



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ANÁLISE DA REFLECTÂNCIA MARINHA NA REGIÃO COSTEIRA DE UBATUBA, LITORAL NORTE DE SÃO PAULO.

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

João Felipe Cardoso dos Santos (IOUSP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: joaofelipe.ioussp@gmail.com

Dr. Milton Kampel (DSR/OBT/INPE, Orientador)
E-mail: milton@dsr.inpe.br

COLABORADORES

Dr. Salvador Airton Gaeta (LaPP/IOUSP)
Msc. Mayza Pompeu (LaPP/IOUSP)

INPE
São José dos Campos
Julho de 2012

RESUMO

Os constituintes opticamente ativos da água do mar possuem características ópticas que concedem diferentes cores ao oceano, podendo ser analisados remotamente pela reflectância marinha na faixa de luz visível dentro ou sobre a água. Nos casos de águas oceânicas abertas do Caso1 a concentração dos componentes opticamente ativos mantém-se praticamente constante ao longo do tempo, fazendo com que os sensores orbitais funcionem bem nestas condições. Onde os constituintes ópticos sofrem maiores interferências, como é o caso das regiões costeiras do Caso2 efeitos antropogênicos, aporte de matéria orgânica e inorgânica, mudanças na direção e intensidade do vento fazem necessária a aquisição de dados oceanográficos complementando as medidas radiométricas e auxiliando a análise da reflectância marinha em entender melhor os processos envolvidos na região litorânea. A aquisição destes dados fundamentais para interpretação do sensoriamento remoto das águas costeiras é realizada através da rede de observações ANTARES, relacionando a reflectância marinha, medida por meio de radiômetros, com os dados oceanográfico, e imagens de satélite. Para identificar quais fatores alteram a concentração dos constituintes da água do mar objetivou-se analisar os constituintes biópticos da água e também simular as bandas de leitura dos sensores orbitais para comparar os valores de clorofila-*a* obtidos com os algoritmos empíricos e os analisados fluorimetricamente. Cada sensor agrupou as estações de coleta de uma maneira diferente que não se correlacionam com as estações do ano, reforçando os estudos que dizem que a região é influenciada por eventos locais. Existe somente no verão e inverno uma característica mais determinante de cor do oceano. O melhor desempenho das versões OC3M, OC3E e OC3S ainda é o mesmo do relatório anterior. Neste ano analisando também os dados do sensor MODIS/Aqua este apresentou melhor desempenho que os algoritmos. Essa pesquisa deverá auxiliar o desenvolvimento e validação de algoritmos da cor do oceano para o litoral de Ubatuba.

ABSTRACT

Some water components have optical properties that give different colors to the ocean water. These optical components can be assessed through the marine reflectance in the visible wavelength under and above water. In open oceans the optical components concentration are constant during the time and the orbital sensors work better. In coast waters, interferences from the continent like anthropogenic discharges, input of organic and inorganic matter, wind direction and intensity make this region a Case 2 when the satellites have a hard time determining these concentrations and identifying the process involved in the water color. To better understand the oceanographic processes that impact on the reflectance data, as well, the Oceanography Institute of the University of São Paulo and the National Institute for Space Research have been contributing to the time series ANTARES. This research aims at analyzing data from July 2006 to July 2011, correlating marine reflectance, measured by *in situ* radiometers, and aboard satellite sensors with oceanographic data to identify factors that interfere in the ocean optics properties dynamic. Another goal was to simulate the empiric algorithms order to compare them to on site fluorimetric readings. Each sensor showed different ways to group the reflectance spectrums but all them the spectrum shape can be compare with some oceanography process. Non-seasonal ocean color patterns were observed, only a more strong same signal during the summer and winter. The algorithm who has the better correlation was OC3M and the best chlorophyll estimation was from MODIS orbital sensor. This research will contribute develop and validate more adequate ocean color algorithms for the Ubatuba coast, helping understand, at the same time, the processes at the shoreline by a synoptic remote sensing monitoring.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1:	Diagrama esquemático da inter-relação entre as propriedades ópticas aparentes e inerentes. O modelo direto é a análise intrínseca dos constituintes da água para estimar a curva óptica. Modelo inverso é o processo do espectro óptico para estimar os constituintes da água (Ilustração adaptada de IOCCG, 2000)..... 3
Figura 2:	Interação da luz solar com a atmosfera, superfície do oceano e constituintes opticamente ativos antes de ser capturada pelo sensor, que pode ser um satélite ou um radiômetro <i>in situ</i> 5
Figura 3:	Localização da estação de coleta Antares (23°36'S e 44°58'W) sobreposta à imagem de clorofila-a (sensor MODIS/Aqua dia 16/08/2009 – 16:35 GMT)..... 6
Figura 4:	Representação da circulação da Água Tropical e da Água Central do Atlântico Sul (Baseada em Stramma & England, 1999). (a) AT - 0 a 140 metros; (b) ACAS - 140 – 1060 metros..... 7
Figura 5:	Esquema utilizado para estimar a média de clorofila-a e a Rrs na estação de coleta ANTARES. A matriz da esquerda indica a dimensão de cada pixel e a área compreendida pelo bloco de dados para o sensor MODIS. A matriz da direita indica a dimensão e área compreendida pelo sensor SeaWiFS.....14
Figura 6a:	Comparação entre o inverno de 2008 (esquerda) com o verão de 2008 para 2009 (direita).17
Figura 6b:	Imagens do verão de 2009-2010 e verão de 2011-2012.....17
Figura 6c:	Imagens do verão de 2010-2011.....17
Figura 6d:	Imagens da cor da água em diferentes meses no ano de 2010 e 2011.....18
Figura 6e:	Imagens da cor do oceano para diferentes meses do ano.....18
Figura 7:	Normal climatológica entre 1961 e 1990 (linha preta com pontos amarelos). A precipitação de 2010 citada na figura foi retirada mantendo somente a normal climatológica como padrão para interpretação dos dados de pluviometria. (Fonte: INMET).19
Figura 8:	Padrão de ventos em larga escala que atingem a costa sudeste. Imagens do sensor QuickScat no dia 17/10/2007 (esquerda) e 24/01/2007 (direita).....20
Figura 9:	Perfis de temperatura (azul) e salinidade (vermelho) de 3 estações ao longo do ano onde se observa a variabilidade destes parâmetros ao longo do ano.....20
Figura 10:	Análise de agrupamento das estações de coleta de dados de acordo com a absorvância em (m-1) em 443nm. Os grupos foram divididos com base em 85% de similaridade por correlação.21
Figura 11:	Análise dos Componentes Principais das estações de coleta.22

Figura 12:	Distribuição das coletas de acordo com o constituinte principal e dados oceanográficos.	23
Figura 13:	Curvas espectrais de Rrs (sr-1) obtidas com o radiômetro FieldSpec HH. Foram retirados dados espúrios.	24
Figura 14:	Curvas espectrais de Rrs (sr-1) obtidas com o radiômetro perfilador free fall Satlantic. Foram retirados dados espúrios.	25
Figura 15:	Curvas espectrais de Rrs (sr-1) obtidas com o sensor orbital MODIS a bordo do satélite Aqua. Foram retirados dados espúrios.	25
Figura 16:	Curvas espectrais de Rrs (sr-1) obtidas com o sensor orbital SeaWiFS.	26
Figura 17:	Exemplo dos espectros de Rrs da estação UBA42 de maio de 2008 entre os radiômetros Satlantic e FieldSpec e os sensores orbitais MODIS e SeaWiFS.	26
Figura 18:	Simulação das bandas dos sensores MODIS, SeaWiFS e MERIS pelos radiômetros FieldSpec (esquerda) e Satlantic (direita).	27
Figura 19:	Cluster dos espectros de reflectância dos radiômetros FieldSpec HH (a), sensor MODIS (b), sensor SeaWiFS (c), radiômetro Satlantic primeiro metro da coluna d'água (d).	28
Figura 20:	As duas primeiras letras da legenda indicam qual o equipamento (AS: Satlantic, FS: FieldSpec, MO: MODIS, SW: SeaWiFS). O restante indica qual o principal constituinte óptico responsável pela assinatura espectral, lembrando-se dos 4 grupos vistos nas análises laboratoriais. Exemplo: SW#1+#3 significa espectro do SeaWiFS caracterizado por uma maior representatividade do grupo #1 (fitoplâncton) mais o grupo #3 (CDOM). Estas curvas são baseadas nas médias de cada grupo de cada sensor.	30
Figura 21:	Gráfico ternário indicando a porcentagem relativa de cada constituinte bióptico da água. As elipses mostram os grupos biópticos divididos pela concentração de DETRITO, FITO E CDOM. As cores das elipses identificam os grupos com a cor utilizada na Figura 3 (vermelho: #1, verde: #2, azul: #3 e amarelo: #4).	32
Figura 22:	Formato dos espectros encontrados relacionados com a porcentagem relativa de cada constituinte óptico.	33
Figura 23:	Imagem da TSM do sensor MODIS referente a estação UBA28 de janeiro de 2007 que faz parte do espectro #2. Observa-se um vento predominante de nordeste e a temperatura da superfície do mar próxima aos 25 °C.	34
Figura 24:	Gráficos dos algoritmos empíricos OC2V2, OC2V4 e OC3M na versão 4 em função da Clo-a <i>in situ</i>	36
Figura 25:	Gráficos dos algoritmos empíricos na versão 6 em relação a colorifla-a <i>in situ</i>	37
Figura 26:	Gráfico da clorofila-a calculada pelo fluorímetro do radiômetro Satlantic (a) e pelo sensor orbital MODIS (b).	38

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1: Coeficientes dos algoritmos da versão 6 dos sensores orbitais MODIS, MERIS e SeaWiFS e os comprimentos de onda no azul e no verde que devem ser usados em cada caso.....	13
Tabela 2: Coletas realizadas ao longo de 06/2006 a 06/2011 na estação fixa 23°36'S - 44°58'O.	16
Tabela 3: Correlação de Spearman entre o valor in situ e a simulação dos algoritmos empíricos, fluorímetro do radiômetro Satlantic e sensor orbital MODIS.	39
Tabela 4: Valores de rmse-L e RDP dos algoritmos empíricos simulando as bandas dos sensores MODIS, SeaWiFS e MERIS nas versões 4 e 6, fluorímetro do radiômetro Satlantic e clorofila-a calculada pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua. Estes valores foram obtidos com base nos dados mensais de 5 anos de coleta.	39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AC	Água Costeira
AOP	Propriedade Óptica Aparente
AT	Água Tropical
CB	Corrente do Brasil
CDOM	Matéria Orgânica Dissolvida Colorida (m^{-1})
Clo- <i>a</i>	Concentração de clorofila- <i>a</i> ($mg\ m^{-3}$)
COA	Componente Ópticamente Ativo
CSE	Corrente Sudeste Equatorial
CSM	Clorofila na Superfície do Mar
Ed(λ)	Irradiância espectral incidente na superfície do mar
FITO	Absorbância do Fitoplâncton (m^{-1})
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOCCG	International Ocean Colour Coordinating Group
IOP	Propriedade Óptica Inerente
IOUSP	Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
LaPP	Laboratório de Produção Primária
Lw(λ)	Radiância espectral emergente da água
MERIS	MEDium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MP	Material Particulado
OC2V	Ocean Chlorophyll 2-band
OC3M	Ocean Chlorophyll 3-bands
OC4V	Ocean Chlorophyll 4-band
PCA	Análise de Componente Principal
PCSE	Plataforma Continental Sudeste Brasileira
RDP	Percentual da diferença média relativa
rmse-L	Erro quadrático médio linearmente transformado
R _{rs} (λ)	Reflectância de Sensoriamento Remoto
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	
1.1 Prefácio	1
1.2 Cor do Oceano	2
1.3 Sensoriamento Remoto	4
1.4 Área de Estudo	5
1.5 Objetivos	7
2 MATERIAIS E MÉTODOS	
2.1 Coleta de Dados <i>in situ</i>	8
2.2 Dados Meteo-Oceanográficos	9
2.3 Análises Laboratoriais	9
2.4 Medidas Radiométricas	10
2.5 Algoritmos Empíricos	11
2.6 Imagens por Satélite - MODIS & SeaWiFS	13
2.7 Comparação Estatística	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	
3.1 Coleta de Dados <i>in situ</i>	15
3.2 Cor do Oceano	16
3.3 Dados Meteo-Oceanográficos	19
3.4 Análises Laboratoriais	21
3.5 Reflectância Marinha	24
3.6 Algoritmos Empíricos	35
3.7 Clorofila- <i>a</i> Satlantic e MODIS	37
3.8 Comparação Estatística	38
4 CONCLUSÕES	40
5 AGRADECIMENTOS	42
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Prefácio

As regiões costeiras representam áreas de grande importância ecológica, mas são alvo de pressão antrópica constante. Além disso, as massas de água costeira sofrem mudanças em curtos períodos, o que dificulta a definição de um padrão temporal e suas propriedades biogeoquímicas. Séries temporais de observações ambientais representam um significativo esforço de monitoramento para o acompanhamento de mudanças de estado e avaliação de impactos naturais ou antropogênicos.

ANTARES é uma rede de observações latino-americana criada em 2003 com apoio internacional cujo objetivo é o estudo de mudanças de longo período nos ecossistemas costeiros em torno da América Latina. Para alcançar este objetivo, propõe-se padronizar e aperfeiçoar uma série de medidas realizadas em estações de séries temporais existentes, permitindo a criação de uma base de dados consistente em escala continental, que servirá para o desenvolvimento e validação de algoritmos usados na obtenção de informações oceanográficas por satélites, tais como a temperatura da superfície do mar e a concentração de clorofila-*a*. (Informações distribuídas pela Rede ANTARES: <http://www.dsr.inpe.br/antares>).

No Brasil, os dados da rede ANTARES tiveram início em março de 2005 e são divididos em duas regiões:

- a) Brasil Sul: 26°S a 38°S e 59°W a 45°W
- b) Brasil Sudeste: 20°S a 30°S e 49°W a 39°W

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) juntamente com o Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) contribuem com a série temporal coletando mensalmente dados *in situ* na região sudeste. A partir de julho de 2006 até o presente, a estação sudeste está localizada no ponto fixo 23,6°S e 44,9°W. Nessa pesquisa trabalhou-se com os dados de julho de 2006 até julho de 2011.

1.2 Cor do Oceano

Enquanto a região oceânica é conhecida como águas de Caso 1, a região costeira é conhecida como águas de Caso 2. Essa classificação se baseia na contribuição dos constituintes da água (fitoplâncton, detrito e matéria orgânica). No Caso 1, a principal contribuição da cor do oceano está relacionada à concentração de fitoplâncton. Isso não impede a possibilidade de outras substâncias estarem presentes em águas do Caso 1, como flagelados, bactérias heterotróficas e vírus; porém a contribuição destes na cor do oceano é relativamente pequena. Por outro lado, no Caso 2, outros componentes como material particulado e matéria orgânica dissolvida têm significativa relevância nas propriedades ópticas da região costeira.

Portanto, a cor do oceano dependerá dos constituintes opticamente ativos da água e suas propriedades distintas. Estas propriedades são divididas em Propriedade Óptica Aparente (AOP) e Propriedade Óptica Inerente (IOP). As IOPs independem da intensidade e do ângulo de distribuição da luz. Estas determinam a cor do oceano essencialmente pelo tipo e concentração da substância presente no meio (IOCCG, 2000). As propriedades ópticas inerentes medem o comportamento da luz (coeficientes ópticos) nas frações particulada e/ou dissolvida de amostras de água natural em condição padronizada, isolada ou protegida da radiação solar. Normalmente, tais medidas são feitas em laboratório, com instrumentos específicos (espectrofotômetros, espectrofluorímetros, entre outros) equipados com lâmpadas que atuam como uma fonte controlada de luz. Nas águas naturais, os principais componentes do meio hídrico que influenciam o comportamento da luz são a água propriamente dita, os detritos (turbidez), o fitoplâncton (clorofila) e a matéria orgânica dissolvida cromófora (capaz de absorver luz), também chamada de matéria orgânica dissolvida colorida, *gilvin*, *gelbstoff* ou, simplesmente, CDOM (do inglês *chromophoric dissolved organic matter*). As AOPs são as propriedades ópticas influenciadas pela distribuição angular da luz e pela condição da superfície de espelhamento e absorção. As propriedades ópticas aparentes incluem as influências da interação entre a luz solar, atmosfera e as águas (e dos sedimentos de fundo). São influências sensíveis às condições ambientais no momento e no local da avaliação. Por meio de medidas de óptica aparente, é possível

determinar a intensidade da radiação solar e sua composição espectral, ou a característica do ambiente de luz subaquático, ao longo da coluna d'água (Pedrosa, 2008). Ainda em relação à óptica aparente, tem sido possível realizar estimativas locais e globais de biomassa fitoplanctônica (algas microscópicas) em águas marinhas superficiais, por meio de sensoriamento remoto, a partir da análise das ondas de luz que sofrem reflexão nesses ambientes.

A reflectância é uma das propriedades ópticas aparentes que auxilia em outras medidas radiométricas como absorvância, espalhamento, concentração de clorofila-*a*, que vão depender das características físicas, químicas e biológicas do corpo d'água. Cada caso de água oceânica (Casos 1 e 2) pode ser caracterizado pela sua assinatura espectral de reflectância. Quando partimos da reflectância para determinar qual o principal constituinte que define a massa d'água naquele instante damos o nome de modelo inverso. Quando partimos das IOPs para definir a reflectância estamos analisando o chamado modelo direto (Figura 1). Normalmente este é utilizado em laboratório com concentrações conhecidas de cada componente principal.

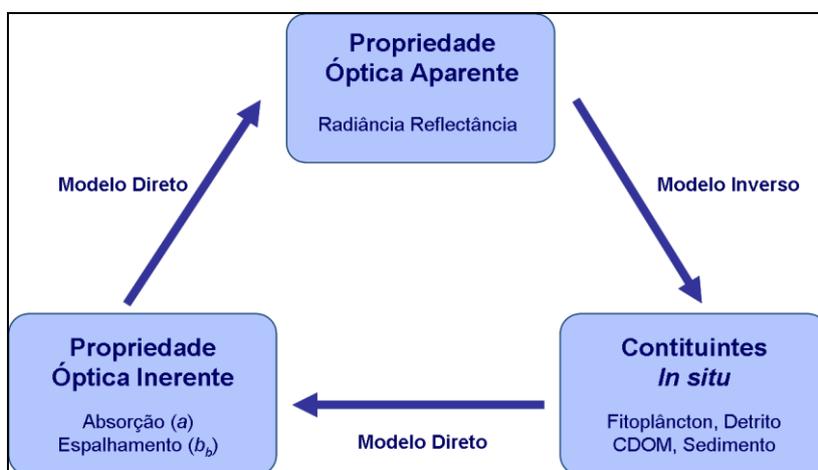


Figura 1: Diagrama esquemático da inter-relação entre as propriedades ópticas aparentes e inerentes. O modelo direto é a análise intrínseca dos constituintes da água para estimar a curva óptica. Modelo inverso é o processo do espectro óptico para estimar os constituintes da água (Ilustração adaptada de IOCCG, 2000).

As interações entre a luz e as águas têm sido avaliadas historicamente por meio do uso de instrumentos relativamente simples como o disco de Secchi, - criado em 1865 e ainda empregado para medir a transparência dos corpos d'água - turbidímetros para medidas de turbidez e métodos comparativos como a escala de cor de águas criada pelo

químico norte-americano Allen Hazen (Hazen, 1896). Desde o pioneirismo desses métodos até os dias atuais, o interesse está em identificar os corpos de água. Esses corpos de água são formados por combinações distintas de materiais particulados e dissolvidos, orgânicos e inorgânicos (IOCCG, 2000) que, juntamente com a reflexão e o espalhamento da luz sobre a superfície marinha, contribuem nas interações entre luz e água na chamada óptica hidrológica, gerando características hidrofísicas que podem ser relacionadas à cor das águas (Pedrosa, 2008). Essa coloração, em geral associada a um valor estético, apoia o desenvolvimento de estudos científicos certamente úteis à caracterização, ao mapeamento, à gestão e ao monitoramento de recursos hídricos e ecossistemas aquáticos.

1.3 Sensoriamento Remoto

A reflectância de sensoriamento remoto da superfície da água é realizada com o uso de sensores passivos capazes de monitorar o fluxo radiométrico que chega aos seus detectores em diferentes comprimentos de onda, nas faixas do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Os sensores passivos operam durante o dia, e sua fonte de energia é o próprio Sol, cujos fótons podem seguir caminhos diferentes antes de alcançarem o detector remoto (Kampel & Novo, 2005). O sinal detectado remotamente é formado pelas seguintes contribuições: luz espalhada pela atmosfera, luz refletida specularmente pela superfície do corpo de água e luz emergente da superfície da água após ter sido retro espalhada no interior do corpo de água (Figura 2).

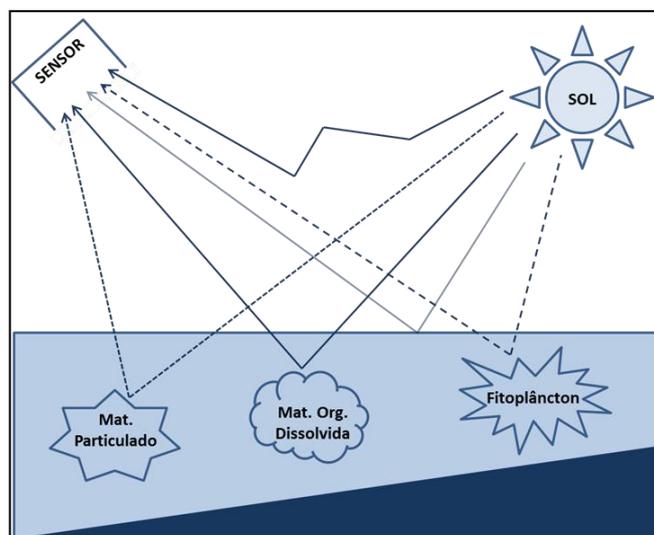


Figura 2: Interação da luz solar com a atmosfera, superfície do oceano e constituintes opticamente ativos antes de ser capturada pelo sensor, que pode ser um satélite ou um radiômetro *in situ*.

Embora haja uma maior facilidade de se obter esses dados radiométricos, a técnica de sensoriamento remoto aplicada à oceanografia não dispensa a necessidade de coleta de dados através dos meios convencionais. Entretanto, é hoje consenso internacional entre os cientistas, engenheiros e técnicos que trabalham na área, que esta técnica é fundamental para a obtenção de dados com características sinópticas, abrangendo grandes regiões oceânicas e com grande repetitividade temporal. Um sistema para o monitoramento e estudo das condições oceânicas deve contar, sem dúvida, com dados de sensoriamento remoto complementados por sistemas continuados de coleta.

1.4 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) há aproximadamente 20 milhas náuticas da cidade de Ubatuba, no litoral norte do estado de São Paulo (Figura 3). De acordo com Castro *et al.* (1987), a parte sul-sudeste da costa brasileira localiza-se entre as latitudes de 19°S e 34°S, possui uma profundidade média de 70 metros e um regime oceanográfico de transição entre águas costeiras e de plataforma continental. A estação fixa de coleta deste projeto está localizada na isóbata média de 40 metros (23°36'S e 44°58'W). Castro *et al.* (1987) afirma que ao largo dessa

faixa observa-se a presença de águas com influência da Água Tropical (AT) e da Água Central do Atlântico Sul (ACAS).

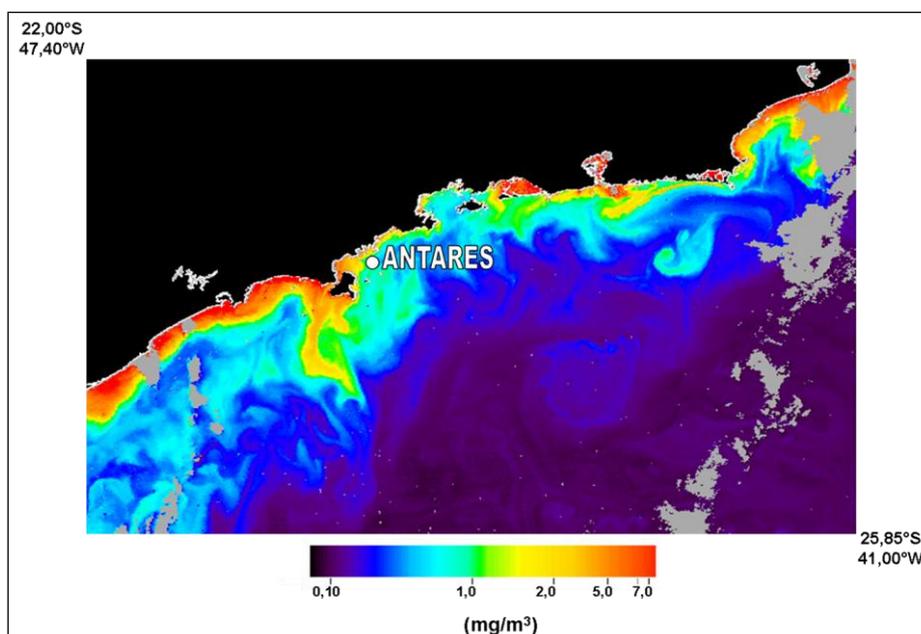


Figura 3: Localização da estação de coleta Antares (23°36'S e 44°58'W) sobreposta à imagem de clorofila-a (sensor MODIS/Aqua dia 16/08/2009 – 16:35 GMT).

A AT foi descrita por Emilson (1961) como parte da massa de água quente e salina que ocupa a superfície do Atlântico Sul Tropical, a qual é transportada para o sul pela Corrente do Brasil (CB). Essa água de superfície é formada como consequência da intensa radiação e excesso de evaporação em relação à precipitação, características do Atlântico Tropical. O resultado é que a AT é caracterizada por temperaturas maiores que 20°C e salinidades acima de 36,2 ao largo do sudeste brasileiro. Stramma & England (1999) compilaram informações que indicam que esta massa de água flui para o sul a partir de 15°S e que, então, circule anti-ciclonicamente conforme ilustrado na Figura 4a. A ACAS apresenta temperaturas maiores que 8,7°C e menores que 20°C, e salinidades entre 34,66 e 36,20. Trabalhos clássicos como Sverdrup *et al.* (1942) mencionam que a ACAS é formada por afundamento das águas na região da convergência sub-tropical, e subsequente espalhamento ao longo da superfície de densidade adequada a seu ajustamento hidrostático. A ACAS entra como parte do Giro Subtropical, circula com as Correntes do Atlântico Sul e Benguela, e atinge a costa da América do Sul, ao largo do sudeste brasileiro, transportada pela Corrente Sul

Equatorial (CSE). Ao se aproximar da costa africana, recebe contribuição da Água Central do Índico devido às intrusões de vórtices da Corrente das Agulhas (Tomczak & Godfrey, 1994), como ilustrado na Figura 4b.

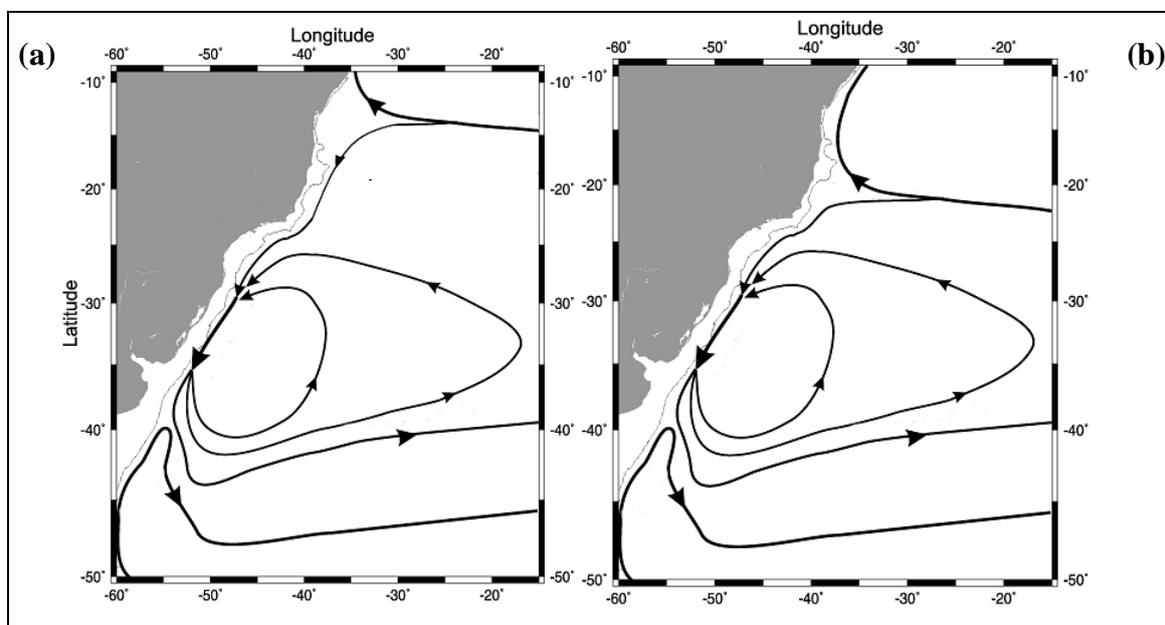


Figura 4 (a,b): Representação da circulação da Água Tropical e da Água Central do Atlântico Sul (Baseada em Stramma & England, 1999). (a) AT - 0 a 140 metros; (b) ACAS - 140 – 1060 metros.

Durante o verão, a intrusão de ventos do primeiro quadrante faz com que a água superficial seja levada para regiões mais externas da plataforma possibilitando que a ACAS penetre na camada profunda em direção à costa, atingindo muitas vezes a parte mais interna da plataforma continental. Durante o inverno, por outro lado, essa massa de água afasta-se em direção à quebra da plataforma continental, aumentando a largura da faixa costeira onde a Água Costeira (AC) é predominante. As massas de água presentes na região apresentam uma dinâmica dependente principalmente do vento (direção, intensidade e tempo de atuação sobre a superfície do oceano), das correntes e do relevo submarino.

1.5 Objetivos

Este trabalho teve como objetivos principais:

- Estimar a reflectância marinha de sensoriamento remoto na estação fixa Antares-Ubatuba.

- Analisar os constituintes opticamente ativos da água.
- Interpretar a variabilidade temporal da reflectância marinha na área de estudo de forma integrada com outros parâmetros meteo-oceanográficos e biópticos.
- Estimar a concentração de clorofila-*a* pela aplicação de algoritmos empíricos da cor do oceano e compará-los às estimativas de clorofila-*a* de medidas fluorimétricas *in situ*.
- Fazer a comparação desse conjunto de dados com o uso de métodos estatísticos para estimar o desempenho dos diferentes sensores orbitais SeaWiFS, MODIS e MERIS.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta de Dados *in situ*

As coletas *in situ* foram realizadas mensalmente a bordo do B/O Veliger II do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo na estação fixa situada em 23°36'S – 44°58'O. Os dados biofísicos e radiométricos utilizados neste trabalho foram: medidas radiométricas sobre a superfície da água (0^+), medidas radiométricas da coluna d'água (0 – 38 metros) interpoladas a cada metro de profundidade, coleta de água e medidas oceanográficas (condutividade, temperatura e densidade).

As medidas radiométricas sobre a superfície do mar foram realizadas com o radiômetro hiperspectral Field Spec HandHeld® e as medidas radiométricas da coluna d'água com o radiômetro perfilador *free fall* Satlantic. Com os equipamentos foram feitas medidas de radiância convertidas para reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}).

As coletas de água foram feitas utilizando garrafas de Niskin e Go-Flow nas profundidades de 0, 5, 10, 25 e 38 metros obtidas simultaneamente para todas as profundidades. A água coletada foi armazenada em galões térmicos opacos, como tentativa de manter a temperatura das amostras similar aos valores *in loco* e protegidas de fotodegradação. Após a coleta o material foi filtrado e analisado no Laboratório de Produção Primária do IOUSP (LaPP/IOUSP) seguindo a metodologia descrita na seção

3 deste capítulo. Os resultados das coletas mensais estão descritos na Tabela 2 do capítulo 3.

Medidas de temperatura, salinidade e densidade em cada metro da coluna d'água foram obtidas com os equipamentos *Conductivity, Temperature, and Depth* CTD Seabird® e perfilador *free fall* Satlantic. Os dados do CTD foram utilizados nos meses em que o Satlantic não estava disponível para o projeto.

2.2 Dados Meteo-Oceanográficos

Os dados meteo-oceanográficos foram obtidos a bordo com o uso de anemômetro, GPS, fotos das condições climáticas, disco de Secchi e a observação visual dos fenômenos locais ao longo da coleta de acordo com protocolo sugerido por Muller (2003).

Para os campos de vento foram utilizados os dados obtidos pelo satélite QuickScat de julho de 2006 até novembro de 2009, data em que este encerrou sua missão. Os índices pluviométricos foram obtidos no site do Instituto de Meteorologia (INMET) até fevereiro de 2009, data em que os dados foram atualizados. Para os anos que não há valores, foi utilizada a normal climatológica de chuva compreendida entre 1961 e 1990. Estes dados foram utilizados para o melhor entendimento dos processos meteo-oceanográficos que ocorreram durante as coletas.

2.3 Análises Laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas com o objetivo de obter o coeficiente de absorção da Matéria Orgânica Dissolvida Colorida (CDOM), Material Particulado (MP) e Clorofila-*a* (Clo-*a*).

Amostras de água para determinação das propriedades de absorção do CDOM foram filtradas em filtros de porosidade 0,2µm. O volume filtrado foi analisado no espectrofotômetro HITACHI® U-3010 com cubeta de quartzo de comprimento de 10 centímetros. As amostras de absorção de MP foram obtidas pelo material retido no filtro GF/F de porosidade 0,47µm, analisadas no espectrofotômetro Shimadzu® UV-2450 com esfera integradora. A metodologia do CDOM e MP utilizada é a sugerida por

Mitchell *et al.* (2000) e Mueller *et al.* (2003). O material particulado foi separado em detrito e fitoplâncton. Para realizar a separação destes materiais foi utilizado hipoclorito de sódio sugerido em Mitchell *et al.* 2000. A concentração de clorofila-*a in situ* foi analisada utilizando o fluorímetro da Turner Designs modelo 10-AU pelo método fluorimétrico descrito por Welshmeyer (1994).

2.4 Medidas Radiométricas

2.4.1 FieldSpec HandHeld®

Medidas radiométricas sobre a água foram obtidas com o radiômetro hiperespectral FieldSpec HandHeld® fabricado pela ASD Inc. seguindo a metodologia descrita por Kampel (2009), adaptada de Mobley (1999) e Fougnie *et al.*, (1999). Dados auxiliares para aquisição de medidas radiométricas sobre a superfície da água também são anotados.

O radiômetro FieldSpec HH informa a irradiância incidente na água e a radiância emergente da água e por uma placa padrão de campo. Para obter a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) utiliza-se a seguinte equação:

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

Onde:

- $L_w(\lambda)$ é a radiância espectral emergente da água.
- $E_d(\lambda)$ é a irradiância espectral incidente na superfície do mar.

$E_d(\lambda)$ foi estimada através da medida de radiância refletida por uma placa padrão feita de Spectralon (Mobley, 1999). Assim, $E_d(\lambda)$ é dada por:

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

Onde fc é um fator de correção determinado em laboratório através da razão entre $L(\lambda)$ de uma placa padrão e a utilizada em campo.

Mueller *et al.* (2003) diz que se assumirmos o oceano como um meio que absorve totalmente a reflectância em 750nm devemos aplicar ao cálculo da reflectância de sensoriamento remoto uma compensação ficando assim com a seguinte equação adaptada:

$$R_{rs} \text{ corrigido} = R_{rs} \text{ calculado} - R_{rs} (750\text{nm}) \quad (\text{Eq. 3})$$

2.4.2 *Free fall Satlantic*

A R_{rs} do radiômetro perfilador *free fall* Satlantic foi calculada automaticamente através do software ProSoft 7.7.13 para cada metro da coluna d'água entre 0 e 38 metros de profundidade. As outras variáveis medidas pelo equipamento como condutividade, temperatura, densidade e fluorescência também foram processadas automaticamente, interpoladas a cada metro da coluna d'água e geradas outras informações como clorofila-*a* e salinidade através das variáveis anteriores.

2.5 Algoritmos Empíricos

Os dados de R_{rs} do Field Spec HH e Satlantic (somente o primeiro metro de profundidade) foram integrados de modo a simularem as bandas espectrais dos sensores orbitais da cor do oceano *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) e *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS).

Neste caso de simulação de bandas foram utilizados os algoritmos empíricos de cor do oceano em duas versões:

- Versão 4:
 - *Ocean Chlorophyll 4-band* - OC4v4 e *Ocean Chlorophyll 2-band* - OC2v4, referentes ao sensor SeaWiFS.
 - *Ocean Chlorophyll 3-bands* - OC3M, referente ao sensor MODIS.
- Versão 6:
 - OC2S, OC3S e OC4S, referentes ao sensor SeaWiFS.
 - OC2E, OC3E e OC4E, referentes ao sensor MERIS.

- OC2M-551 e OC3M-551, referentes ao sensor MODIS.

2.5.1 Versão 4

Na versão 4 o algoritmo OC2v4 estima a clorofila na superfície do mar (CSM) a partir da razão de bandas $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ utilizando a função polinomial cúbica modificada:

$$C_a = 10,0^{(0,319-2,336R_{2S}+0,879R_{2S}^2-0,135R_{2S}^3)-0,071} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde $R_{2S} = \log_{10}(R^{490/555})$.

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

$$C_a = 10,0^{(0,366-3,067R_{4S}+1,930R_{4S}^2-0,649R_{4S}^3-1,532R_{4S}^4)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde $R_{2S} = \log_{10}(R_{\max})$

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

$$C_a = 10,0^{(0,283-2,753R_{3M}+1,457R_{3M}^2-0,659R_{3M}^3-1,403R_{3M}^4)} \quad (\text{Eq. 6})$$

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

2.5.2 Versão 6

A versão 6 diz que todos os algoritmos empíricos são iguais, ou seja:

OC4 = OC3 = OC2

Sendo:

$R_{rs1} = R_{rs}$ banda do azul (e.g., 443, 490, or 510nm).

$R_{rs2} = R_{rs}$ banda do verde (e.g., 547, 555, or 565nm).

$X = \log_{10}(R_{rs1} / R_{rs2})$

Os algoritmos da versão 6 são definidos pela seguinte equação:

$$C_a = 10^{(a_0 + a_1 * X + a_2 * X^2 + a_3 * X^3 + a_4 * X^4)} \quad (\text{Eq. 7})$$

A Tabela 1 indica os coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , a_3 e a_4 citados na equação 6:

Tabela 1: Coeficientes dos algoritmos da versão 6 dos sensores orbitais MODIS, MERIS e SeaWiFS e os comprimentos de onda no azul e no verde que devem ser usados em cada caso.

	Sensor	Azul	Verde	a0	a1	a2	a3	a4
OC4	SeaWiFS	443>489>510	555	0.3272	-2.9940	2.7218	-1.2259	-0.5683
OC4E	MERIS	443>489>510	560	0.3255	-2.7677	2.4409	-1.1288	-0.4990
OC3S	SeaWiFS	443>489	555	0.2515	-2.3798	1.5823	-0.6372	-0.5692
OC3M-551	MODIS	443>489	550	0.2424	-2.5828	1.7057	-0.3415	-0.8818
OC3E	MERIS	443>489	560	0.2521	-2.2146	1.5193	-0.7702	-0.4291
OC2S	SeaWiFS	489	555	0.2511	-2.0853	1.5035	-3.1747	0.3383
OC2E	MERIS	489	560	0.2389	-1.9369	1.7627	-3.0777	-0.1054
OC2M-551	MODIS	489	550	0.2481	-2.2958	1.4053	-3.1299	0.6478

2.6 Imagens por Satélite – MODIS & SeaWiFS

Foram analisadas as médias de um bloco de imagens formando uma matriz 3x3 pixel onde a estação ANTARES está localizada no centro deste bloco (Figura 5).

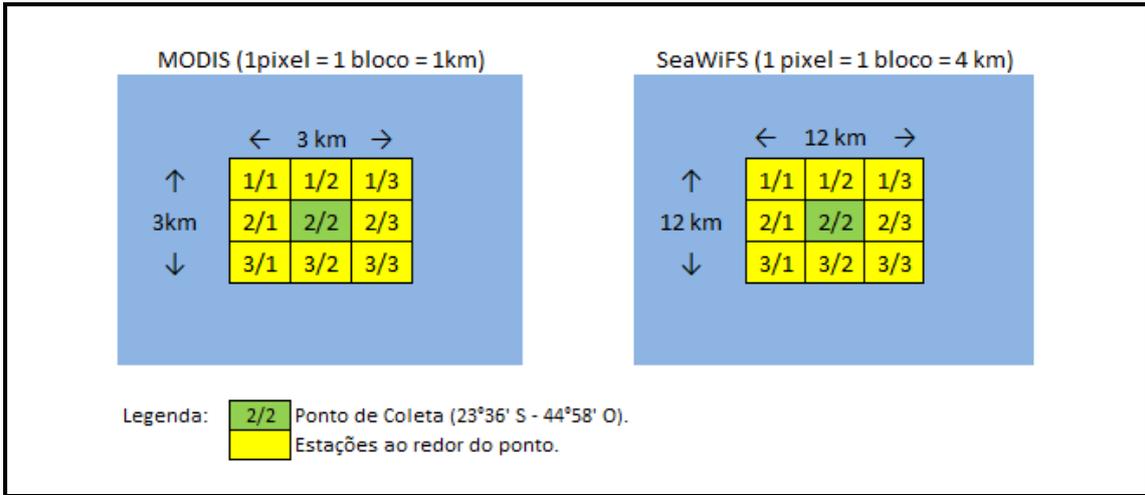


Figura 5: Esquema utilizado para estimar a média de clorofila-*a* e a R_{rs} na estação de coleta ANTARES. A matriz da esquerda indica a dimensão de cada pixel e a área compreendida pelo bloco de dados para o sensor MODIS. A matriz da direita indica a dimensão e área compreendida pelo sensor SeaWiFS.

Quando as imagens referentes ao dia da coleta *in situ* não estavam disponíveis foi utilizada a imagem do dia anterior ou a imagem do dia posterior à coleta. Utilizou-se para isso uma correlação entre a reflectância obtida pelo radiômetro FieldSpec e a reflectância obtida nas bandas MODIS e SeaWiFS (dia anterior e posterior). Foi utilizada a data que apresentou melhor correlação com a R_{rs} *in situ*.

Nos casos em que não foi possível obter imagens do bloco de 3x3 pixel no dia da coleta, nem no dia anterior e no dia posterior, os valores orbitais desta coleta não foram utilizados.

2.7 Comparação Estatística

As concentrações *in situ* de Clo-*a* (mg m^{-3}) foram comparadas estatisticamente com as estimativas obtidas pelos algoritmos empíricos através de análises de correlação de Spearman, erro quadrático médio linearmente transformado ou rmse-L (Carder *et al.*, 2004) e o percentual da diferença média relativa (RDP) listados abaixo.

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\log_{10} \left(\frac{Chla_{alg}}{Chla_{insitu}} \right)^2 \right]} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$rmse - L = 0,5[(10^{+rmse} - 1) + (1 - 10^{-rmse})] \quad (\text{Eq. 10})$$

$$RDP = \sum_{n=1}^N \left(\frac{Chla_{alg} - Chla_{in\,situ}}{Chla_{in\,situ}} \right) \frac{1}{N} \times 100\% \quad (\text{Eq. 11})$$

As análises de agrupamento (cluster) seguiram o padrão não paramétrico, de comparação simples por correlação. As análises estatísticas adicionais seguiram o protocolo recomendado por Botter (1996). Foram utilizados os softwares Statistica 8.0, PAST version 2.01 e Grapher 8.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Coleta de Dados *in situ*

A Tabela 2 apresenta a frequência dos dados coletados na estação ANTARES entre julho de 2006 a julho de 2011.

Tabela 2: Coletas realizadas ao longo de 06/2006 a 06/2011 na estação fixa 23°36'S - 44°58'O.

NOME	DATA	F	S	CL	MP	CD	NOME	DATA	F	S	CL	MP	CD	NOME	DATA	F	S	CL	MP	CD
2006						2007						2008								
UBA20	17/07/2006	X	X	-	-	X	UBA26	24/01/2007	X	-	X	X	X	UBA38	24/01/2008	X	-	X	X	X
UBA21	30/08/2006	X	X	X	-	X	UBA27	13/02/2007	X	-	X	X	X	UBA39	26/02/2008	X	-	X	X	X
UBA22	28/09/2006	X	X	X	X	X	UBA28	13/03/2007	X	X	X	X	X	UBA40	19/03/2008	X	-	X	-	X
UBA23	31/10/2006	X	-	X	X	X	UBA29	16/04/2007	X	-	X	X	X	UBA41	23/04/2008	X	X	X	X	X
UBA24	22/11/2006	X	-	X	X	X	UBA30	04/06/2007	X	-	X	X	X	UBA42	06/05/2008	X	X	X	X	X
UBA25	12/12/2006	X	-	X	X	X	UBA31	28/06/2007	-	X	X	X	X	UBA43	18/06/2008	X	X	X	X	X
							UBA32	21/07/2007	X	X	X	X	X	UBA44	17/07/2008	X	-	X	X	X
							UBA33	30/08/2007	-	X	X	X	X	UBA45	14/08/2008	X	X	X	X	X
							UBA34	20/09/2007	X	X	X	X	X	UBA46	02/09/2008	X	X	X	X	X
							UBA35	17/10/2007	X	X	X	X	X	UBA47	14/10/2008	-	X	X	X	X
							UBA36	08/11/2007	X	X	X	X	X	UBA48	11/11/2008	X	X	X	X	X
							UBA37	18/12/2007	X	X	X	X	X	UBA49	12/12/2008	-	X	X	X	X
2009						2010						2011								
UBA50	30/01/2009	X	X	X	X	X	UBA61	28/01/2010	X	X	X	X	X	UBA71	27/01/2011	X	X	X	X	X
UBA51	19/02/2009	X	X	X	X	X	-----	-----	-	-	-	-	-	UBA72	22/02/2011	X	-	X	-	X
UBA52	12/03/2009	X	X	X	X	X	UBA62	30/03/2010	X	X	X	X	X	UBA73	29/03/2011	X	X	X	X	X
UBA53	07/04/2009	-	X	X	X	X	UBA63	13/04/2010	X	X	X	X	X	UBA74	19/04/2011	X	X	X	X	X
UBA54	21/05/2009	X	X	X	X	X	-----	-----	-	-	-	-	-	UBA75	17/05/2011	-	X	X	-	X
UBA55	18/06/2009	-	X	X	X	X	UBA64	23/06/2010	-	-	X	X	X	UBA76	07/06/2011	X	X	X	X	X
UBA56	29/07/2009	X	X	-	X	X	UBA65	06/07/2010	-	-	X	X	X	UBA77	14/07/2011	-	X	X	X	X
UBA57	27/08/2009	X	X	X	X	X	UBA66	10/08/2010	X	-	X	X	X							
-----	-----	-	-	-	-	-	UBA67	07/10/2010	X	X	X	X	X							
UBA58	20/10/2009	X	X	X	X	X	UBA68	26/10/2010	X	X	X	X	X							
UBA59	24/11/2009	X	X	X	X	X	UBA69	09/11/2010	X	X	X	X	X							
UBA60	10/12/2009	X	X	X	X	-	UBA70	09/12/2010	X	X	X	X	X							

Legenda: F: FieldSpec HH CL: Clorofila-*a* (método fluorimétrico)
S: Satlantic MP: Material Particulado
CD: CDOM (Mat. Orgâ. Diss. Colorida)

A tabela acima mostra que ao longo dos cinco anos de coletas mensais tivemos um $N_{amostral}$ igual a 58 meses. Em alguns meses, indicados na tabela com linha pontilhada, o mal tempo impossibilitou o trabalho. Compreendidas neste período, tivemos 48 medidas radiométricas feitas com o Field Spec HH, 43 medidas radiométricas feitas com o Satlantic, 56 análises de Clo-*a in situ* por fluorimetria, 53 análises de MP e 57 análises de CDOM.

3.2 Cor do Oceano

Através das fotos tiradas a bordo foi observada a cor do oceano ao longo dos anos como mostram as Figuras 6 (a, b, c, d, e).



Figura 6a: Comparação entre o inverno de 2008 (esquerda) com o verão de 2008 para 2009 (direita).

No inverno foi observado águas mais turbulentas e escuras. No verão águas mais claras e esverdeadas.



Figura 6b: Imagens do verão de 2009-2010 e verão de 2011-2012.

No verão de 2008 para 2009 e 2011 para 2012 as coletas foram realizadas em condições de mar agitado. Mesmo assim observa-se a cor esverdeada da água.



Figura 6c: Imagens do verão de 2010-2011.

O verão de 2010-2011 não apresentou o padrão observado nos verões de 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 e 2011-2012. Caracterizou-se por águas claras transparentes mesmo com o mar um pouco agitado. A causa para a cor da água no verão de 2010 para 2011 não manter o tom esverdeado pode estar relacionado ao atraso no período de chuvas no verão de 2010-2011.

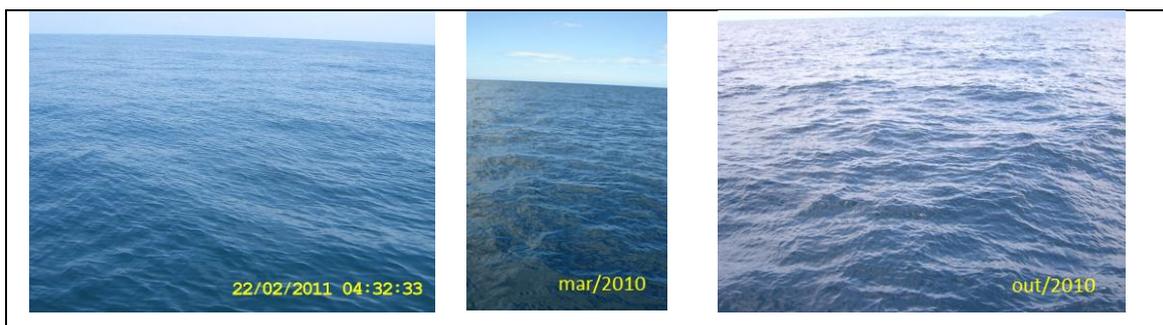


Figura 6d: Imagens da cor da água em diferentes meses no ano de 2010 e 2011.

Nas estações de primavera e outono observamos águas mais escuras com mar agitado, formando ondas capilares.



Figura 6e: Imagens da cor do oceano para diferentes meses do ano.

Outras cores de oceano foram observadas e interações com gelatinosos (salpas) e bloom de cianobactérias apareceram em alguns meses do ano.

As figuras ilustram alguns padrões de cor do oceano que foram observadas nos 5 anos de coletas. Existe uma tendência no verão, mas para o restante do ano as cores da água podem variar e dependem dos acontecimentos locais.

Estes tipos de água foram classificados de acordo com as propriedades ópticas inerentes (MP e CDOM) na seção 3 deste capítulo.

3.3 Dados Meteo-oceanográficos

Os índices pluviométricos têm valores altos no verão e caem no inverno. De acordo com Kampel *et al*, (2007) a pluviosidade é importante para determinar o aporte de água doce para a região e, devido a proximidade com a Serra do Mar, pode influenciar o *input* de matéria orgânica (folhas) e sedimento (terra) para a estação de coleta (Figura 7).

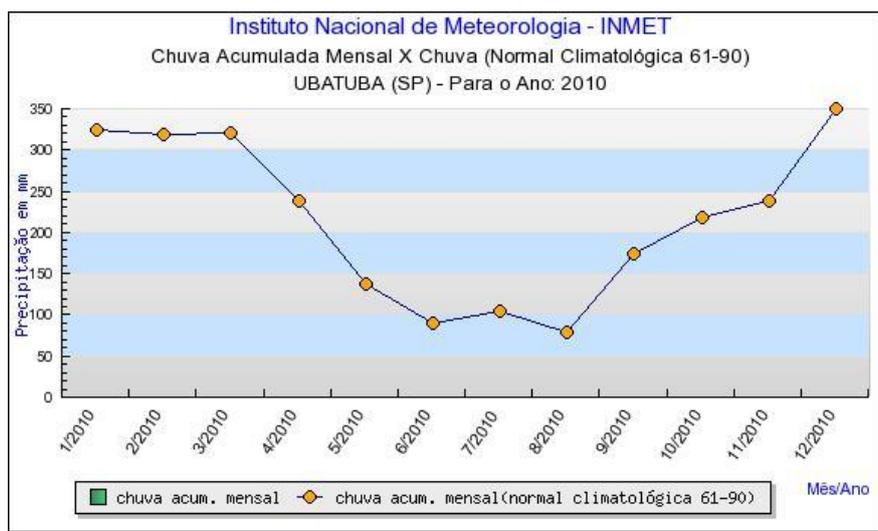


Figura 7: Normal climatológica entre 1961 e 1990 (linha preta com pontos amarelos). A precipitação de 2010 citada na figura foi retirada mantendo somente a normal climatológica como padrão para interpretação dos dados de pluviometria. (Fonte: INMET)

A Figura 8 (a, b) indica os principais padrões de vento da região litorânea sudeste. O primeiro com giros horários vindos do primeiro quadrante. Estes trazem a ACAS e intensificam os meandros e vórtices da CB ao longo do talude o que também facilita o fenômeno de ressurgência. O segundo são giros anti-horários que vêm de sul, as chamadas frentes frias.

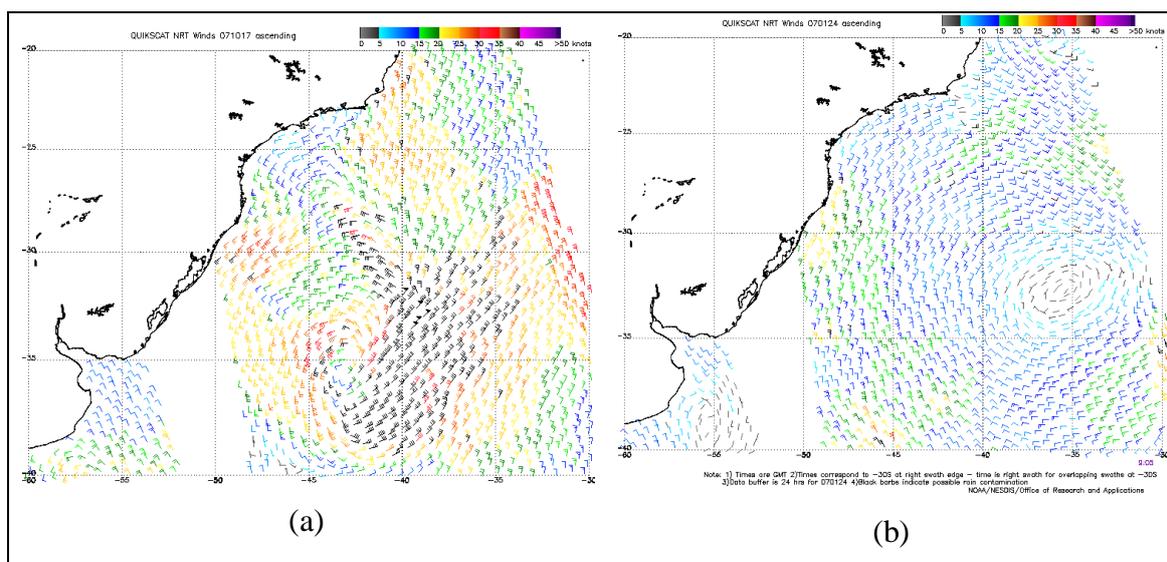


Figura 8 (a, b): Padrão de ventos em larga escala que atingem a costa sudeste. Imagens do sensor QuickScat no dia 17/10/2007 (esquerda) e 24/01/2007 (direita).

Devido a estes fenômenos climáticos podemos observar na região do projeto ANTARES, desde coluna de água homogênea clara, homogênea escura, estratificada clara, estratificada escura, termoclinas bem definidas ou colunas de água homogêneas e, salinidades de 35 que podem chegar a 31psu (Figuras 9a, b, c).

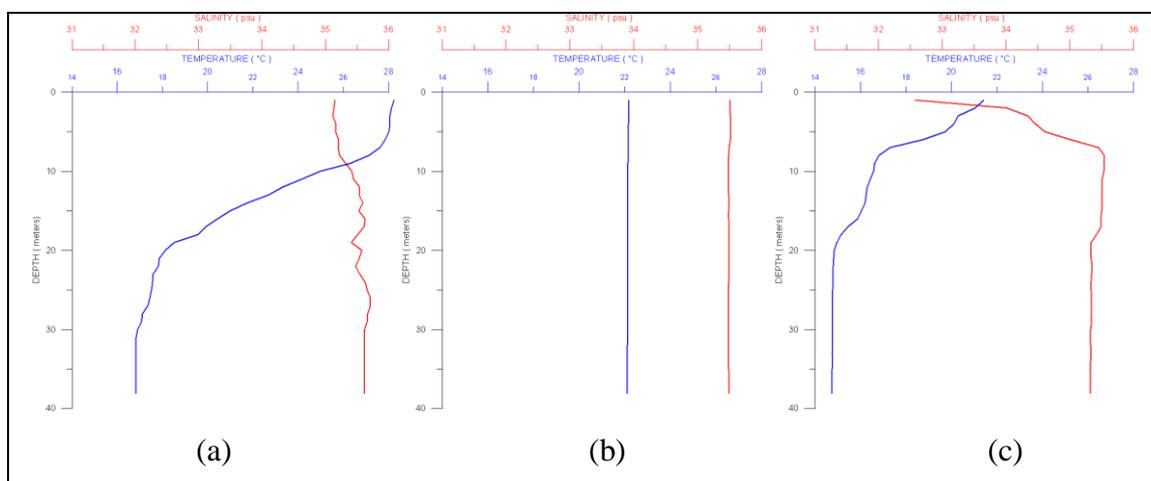


Figura 9 (a, b, c): Perfis de temperatura (azul) e salinidade (vermelho) de 3 estações ao longo do ano onde se observa a variabilidade destes parâmetros ao longo do ano.

3.4 Análises Laboratoriais

As análises laboratoriais compreendem os valores de absorvância (m^{-1}) dos constituintes opticamente ativos, MP e CDOM, pelos espectrofotômetros. A Figura 10 mostra o agrupamento das estações pelas suas características ópticas de absorvância no comprimento de onda de 443 nanômetros.

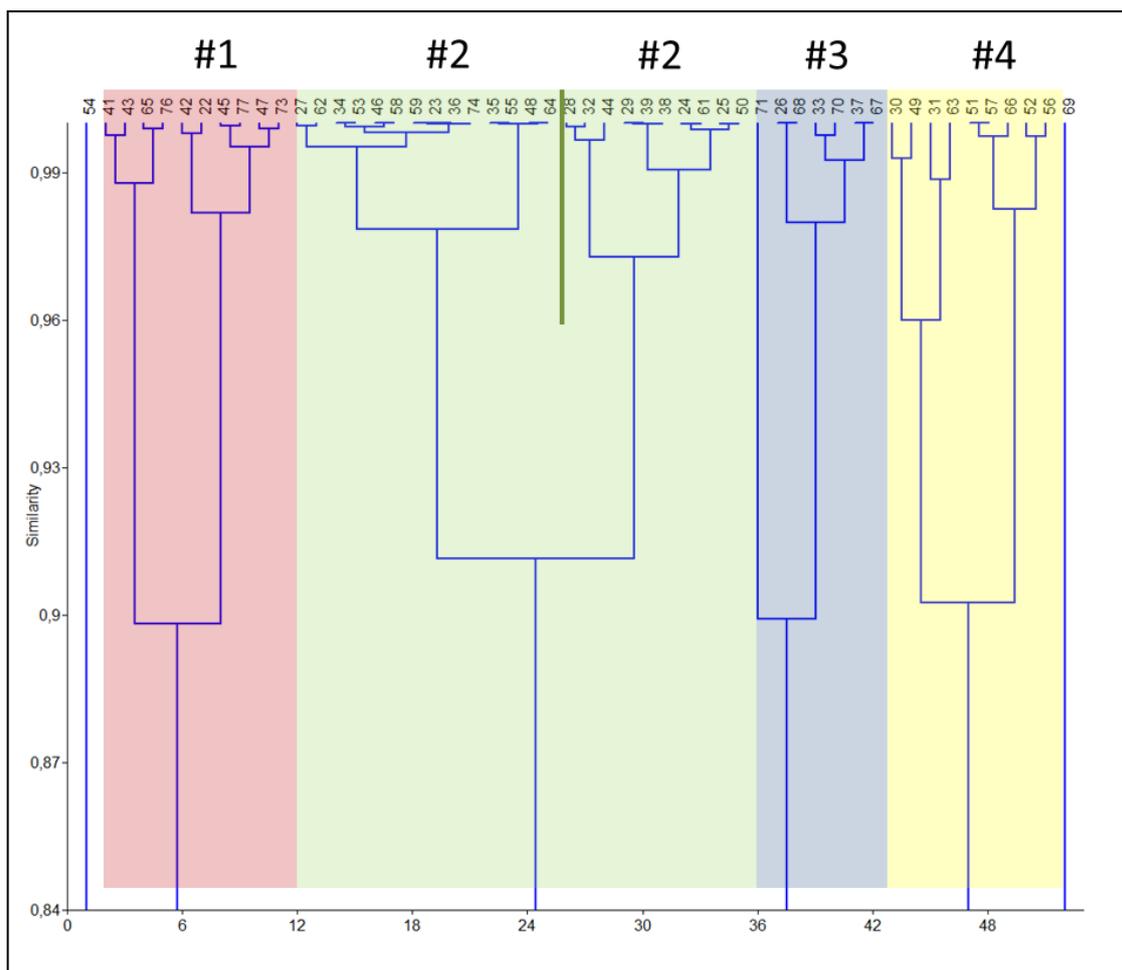


Figura 10: Análise de agrupamento das estações de coleta de dados de acordo com a absorvância em (m^{-1}) em 443nm. Os grupos foram divididos com base em 85% de similaridade por correlação.

Após identificados os grupos bióticos similares, foi feita uma análise de componentes principais (PCA) para identificar qual o constituinte responsável pelo agrupamento (Figura 11).

outras características como, por exemplo, aspectos da coluna d'água (temperatura e salinidade).

O grupo azul #3 responde as variações na porcentagem de CDOM e o grupo #4 varia principalmente com a variação de detritos. O grupo #3 acontece em meses que sucedem o inverno e o grupo #4 são meses principalmente de inverno.

Se analisarmos o cluster, o PCA e os dados oceanográficos de forma integrada, podemos ver um ciclo sazonal (Figura 12).

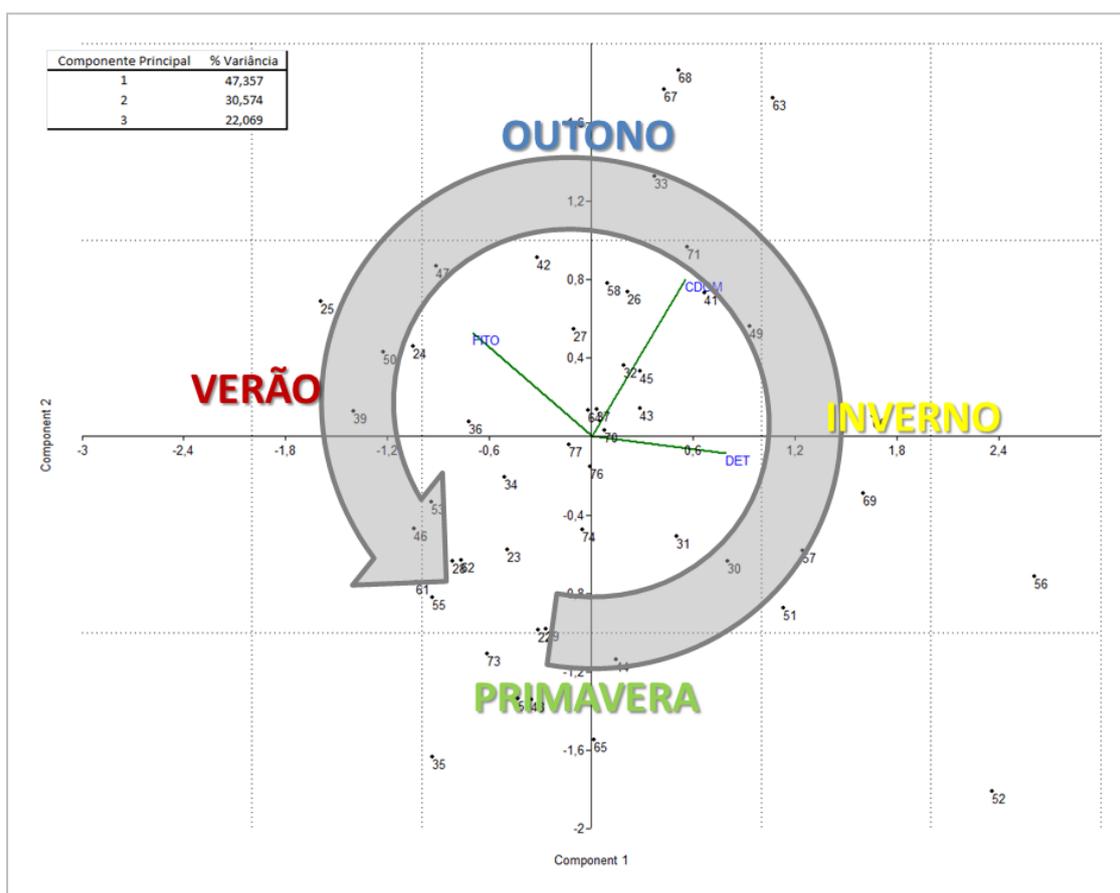


Figura 12: Distribuição das coletas de acordo com o constituinte principal e dados oceanográficos.

Os constituintes correlacionaram com as estações e com os grupos obtidos pelo cluster.

Os resultados encontrados foram:

- O grupo #1 ocorre predominantemente no verão e predomina uma maior porcentagem de fitoplâncton.

- O grupo #2 ocorre na primavera, mas também em todas as outras estações. É uma mistura de constituintes, estações e climas diferentes.
- O grupo #3 ocorre principalmente no outono e varia com a porcentagem de CDOM.
- O grupo #4 sofre influência principalmente dos detritos e predomina nos meses de inverno.

3.5 Reflectância Marinha

Foram analisados os resultados obtidos de Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{rs}) com os radiômetros *in situ* e os sensores orbitais de cor do oceano. A análise do box-plot de R_{rs} de cada equipamento foi utilizado como critério para retirada de dados espúrios.

3.5.1 FieldSpec HandHeld®

Os espectros de R_{rs} calculados com o FieldSpec estão na Figura 13.

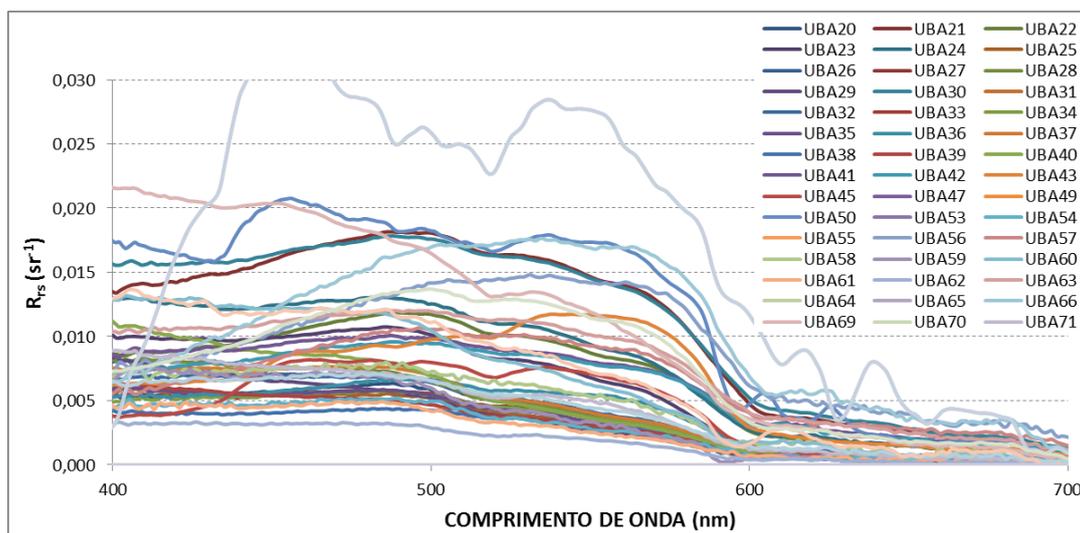


Figura 13: Curvas espectrais de R_{rs} (sr^{-1}) obtidas com o radiômetro FieldSpec HH. Foram retirados dados espúrios.

3.5.2 Free fall Satlantic

Os espectros de R_{rs} calculados com o Satlantic estão na Figura 14.

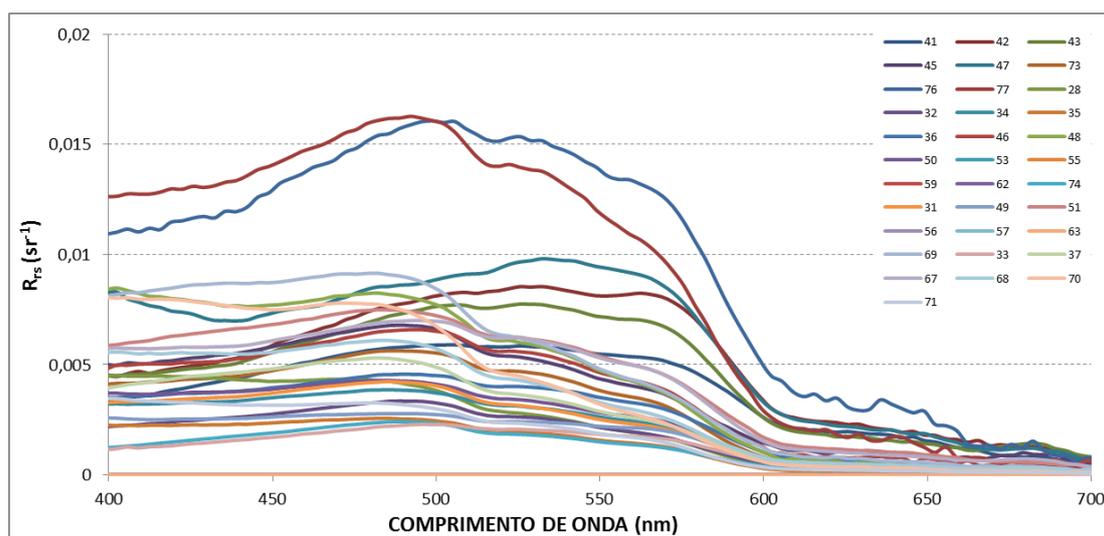


Figura 14: Curvas espectrais de R_{rs} (sr^{-1}) obtidas com o radiômetro perfilador *free fall* Satlantic. Foram retirados dados espúrios.

3.5.3 Sensor MODIS

Foram obtidas, através das imagens de satélite, a R_{rs} do sensor MODIS (Figura 15).

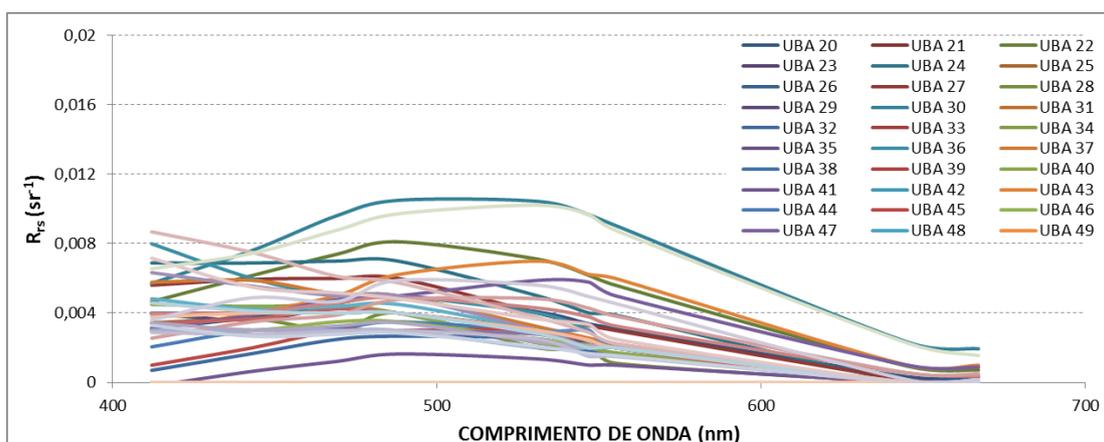


Figura 15: Curvas espectrais de R_{rs} (sr^{-1}) obtidas com o sensor orbital MODIS a bordo do satélite Aqua. Foram retirados dados espúrios.

3.5.4 Sensor SeaWiFS

Foram obtidas, através das imagens de satélite, a R_{rs} do sensor SeaWiFS (Figura 16).

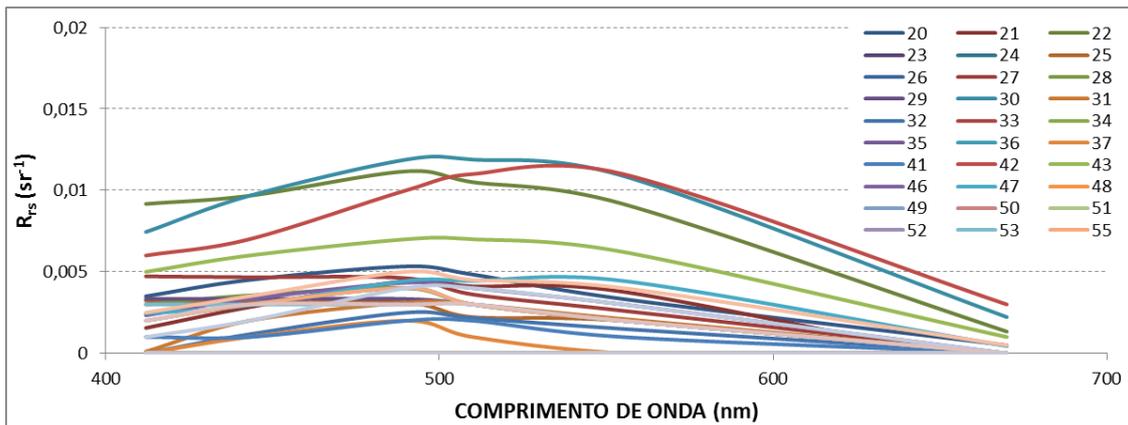


Figura 16: Curvas espectrais de R_{rs} (sr^{-1}) obtidas com o sensor orbital SeaWiFS.

A reflectância de sensoriamento remoto do FieldSpec e do Satlantic mostraram que a curva espectral do Satlantic está abaixo em relação a do FieldSpec, além de apresentar uma curva mais suavizada do espectro (Figura 17).

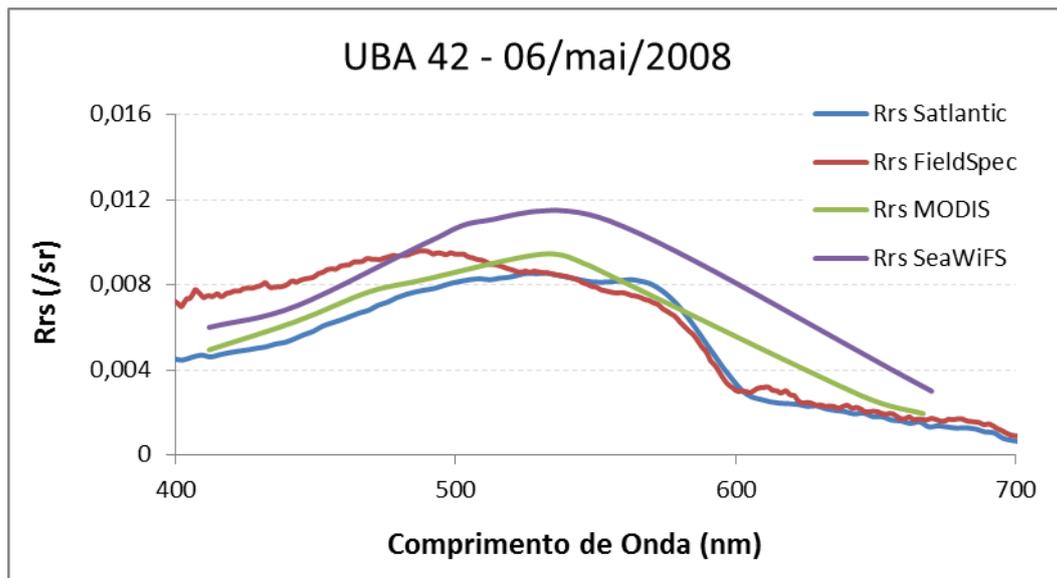


Figura 17: Exemplo dos espectros de R_{rs} da estação UBA42 de maio de 2008 entre os radiômetros Satlantic e FieldSpec e os sensores orbitais MODIS e SeaWiFS.

A Figura 17 mostra também que o sensor MODIS apresenta valores mais próximos aos dos radiômetros *in situ*. Os valores mais altos do FieldSpec podem estar relacionados ao espalhamento da luz na superfície da água (glint). Os menores valores de R_{rs} nos comprimentos de onda mais baixos para o Satlantic e para os sensores orbitais possivelmente se deve a atenuação da luz nos primeiros metros da coluna d'água nos comprimentos de onda menores. Para os sensores orbitais a interação desses comprimentos de onda menores com a atmosfera e seus gases pode fazer o papel de filtro e se observa uma queda entre 400nm até 450nm.

Foi feita uma simulação das bandas dos sensores MODIS, SeaWiFS e MERIS com os dados radiométricos *in situ* (Figura 18).

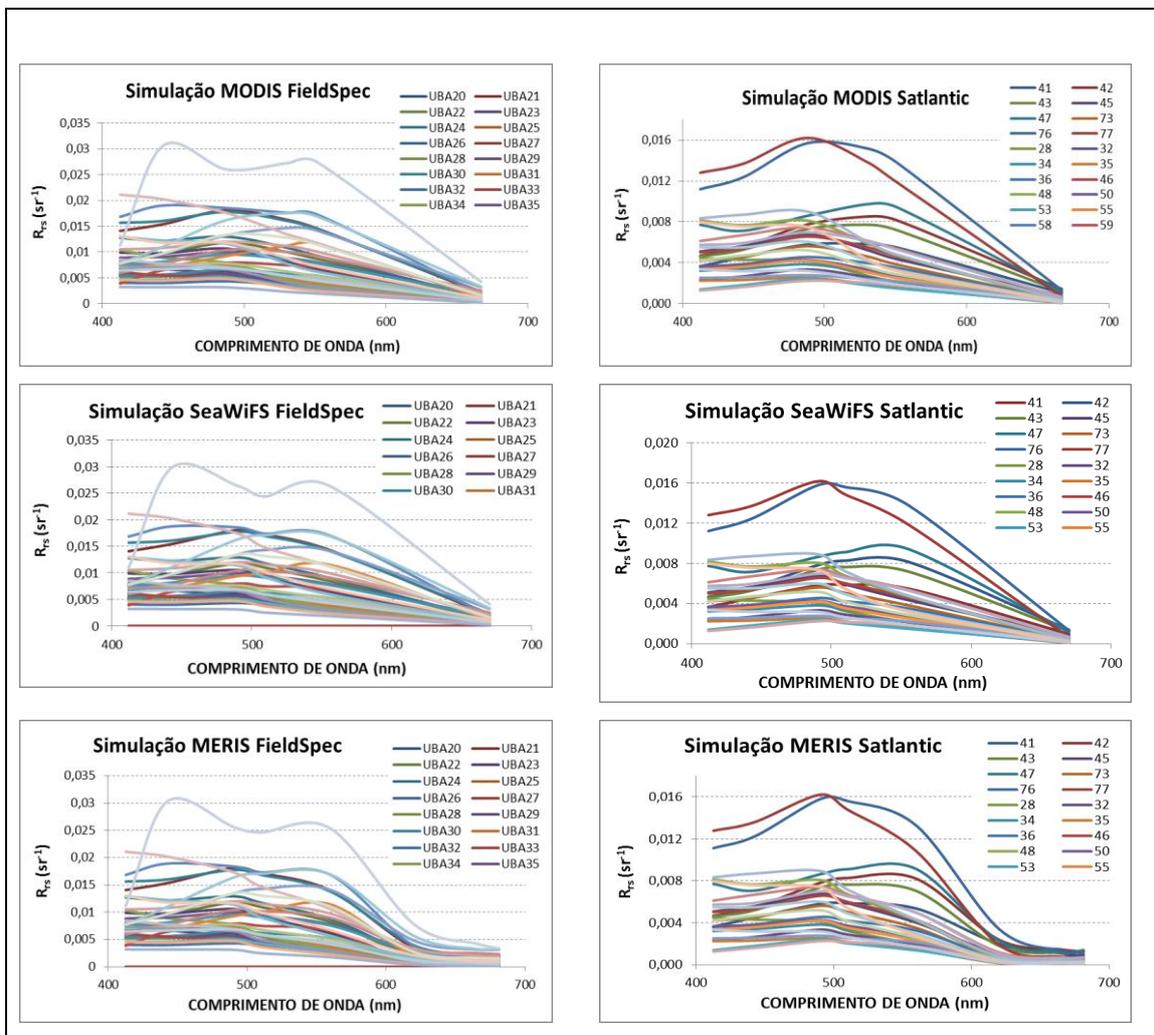
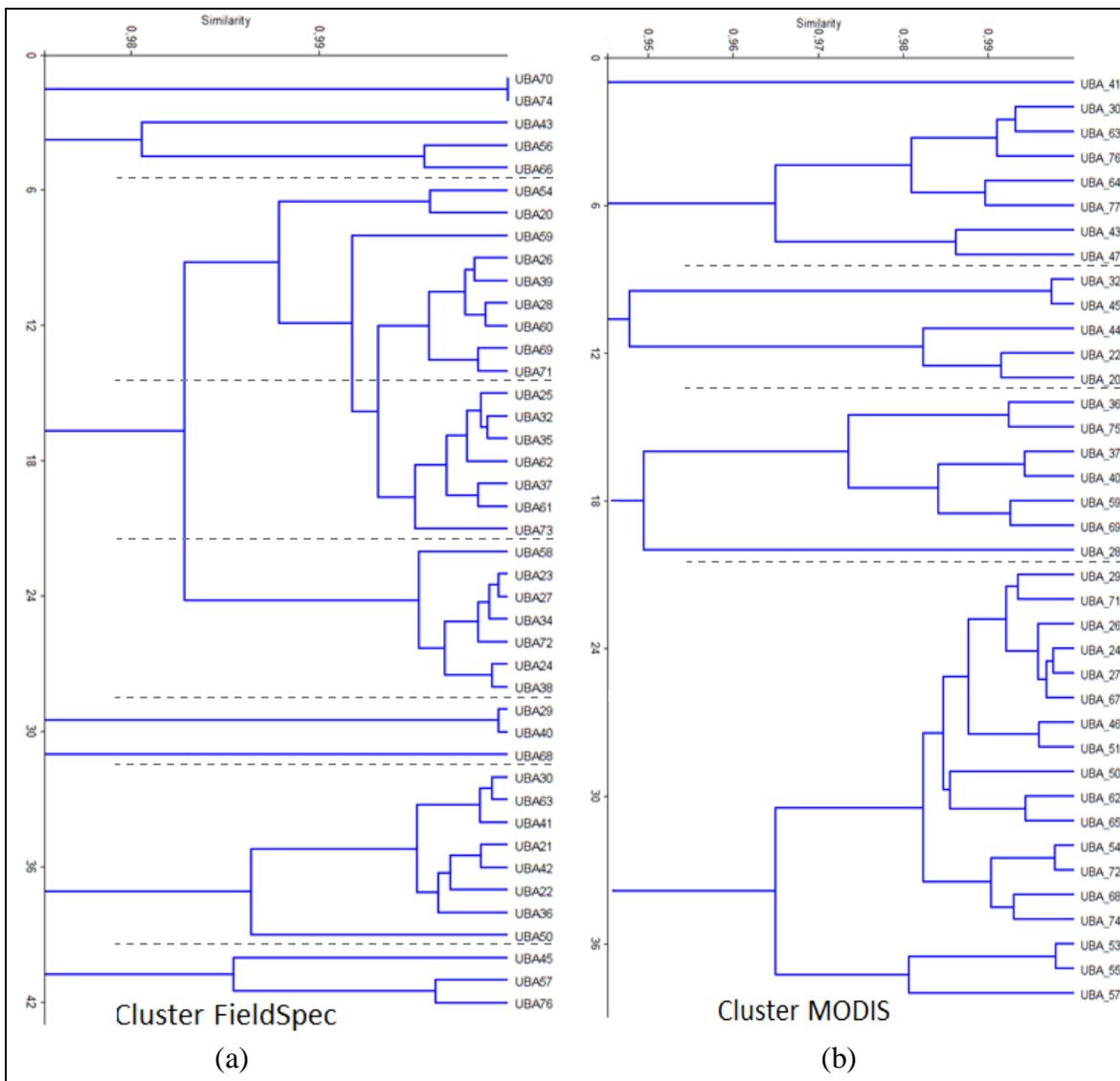


Figura 18: Simulação das bandas dos sensores MODIS, SeaWiFS e MERIS pelos radiômetros FieldSpec (esquerda) e Satlantic (direita).

A Figura 18 mostra uma semelhança entre as bandas dos sensores MODIS e SeaWiFS. As bandas do MERIS têm mais definição nos comprimentos de onda maiores, por isso, enquanto as bandas do MODIS e SeaWiFS mantêm uma queda linear a partir dos 550nm, o MERIS cai de forma logarítmica. Após obter os dados de R_{rs} e simular as bandas dos sensores orbitais foram feitos os cluster do radiômetro FieldSpec e Satlantic, como modelo *in situ*, e do sensor MODIS e SeaWiFS como modelo orbital no período de 5 anos (Figura 19 a, b, c, d).



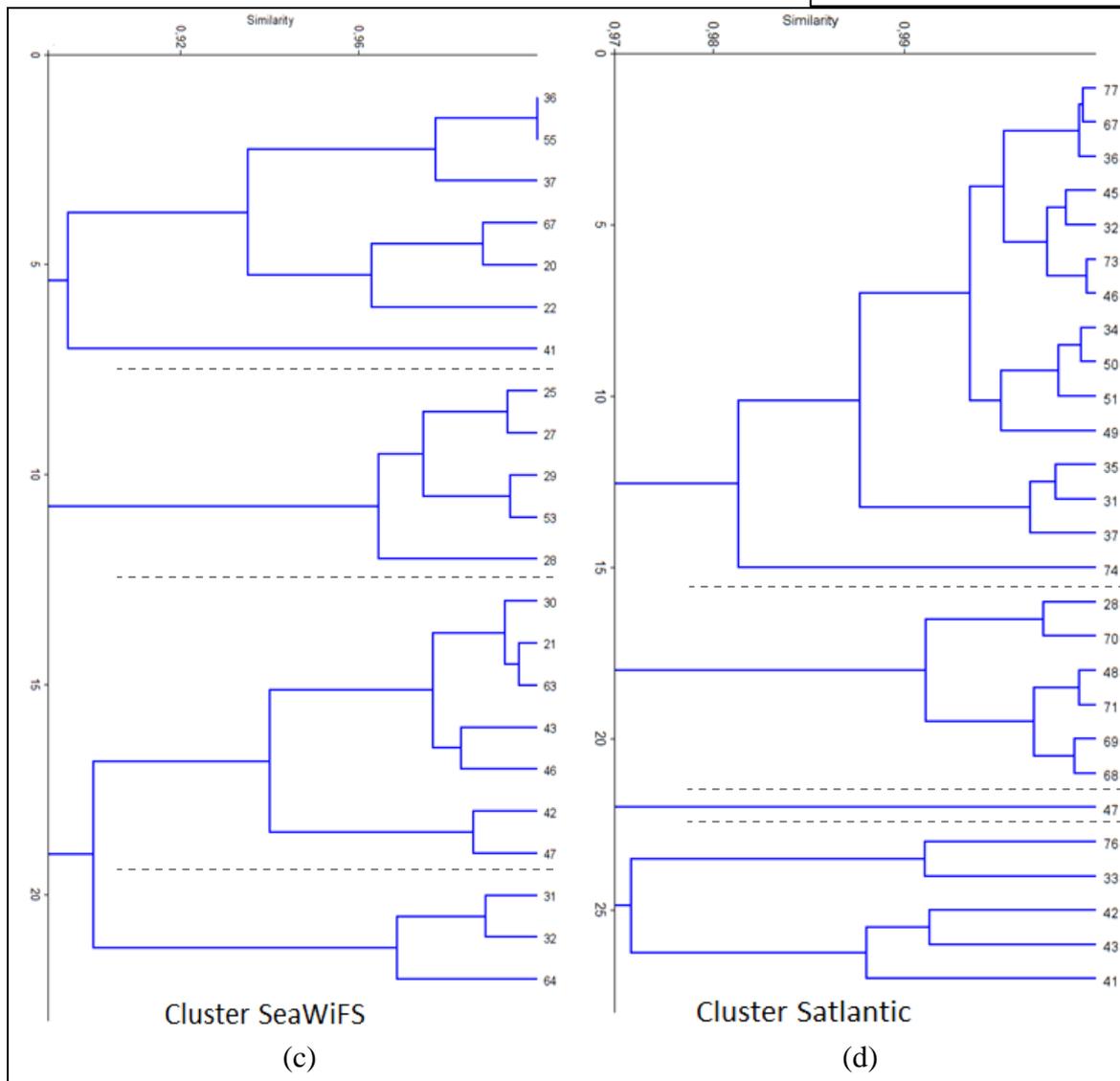
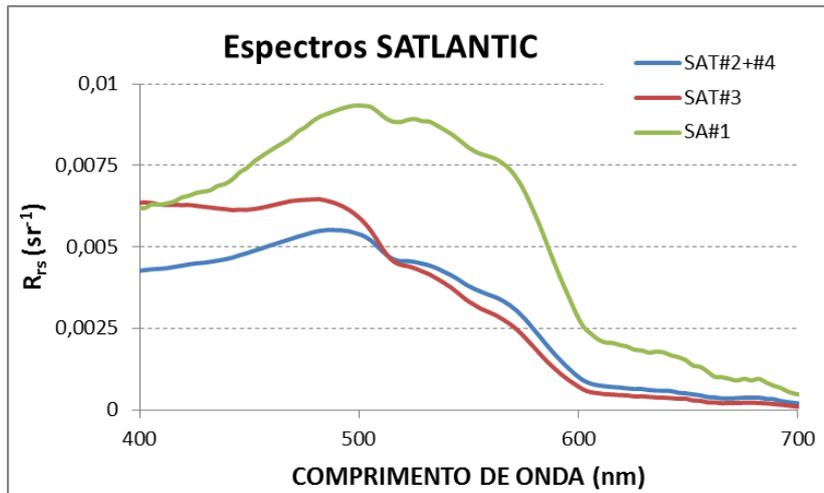
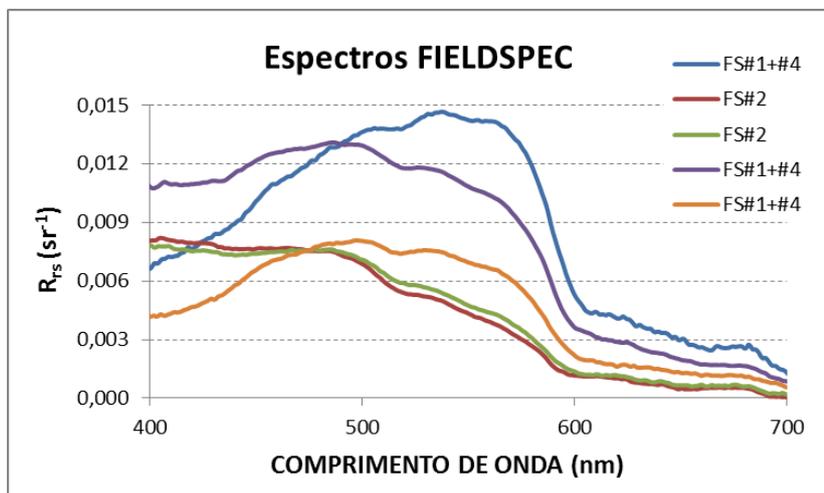


Figura 19: Cluster dos espectros de reflectância dos radiômetros FieldSpec HH (a), sensor MODIS (b), sensor SeaWiFS (c), radiômetro Satlantic primeiro metro da coluna d'água (d).

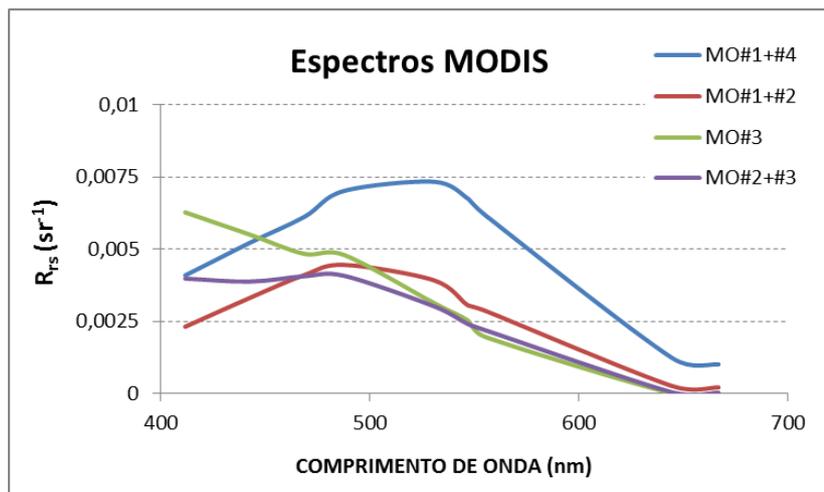
Os clusters de reflectância não se correlacionaram entre si. Cada um demonstrou um padrão de agrupamento ou as estações se uniram em grupos diferentes. Porém todos seguiram uma tendência de relacionarem o comportamento espectral com os constituintes biópticos, de acordo com o sugerido pelo IOCCG (2000). A Figura 20 (a, b, c, d) mostra o espectro de cada grupo que o cluster definiu para cada sensor.



(a)



(b)



(c)

Figura 20: Continuação.

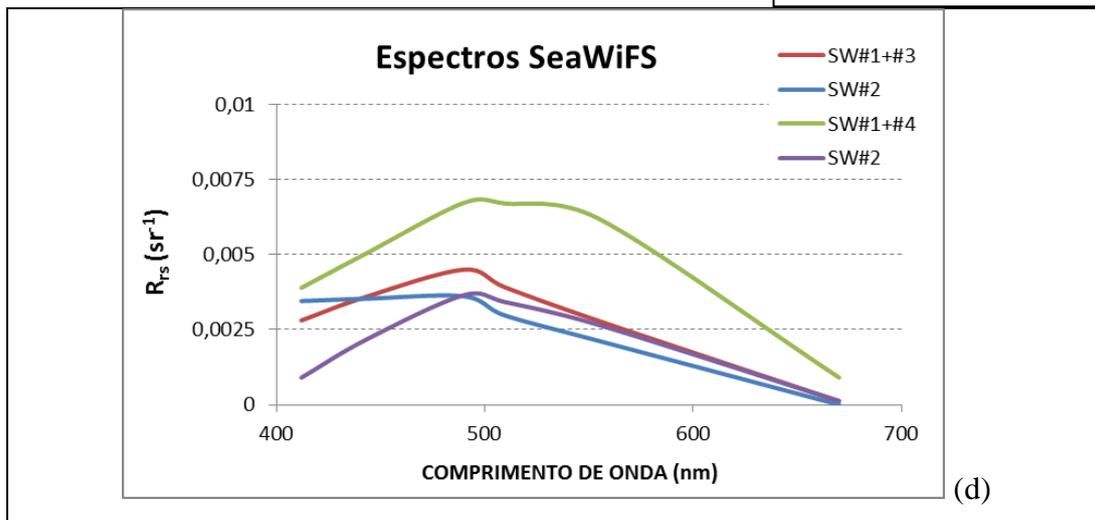


Figura 20 (a, b, c, d): As duas primeiras letras da legenda indicam qual o equipamento (AS: Satlantic, FS: FieldSpec, MO: MODIS, SW: SeaWiFS). O restante indica qual o principal constituinte óptico responsável pela assinatura espectral, lembrando-se dos 4 grupos vistos nas análises laboratoriais. Exemplo: SW#1+#3 significa espectro do SeaWiFS caracterizado por uma maior representatividade do grupo #1 (fitoplâncton) mais o grupo #3 (CDOM). Estas curvas são baseadas nas médias de cada grupo de cada sensor.

Podemos observar que em todas as figuras onde predomina o grupo óptico #1 (fitoplâncton) a R_{rs} é maior entre 500-550nm refletindo dentro da faixa do verde. Onde o espectro cresce entre 400-500nm como, por exemplo, MO#3, MO#2+#3, predomina a presença de matéria orgânica dissolvida. Quando esta mesma região espectral apresenta um patamar o mais provável é uma mistura de águas como acontece no caso dos grupos bióticos #2 citado nas Figuras 10 e 11 desde capítulo. O aumento após os 600nm, como nos casos FS#1+#4, sugere uma predominância de detritos nos meses de inverno. As Figuras 21 e 22 sugerem o tipo de espectro e a porcentagem relativa de cada constituinte.

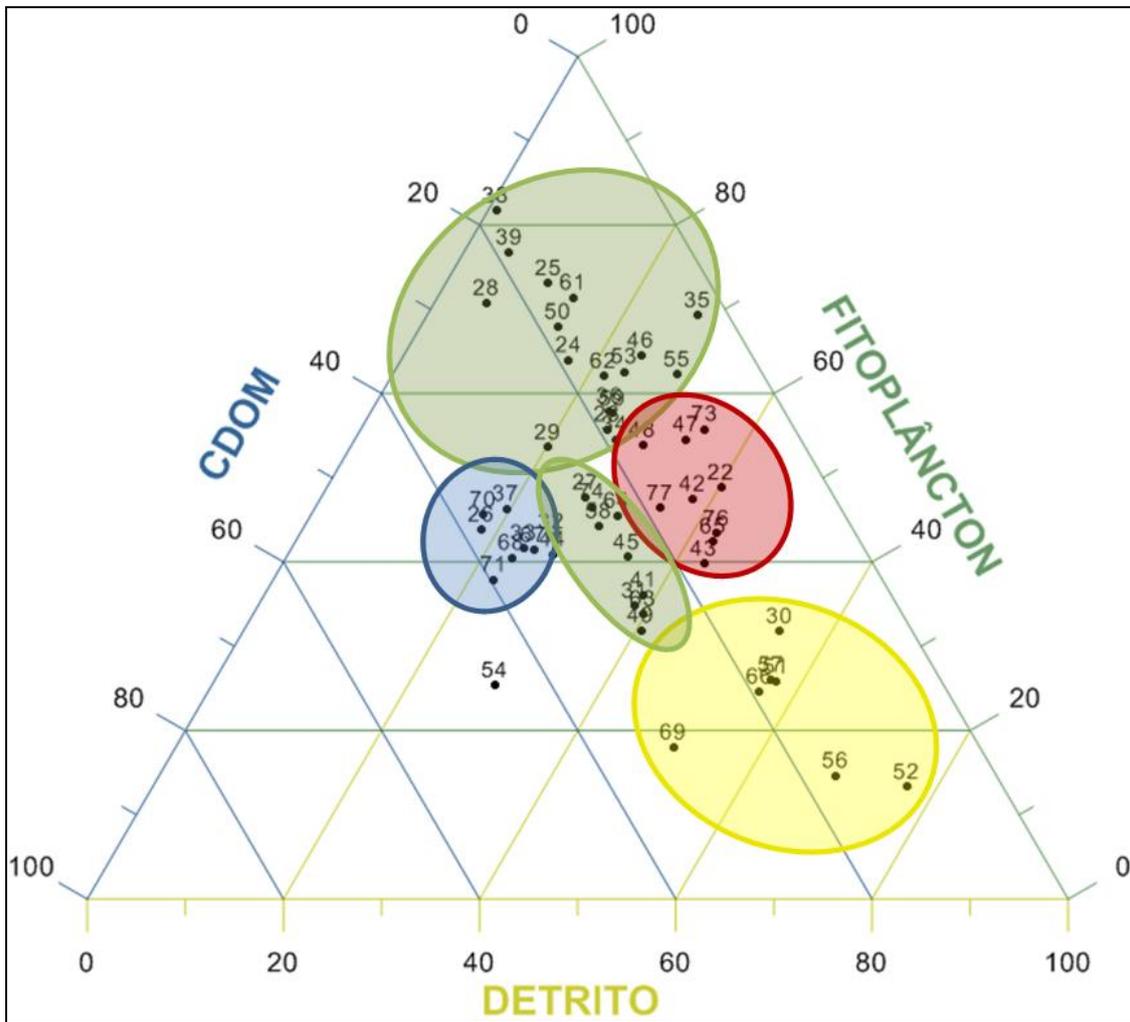


Figura 21: Gráfico ternário indicando a porcentagem relativa de cada constituinte biótico da água. As elipses mostram os grupos bióticos divididos pela concentração de DETRITO, FITO E CDOM. As cores das elipses identificam os grupos com a cor utilizada na Figura 3 (vermelho: #1, verde: #2, azul: #3 e amarelo: #4).

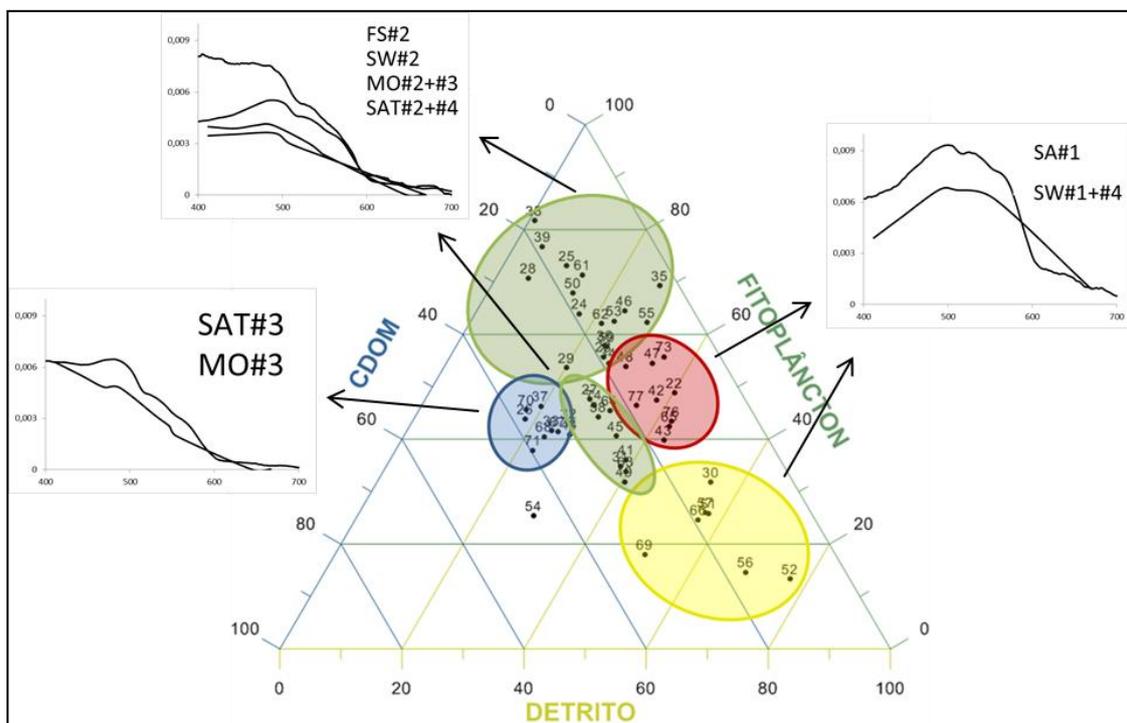
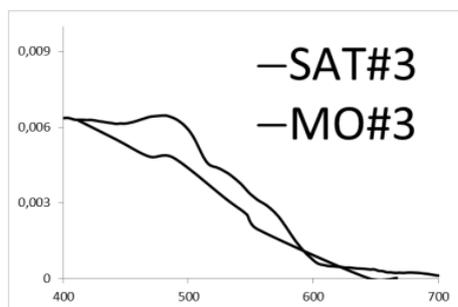


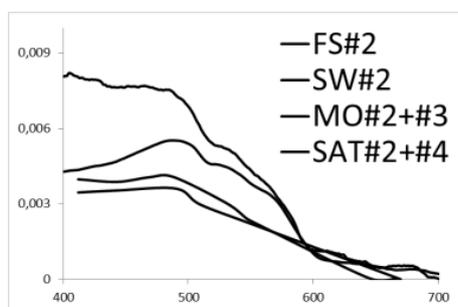
Figura 22: Formato dos espectros encontrados relacionados com a porcentagem relativa de cada constituinte óptico.

Cada um destes perfis de espectros é identificado com uma característica oceanográfica ou um acontecimento local. Analisando os dados obtidos neste ano com os do ano passado a forma do espectro e a influência oceanográfica mantiveram as mesmas podendo ser explicadas de acordo com o relatório descrito anteriormente (SANTOS *et al*, 2011).



Neste caso a zona eufótica alcança o fundo. Maior absorbância de CDOM. Sua temperatura da superfície do mar (TSM) é a menor entre as quatro e a análise da temperatura em toda a coluna d'água indicou pouca ou nenhuma presença de uma

estratificação térmica definida. Assim sugere que as concentrações de componentes opticamente ativos (COA) devem estar homogêneas na coluna d'água indicando um período pobre em COA, gerando a curva TIPO 3.



Neste caso a camada eufótica também alcança o fundo. Apresenta os menores valores de absorvância de CDOM, DETRITO e FITO corroborando com tipo massa d'água pobre, limpa ou clara. Porém observa-se a maior média de TSM entre todas as médias dos grupos de estações. Isto pode sugerir que a água se encontra clara porque seus COAs estão concentrados abaixo de uma estratificação da temperatura que mantém a água limpa nos primeiros metros (Figura 23).

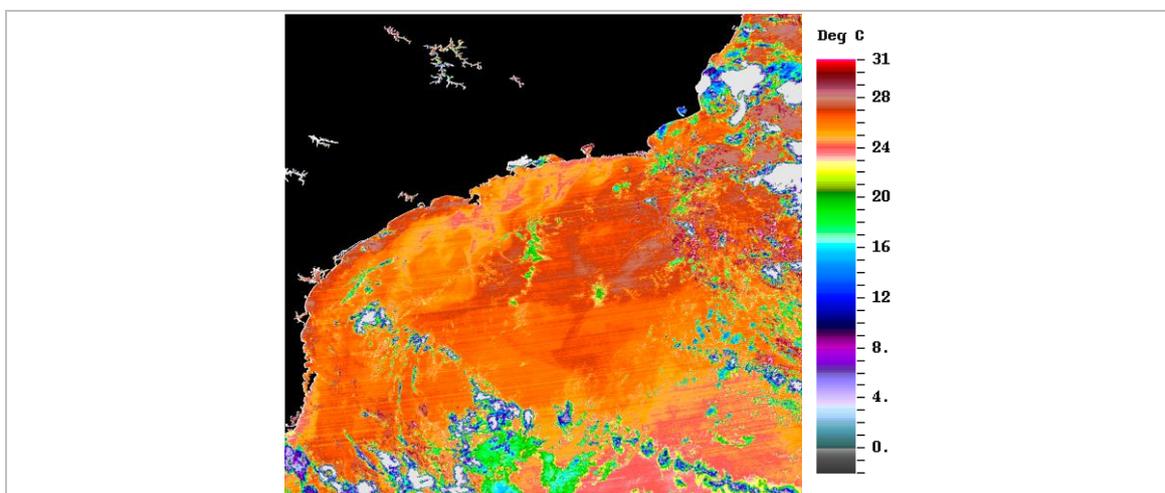
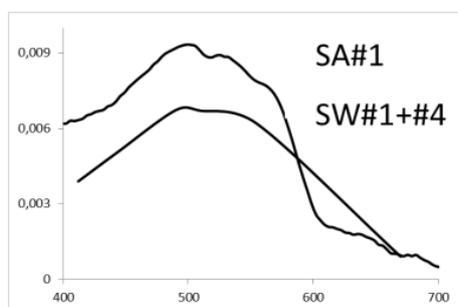


Figura 23: Imagem da TSM do sensor MODIS referente a estação UBA28 de janeiro de 2007 que faz parte do espectro #2. Observa-se um vento predominante de nordeste e a temperatura da superfície do mar próxima aos 25 °C.

Estes espectros são típicos de água clara (IOCCG, 2000). No primeiro caso podemos ter uma água pobre em toda coluna d'água, enquanto no segundo caso, essa água é clara até certa profundidade e possui maiores concentrações no fundo abaixo da termoclina.



Diferente dos dois primeiros, a camada eufótica destes não chega ao fundo. Tem os maiores valores médios de Clo-*a* e DETRITO. O máximo de clorofila-*a* não ocorre concomitantemente ao máximo de FITO e a coluna d'água na maioria das coletas realizadas nesses meses estava homogênea. Isso pode indicar que toda coluna d'água foi enriquecida pela homogeneização da coluna d'água que favoreceu a disponibilidade de nutrientes e COAs por toda a massa de água, contribuindo também para a produção primária e os altos níveis de Clo-*a* e DETRITO em suspensão.

As curvas obtidas foram também descritas semelhantemente por Rudorff *et al.*, (2007) e Kampel *et al.*, (2007) para a mesma região de Ubatuba, sendo realizadas para o primeiro ponto de coleta que abrange dezembro de 2004 a junho de 2006.

3.6 Algoritmos Empíricos

Os algoritmos empíricos na versão 4 foram comparados aos valores de clorofila-*a* *in situ* e estão apresentados na Figura 24.

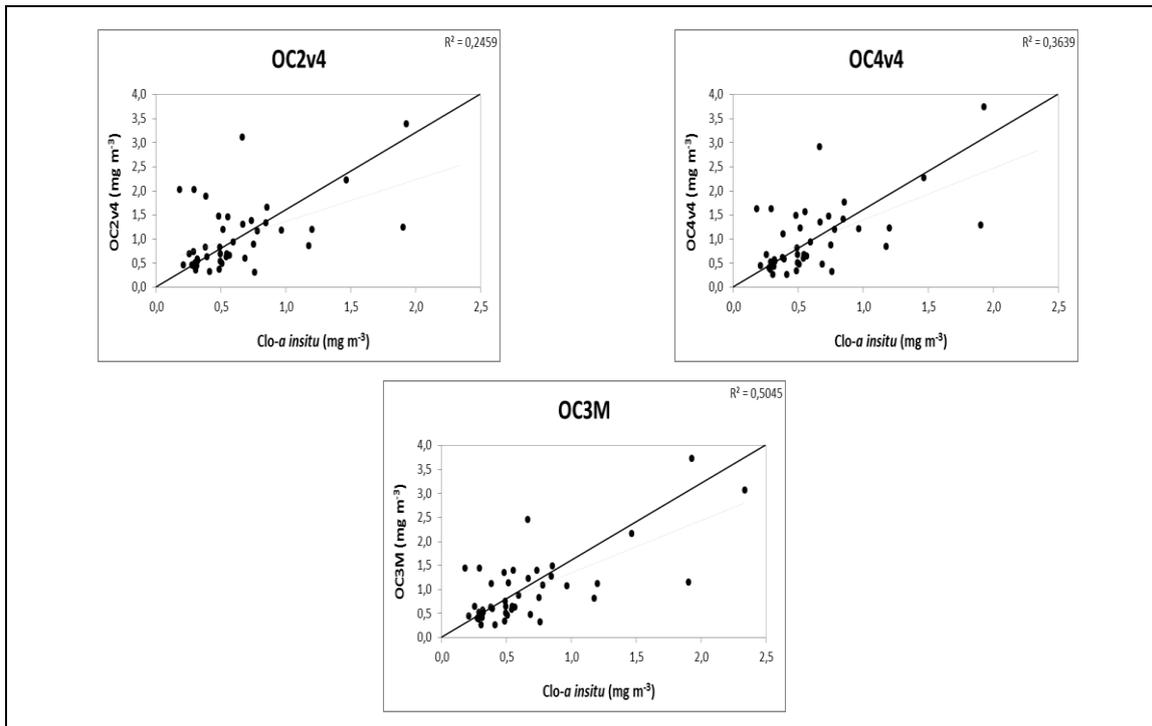


Figura 24: Gráficos dos algoritmos empíricos OC2V2, OC2V4 e OC3M na versão 4 em função da Clo-a *in situ*.

Na versão 4 o algoritmos com melhor desempenho foi o OC3M ($r^2 = 50\%$) enquanto OC2 e OC4 tiveram valores iguais a 24% e 36% respectivamente. Garcia *et al.* (2006) também avaliaram os algoritmos empíricos OC4v4 e OC2v4 para a região costeira do Atlântico Sudoeste a partir de dados obtidos por uma bóia radiométrica. todavia eles obtiveram resultados mais consistentes para os algoritmos OC4v4 e OC2v4, respectivamente.

A Figura 25 apresenta os gráficos dos algoritmos empíricos na versão 6 em função da Clo-a *in situ*.

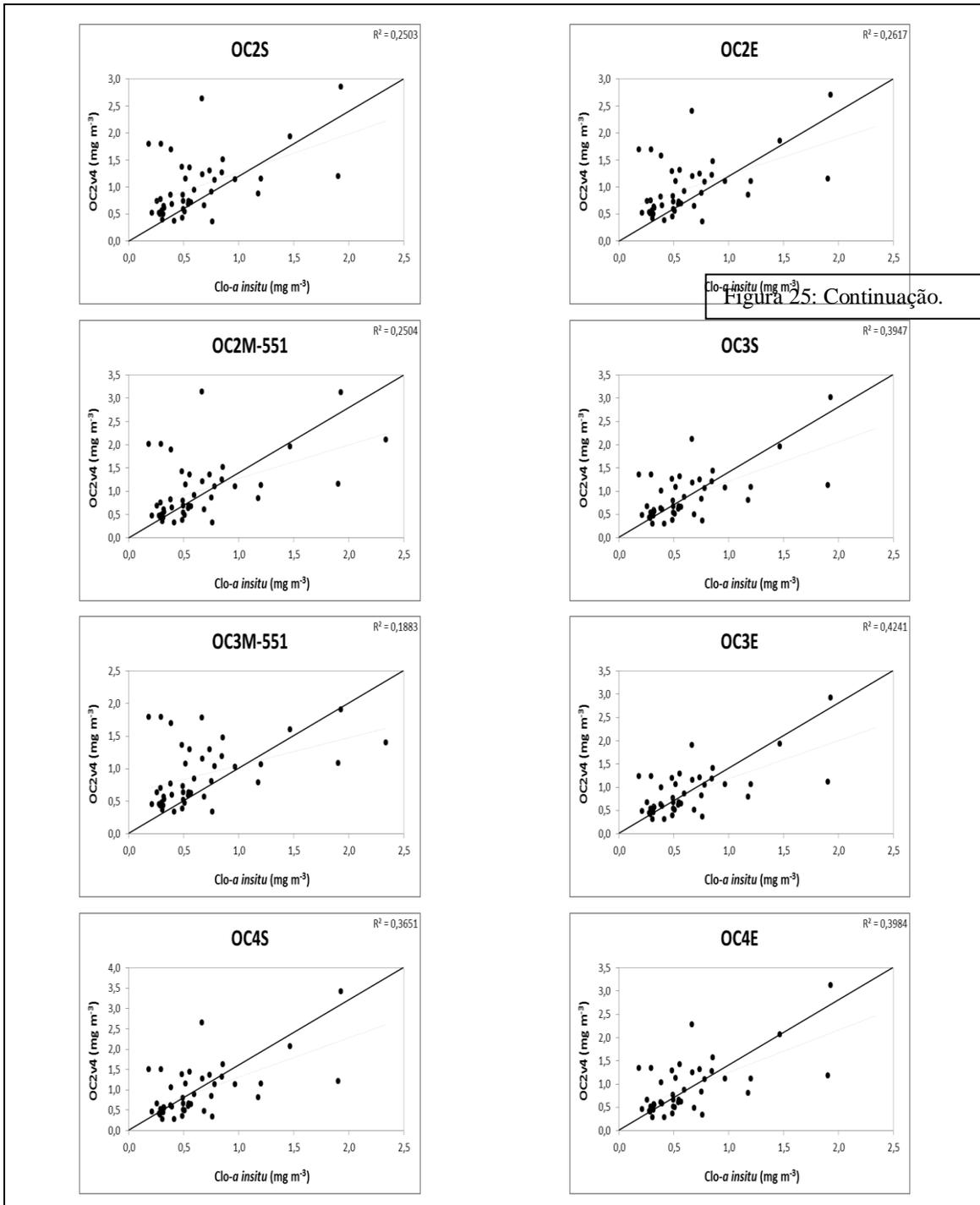


Figura 25: Continuação.

Figura 25: Gráficos dos algoritmos empíricos na versão 6 em relação a colorifla-*a in situ*.

Na versão 6 o algoritmo com melhor desempenho foi o OC3E $r^2 = 42\%$.

3.7 Clorofila-*a* Satlantic e MODIS

A Figura 26a apresenta o gráfico da clorofila-*a* calculada pelo fluorímetro do radiômetro Satlantic e a Figura 26b apresenta o gráfico da clorofila-*a* calculada pelo sensor orbital MODIS.

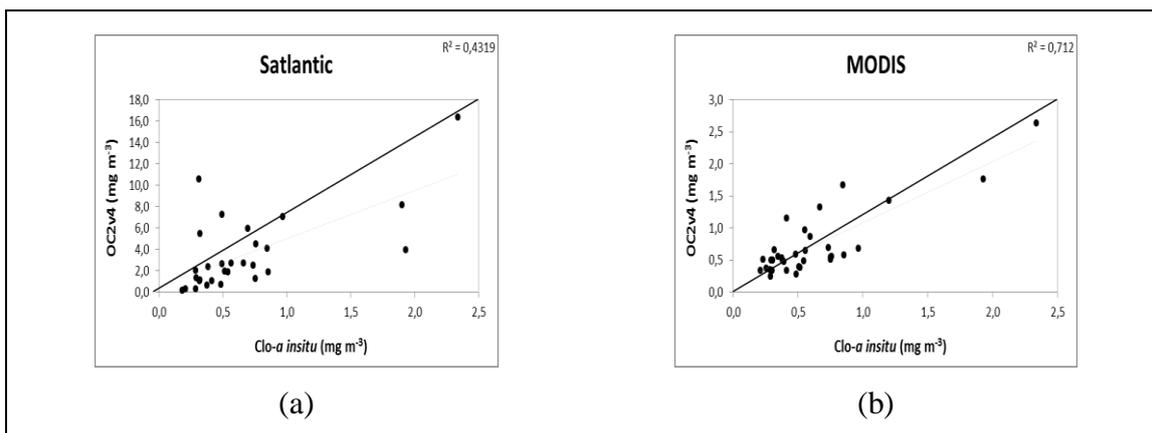


Figura 26: Gráfico da clorofila-*a* calculada pelo fluorímetro do radiômetro Satlantic (a) e pelo sensor orbital MODIS (b).

O MODIS apresentou melhor desempenho ($r^2 = 71\%$) dentre todos os algoritmos e sensores de clorofila-*a*.

A Clo-*a in situ* variou entre 0,181 até 2,337mg m⁻³. Aidar *et al.*, (1993) e Gaeta *et al.*, (1999) também identificaram valores semelhantes de concentração de clorofila-*a* na região de Ubatuba.

3.8 Comparação Estatística

Considerando os dados como sendo não paramétricos foi feita a correlação de Spearman, rmse-L e a RDP dos valores dos algoritmos, do Satlantic e do sensor MODIS (Tabela 3).

Tabela 3: Correlação de Spearman entre o valor *in situ* e a simulação dos algoritmos empíricos, fluorímetro do radiômetro Satlantic e sensor orbital MODIS.

	IN SITU		IN SITU
OC2v4	0,448	OC4E	0,553
OC4v4	0,536	OC3S	0,544
OC3M	0,596	OC3M-551	0,440
OC2S	0,447	OC3E	0,560
OC2E	0,451	Satlantic	0,664
OC2M-551	0,467	MODIS	0,741
OC4S	0,536		

A correlação de Spearman também indicou um melhor desempenho do MODIS em seguida do Satlantic e do algoritmo OC3M. Para corroborar aos dados obtidos foi feita a análise de rmse-L e RDP (Tabela 4).

Tabela 4: Valores de rmse-L e RDP dos algoritmos empíricos simulando as bandas dos sensores MODIS, SeaWiFS e MERIS nas versões 4 e 6, fluorímetro do radiômetro Satlantic e clorofila-a calculada pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua. Estes valores foram obtidos com base nos dados mensais de 5 anos de coleta.

	rmse-L	RDP
OC2v4	2,15	104,66
OC4v4	1,92	85,48
OC3M	1,74	72,89
OC2S	2,21	100,20
OC2E	2,13	94,05
OC2M-551	2,03	98,73
OC4S	1,83	78,27
OC4E	1,77	71,54
OC3S	1,78	71,18
OC3M-551	1,73	79,22
OC3E	1,73	66,72
Satlantic	5,53	476,21
MODIS	0,57	26,60

No cálculo do rmse-L e RDP, o algoritmo que apresentou o melhor desempenho foi o OC3E, com menores valores de rmse-L (1,73), RDP (66,72). O algoritmo OC3M apresentou maior valor de r^2 . Porém o sensor MODIS ainda apresenta valores que faz dele melhor que os algoritmos empíricos e que o fluorímetro do radiômetro Satlantic.

4 CONCLUSÃO

Sobre as imagens e condições oceanográficas podemos dizer que por ser uma região costeira, ao longo do ano as condições podem variar entre as estações, entre os meses, entre os dias de coleta e entre as horas do dia em que a coleta foi feita. Existem blooms de fitoplâncton (novembro de 2009, dezembro de 2007), blooms de organismos gelatinosos como salpas e água-viva (julho de 2010), ocorrência de golfinhos, baleias e pinguins e isso ocorre ao longo de todo ano e com duração de curto prazo (dias ou semanas). Embora haja um padrão sazonal na região, a coleta mensal pode não acontecer nos períodos favoráveis para uma observação clara dos fenômenos. Ou seja, a coleta pode acontecer em dias de calmaria e água clara, mar agitado e águas mais escuras, coluna d'água homogênea ou estratificada. E essas mudanças podem ocorrer em questão de dias ou, como em algumas amostras, as mudanças ocorrem ao longo da coleta. A observação a bordo é extremamente importante e deve ser feita regularmente ao longo do dia. Este procedimento deve ser melhorado no projeto e passar a ser mais eficaz, deixando de ser um acessório para interpretação e passar a ser uma variável de análise feita com equipamentos corretos (anemômetro, pluviômetro, etc).

Porém, não existe um padrão que relacione a cor do oceano e uma condição específica de clima.

Esta variabilidade observada na Figura 9 mostrou que identificar uma massa de água através da reflectância marinha é extremamente complexo. Dizer como está a coluna d'água baseado no(s) primeiro(s) metros ópticos medidos pelos radiômetros pode gerar diversas interpretações diferentes de acordo com quem está analisando.

A análise dos constituintes bióticos por cluster não apresentou bom desempenho. Isso porque a união dos grupos na Figura 10 não está definida por uma característica meteorológica ou oceanográfica. Isto é, os grupos formados não apresentam um processo oceanográfico semelhante de formação. Apenas os valores dos constituintes se correlacionaram.

Já a análise por componentes principais apresentou um melhor desempenho, agrupando as estações semelhantes em processos de ressurgência, frentes frias, estratificação da coluna d'água e estações do ano.

Quando tratamos dos dados de reflectância marinha observamos que as bandas do sensor MERIS a partir de 550nm seguem um decaimento logarítmico. Para o desenvolvimento de algoritmos empíricos regionais essa observação deveria ser levada em conta. Como o MERIS tem uma melhor qualidade nos comprimentos de onda maiores esta região do espectro passa mais facilmente pela atmosfera e por isso pode ser útil para desenvolvimento regional de algoritmos utilizando os dados do MERIS enquanto o MODIS tem qualidade na sua região do azul/verde.

A análise da reflectância marinha para identificação de massas de água opticamente diferenciáveis na região costeira de Ubatuba é possível e quantificável.

Analisando os algoritmos empíricos observamos que a análise do melhor desempenho depende de dois fatores: correlação e escala. O algoritmo com melhor desempenho não apresentou uma escala similar em ambos os eixos do gráfico. Por exemplo, o algoritmo OC3M com 72% de correlação tem, no eixo da clorofila-a máximo em $2,5 \text{ mg m}^{-3}$. Enquanto isso o eixo y chega a $4,0 \text{ mg m}^{-3}$. Por outro lado o algoritmo onde os eixos x e y estão em mesma escala (OC3M-551) os resultados da correlação foram os piores possíveis. Para o desenvolvimento e validação de algoritmos regionais deverá ser observado com mais detalhe qual fator interfere mais na qualidade dos valores obtidos, se a correlação ou a acuraria.

Em geral, o sensor MODIS do satélite Aqua ainda apresenta o melhor desempenho para calcular a clorofila-a da região. Em seguida vêm os algoritmos OC3M, OC3E e OC3S. Ou seja, a desempenho dos algoritmos OC3 desenvolvidos para o sensor MODIS foi melhor que para o SeaWiFS e MERIS.

Um fator que pode ter contribuído para o baixo desempenho dos algoritmos na região em estudo é a complexidade das propriedades óticas inerentes. Os algoritmos foram desenvolvidos para águas do tipo Caso 1, sendo modelados a partir de concentrações de clorofila e de razões das reflectâncias de sensoriamento remoto *in situ*. Esta abordagem funciona bem para águas Caso 1 uma vez que o fitoplâncton e as substâncias covariantes determinam as propriedades óticas da água. Todavia, em águas costeiras, frequentemente a matéria orgânica dissolvida (CDOM) e os detritos não covariam com o fitoplâncton devido à maior complexidade de fontes de componentes opticamente

ativos (IOCCG 2000). Segundo Carder et al. (1999), em águas costeiras Caso 2 o CDOM pode inclusive absorver mais luz no azul do que o fitoplâncton.

Desta forma, valores mais altos de concentração de clorofila podem ser devido ao efeito do CDOM, uma vez que estes algoritmos empíricos não distinguem entre os dois. Assim, uma das causas da superestimação dos algoritmos pode ser devido à possibilidade de que a região estudada apresenta características de águas do tipo Caso 2, uma vez que a mesma está inserida em águas costeiras.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio nas pesquisas através da bolsa de Iniciação Científica PIBIC/INPE processo 114310/2011-4. Ao Dr. Milton Kampel pela orientação e atenção que me foi dada. Ao INPE pelo suporte para realizar as coletas em campo. Ao Laboratório de Produção Primária do Instituto Oceanográfico onde pude trabalhar minhas análises. Ao Dr. Salvador A. Gaeta que me proporciona utilizar de seu laboratório para a pesquisa. A Msc. Mayza Pompeu pelo apoio em campo e nas análises laboratoriais. A todos que de alguma forma estiveram participando desse projeto ao longo do ano.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aidar, E.; Gaeta, S. A.; Giancesella-Galvão, F.; Kutner, M. B.; Teixeira, C. Ecosystema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. **Publicação Especial Instituto Oceanográfico**, v. 10, p. 9-943, 1993.
- Botter, D. A.; Paula, G. A.; Leite, J. G. e Cordani, L. K. Noções de estatística. São Paulo, **IME-USP**, 1996.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Cannizzaro, J. P.; Campbell, J. W.; Mitchell, B. G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. **Advances in Space Research**, v. 33, n.7, p. 1152-1159, 2004.
- Castro, B.M; Miranda, L.B.; Miyao, S. Y. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. **Boletim Instituto Oceanográfico**. v.35, n.2, p. 135-151, 1987.
- Emilson, I. The shelf and coastal waters off Southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**. São Paulo, 17(2): 101-112, 1961.
- Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P.-Y. Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance. **Applied Optics**. v. 38, n.18, p. 3844-3856, 1999.
- Gaeta, S. A.; Ribeiro, S. M. S.; Metzler, P. M.; Francos, M. S.; Abe, D. S. Environmental forcing on phytoplankton biomass and primary productivity of the coastal ecosystem in Ubatuba region, southern Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, Brasil, v. 47, n. 1, p. 11-27, 1999.
- Hazen, A. "The measurement of the colors of natural waters," **American Chemist Journal**, v. 18, 264p., 1896.
- IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters, *in* SATHYENDRANATH, S., ed., **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, Dartmouth, IOCCG, p. 140, 2000.
- Kampel, M.; Novo, E. M. L. M. O sensoriamento remoto da cor do da água. In: **Souza, R.B. (Org.). Oceanografia por Satélites**. São Paulo. p.179-196, 2005.

- Kampel, M.; Gaeta, S. A.; Lorenzetti, J. A.; Pompeu, M.; Rudorff, F. M.; Frouin, R. J. Bio-optical variability in coastal waters of southeast Brazil. *Coastal Ocean Remote Sensing. Proc. of SPIE Vol. 6680*, p. 08, 2007.
- Kampel, M.; Lorenzetti, J. A.; Bentz, C. M.; Nunes, R. A.; Paranhos, R.; Rudorff, F. M.; Politano, A. T. Simultaneous measurements of chlorophyll concentration by Lidar, fluorometry, above-water radiometry, and ocean color MODIS images in the Southwestern Atlantic. *Sensors*. v. 9, p. 528-541, 2009.
- Mitchell, B. G.; Bricaud, A.; Carder, K.; Cleveland, J.; Ferrari, G.; Gould, R.; Kishino, M. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. **Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation**, Revision 2. Chapter 12, pp125-153, 2000.
- Mobley, C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, v. 38, n.36, p. 7442-7455, 1999.
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, v. 22, p. 709-722, 1977.
- Mueller, J. L., Fargion, G. S.; McClain, C. R. Methods Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols, Revision 4. **Greenbelt, Md, NASA Goddard Space Flight Center**. 83p, 2003.
- O'Reilly, J. E.; Maritorena, S.; Siegel, D. A.; O'Brien, M. C.; Toole, D.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, F. P.; Strutton, P.; Cota, G. F.; Hooker, S. B.; McClain, C. R.; Carder, K. L.; Müller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phinney, D.; Moore, G. F.; Aiken, J.; Arrigo, K. R.; Letelier, R.; Culver, M. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: Hooker, S. B.; Firestone, E. R., eds., **SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, NASA Technical Memorandum, v. 11**: Greenbelt, NASA Goddard Space Center, p. 9 – 27, 2000.
- Rudorff, F. M. Comparação de algoritmos empíricos na estimativa da concentração de clorofila-a na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE. p. 4675-4682, 2007.
- Santos, J. F. C.; Kampel, M.; Gaeta, S. A.; Pompeu, M. Análise da reflectância marinha na região costeira de Ubatuba litoral norte de São Paulo. **Relatório Científico**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.

Stramma, L.; England, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **J. Geophys. Res.**, v. **104(C9)**, p. 20.863–20.883, 1999.

Sverdrup, H. U.; Johnson M. W.; Fleming R. H. The oceans, their physics, chemistry, and general biology. **Prentice-Hall Inc., New Jersey**, 1087p., 1942.

Tomczak, M.; J. S. Godfrey. Regional oceanography: an introduction. **Pergamon, Great Britain**, 422p., 1994.

Welschmeyer, N. A.; Fluorometric analysis of chlorophyll-a in the presence of chlorophyll-b and pheopigments. **Limnology and Oceanography**, v. 39, p. 1985-1992, 1994.