OC3, OC2v4 e OC4v4 (*log*) *versus* a concentração de clorofila-*a* medida *in situ* (*log*), para: (a) todo o conjunto de dados (n = 49); (b) outubro/2005, (n = 27), e; (c) março/2006 (n = 22).



(a)

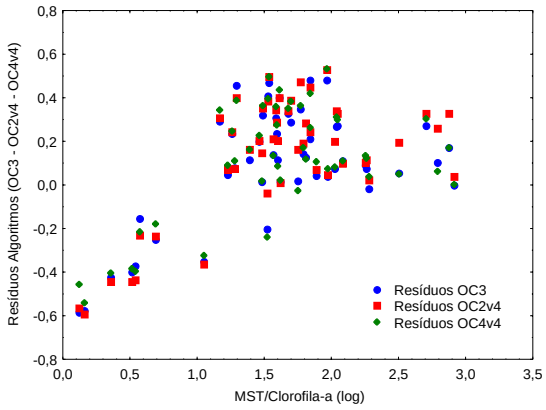


(b)

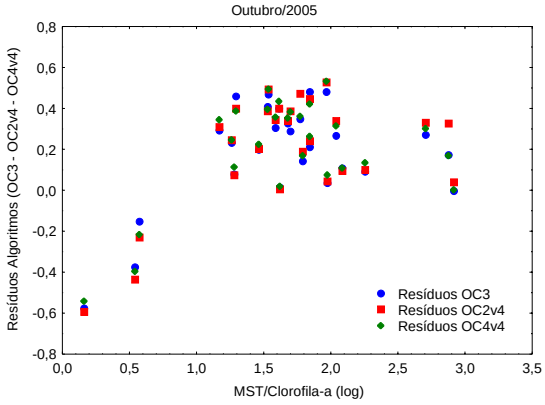


(c)

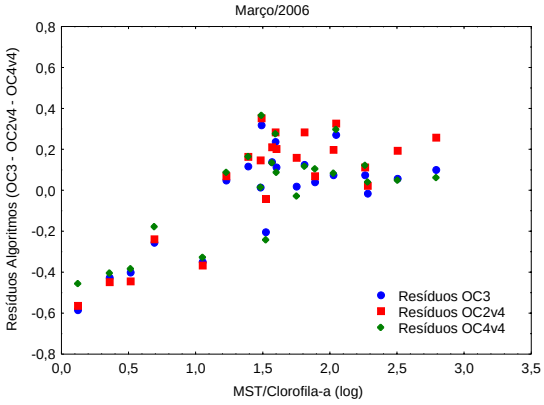
Figura 4.2.8– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão Carotenóides/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c).



(a)

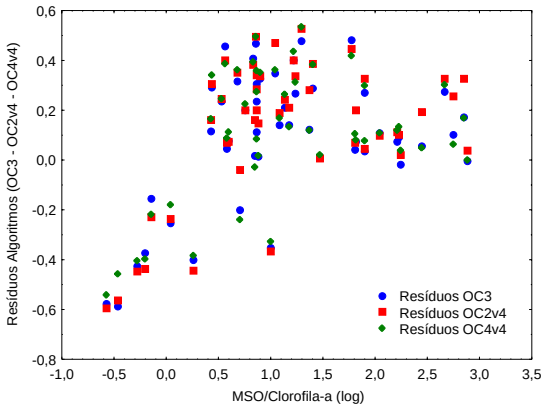


(b)

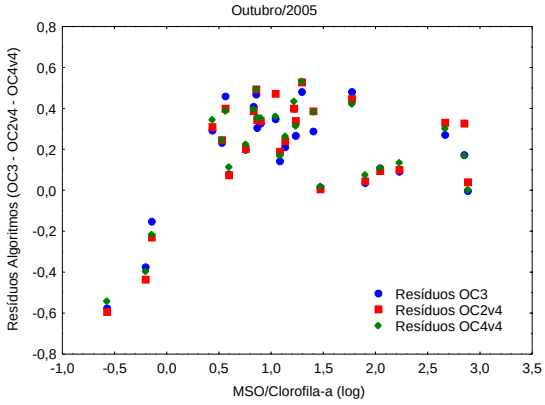


(c)

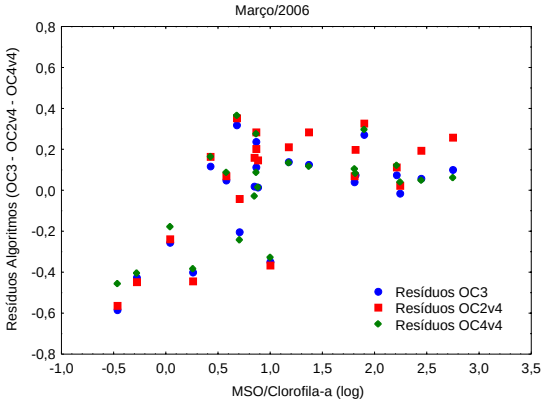
Figura 4.2.9– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MST/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2 005 (b) e para março/2006 (c).



(a)

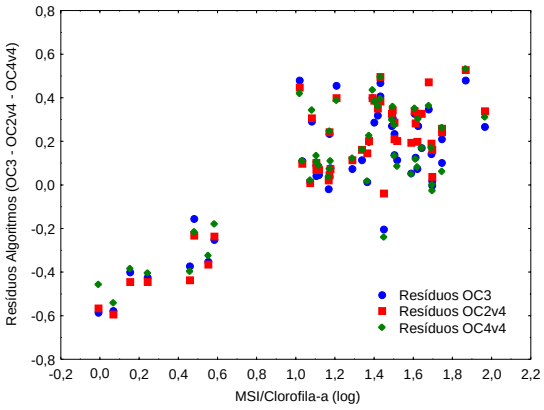


(b)

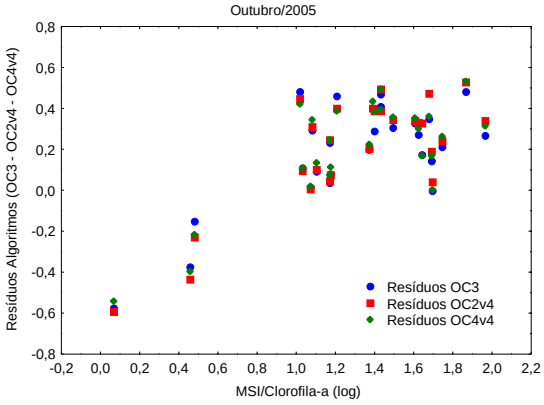


(c)

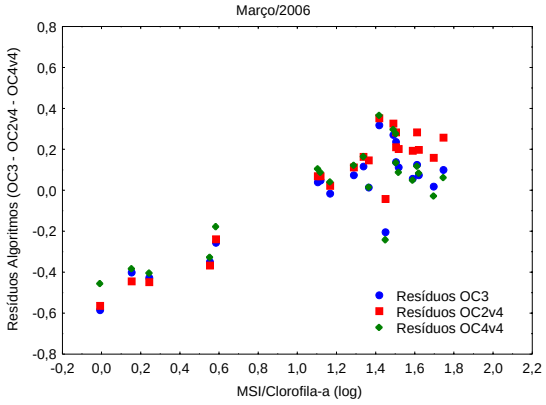
Figura 4.2.10– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MSO/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c).



(a)

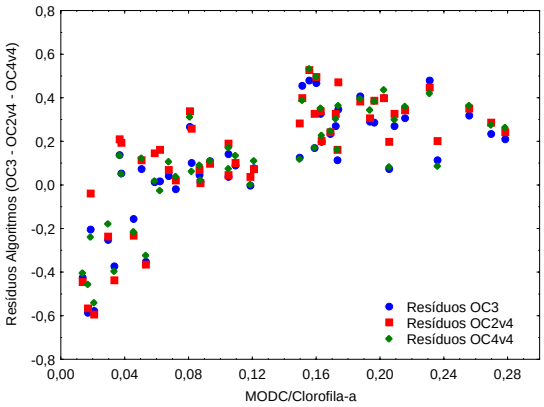


(b)

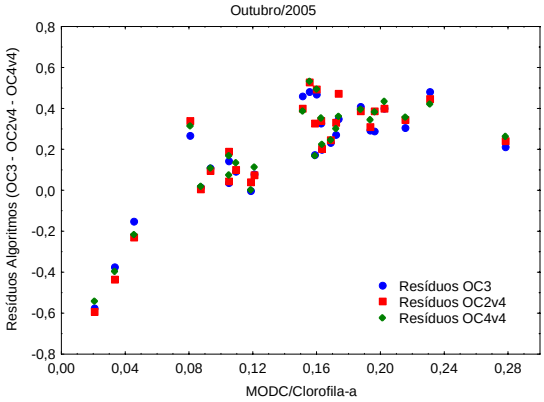


(c)

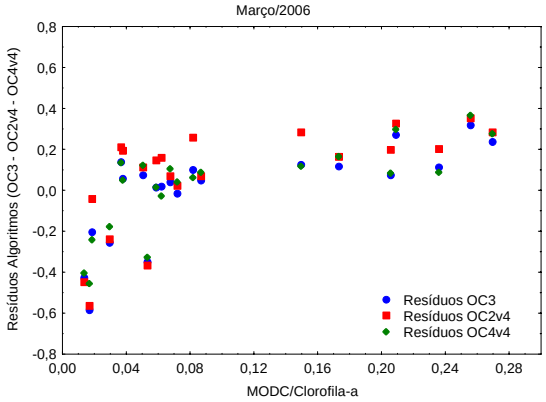
Figura 4.2.11– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MSI/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2.12– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa do algoritmo OC3, OC2v4 e OC4v4 e a razão MODC/Clorofila-a, para todo o conjunto de dados (a), para outubro/2005 (b) e para março/2006 (c).

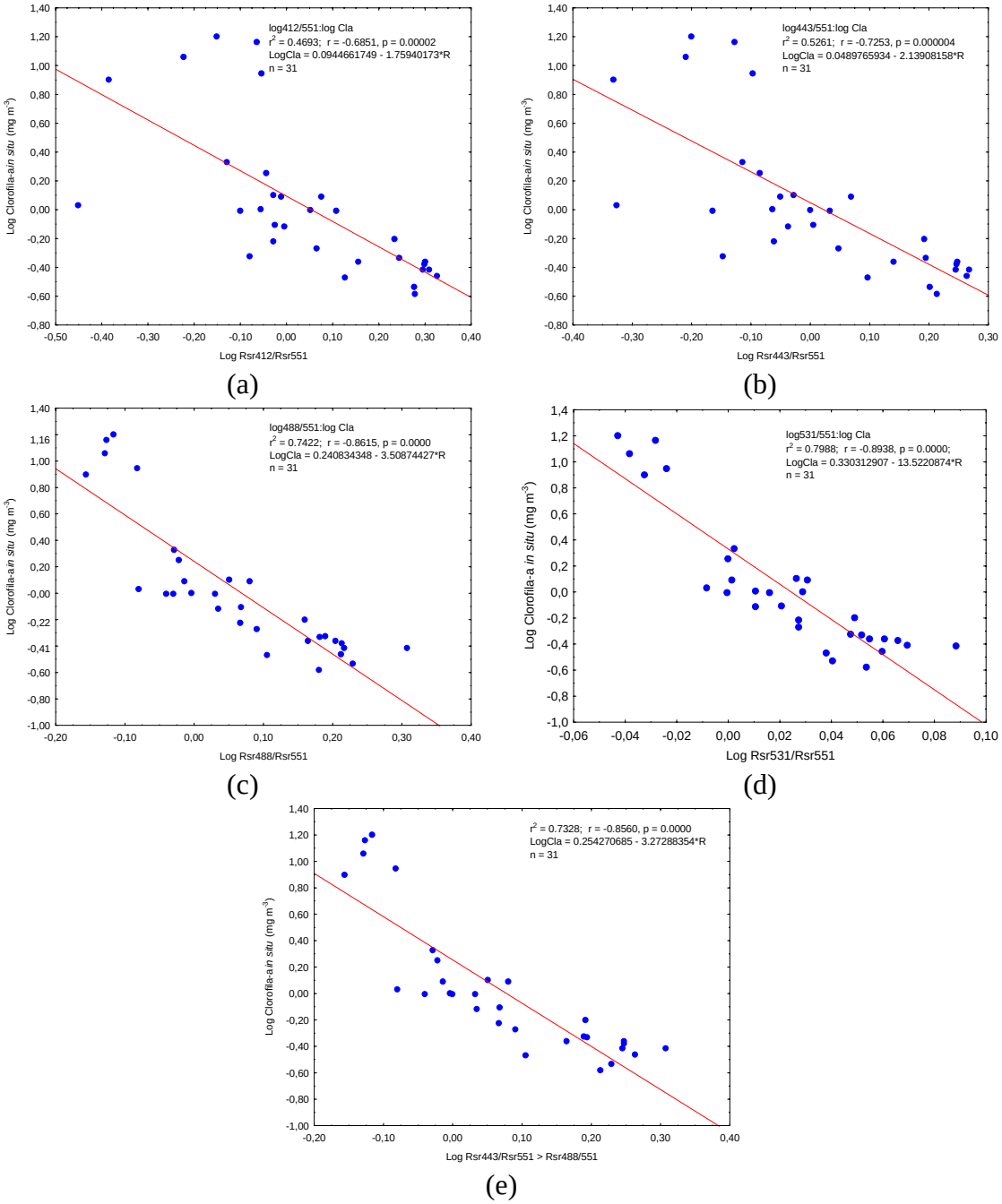
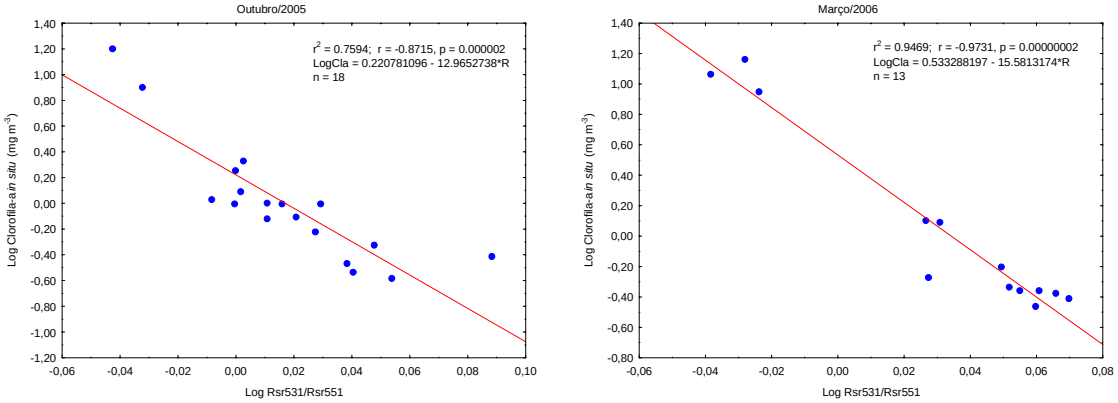
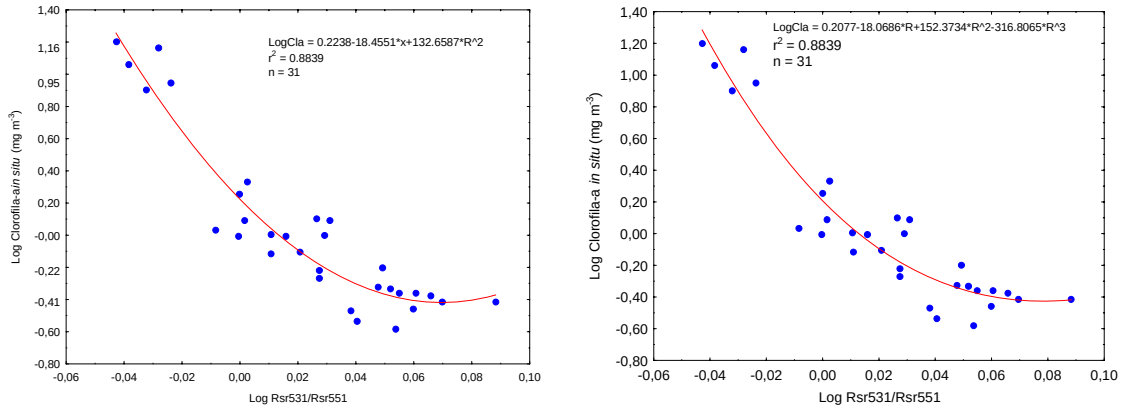


Figura 4.2.13– Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e as razões de bandas (*log*), ajustadas linearmente: (a) 412/551; (b) 443/551; (c) 488/551; (d) 531/551, e; (e) R443/551 > 488/551.

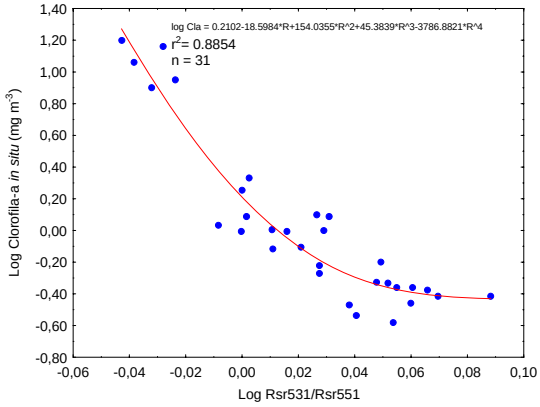


(a) (b)

Figura 4.2.14– Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e a razão de bandas Rsr531/Rsr551 (*log*), ajustadas linearmente, para (a) outubro/2005 e (b) março/2006.



(a) (b)



(c)

Figura 4.2.14- Diagrama de dispersão entre a clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e a razão entre as bandas 531 e 551 (*log*) ajustados por um polinômio de segunda (a), terceira (b) e quarta (c) ordem, com suas respectivas equações e coeficientes de determinação.

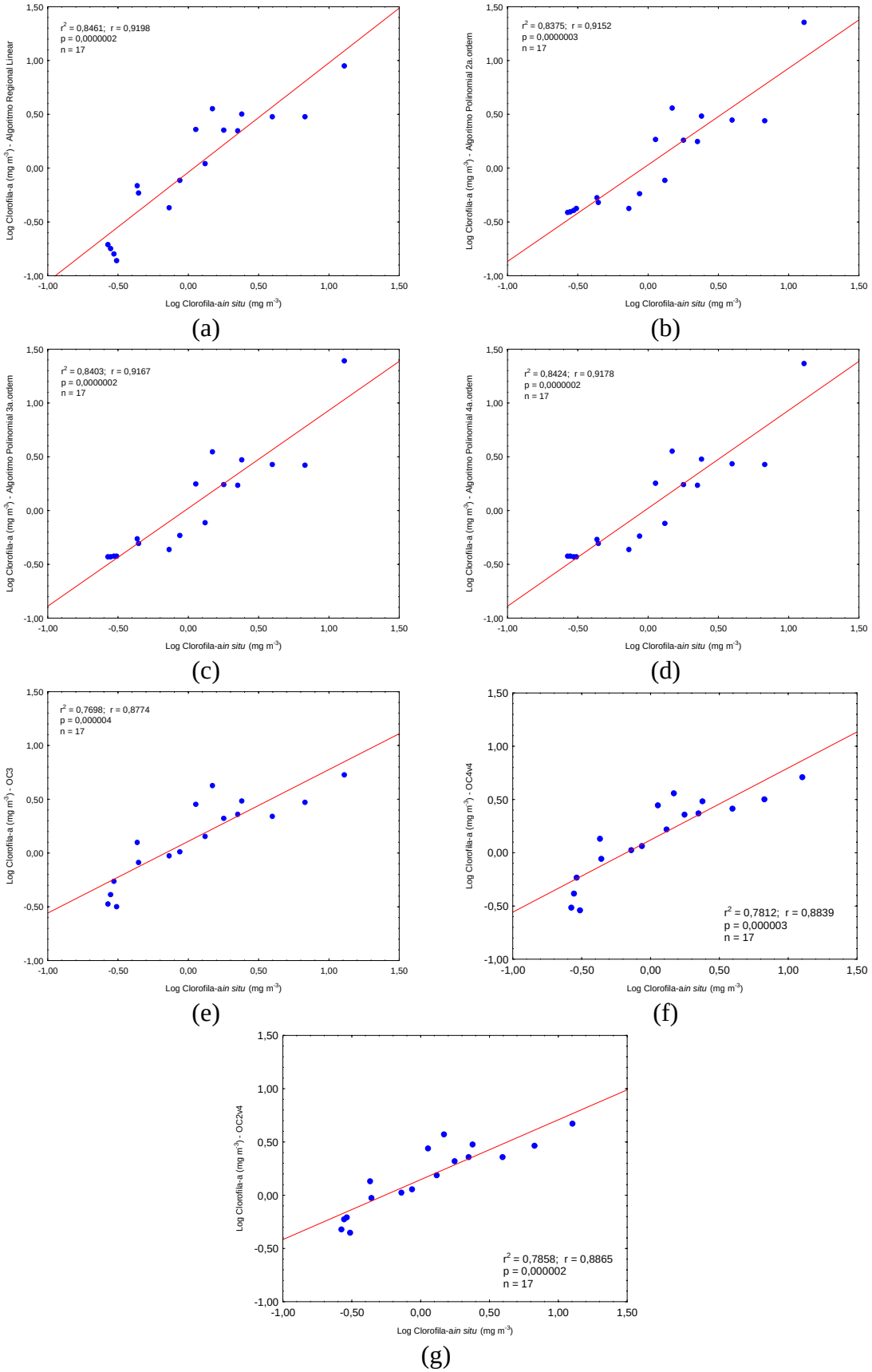


Figura 4.2.16– Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e a estimada pelos algoritmos regionais, linear (a), polinomial de segunda (b), terceira (c) e quarta ordem (d), e os globais OC3 (e), OC4v4 (f) e OC2v4 (g), a partir dos dados radiométricos.

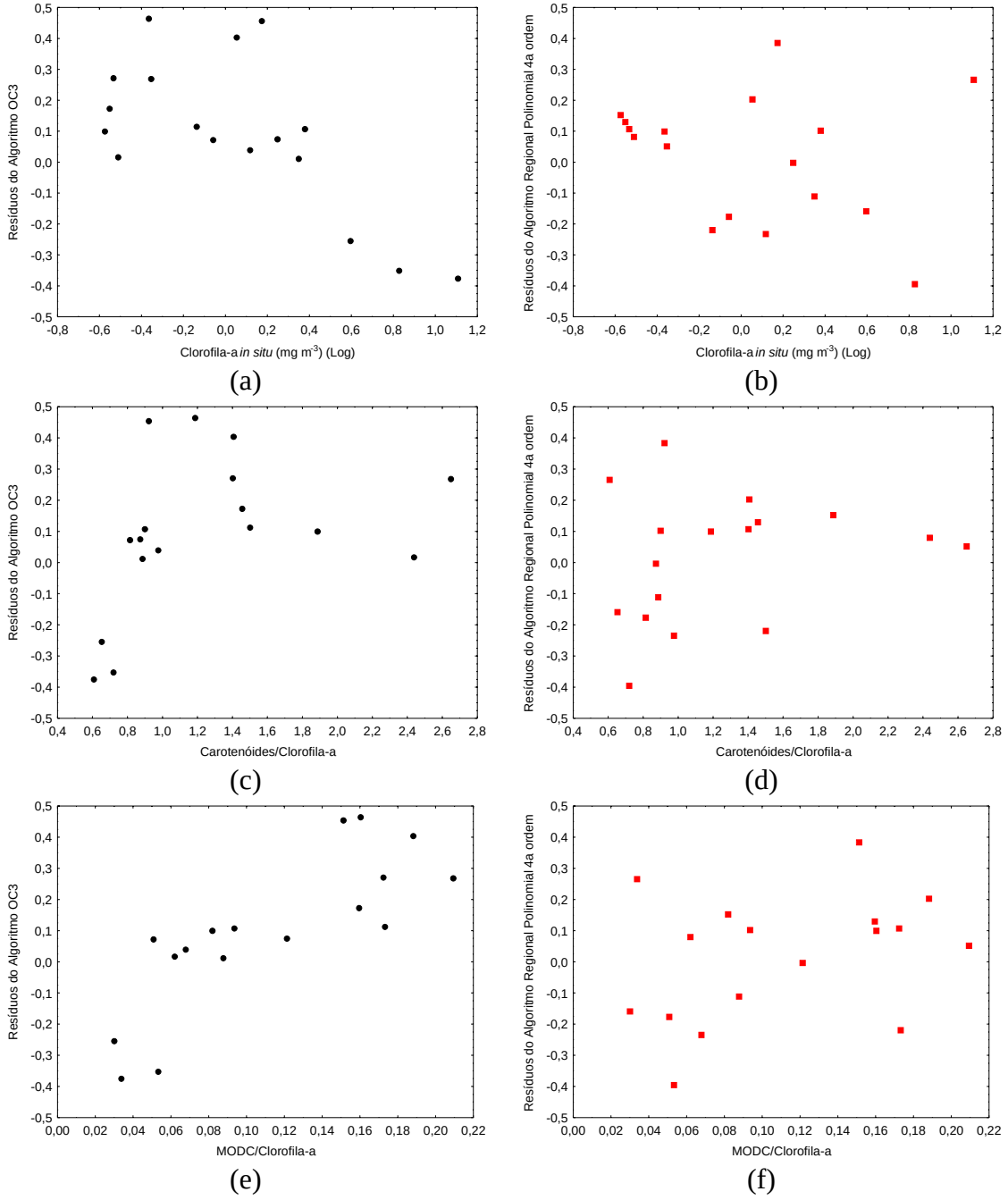


Figura 4.2.17– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa dos algoritmos OC3 e o regional polinomial de quarta ordem, respectivamente: (a) e (b) clorofila-a; (c) e (d) razão carotenóides/Clorofila-a, e; (e) e (f) razão MODC/Clorofila-a.

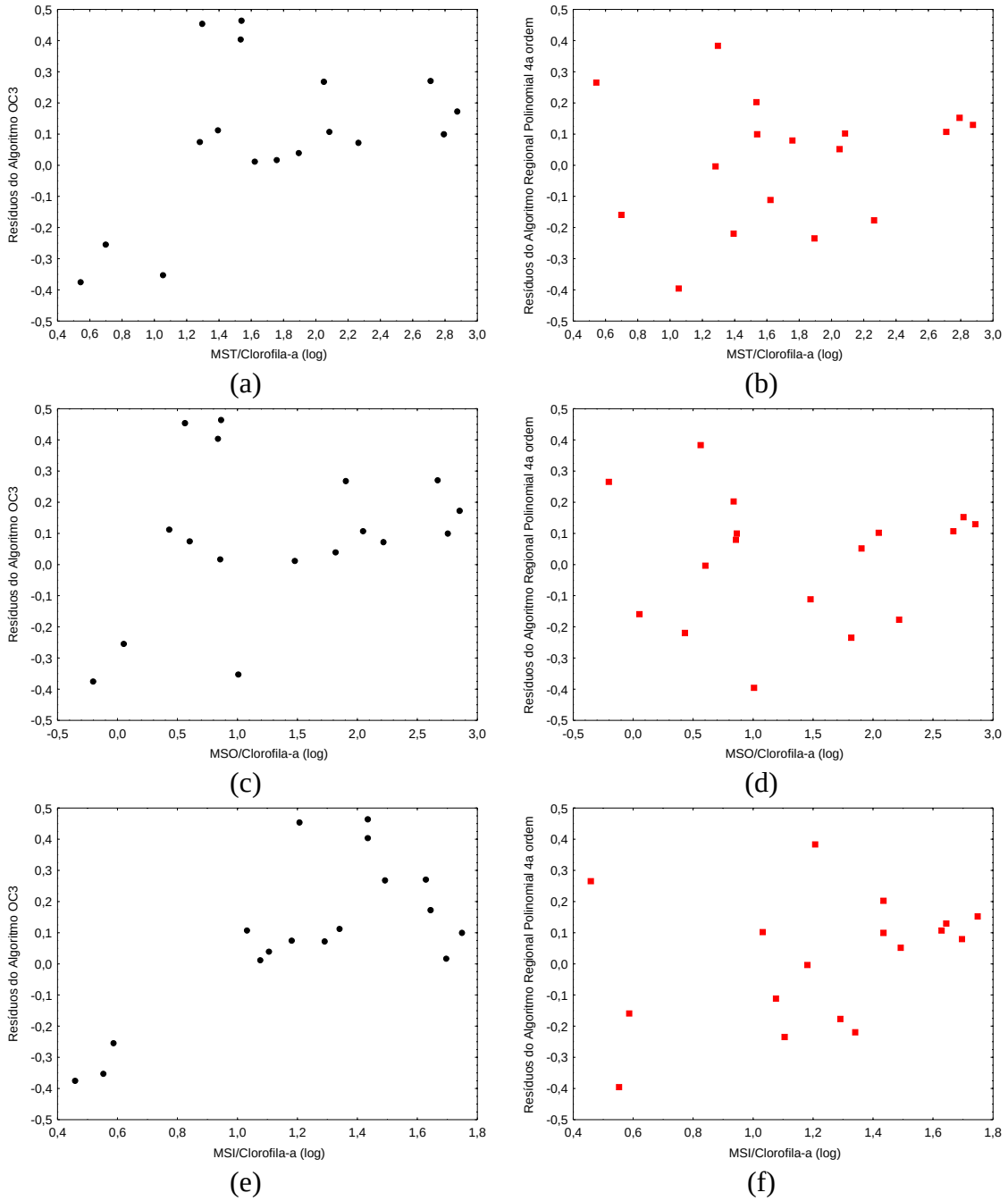


Figura 4.2.18– Diagramas de dispersão entre os erros de estimativa dos algoritmos OC3 e o regional polinomial de quarta ordem, respectivamente: (a) e (b) razão MST/ Clorofila-a; (c) e (d) razão MSI/ Clorofila-a, e; (e) e (f) razão MSO/ Clorofila-a, para o conjunto de dados com 17 estações.

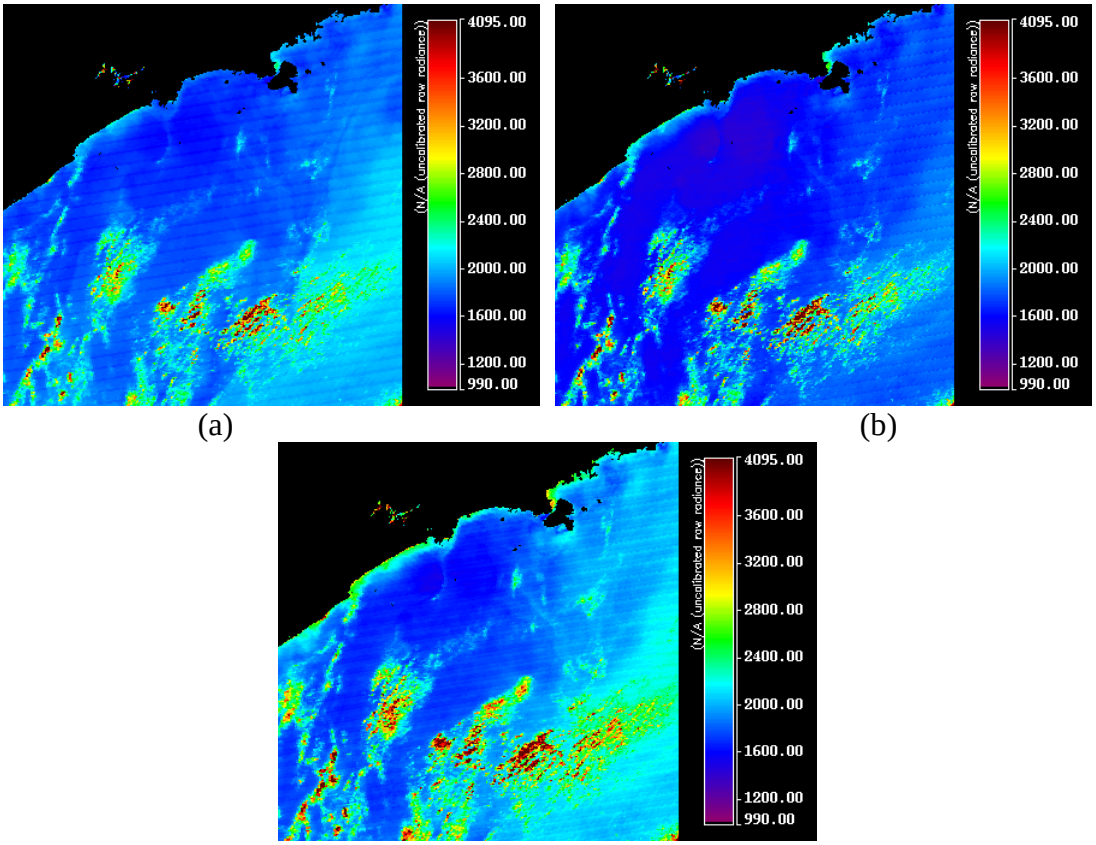


Figura 4.3.1 – Radiância ascendente da água nas bandas centradas em 488, 531 e 551 nm (a, b e c, respectivamente), de 17 de março de 2006, para a região da plataforma continental em frente à Santos.

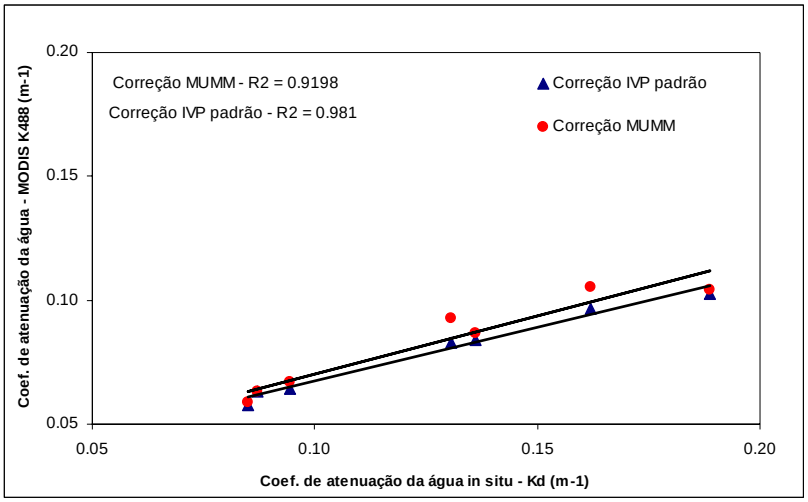


Figura 4.3.2 – Diagrama de dispersão entre o coeficiente de atenuação da água (Kd) medido *in situ* e estimado pelo sensor MODIS (K488).

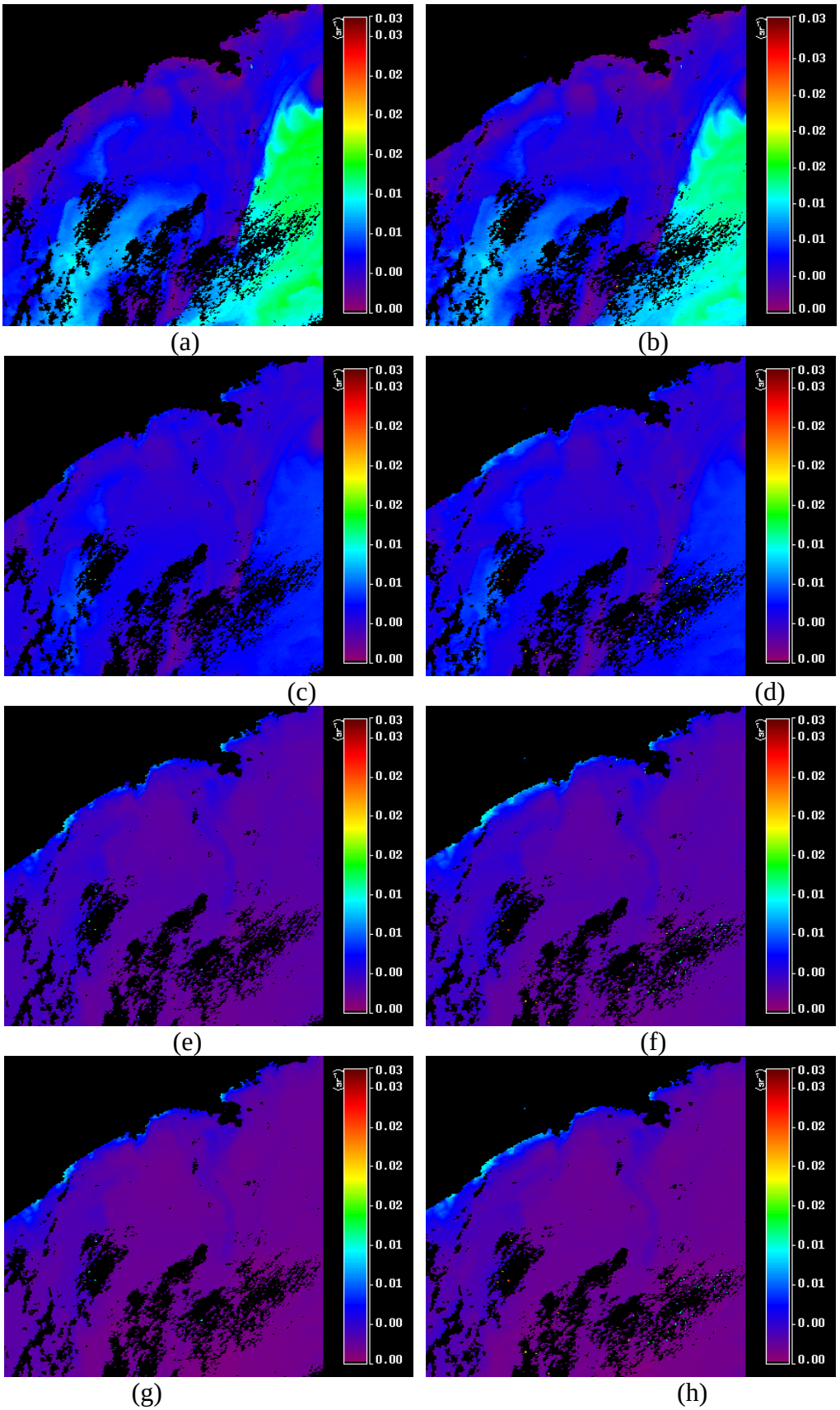
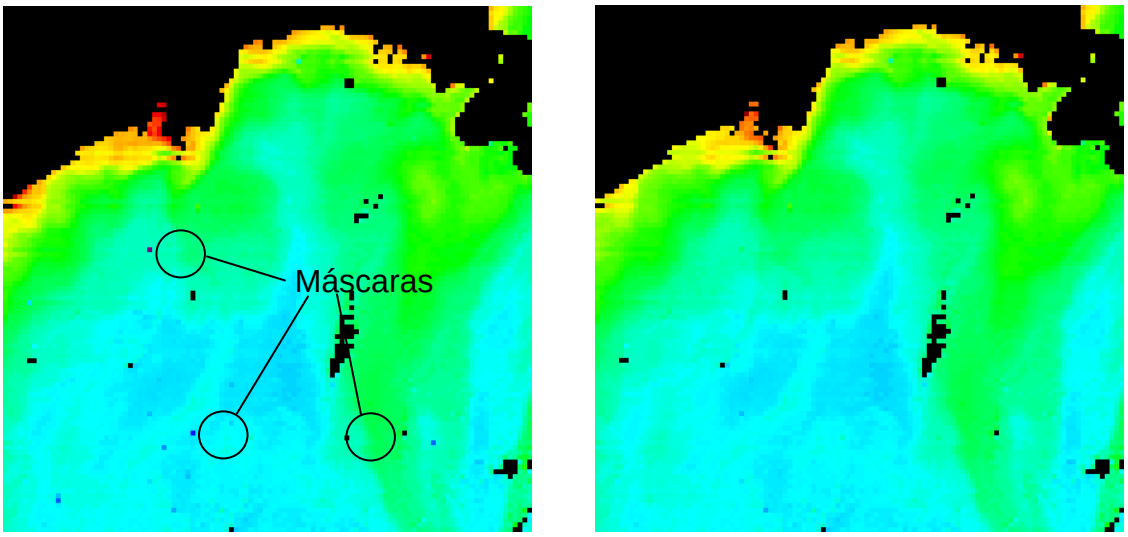


Figura 4.3.3 – Imagens de refletância das bandas centradas em 412, 488, 531 e 551 nm, referente ao dia 17 de março de 2006, obtidas através do modelo de aerossóis com as bandas do IVP (a, c, e, e g, respectivamente) e utilizando o modelo MUMM (b, d, f e h, respectivamente).



(a) (b)

Figura 4.3.4 – Detalhe do mapa de clorofila-a (mg m^{-3}) produzido utilizando a correção padrão do Seadas (a), onde se observa *pixels* com valor nulo de concentração de clorofila-a, e utilizando a correção atmosférica pelo método MUMM (b), com menor número de *pixels* nulos.

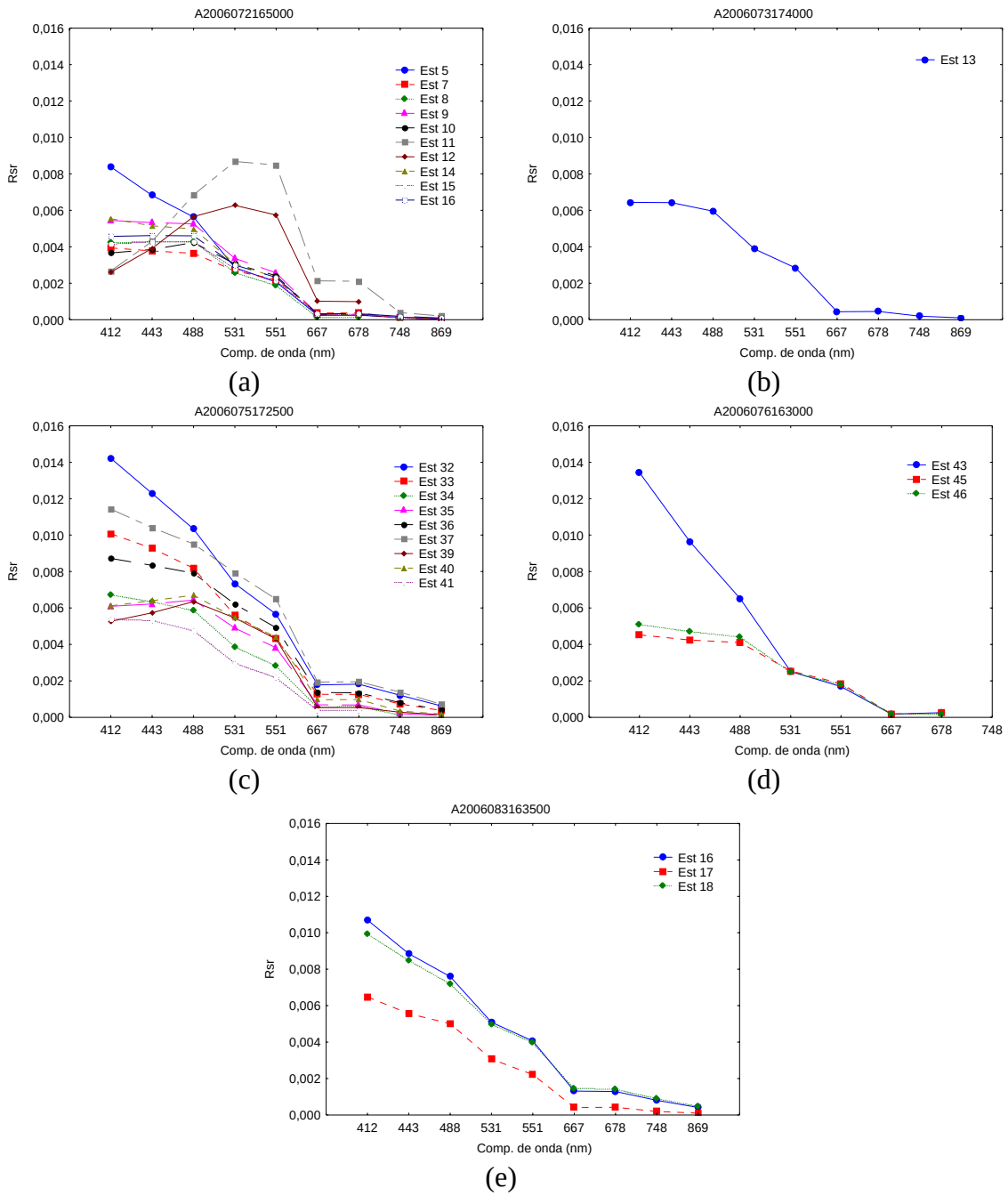
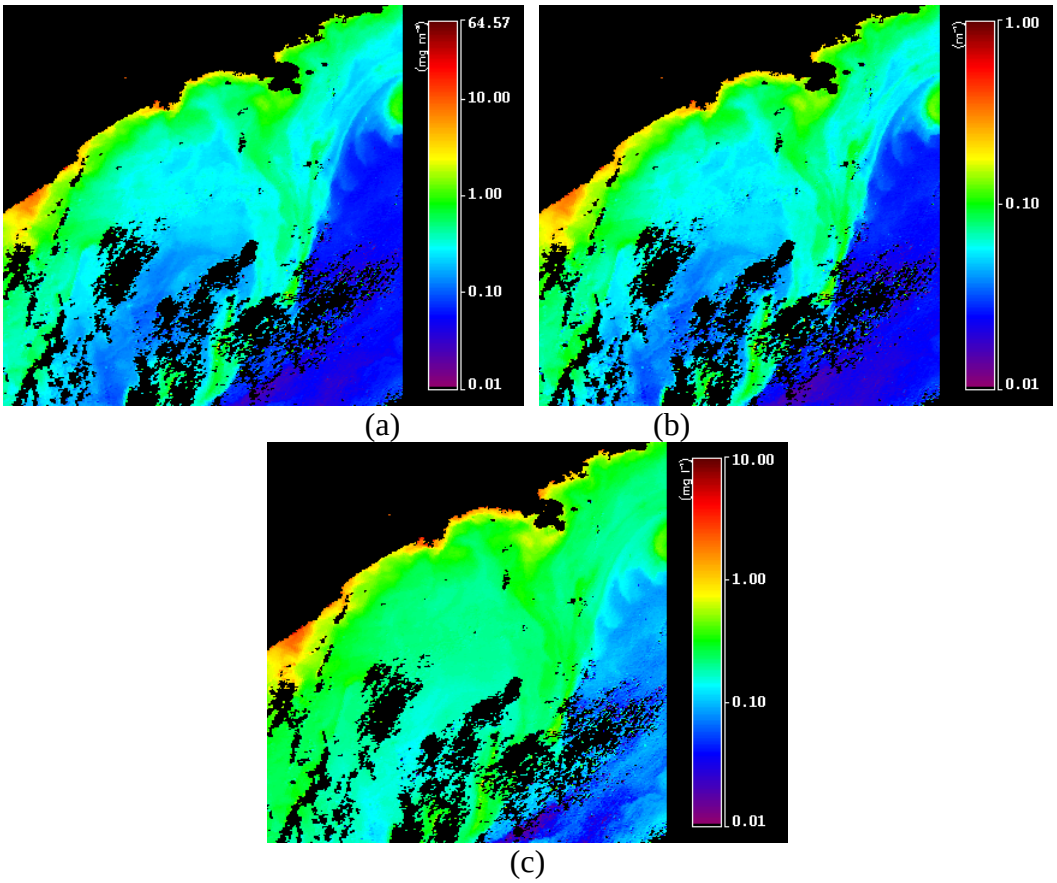


Figura 4.3.5 – Curvas de refletância das obtidas pelo sensor MODIS para as estações de coleta *in situ* dentro de uma janela temporal de 24 horas em relação ao horário de aquisição da imagem.



(a) (b)

(c)

Figura 4.3.6. - Exemplos dos produtos nível 2 obtidos para a imagem de 17 de março de 2006: (a) Clorofila-a (mg m^{-3}) – OC3; (b) Coeficiente de atenuação difusa da água - K488 (m^{-1}); (c) Material em suspensão total (mg l^{-1}) – Clark.

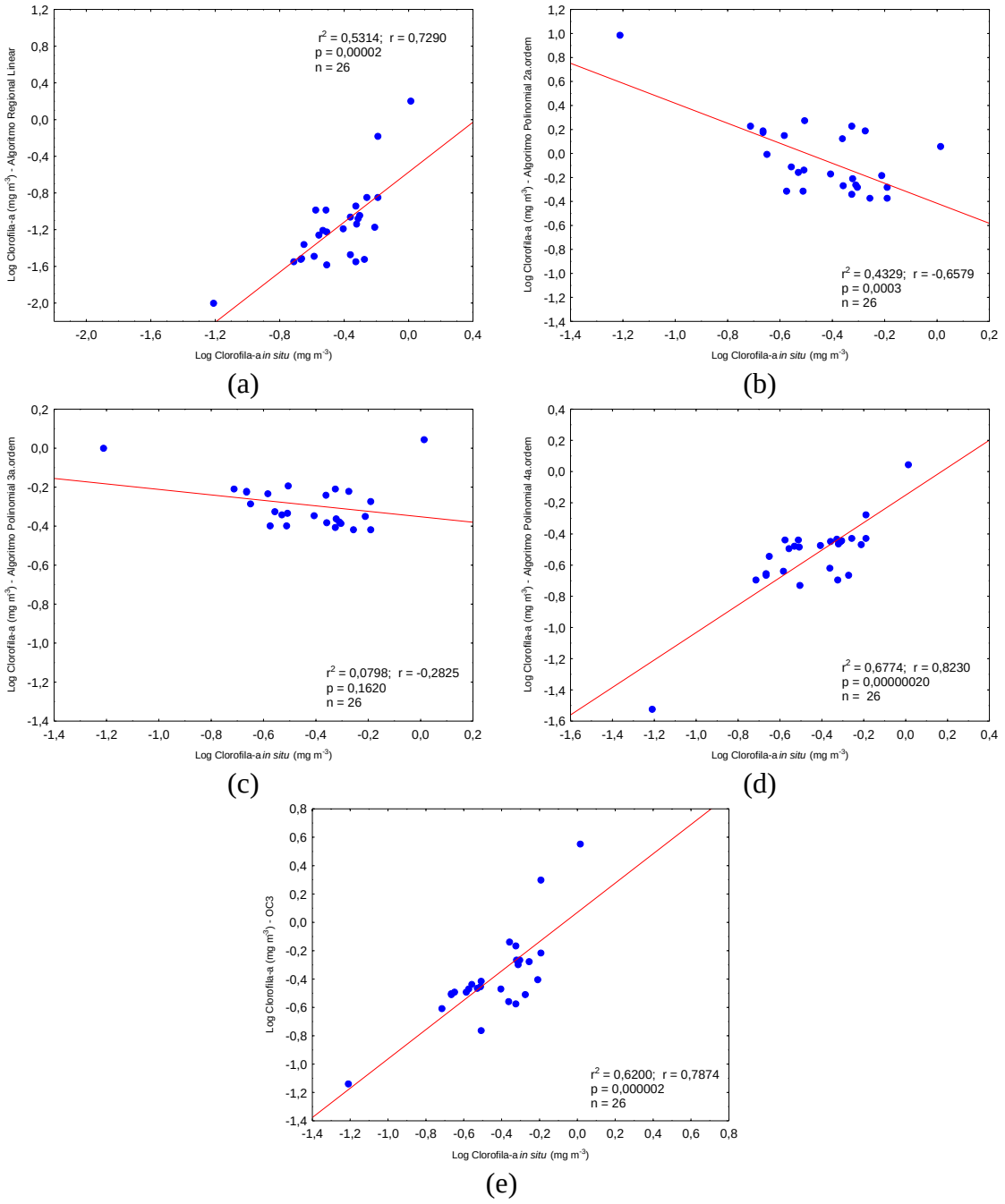


Figura 4.3.7 – Diagrama de dispersão entre a concentração de clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e a estimada pelos algoritmos regionais: linear (a), polinomial de segunda (b), terceira (c) e quarta ordem (d); e pelo algoritmo OC3 (e), a partir dos dados de refletância do sensor MODIS.

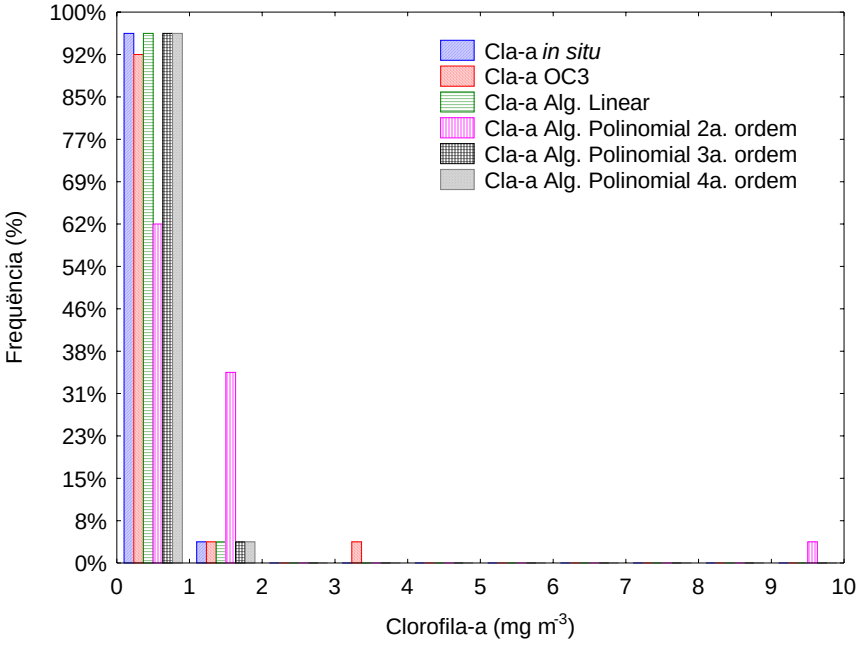
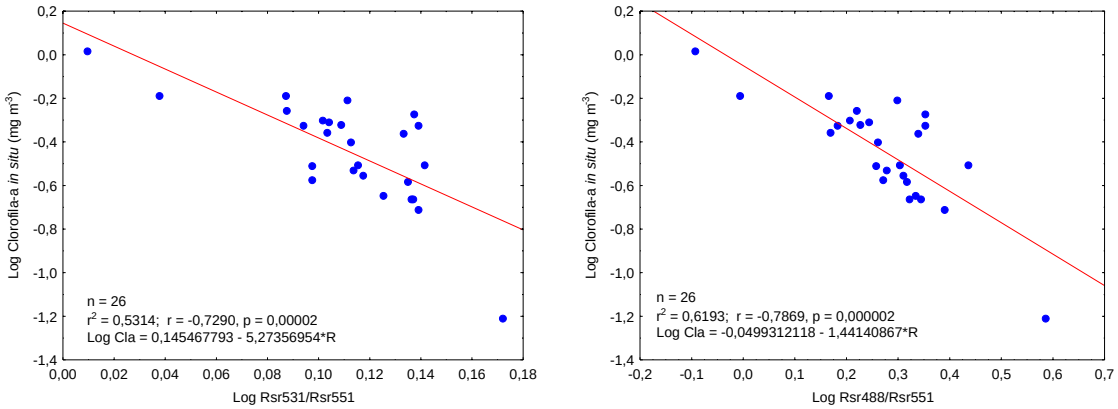
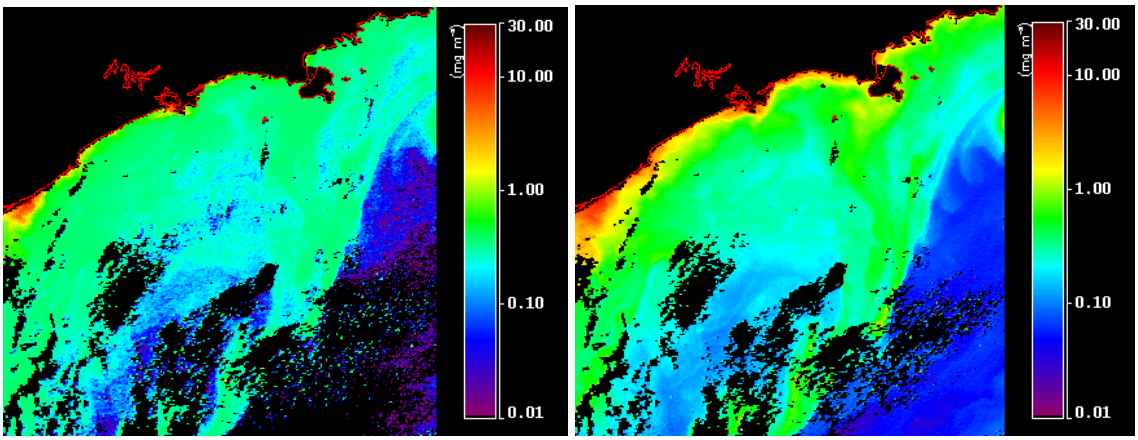


Figura 4.3.8 – Histograma de freqüência de observação (%) da concentração de clorofila-a obtida *in situ* e pelos algoritmos regionais, linear, polinomial de segunda, terceira e quarta ordem, e pelo algoritmo OC3, a partir de dados de refletância do sensor MODIS (n = 26).



(a) (b)

Figura 4.3.9 – Diagrama de dispersão entre a concentração da clorofila-a obtida *in situ* (*log*) e as razões de bandas (*log*) do sensor MODIS (n = 26), ajustadas linearmente: (a) 488/551; (b) 531/551.



(a) (b)

Figura 4.3.10 – Concentração de clorofila-a estimada pelo (a) algoritmo regional polinomial de quarta ordem e pelo (b) algoritmo global OC3, para a imagem MODIS do dia 17 de março de 2006.