



**Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNESP – Campus do Litoral Paulista - Unidade São Vicente**

Rafael Riani Costa Perinotto

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ABSORÇÃO DA LUZ PELO
FITOPLÂNCTON NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE DO BRASIL

São Vicente

2005

Rafael Riani Costa Perinotto

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ABSORÇÃO DA LUZ PELO
FITOPLÂNCTON NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em
Biologia Marinha no curso de Ciências Biológicas da
Universidade Estadual Paulista, campus do Litoral
Paulista, Unidade de São Vicente.

Orientadora: Professora Doutora Áurea Maria Ciotti

São Vicente

2005

Perinotto, Rafael Riani Costa

Comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton na plataforma continental sudeste do Brasil / Rafael Riani Costa Perinotto. – São Vicente, 2005. 42 p.

Trabalho de conclusão (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, Campus do Litoral Paulista-Unidade São Vicente.

Orientador: Áurea Maria Ciotti

1. Biologia marinha 2. Fitoplâncton marinho

CDD 574.92

Palavras-chaves: fitoplâncton; absorção de luz; detritos; plataforma continental; camada de mistura; picnoclina

Dedico este trabalho aos meus pais José Alexandre de Jesus Perinotto e Maria Cecília Riani Costa Perinotto, e aos meus irmãos André e Fábio Riani Costa Perinotto; que apesar de toda a distância durante esses quatro anos de faculdade sempre me deram muito apoio, força e alegria.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus familiares, em especial meus pais e irmãos.

Agradeço em especial a todo o pessoal da minha turma (I turma) por todos os momentos (viagens, festas, provas, trabalhos, reclamações, aulas) passados desde o primeiro e turbulento ano de nosso curso. Lembranças especiais: Léo, Iara, Melina, Pizza, Ríquel, César, Marina, Thaís, Doidão, Eduardo, Fernando e Serpentário.

Agradeço a todos os amigos - bixos que fiz nesse pequeno e novo campus universitário e que de alguma forma ou outra, alguns mais outros menos, direta ou indiretamente, me ajudaram e participaram da minha formação acadêmica. Lembranças especiais ao Navala e ao Lacraia.

Agradeço carinhosamente à Larissa, por todos os momentos passados juntos, por toda a confiança e carinho; por tantas conversas, discussões e aprendizagens.

Agradeço aos meus companheiros de república (K-NAVIAL) e do dia a dia, Eduardo, Fernando e Lacraia, e uma lembrança especial ao Doidão; por tantas risadas, bagunças, estudos, confiança e tudo o mais.

Agradeço às minhas amigas Talía e Natalia por toda a amizade, todo o carinho, paciência, confiança e atenção, e por tantos momentos compartilhados.

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Áurea Maria Ciotti, à Marcela pela ajuda e pelas imagens de satélite cedidas, e à Amábile pela ajuda, participação e companheirismo em tantas etapas de desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao pessoal do IOUSP (Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo), pelos dados cedidos e laboratórios e equipamentos emprestados. Aos professores doutores Salvador Airtton Gaeta, Paulo Yukio Gomes Sumida, Michel Michaelovitch de Mahiques, Ilson Carlos Almeida da Silveira; ao Rafael Augusto de Mattos; à Mayza Pompeu; e à Flávia M. P. Saldanha-Corrêa.

Agradeço também à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), da qual sou bolsista de Iniciação Científica - Processo 04/12699-0.

PERINOTTO, R.R.C. Comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton na plataforma continental sudeste do Brasil, 2005. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas – Habilitação em Biologia Marinha) – Curso de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Resumo

Este estudo visou avaliar a influência das variações na estrutura vertical da coluna de água sobre a magnitude e o comportamento espectral de absorção da luz pelo fitoplâncton, na região de plataforma continental sudeste do Brasil. A quantificação da absorção da luz espectral em corpos de água tem sido empregada como variável em estudos de ecologia do fitoplâncton, uma vez que essa depende dos grupos taxonômicos presentes, seu tamanho e estado fisiológico. A absorção da luz pelo fitoplâncton é um dos fatores principais determinando as taxas de produtividade primária em um local, mas sua aplicação em estudos ecológicos depende, todavia, da caracterização prévia de sua variabilidade. Foi analisada uma base de dados proveniente de uma região na plataforma continental no Sudeste do Brasil, coletada durante duas campanhas de verão, nos meses de janeiro de 2002 e janeiro de 2003. Cerca de 30 estações foram amostradas em perfis perpendiculares à costa entre a Ilha de São Sebastião (SP) e a região de Búzios (RJ). Perfis verticais de salinidade e de temperatura, medidos concomitantemente *in situ*, foram utilizadas para a determinação da estrutura vertical da hidrografia na região. As curvas espectrais de absorção de luz pelo fitoplâncton coletadas em diferentes profundidades, medidas em espectrofotômetro, foram parametrizadas, segundo modelos propostos na literatura, e os parâmetros encontrados, foram estatisticamente relacionadas a variáveis como a profundidade local e a concentração de clorofila-a. Os valores de absorção da luz pelo fitoplâncton foram bem explicados pela concentração de clorofila-a, mas os resultados mostram uma grande variabilidade com um fator proporcional ao tamanho celular médio da comunidade fitoplanctônica (S_f). Valores altos de magnitude da absorção de luz pelos detritos foram observados em regiões oceânicas de alta salinidade, durante apenas o cruzeiro contendo a base de dados de 2003 (BÚZIOS). A estrutura vertical da coluna de água mostra uma influência

marcante da ACAS (Água Central do Atlântico Sul) abaixo da picnoclina, que diferencia essa camada devido às altas concentrações de clorofila-a e conseqüentemente altos valores de magnitude da absorção da luz pelo fitoplâncton. Essa estrutura vertical parece estar ligada com a dinâmica do meandramento da Corrente do Brasil, que propicia tanto situações de ressurgência (meandros ciclônicos) como de subsidência (meandros anticiclônicos). A grande dinâmica desses meandros parece explicar, em parte, a variabilidade observada durante as campanhas. Os resultados do presente estudo auxiliarão na compreensão do efeito da estrutura vertical da coluna d'água sobre as comunidades de fitoplâncton da plataforma continental e fornecerão subsídios para modelos oceanográficos que usam dados de sensoriamento remoto para processos biológicos em toda a camada de mistura.

Palavras-chave: fitoplâncton; absorção de luz; detritos; plataforma continental; camada de mistura; picnoclina

PERINOTTO, R.R.C. Comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton na plataforma continental sudeste do Brasil, 2005. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas – Habilitação em Biologia Marinha) – Curso de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Abstract

This study aims to evaluate the influence of water column vertical structure on the magnitude and spectral behavior of phytoplankton light absorption in a Brazilian southeast continental shelf region. Spectral light absorption is a variable used in phytoplankton ecology studies, since it depends strongly on the taxonomic groups present and also on their size and physiological status. Phytoplankton light absorption is the most important factor determining local primary production rates, therefore, it is important to understand its variability in time and space. The analyzed data, from a Brazilian southeast continental shelf region, was obtained during 2 summer oceanographic cruises performed in January 2002 and January 2003. Around 30 points were sampled in perpendicular transects between the Island of São Sebastião (SP – Brazil) and Búzios region (RJ – Brazil). Salinity and temperature profiles, concomitantly measured *in situ*, were used to determine the hydrography vertical structure in each point. The spectral curves of phytoplankton light absorption, collected in different depths and measured in spectrophotometer, were parameterized according to models proposed in the literature. The observed parameters were statistically related to variables such as local depth and chlorophyll-a concentration. Phytoplankton light absorption values were well explained by chlorophyll-a concentration, but our results suggest the influence of the size factor S_f , in its variability. Light absorption by detritus showed high unexpected values in oceanic regions during the 2003 cruise only. Water column vertical structure shows a remarkable influence of SACW (South Atlantic Central Water) below the pycnocline, and this layer showed the highest chlorophyll-a concentrations and phytoplankton light absorption. Changes in the vertical structure in this area seems to be related to the Brazil Current meandering dynamics that provides both upwelling (cyclonic meanders) and downwelling (anti-cyclonic meanders) situations. The great dynamics

of these meanders seems to partially explain bio-optical variability observed during the two cruises over the continental shelf. Our results will give subsidies to biological models that use remote sensing data to understand about the dynamics of phytoplankton communities in the mixed layer.

Keywords: phytoplankton; light absorption; detritus; continental shelf; mixed layer; pycnocline

Sumário

1 - Introdução e Revisão da Literatura	9
2 - Objetivos	14
3 - Materiais e Métodos	15
4 - Resultados e Discussões	22
5 - Conclusões	38
Referências	39

1 – Introdução e Revisão da Literatura

Nos últimos anos, uma grande quantidade de instrumentos ópticos, usados *in situ* ou em sensores remotos (satélites, aeronaves, etc), têm gerado informações biológicas importantes. Muito da aplicabilidade biológica desses instrumentos se deve à estreita relação entre a cor de um corpo de água e o chamado comportamento espectral do mesmo, que é uma função dos comprimentos de onda da luz da irradiância solar que são absorvidos ou refletidos. Nos oceanos, geralmente, a absorção da luz pelo fitoplâncton é a propriedade óptica principal, e por essa razão tem sido empregada como subsídio para estudos ecológicos. Mudanças na abundância de organismos fitoplanctônicos, nos seus grupos taxonômicos, e no seu estado fisiológico afetam as taxas de produtividade primária, e conseqüentemente os ciclos locais de carbono, nitrogênio, e outros elementos. Assim, a eficiência fotossintética desses organismos, que resulta em maior ou menor produtividade primária, depende em grande parte de sua capacidade de absorção de luz.

A absorção da luz solar pelos oceanos é a fonte principal de energia para o aquecimento de suas camadas superficiais. O aquecimento da superfície influencia a dinâmica de mistura das massas de água (e.g., Lewis *et al.*, 1990). A luz, ao chegar à superfície dos oceanos, é refletida ou transmitida para maiores profundidades; ambos caminhos dependem de propriedades ópticas inerentes a um ambiente, como o retro-espalhamento e a absorção espectrais. Essas propriedades variam de acordo com os componentes ópticos presentes na água. Segundo Kirk (1994), os componentes ópticos mais importantes presentes nos oceanos são geralmente divididos em 3 categorias: i) as moléculas de água, ii) as partículas (incluindo o fitoplâncton) e iii) as substâncias dissolvidas. A luz que pode ser efetivamente absorvida pelos componentes dissolvidos e particulados presentes na água do mar provê energia para atividades biológicas como a fotossíntese (e.g., Platt *et al.*, 1988), bem como para processos químicos como a foto-oxidação de substâncias orgânicas (e.g., Miller, 1994). A porção iluminada dos oceanos é conhecida como zona eufótica, que delimita a região aproximada onde o processo de fotossíntese pode ocorrer. Essa é geralmente delimitada desde a superfície até a profundidade onde a intensidade luminosa está entre 0,5 a 1% daquela medida em superfície.

O processo de aquecimento das camadas superiores dos oceanos, resultado da absorção da luz, é uma das principais forçantes da estratificação vertical da coluna d'água. Essa é caracterizada por um gradiente crescente da densidade, função da temperatura, da salinidade e da pressão com a profundidade e, geralmente, decrescente de temperatura com a profundidade. A turbulência causada na superfície, principalmente pela ação friccional dos ventos, forma em locais estratificados verticalmente, a chamada camada de mistura, caracterizada por uma homogeneidade das características físico-químicas da água. Já que o fitoplâncton é um grupo de organismos passivos em relação aos movimentos das massas de água, espera-se que sua distribuição seja também homogênea nessa camada. Logo abaixo da camada de mistura, existe a picnoclina (ou termoclina em regiões onde as variações de salinidade são pequenas), que é a região de transição entre a camada de mistura e as camadas mais profundas, que são geralmente mais frias e ricas em nutrientes (Mann e Lazier, 1996). A picnoclina é, portanto, uma região com um forte gradiente de densidade, e funciona como uma barreira para a camada de mistura, afetando principalmente os fluxos de nutrientes para a zona eufótica. Assim, a relação entre as profundidades da camada de mistura e da zona eufótica é um fator importante para as atividades fitoplanctônicas, participando do controle da disponibilidade de luz e nutrientes. Quando a camada de mistura está totalmente inserida na zona eufótica os organismos do fitoplâncton têm luz abundante, mas podem eventualmente ficar limitados por nutrientes se o isolamento dessa com as camadas mais profundas for extenso.

A eficiência da absorção da luz pelo fitoplâncton, ou seja, a proporção dessa energia que é efetivamente transferida para os processos bioquímicos, pode ser influenciada pelo grau de sombreamento intracelular dos pigmentos ("empacotamento dos pigmentos" ou "*pigment packaging*", como descrito por Duysens, 1956) e pela composição e concentração de pigmentos (ver Bricaud *et al* 1995 e referências). Ambas características são uma função dos grupos taxonômicos presentes, da disponibilidade e concentração de nutrientes e da disponibilidade de luz no ambiente. Os organismos do fitoplâncton possuem, além da clorofila-*a* (ou divinil clorofila em proclorofitas) pigmentos acessórios, que servem para captação complementar de energia para fotossíntese (pigmentos acessórios fotossintéticos) ou para a proteção de excessos de irradiância (pigmentos acessórios fotoprotetores). Existe uma relação bastante estreita entre os grupos taxonômicos e

pigmentos presentes nos organismos (Rowan, 1989). A influência de todas essas variáveis faz com que uma descrição acurada do comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton nos oceanos não seja um procedimento simples (ver Ciotti *et al.*, 1999 e referências). Existem, todavia, simplificações que podem ser feitas. Trees *et al.*, (2000) estudando uma grande base de dados sobre a concentração de pigmentos nos oceanos globais, observaram uma alta covariação entre a concentração de pigmentos acessórios e a concentração de clorofila-*a* que parece praticamente independente da concentração local de nutrientes ou da profundidade. Esses autores concluíram que o parâmetro mais importante na variação da absorção da luz pelo fitoplâncton é a concentração total de pigmentos intracelulares, sendo a mesma uma função não só do tamanho das células, mas também dos ajustes fisiológicos destas às condições de luz. Vidussi *et al* (2001) mostraram que as diferentes concentrações de pigmentos acessórios podem ser relacionadas com o tamanho dominante dos organismos presentes em um local, e relações empíricas entre alguns grupos de pigmentos. Ciotti *et al.* (2002) mostraram que a variabilidade no comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton pode ser mais de 80% causada exclusivamente pelo tamanho dos organismos dominantes nas comunidades, ao menos para as camadas superficiais de regiões costeiras. Recentemente, Bricaud *et al.* (2004), mostraram para uma grande base de dados amostrada em varias regiões dos oceanos globais, que a estrutura de tamanho do fitoplâncton é realmente o principal fator controlando as variações observadas em seu comportamento espectral da absorção da luz. Essas covariações que geram relações estreitas entre o tamanho celular e absorção da luz pelo fitoplâncton permitiram a Ciotti *et al* (2002) sugerir um método simples para uma descrição do comportamento espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton. Essa simplificação produz dois parâmetros com importância ecológica: a magnitude da absorção de luz no espectro da luz visível e um “fator de tamanho” (S_f) que indica o tamanho dominante dos organismos presentes. Ciotti e Bricaud (submetido) descrevem um método capaz de extrair o fator S_f de dados de cor do oceano podendo, como consequência, ser estimados por sensoriamento remoto.

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de duas bases de dados, adquiridas através de campanhas oceanográficas realizadas sobre a plataforma continental sudeste do Brasil, entre a Ilha de São Sebastião (SP) e a Ilha Grande (Angra dos Reis - RJ), em janeiro de 2002 e em janeiro de 2003. Pela

classificação de Castro e Miranda (1998) a área de estudo faz parte da “Bacia do Sul do Brasil”, compreendida entre Cabo Frio (23°S) e Cabo de Santa Marta (28°40’S), uma região cuja plataforma apresenta topografia suave, com isóbatas paralelas à linha da costa. A Corrente do Brasil, que é a corrente de contorno oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul, apresenta meandros e vórtices, (Silveira *et al.*, 2000) sobrepondo a plataforma continental, inclusive sobre a região estudada. Vórtices ciclônicos proporcionam a entrada de uma água mais fria e rica em nutrientes, a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), da região do talude para as plataformas continentais, principalmente média e externa (Castro e Miranda, 1998; Gaeta, 1999).

Apesar de não haver descargas significativas de água doce na denominada “Bacia do Sul do Brasil”, a presença de diversos estuários de pequeno a médio porte é constante, proporcionando uma influência consistente de águas continentais sobre a dinâmica das principais massas de água presentes, a Água Tropical (AT) e a ACAS (Castro e Miranda, 1998). Além disso, a região recebe uma influência sazonal (mais relevante no inverno) de águas de origem continental da plataforma mais ao sul, sob a influência das descargas do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos (Piola *et al.* 2005). A Água Tropical é caracterizada por temperaturas superiores a 20°C e salinidade acima de 36 ups (unidades práticas de salinidade); enquanto a ACAS apresenta temperaturas entre 6°C e 20°C e salinidade entre 34,6 e 36 ups (Silveira *et al.*, 2000).

Estudos sobre as propriedades bio-ópticas dessa região são ainda escassos. Ciotti e Gaeta (2002) mostraram que os algoritmos para as estimativas de concentração de clorofila-*a* empregados têm bons resultados. Ciotti e Gaeta (em prep.) estudando a região entre a Ilha de São Sebastião (SP) e o Cabo de São Tomé (RJ) em duas campanhas oceanográficas (janeiro e agosto de 2002), descrevem que os principais componentes ópticos da região, sobre a plataforma média e externa, são o fitoplâncton e a matéria orgânica dissolvida colorida (MODC), e que a sua proporção relativa varia sazonalmente. No inverno, as águas de origem da plataforma continental mais ao Sul, trazem altas concentrações de MODC, enquanto que no verão, a maior influência da AT faz com que a participação de MODC diminua. Além disso, a maior proximidade da ACAS com a superfície durante o verão, proporciona eventuais fluxos de nutrientes para a zona eufótica, aumentando potencialmente a concentração de clorofila-*a* e a contribuição do

fitoplâncton na absorção da luz. Ciotti e Gaeta (em prep) descrevem também que o material particulado não fitoplanctônico (aqui, referido como “detritos” para simplificar) não foi relativamente importante durante as duas campanhas amostradas, exceto para alguns pontos na plataforma interna.

Sobre a plataforma continental, e quanto mais próximo da costa, a estrutura da camada de mistura pode ser fortalecida ou enfraquecida por movimentos horizontais da água. As marés proporcionam turbulência na água e podem, dependendo da profundidade local, causar atrito com o fundo, levando a extensão da camada de mistura até o fundo. O fluxo de massas de água de origem continental (menos salina e conseqüentemente menos densa) facilita a estratificação da coluna d’água, afetando assim a camada de mistura. Portanto, uma complexa relação entre diversos fatores, principalmente a ação dos ventos, das marés e dos aportes continentais, determina a estrutura vertical da coluna d’água sobre a plataforma continental, e a conseqüente disponibilidade de luz e nutrientes para a zona eufótica. Essa estrutura condiciona também as forçantes para as propriedades bio-ópticas, já que potencializa ou não o crescimento do fitoplâncton, a competição entre as espécies (Cullen *et al* 2002) e determinam seu estado fisiológico. É importante lembrar que o material aqui chamado de “detritos” pode se originar externamente, do aporte continental, mas também localmente, através da degradação do fitoplâncton. Assim, essa complexa estrutura física sobre a plataforma deve também alterar a contribuição relativa de detritos na absorção espectral de luz.

A grande dinâmica física observada em regiões de plataforma continental tem conseqüência direta sobre a ecologia do fitoplâncton que, por sua vez, pode se utilizar de parâmetros derivados de propriedades bio-ópticas para sua descrição no tempo e no espaço através do uso de imagens de satélite. O entendimento das variações verticais das propriedades bio-ópticas na coluna de água é, assim, importante para o melhor conhecimento do ambiente, já que apenas as camadas mais superficiais podem ser observadas com essas imagens.

2 – Objetivos

No presente trabalho, descreveremos propriedades bio-ópticas do fitoplâncton e do material particulado não algal (“detritos”) na região de plataforma continental compreendida entre a Ilha de São Sebastião (SP) e a Ilha Grande (Angra dos Reis - RJ) em relação à estrutura vertical da coluna de água. Duas campanhas de verão foram compiladas, para atender os seguintes objetivos:

a) Descrever as variações encontradas nos parâmetros que descrevem a variação espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton e pelos detritos na região durante duas campanhas de verão;

b) Relacionar e interpretar a variabilidade encontrada com a profundidade local, a concentração de clorofila-*a* e as características físico-químicas (temperatura e salinidade);

c) Quantificar a variação vertical desses parâmetros em relação à estrutura física da coluna de água (camada de mistura e pycnoclina).

As respostas a essas perguntas têm relevância para aplicações ecológicas de dados bio-ópticos.

3 – Materiais e Métodos

Dados de campo

Dados físico-químicos e bio-ópticos foram amostrados em duas campanhas oceanográficas na região de plataforma continental compreendida entre a Ilha de São Sebastião (litoral norte do estado de São Paulo) e a Ilha Grande (Angra dos Reis – RJ). A primeira base de dados disponível foi obtida durante o cruzeiro denominado BÚZIOS, conduzido no verão de 2003, entre os dias 21 e 27 de janeiro, quando foram realizadas 15 estações em 4 perfis perpendiculares à costa (Ilustração 1). Os dados do cruzeiro BÚZIOS foram complementados por uma porção do cruzeiro de verão da campanha DEPROAS denominado DEPROAS3, realizado em janeiro de 2002 entre os dias 5 a 23. A porção utilizada do cruzeiro DEPROAS3 correspondeu às 14 estações em 5 perfis perpendiculares à costa na região aproximada daquela do cruzeiro BÚZIOS (Ilustração 1)

Desenho amostral

Em ambos os cruzeiros o desenho amostral, bem como a metodologia aplicada, foram similares. Nos perfis amostrados, em cada estação, uma rossete equipada com um CTD Falmouth era lançada para coleta de dados de temperatura e condutividade. O perfil de densidade originado determinou as profundidades de coleta discretas (de 2 a 4 por estação) com garrafas de Niskin de 10 litros. As amostras de água foram transferidas para galões escuros. Subamostras foram retiradas dos galões para análises de concentração de clorofila-a e para a absorção da luz pelo material particulado, como descrito a seguir.

Concentração de clorofila-a

De cada amostra foram filtrados cerca de 200 a 500 ml, usando-se filtros de fibra de vidro GF/F de 25 mm de diâmetro. Esses, imediatamente após a filtragem, foram colocados em tubos criogênicos e armazenados em nitrogênio líquido. Em laboratório, os filtros ainda congelados foram transferidos para tubos de borosilicato contendo 10 ml de uma mistura previamente resfriada (-10 °C) de acetona 90% e óxido de dimetil sulfato (6:4 em volume, Shoaf e Lium 1976; Stramski e Morel 1990), por pelo menos 24 horas em freezer e ao abrigo da luz. Os tubos utilizados possuem tampas especiais para evitar a evaporação da mistura. Após o

período de extração as amostras foram levadas à temperatura ambiente e a fluorescência dos extratos foi lida em um fluorímetro Turner Designs modelo AU-10 (Holm-Hansen *et al.* 1965) previamente calibrado com padrões de clorofila-*a* pura (Sigma Products), empregando-se a metodologia proposta por Welschmeyer (1994), na qual um conjunto de filtros de emissão e excitação e uma lâmpada especiais (kit Turner 10-040R) são instalados no equipamento. Essa configuração reduz a interferência de feopigmentos e pigmentos acessórios nas leituras (Mantoura *et al.* 1997), e elimina a necessidade de correção das amostras pela acidificação (HCl 10%) e releitura dos extratos.

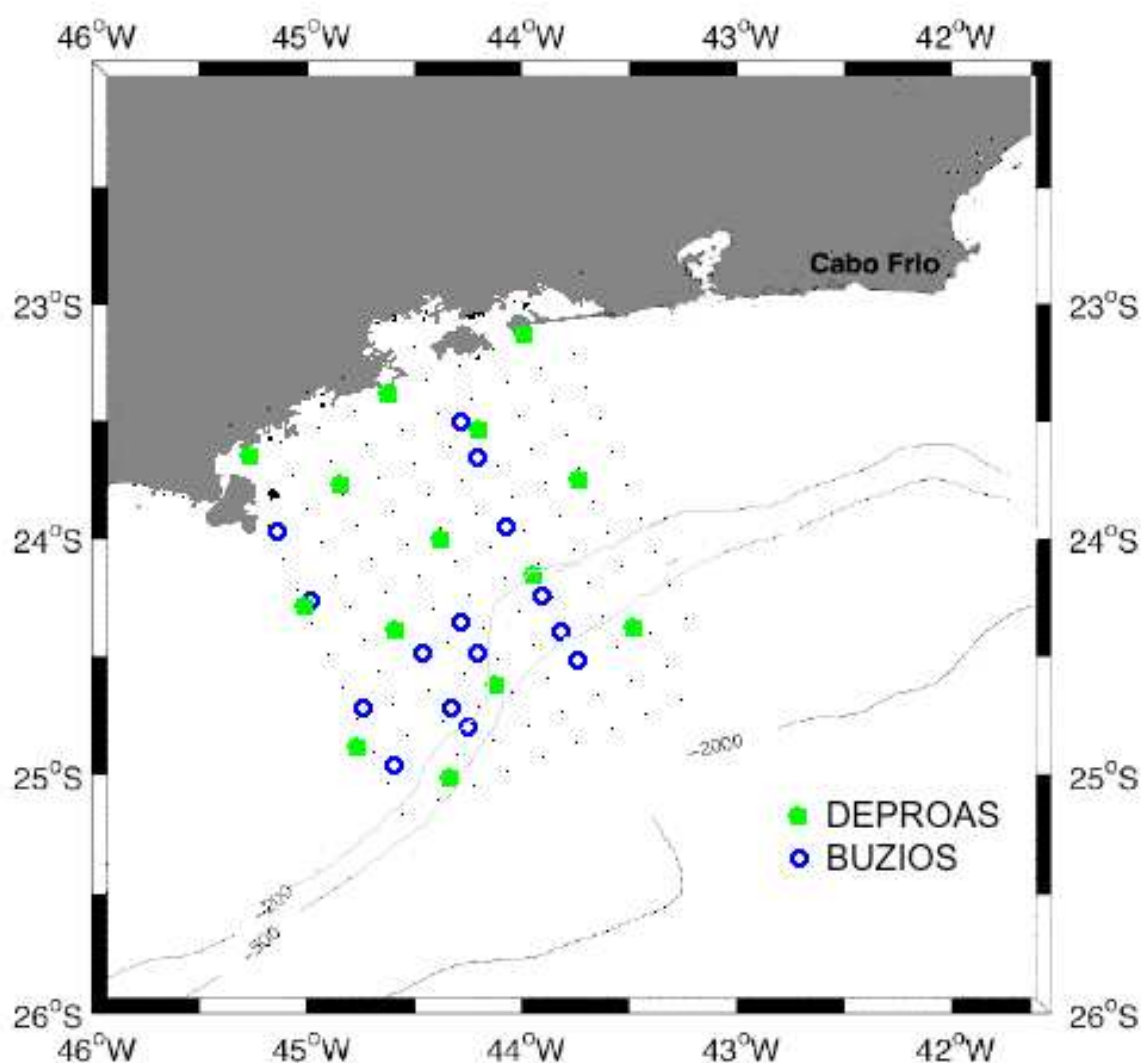


Ilustração 1 - Localização das estações oceanográficas utilizadas no estudo. As estações da base de dados BÚZIOS foram amostradas entre 21 e 27 de janeiro de 2003. As estações da base de dados DEPROAS correspondem apenas aos primeiros 5 perfis executados durante uma campanha de verão (DEPROAS 3), durante os dias 5 a 11 de janeiro de 2002

Absorção da luz pelo material particulado

Para cada amostra foram filtrados de 500 a 2000 ml, usando-se filtros de fibra de vidro GF/F de 25 mm de diâmetro. Esses, imediatamente após a filtragem, foram igualmente armazenados em tubos criogênicos em um camburão contendo nitrogênio líquido. Em laboratório, essas amostras foram descongeladas, mas mantidas em baixa temperatura e abrigadas da luz direta durante as análises. As leituras foram feitas num espectrofotômetro equipado com uma esfera integradora (Hitachi U-3010). As medidas de absorção de luz pelo fitoplâncton no oceano, realizadas em espectrofotômetro, tradicionalmente utilizam o método descrito como 'Quantitative Filter Techinque' (QFT, descrito por Mitchell, 1990), aonde as amostras concentradas em filtros de fibra de vidro tinham suas transmitâncias registradas com os filtros posicionados o mais próximo possível da janela receptora do feixe. Essa metodologia necessita de uma correção para o fator de espalhamento de luz pelo filtro (descrito como "fator beta") e também assume que os valores de absorção de material particulado são nulos para comprimentos de onda acima de 700 nm. Tassan e Ferrari (1995) testaram e demonstraram a eficiência de um novo método chamado de "Transmittance-Reflectance" (TR), posteriormente modificado em Tassan *et al.* (2000) e testado em amostras naturais por Tassan e Ferrari (2002). Esse método emprega leituras da transmitância dos filtros posicionados na entrada e também na saída de uma esfera integradora acoplada ao espectrofotômetro. A aplicação de um modelo permite que através desse método corrija-se de forma mais precisa as perdas de luz por espalhamento pelo filtro, e conseqüentemente se chegue a um comportamento espectral mais próximo ao que ocorre no ambiente natural. Nesse método, a assunção de que os valores de absorção de material particulado são nulos para comprimentos de onda acima de 700 nm não é mais necessária. Porém tal procedimento exige maior tempo e esforço para leitura e análise das amostras e requer que a orientação do filtro com respeito ao feixe de luz do espectro seja mantida o mais constante possível.

Após essas leituras, os pigmentos fotossintéticos contidos nas células retidas pelos filtros foram extraídos pela adição de algumas gotas de Hipoclorito de Sódio 1% e subsequente lavagem com água do mar filtrada, então novas leituras na entrada e na saída da esfera foram realizadas. As leituras anteriores à extração dos pigmentos representam a absorção da luz pelo material particulado total e as leituras feitas após a extração representam a absorção da luz pelos "detritos", ou material

particulado não algal. A absorção da luz pelo fitoplâncton é calculada através da diferença entre ambas após a aplicação do modelo de Tassan e Ferrari (1995) para a conversão das leituras em valores de absorção de luz (m^{-1}) após se levar em conta o volume filtrado e a área ocupada pelas partículas na superfície dos filtros.

Parametrização da absorção da luz pelo fitoplâncton

A curva espectral da absorção da luz pelo fitoplâncton, foi parametrizada de acordo com o descrito em Ciotti *et al.* (2002). Para tanto, o coeficiente de absorção de luz pelo fitoplâncton, ($a_{ph}(\lambda)$, m^{-1}) foi inicialmente normalizada pelo valor de absorção médio computado dentro do espectro do visível (entre 400 e 700 nm), gerando $a_{<ph>}(\lambda)$, sem unidades, seguindo (Garver e Siegel, 1994):

$$a_{<ph>}(\lambda) = \frac{1}{301} \sum_{\lambda=400}^{700} a_{ph}(\lambda) \Delta\lambda, \quad (1)$$

Essa normalização é necessária para a comparação de diferentes concentrações de células de fitoplâncton, que controlam a magnitude geral da curva, e são independentes da concentração de clorofila-*a*. Cada curva de absorção normalizada foi posteriormente decomposta seguindo Ciotti *et al.* (2002) que propõe o seguinte modelo espectral de mistura:

$$a_{ph}(\lambda) = a_{<ph>}(\lambda) \cdot [S_f \cdot \bar{a}_{<pico>}(\lambda)] + [(1 - S_f) \cdot \bar{a}_{<micro>}(\lambda)] \quad (2)$$

onde $\bar{a}_{<pico>}(\lambda)$ e $\bar{a}_{<micro>}(\lambda)$ são “vetores básicos” ou curvas espectrais normalizadas, como mostrado pela equação (1), de absorção de luz correspondentes ao menor (picoplâncton) e ao maior (microplâncton) tamanho de célula, respectivamente. O vetor picoplâncton utilizado aqui corresponde ao valor descrito em Ciotti e Bricaud (submetido). O parâmetro S_f no modelo espectral de mistura representa a contribuição relativa do micro ou do picoplâncton e varia gradualmente entre os valores máximos 0 e 1, de forma que quando S_f é igual a 1 a curva espectral representa dominância do picoplâncton, e quando S_f é igual a 0 a curva espectral representa dominância do microplâncton. Assim, a decomposição da curva de absorção medida usando a equação 2, gera parâmetros para a descrição

da variabilidade espacial da absorção da luz pelo fitoplâncton: $a_{<ph>}(\lambda)$ representando sua magnitude, e S_f representando seu comportamento espectral.

Parametrização da absorção da luz pelo material particulado não algal (detritos)

O comportamento espectral da absorção da luz pelos detritos é bem conhecido, representado por um decréscimo exponencial da absorbância com o aumento do comprimento de onda. As curvas de absorção de luz pelos detritos podem ser parametrizadas de acordo com a equação 3, fornecida em Bricaud *et al.*, (1981):

$$a_{\text{modc}}(\lambda) = a_{\text{modc}}(\lambda_0)^{(S(\lambda-\lambda_0))} \quad (3)$$

onde λ (nm) é o comprimento de onda, $a_{\text{modc}}(\lambda_0)$, m⁻¹, é o valor da absorção medida em um comprimento de onda de referência e S (nm⁻¹) que é o expoente do decaimento dos valores de absorção de luz com λ .

A magnitude de referência, $a_{\text{modc}}(\lambda_0)$, é geralmente estabelecida para um comprimento de onda entre 400 e 443 nm. No presente estudo foi assumido o valor de 443 nm por consistência com a literatura disponível, e a equação (3) foi modificada segundo:

$$a_{\text{modc}}(\lambda) = A + a_{\text{modc}}(\lambda_0)^{(S(\lambda-\lambda_0))} \quad (4)$$

onde r A descreve a inclusão do valor da absorção em 750 nm de acordo com o método TR descrito anteriormente.

Comparação dos métodos

Antes da análise dos resultados, realizamos testes para a verificação de diferenças entre o método tradicional (QFT) e o método aqui empregado (TR), apenas para os dados do cruzeiro BÚZIOS. Uma vez que o método TR demanda maior tempo, testes estatísticos foram empregados entre os valores computados para a magnitude e o comportamento espectral, tanto para o fitoplâncton como para os detritos, obtidos pelos dois diferentes métodos (QFT e TR). Um teste t para observações pareadas demonstrou que, a um nível de significância de 5%, ambos os comportamentos espectrais (S_f do fitoplâncton e S dos detritos) e os valores de magnitude dos detritos (ad_{443}) apresentaram resultados diferentes, enquanto que

os valores de magnitude do fitoplâncton ($\langle \text{aph} \rangle$) não foram significativamente distintos (Tabela 1). Acreditamos que essa diferença é resultado principalmente da melhor correção do alto grau de espalhamento da luz pelos filtros GF/F, proporcionada no método TR para amostras dessa região (Ciotti e Gaeta, em preparo). Portanto, nos resultados e discussões do presente trabalho são apresentados apenas dados obtidos através do método TR.

Tabela 1 - Análise estatística para comparação dos métodos QFT e TR para medidas de absorção de luz do material particulado

teste t para observações pareadas entre os valores dos métodos TR e QFT				
parâmetro	Sf	S	$\langle \text{aph} \rangle$	ad_443
média da diferenças	0,031277	0,0006006	0,0000493	0,0058347
variância das diferenças	0,004435	0,0000015	0,00000174	0,0000301
t calculado	2,738564	2,8562845	0,21764039	6,2027215
t crítico tabelado com nível de significância de 5% e 33 g.l.				2,03451691

Valores de t calculado maiores que o t crítico tabelado indicam diferença significativa entre os métodos para o parâmetro analisado.

Determinação da estrutura vertical da coluna de água

Os dados de temperatura e salinidade derivados pelos perfis verticais com o CTD, durante ambos os cruzeiros, foram analisados pelo grupo do Laboratório de Dinâmica Oceânica (LaDO) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Os dados de densidade e anomalia específica (sigma-t) foram gentilmente fornecidos por Rafael Augusto de Mattos (equipe LaDO), com uma resolução vertical de 1 metro. Esses dados foram plotados e para cada estação, a estrutura vertical da coluna de água foi visualmente dividida em três estratos, de acordo com os perfis de densidade em:

- camada de mistura,
- picnoclina, e
- região abaixo da picnoclina.

A camada de mistura foi determinada por uma ausência (ou mínima variação) dos valores de sigma-t ($\sigma-t$, g/cm³) nos primeiros metros a partir da superfície, enquanto que a picnoclina foi determinada por uma região de constante gradiente crescente de densidade, a partir do ponto de intersecção com o fundo da camada de mistura até a intersecção com a superfície da próxima camada de homogeneização (região abaixo da picnoclina). As amostras de água discretas coletadas em cada estação foram então classificadas de acordo com a divisão da coluna de água proposta.

Estimativa da profundidade da Zona Eufótica

Tradicionalmente a profundidade da zona eufótica é estimada através da utilização do Disco de Secchi ou por instrumentos que medem a intensidade luminosa verticalmente na coluna de água. Como o cruzeiro da campanha BÚZIOS não dispunha desses equipamentos, optamos por estimar a zona eufótica pela equação fornecida por Morel e Maritorena, 2001 que a estima como uma função única da concentração de clorofila-*a* da superfície:

$$K_d(\lambda) = K_w(\lambda) + X(\lambda)cla^{-e(\lambda)} \quad (5),$$

Onde, para cada comprimento de onda λ (nm), K_d (m⁻¹) é o coeficiente de atenuação vertical da luz, K_w é o coeficiente de atenuação vertical da luz da água pura e X é uma constante, enquanto cla é a concentração de clorofila-*a* (mg/m³). Aqui, assumimos que K_d em 490 nm é igual ao K_d PAR (integrado entre 400 e 700nm), e consideramos a profundidade da zona eufótica como a profundidade aonde a intensidade luminosa é 1% daquela medida em superfície. Assim:

$$E_{uz} = \frac{-\ln(0,01)}{K_d(490)} \quad (6)$$

sendo E_{uz} a profundidade da zona eufótica em metros.

4 – Resultados e Discussão

Comparação entre as bases de dados

A classificação dos pontos discretos amostrados de acordo com a estrutura vertical da coluna de água, resultou que, para o cruzeiro BÚZIOS, nas 15 estações temos 19 pontos na camada de mistura, 11 pontos na picnoclina e 4 pontos abaixo da picnoclina (total de 34 amostras). Já para o cruzeiro DEPROAS, temos, nas 14 estações amostradas, 13 pontos na camada de mistura, 12 pontos na picnoclina e 6 pontos abaixo da picnoclina (total 31 amostras). Assim, nossa base de dados completa consiste em 65 amostras, sendo 32 na camada de mistura, 23 na picnoclina e 10 abaixo da picnoclina.

Para comparação dos parâmetros e variáveis obtidos em cada uma das 2 bases de dados, realizou-se um Teste *t* para observações independentes com os valores médios obtidos em toda a coluna de água (Tabela 2), e um Teste *t* para observações independentes apenas com os valores de superfície (obtidos dentro da camada de mistura) (Tabela 3 – demonstrando apenas os parâmetros com diferença significativa entre os valores superficiais das 2 campanhas). Através da média dos valores obtidos em toda a coluna de água, não foram observadas diferenças significativas para a magnitude de absorção do fitoplâncton nem para o comportamento espectral da mesma pelos detritos (S). Porém ao considerar apenas os valores superficiais (dentro da camada de mistura) o parâmetro S foi significativamente maior no DEPROAS (Tabela 3). Já a magnitude de absorção de luz dos detritos e o fator de tamanho Sf (que determina o comportamento espectral do fitoplâncton) apresentaram diferenças significativas tanto quando considerada toda a coluna de água (vide Tabela 2) como apenas superficialmente (Tabela 3).

As variáveis, concentração de clorofila-*a*, e profundidades médias da camada de mistura, da picnoclina e da zona eufótica, apesar de apresentarem valores médios bem diferentes entre as duas campanhas, não demonstraram diferenças significativas entre as campanhas devido à alta variabilidade intra-campanhas (vide valores de desvio padrão, entre parênteses na Tabela 2).

Tabela 2 - Comparação de parâmetros e variáveis entre as 2 bases de dados através de teste *t* para amostras independentes

parâmetros/variáveis	DEPROAS	BUZIOS	T - calculado	T - tabelado
[cla]	0.416 (0.686) (n=31)	1.20 (4.31) (n=34)	1,001	1,999
ad_443	0.00496 (0.006) (n=31)	0.01670 (0.015) (n=34)	4,049	1,999
S	0.01347 (0.0046) (n=31)	0.01222 (0.0021) (n=34)	1,439	1,999
<aph>	0.00747 (0.0097) (n=31)	0.01194 (0.0282) (n=34)	0,839	1,999
Sf	0.552 (0.147) (n=31)	0.771 (0.201) (n=34)	4,975	1,999
prof.cam.mist.	11 (7.029) (n=11)	19.14 (13.12) (n=14)	1,85	2,07
prof. picnoclina	14.583 (6.11) (n=12)	23.933 (17.71) (n=15)	1,74	2,06
prof. zona eufótica	67.176 (33.72) (n=13)	57.814 (13.25) (n=15)	0,993	2,06

Valores médios dos parâmetros ad_443 = magnitude de absorção de luz pelos detritos (m^{-1}), S = comportamento espectral dos detritos (nm^{-1}), <aph> = magnitude de absorção de luz pelo fitoplâncton (m^{-1}), Sf = comportamento espectral do fitoplâncton (adimensional); e das variáveis [cla] = concentração de clorofila-a (mg/m^3), profundidade da camada de mistura (m), profundidade da picnoclina (m), e profundidade da zona eufótica (m). (n) = número de amostras utilizadas no cálculo do valor médio. Números entre parênteses ao lado do valor médio representam valores de desvio padrão respectivos. T – tabelado é o valor crítico para o qual valores de T – calculados superiores indicam diferença significativa ao nível de significância de 5%. Valores em negrito indicam diferença significativa entre as 2 campanhas, quando considerada toda a coluna de água.

Tabela 3 – Comparação dos valores superficiais (dentro da camada de mistura) dos parâmetros que demonstraram diferenças significativas entre as 2 bases de dados através de teste t para amostras independentes

parâmetros (superfície)	DEPROAS	BUZIOS	T - calculado	T - tabelado
ad_443	0.00391 (0.003) (n=13)	0.01922 (0.014) (n=19)	3,853	2,04
S	0.01358 (0.0033) (n=13)	0.01120 (0.0016) (n=19)	2,704	2,04
Sf	0.587 (0.119) (n=13)	0.762 (0.142) (n=19)	3,641	2,04

Valores médios de superfície (computados dentro da camada de mistura) dos parâmetros ad_443 = magnitude de absorção de luz pelos detritos (m^{-1}), S = comportamento espectral dos detritos (nm^{-1}), Sf = comportamento espectral do fitoplâncton (adimensional). (n) = número de amostras utilizadas no cálculo do valor médio. Números entre parênteses ao lado do valor médio representam desvios padrão respectivos. T – tabelado é o valor crítico para o qual valores de T – calculados superiores indicam diferença significativa ao nível de significância de 5%.

Variações com as características físico-químicas e profundidade local

Como observado na Ilustração 1, a distribuição das estações amostradas segue perfis perpendiculares à costa. Para diferenciar os valores que apresentam maiores ou menores participações de águas com influência continental, apresentamos os resultados de algumas variáveis em relação à profundidade local, que indica para a região, aproximadamente a distância da costa (Ilustração 2). A distribuição da salinidade mostra um aumento com a profundidade local, resultado da presença de AT sobre o talude e de águas com maior influência continental mais próximas à costa. Nota-se uma maior amplitude de valores de salinidade para o cruzeiro DEPROAS, parcialmente resultado de um maior número de estações sobre o talude (Ilustração 1). A distribuição da temperatura ilustra, para ambos os cruzeiros, a presença da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma média. Todavia, a ACAS se encontrou mais ao Norte durante o cruzeiro DEPROAS. A concentração de clorofila-a e a absorção de luz pelo fitoplâncton mostraram tendências similares, com brusca diminuição de valores com a distância da costa, e com os maiores valores em locais de influência da ACAS.

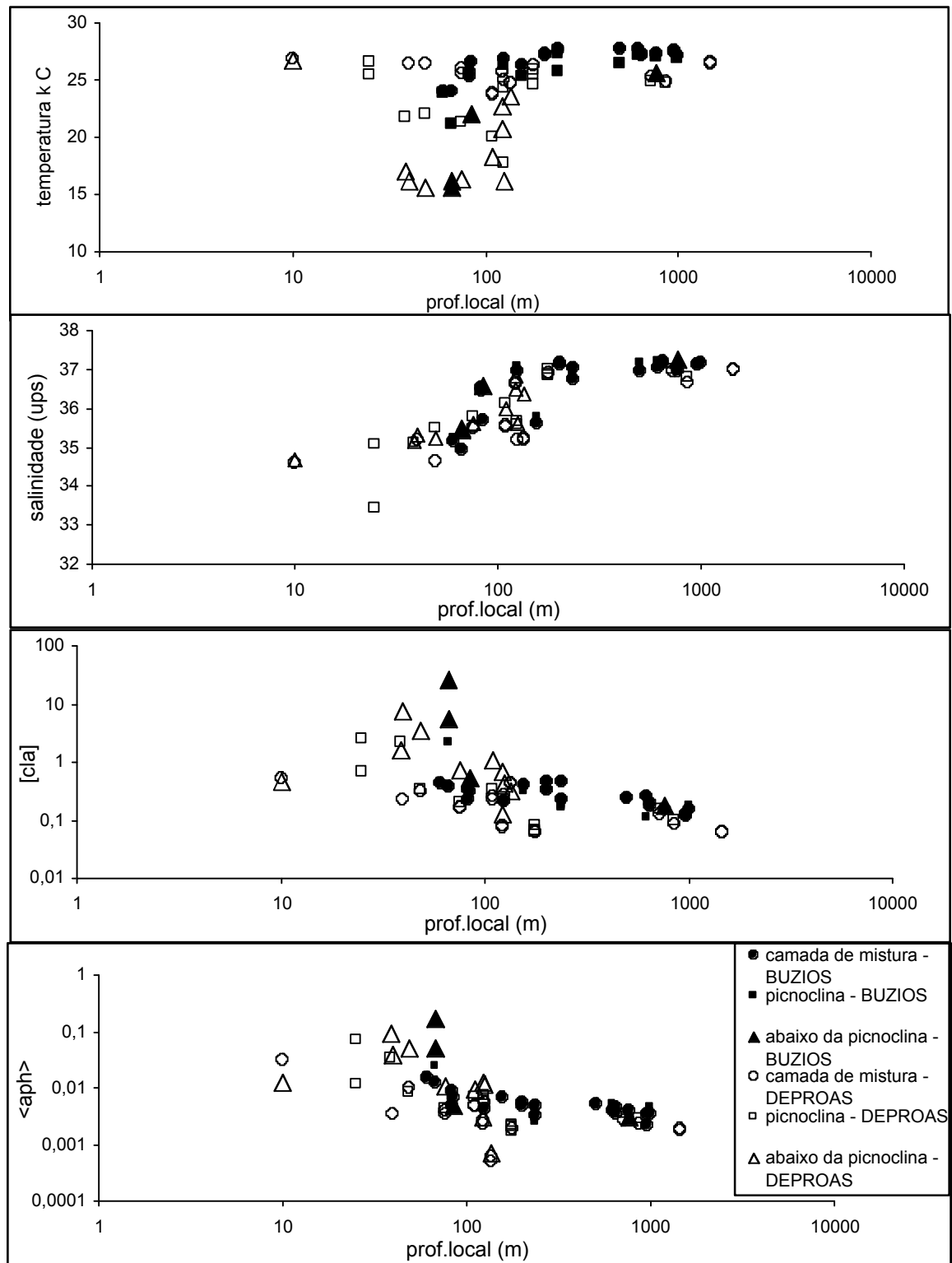


Ilustração 2 – Relação das variáveis físico-químicas temperatura (°C) e salinidade (ups); da concentração de clorofila-a ([cla], em mg/m^3); e do parâmetro <aph> (magnitude de absorção de luz do fitoplâncton, em m^{-1}), com a distância da costa (indicada pela profundidade local, em metros). Note a escala logarítmica no eixo x (prof.local) e nos eixos de [cla] e de <aph>

Os parâmetros que descrevem as magnitudes de absorção de luz dos constituintes do material particulado, ou seja, $\langle \text{aph} \rangle$ para o fitoplâncton (valor médio da absorção entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm) e ad_{443} para os detritos (valor de referência em 443 nm) foram comparados em diagramas da temperatura como uma função da salinidade (Diagramas T-S, Ilustração 3), que permitem observar que os maiores valores das magnitudes dos detritos ocorrem na camada de mistura ou na pycnoclina das estações mais costeiras, demonstrando uma forte influência de aporte de águas continentais, que menos densas, ocupam a superfície, podendo se estender até longas distâncias da costa dependendo da magnitude do aporte e das condições oceanográficas locais.

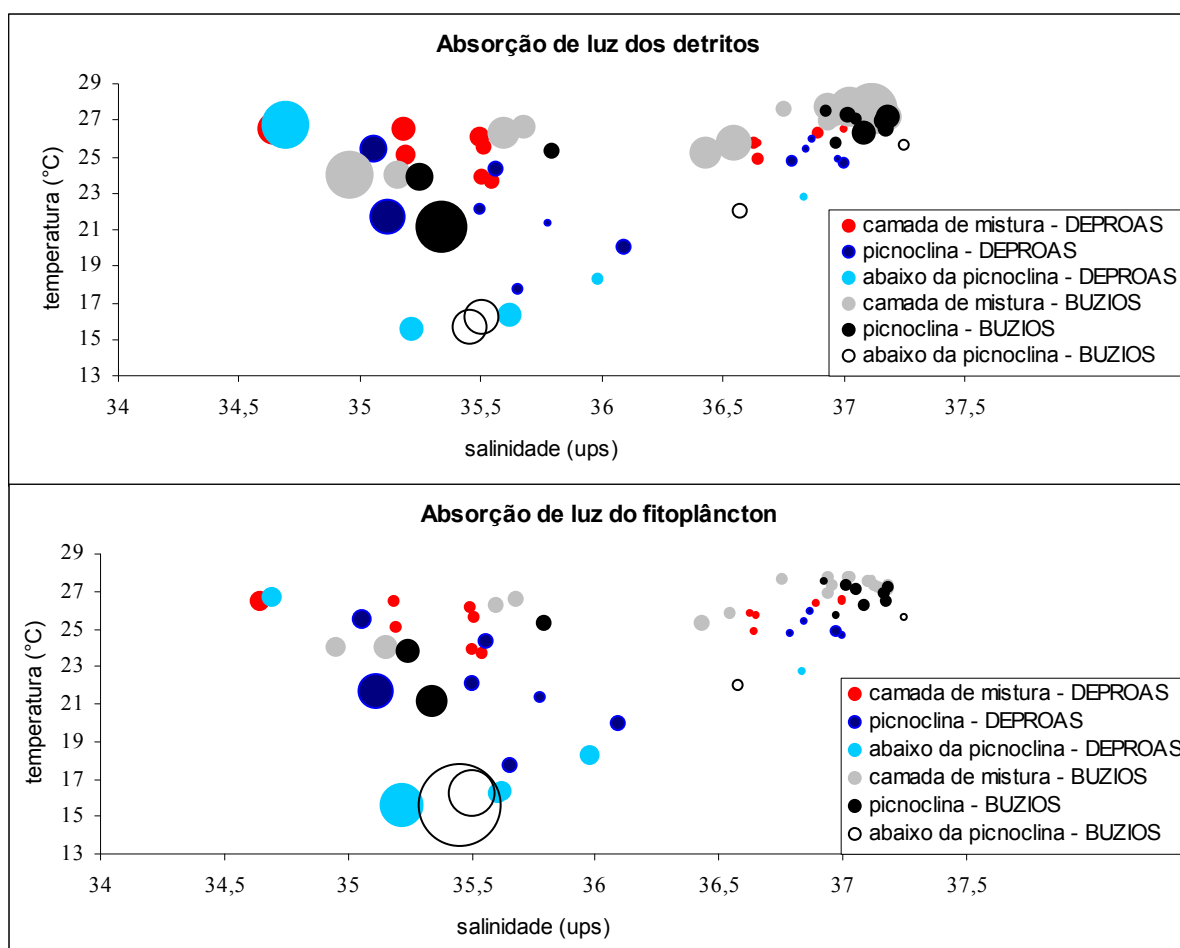


Ilustração 3 – Diagramas T-S ilustrando os valores médios de absorção (m^{-1}) de luz pelos detritos (acima) e pelo fitoplâncton (abaixo), em cada ponto amostrado. Os valores absolutos de cada variável são proporcionais ao tamanho das esferas. Note que cada gráfico tem sua própria escala ajustada de acordo com os valores mínimos e máximos das variáveis

Os dados ilustram uma participação importante dos detritos no cruzeiro BÚZIOS, em superfície, na região de influência direta da AT, o que não é observado

para o DEPROAS e nem tão pouco esperado pela distância dos aportes continentais. Estudos para essa região da plataforma mostraram uma baixa participação dos detritos sob a influência de água tropical (Ciotti e Gaeta, em prep.); assim, espera-se que, nesse caso, a produção desses detritos seja provavelmente local.

Os valores da magnitude da absorção de luz pelo fitoplâncton foram maiores na picnoclina e na região abaixo da picnoclina para o DEPROAS, e apresentaram um pico destacado durante o cruzeiro BÚZIOS na camada abaixo da picnoclina. Esse pico refere-se a uma estação próxima à costa sobre a plataforma continental interna, do perfil realizado na direção da Ilha de São Sebastião, numa profundidade de 40 metros. Em ambos os cruzeiros, os maiores valores de absorção de luz pelo fitoplâncton foram observados em águas com influência de ACAS. Gaeta (1999) observou intrusões de ACAS semelhantes nos verões de 1993 e 1994 na região de plataforma adjacente à Ilha de São Sebastião e sugeriu uma correlação entre as mesmas e um meandramento ciclônico da Corrente do Brasil se estendendo desde a plataforma externa até a plataforma interna. Os meandramentos ciclônicos potencializam a entrada de nutrientes presentes na ACAS para a zona eufótica através do mecanismo de ressurgência induzido.

Variabilidade com a estrutura vertical da coluna de água

A influência da estrutura vertical da coluna de água sobre os quatro parâmetros bio-ópticos aqui descritos (magnitudes e comportamentos espectrais da absorção da luz pelo fitoplâncton e pelos detritos, ou seja, $\langle \text{aph} \rangle$, S_f , ad_{443} e S) e também sobre a variável concentração de clorofila-*a*, foi inicialmente investigada através de uma análise de variância para amostras com números de repetições diferentes (Tabela 4). As análises estatísticas foram conduzidas para as bases BÚZIOS e DEPROAS independentemente, e também para a totalidade das amostras. Quando ocorreram variações significativas entre as amostras de diferentes estratos verticais (camada de mistura, picnoclina e abaixo da picnoclina) a um nível de significância de 5%, o teste de Tukey foi aplicado para a determinação de como e quais camadas diferiam entre si.

Não houve diferenças significativas entre as 3 camadas classificadas para os parâmetros Sf (comportamento espectral de absorção de luz do fitoplâncton) e ad_443 em nenhuma base de dados isoladamente ou para a totalidade das amostras. Já a magnitude de absorção do fitoplâncton, <aph>, mostrou-se, durante o cruzeiro BÚZIOS, maior na camada abaixo da picnoclina em relação às outras duas camadas superiores, porém a diferença não foi significativa entre a picnoclina e a camada de mistura. Considerando-se apenas os dados do DEPROAS, a magnitude de absorção do fitoplâncton (<aph>) mostrou-se significativamente diferente apenas entre a camada de mistura e a camada abaixo da picnoclina, com os valores de absorção maiores nessa última. Quando as duas bases de dados foram combinadas, os resultados observados durante o cruzeiro BUZIOS se repetiram. As análises estatísticas para a variável concentração de clorofila-a forneceram resultados idênticos ao descrito para <aph>.

Tabela 4 - Diferença da concentração de clorofila-a e dos parâmetros de absorção de luz do fitoplâncton e dos detritos, entre os 3 estratos da coluna de água, em cada campanha e em toda a base de dados

parâmetro / variável	DEPROAS	BUZIOS	Todos os dados
<aph>	F > M	F > (P = M)	F > (P = M)
Sf	-----	-----	-----
ad_443	-----	-----	-----
S	-----	(F = P) > M	-----
[cla]	F > M	F > (P = M)	F > (P = M)

F = Fundo (camada abaixo da picnoclina). P = picnoclina. M = camada de mistura. Parâmetros: <aph> = magnitude de absorção do fitoplâncton (m^{-1}), Sf = comportamento espectral do fitoplâncton (adimensional), ad_443 = magnitude de absorção dos detritos (m^{-1}), S = comportamento espectral dos detritos (nm^{-1}). Variável: [cla] = concentração de clorofila-a (mg/m^3). Regiões com risco pontilhado representam que não houve diferença significativa constatada para o parâmetro ou variável na respectiva base de dados analisada. A diferença entre as 3 camadas foi testada estatisticamente através de uma análise de variância para amostras com números de repetições diferentes; quando constatada a diferença foi aplicado o teste de Tukey para a determinação de como e quais camadas diferiam entre si

O parâmetro que descreve o comportamento espectral da absorção de luz dos detritos foi apenas diferente entre as 3 camadas para a base de dados BÚZIOS, com valores significativamente menores na camada de mistura em relação tanto com a picnoclina como com a região abaixo da picnoclina, sendo que estas duas últimas não apresentam diferença significativa entre si. Essa diferença foi eliminada quando as duas bases de dados foram combinadas.

Apesar de ainda existirem poucos trabalhos descrevendo o comportamento espectral do material particulado não algal (Babin e Stramski, 2002; Babin *et al.*, 2003), se considera, em geral, que S , em regiões oceânicas varia muito pouco (Bricaud *et al.*, 1998). Todavia, o valor de S , de acordo com a parametrização proposta, tende a aumentar com uma maior contribuição de partículas inorgânicas na coluna de água (Bukata, 1995). Esse resultado está relacionado com a grande contribuição dos detritos em regiões com águas mais salinas durante o cruzeiro BÚZIOS.

Variabilidade da absorção da luz pelo fitoplâncton

Como descrito anteriormente, a absorção da luz pelo fitoplâncton é influenciada por diversos fatores, que provocam, por exemplo, o aumento de sua magnitude, como o constatado na camada de profundidade inferior do presente estudo. Dentre esses fatores estão o sombreamento intracelular dos pigmentos ("empacotamento dos pigmentos" descrito por Duysens, 1956) e a composição e concentração de pigmentos (ver Bricaud *et al.* 1995 e referências), que são função dos grupos taxonômicos presentes, da disponibilidade e concentração de nutrientes e da disponibilidade de luz no ambiente.

Através do diagrama T-S combinado aos valores de concentração de clorofila-a (Ilustração 4), nota-se claramente que a concentração de clorofila-a é o fator primário determinando a magnitude de absorção do fitoplâncton nos dados analisados, fato bem conhecido e facilmente observado em nossa base de dados ao compararmos o diagrama TS combinado com $\langle \text{aph} \rangle$ na Ilustração 3.

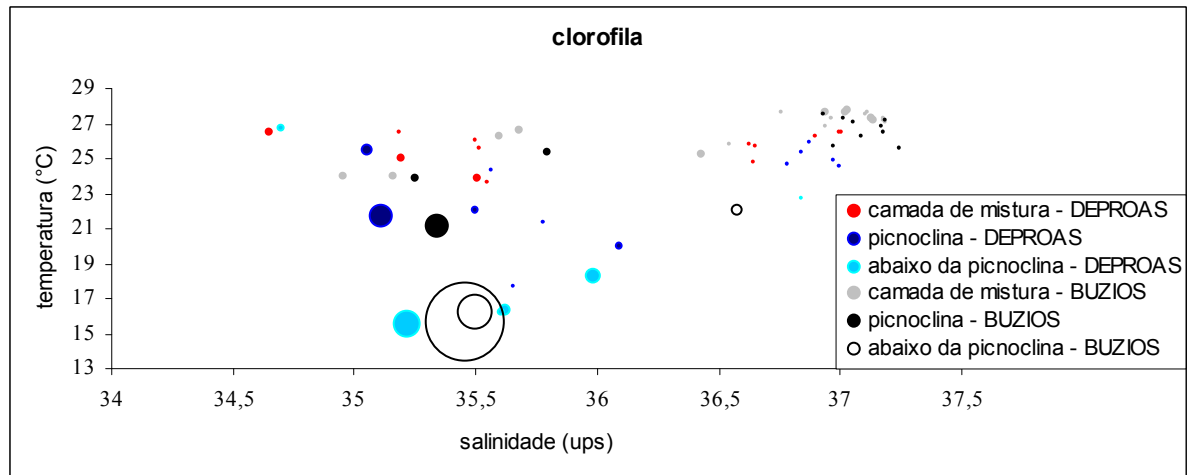


Ilustração 4 – Diagrama T-S ilustrando os valores de concentração de clorofila-a (mg/m^3), em cada ponto amostrado; os valores absolutos são proporcionais ao tamanho das esferas

Essa grande influência da clorofila na absorção de luz do fitoplâncton pode ser notada também na Ilustração 5 que relaciona a magnitude ($\langle \text{aph} \rangle$) e a concentração de clorofila-a.

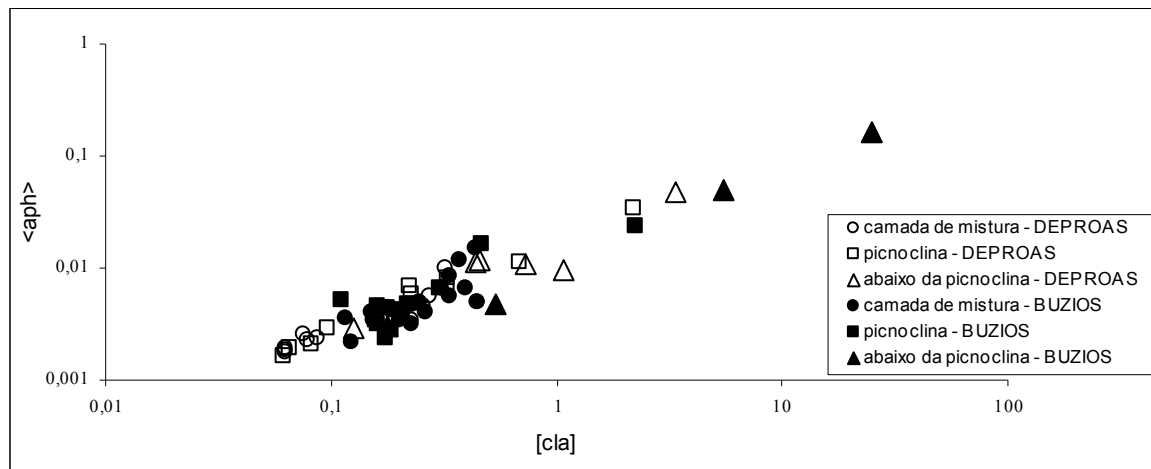


Ilustração 5 – Relação entre a magnitude de absorção de luz do fitoplâncton ($\langle \text{aph} \rangle$ em m^{-1}) e a concentração de clorofila-a ($[cla]$ em mg/m^3). Note a escala logarítmica em ambos os eixos

As análises estatísticas aplicadas com a finalidade de comparar tanto os diferentes estratos na coluna de água como as diferentes bases de dados mostram claramente que os maiores valores de clorofila-a se encontram na camada abaixo da picnoclina. Essa região subsuperficial de clorofila-a máxima já é bastante conhecida em regiões oceânicas estratificadas (Cullen, 1982), resultado do estabelecimento de camadas mais profundas, potencialmente contendo massas de água ricas em nutrientes, no interior da zona eufótica. A presença da ACAS em subsuperfície

durante o verão nessa região de estudo, é uma forçante importante para essa condição.

A relação entre a concentração de clorofila-a e a absorção de luz do fitoplâncton em um comprimento de onda específico, todavia (Ilustração 6), mostra uma dispersão de pontos mais elevada, indicando que a concentração deste pigmento não é o único fator controlando a absorção espectral da luz em bandas determinadas. Bricaud *et al.* (1995) propõem uma equação simples que determina a absorção de luz do fitoplâncton em cada comprimento de onda na faixa de luz visível usando apenas a concentração de clorofila-a como variável independente. Os valores calculados a partir dessa equação estão apresentados no gráfico na forma de uma reta. Quando as concentrações de clorofila-a são baixas, nota-se uma grande dispersão da absorção em relação ao esperado pela equação simples, sugerindo que outros fatores têm importância.

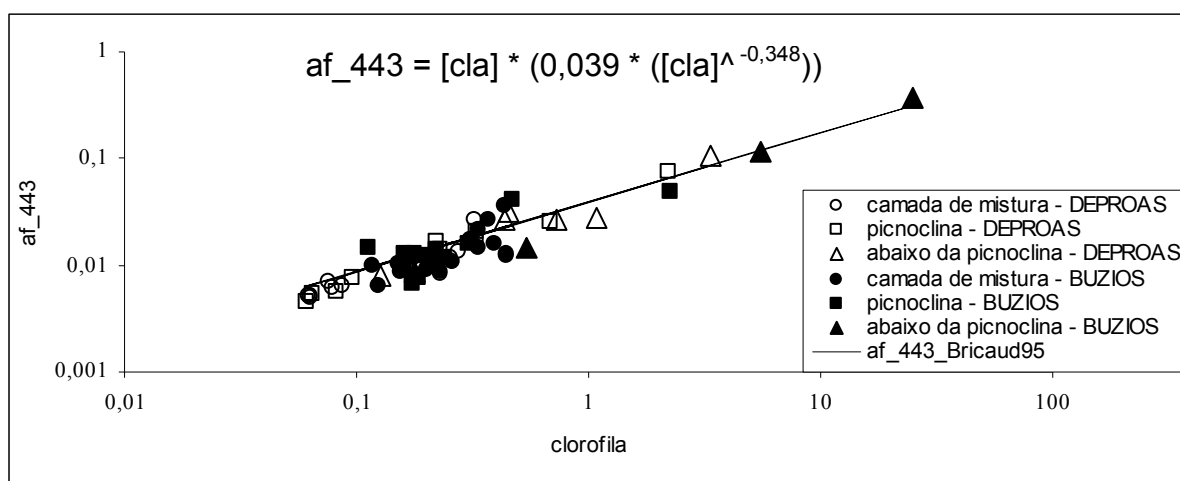


Ilustração 6 – Relação entre absorção de luz do fitoplâncton em 443nm (m^{-1}) e concentração de clorofila-a (mg/m^3), dentro das 3 camadas de profundidade; a reta representa os valores esperados segundo Bricaud *et al.* (1995); (Notar a escala logarítmica)

Como descrito anteriormente, o parâmetro S_f pode dar uma idéia do tamanho dominante dos organismos presentes. A tendência geral para os ambientes marinhos é de um aumento do tamanho celular (e conseqüente diminuição do valor de S_f , Ciotti *et al.*, 2002) quando a concentração de clorofila-a aumenta (Yentsch e Phinney, 1989). Para nossa base de dados, observamos uma grande variação na relação entre S_f e concentração de clorofila-a. (Ilustração 7), apesar de uma tendência clara existir com a profundidade local (Ilustração 8), indicando a

predominância de organismos maiores nas regiões mais costeiras e de organismos menores nas regiões oceânicas.

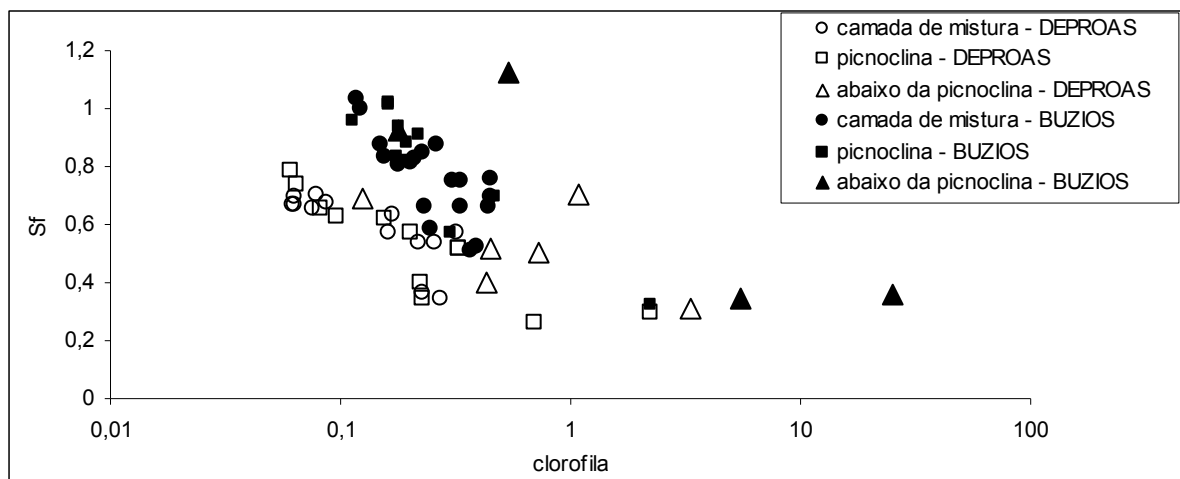


Ilustração 7 – Relação entre o parâmetro que relaciona tamanho dominante do fitoplâncton presente nas amostras (S_f) e a concentração de clorofila-*a* (mg/m^3), dentro das 3 camadas de profundidade, das duas campanhas oceanográficas realizadas

Observamos uma diferença significativa entre os valores de S_f estimados em cada cruzeiro (ver Tabela 2), sendo que os dados durante BÚZIOS indicam a dominância de espécies de tamanho bem menor quando comparados com os dados do DEPROAS, sugerindo condições mais produtivas (ou eutróficas) durante o DEPROAS. Porém, a diferença entre as camadas para cada cruzeiro ou para as bases de dados combinadas, não é estatisticamente significativa (Tabela 4). É importante lembrar, todavia, que o número de dados apresentando valores elevados (i.e., concentrações de clorofila-*a* acima de $1\text{-}2 \text{ mg}/\text{m}^3$) é bastante pequeno, e por isso, eles tendem a forçar a variância geral dos dados.

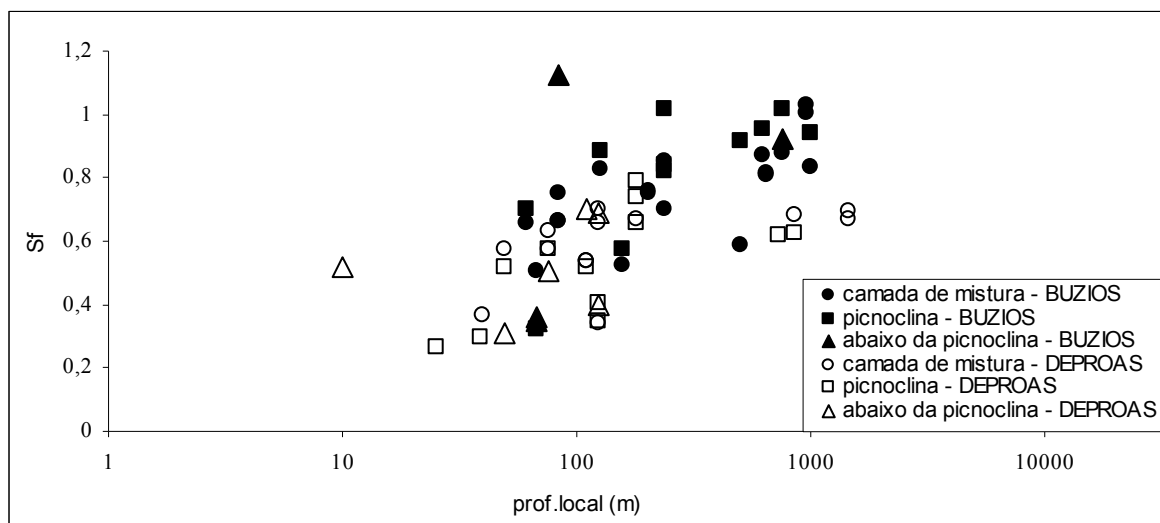


Ilustração 8 - Relação entre o parâmetro que relaciona tamanho dominante do fitoplâncton presente nas amostras (S_f) e a profundidade local (m) que indica aproximadamente a distância da costa

O fator de tamanho S_f pode ser também influenciado pela dinâmica das massas de água presentes na coluna d'água, como pode ser observado no gráfico que demonstra a relação entre S_f e a profundidade da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na coluna d'água (Ilustração 9). A profundidade da ACAS foi estimada através dos perfis hidrográficos de cada estação fornecidos pelos dados do CTD, sendo identificada com valores de temperatura da água inferiores a 20°C e de salinidade entre 34,6 e 36 ups (Silveira *et al.*, 2000).

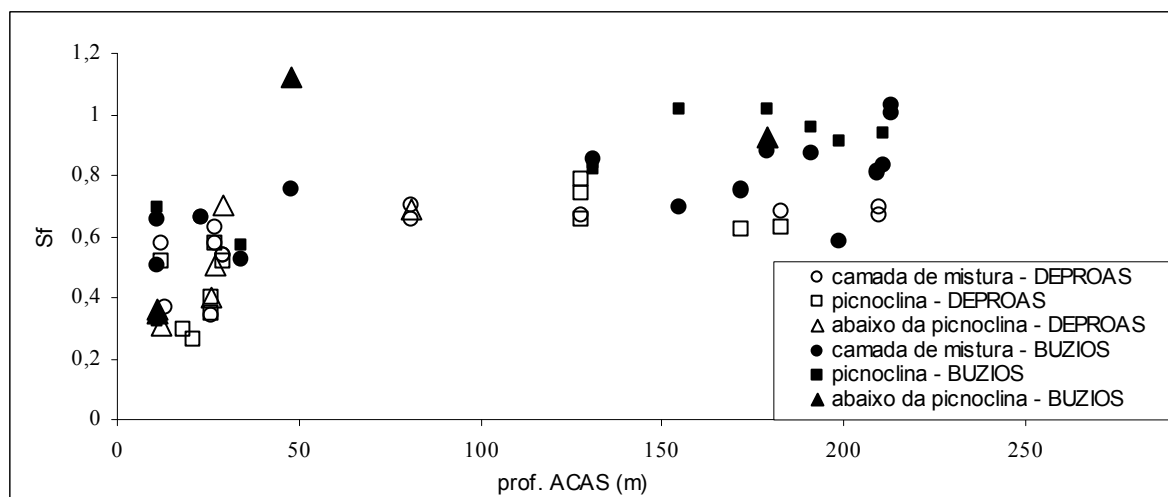


Ilustração 9 – Relação entre a profundidade (em metros) da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na coluna de água de cada estação amostrada, com o parâmetro S_f , “fator de tamanho” que indica o tamanho dominante dos organismos fitoplanctônicos

Em geral, quando mais próxima à superfície, a ACAS parece favorecer o crescimento de organismos maiores. Assim, os dados sugerem que as intrusões de ACAS potencializam o desenvolvimento de comunidades fitoplanctônicas distintas na estrutura vertical da coluna de água.

A variabilidade observada nos valores de $\langle \text{aph} \rangle$ e de S_f entre os cruzeiros pode ser tentativamente explicada pela relação entre a profundidade da ACAS (localizada no perfil hidrográfico de cada estação) e a profundidade local, que pode ser usada como uma estimativa da distância da costa, considerando-se a escala espacial do estudo e a presença das isóbatas, principalmente as de 200, 500 e 1000 metros.

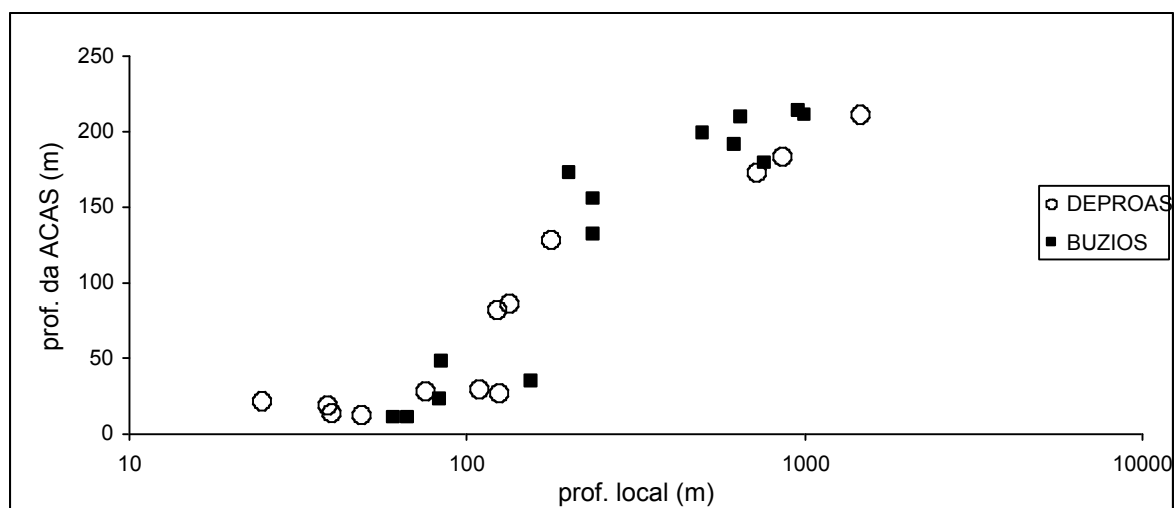


Ilustração 10 – Relação entre a profundidade (em metros) da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), e a profundidade local (em metros) de cada estação amostrada, como uma indicativa da distância da costa. Note escala logarítmica no eixo x (prof.local)

A base de dados do cruzeiro oceanográfico BÚZIOS apresentou um valor médio da profundidade da ACAS maior (127,6m) do que o DEPROAS (77,4m). É importante lembrar, todavia, que existem diferenças importantes: a ACAS estava mais ao norte durante o cruzeiro DEPROAS, e esse também mostra possuir estações com maior influência de ACAS sobre o talude, o que não ocorreu durante BÚZIOS. Apesar dessas diferenças, para a região como um todo a profundidade da ACAS parece ter uma relação com a profundidade local (Ilustração 10). Portanto, imagina-se que a ACAS alcança profundidades mais próximas à superfície sobre a plataforma continental e em regiões mais próximas à costa, provavelmente devido à influência do atrito da massa de água com o fundo.

Variabilidade da absorção da luz pelos detritos

A maior diferença observada para os parâmetros que descrevem a magnitude e o comportamento espectral da absorção de luz pelos detritos se refere ao cruzeiro BÚZIOS, nas estações com influência direta da Água Tropic (AT). Os valores de magnitude são bastante elevados (Ilustração 11) em águas de maior salinidade (veja Ilustração 3).

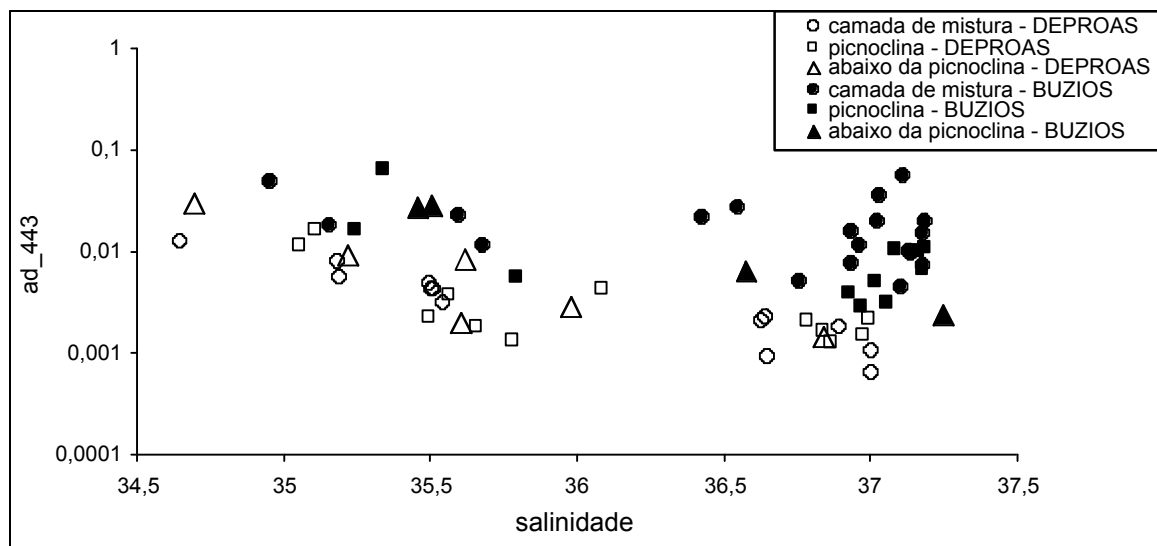


Ilustração 11 – Relação do parâmetro ad_{443} (valor de absorção de luz no comprimento de onda 443 nm, em m^{-1}) que determina a magnitude da absorção dos detritos, com a salinidade (ups); (Notar escala logarítmica no eixo y (ad_{443}))

A presença de altas concentrações de detritos em regiões distante dos aportes continentais sugere uma produção local, e também que esse material é provavelmente orgânico (evidenciado pelos baixos valores de S, principalmente em superfície). Para explicar essa produção local, podemos assumir que o cruzeiro BÚZIOS se deu durante uma possível situação de pós-floração algal. Os dados referentes ao parâmetro Sf são maiores em BÚZIOS (Fig. 11), indicando predominância de organismos menores que costumam dominar a comunidade fitoplanctônica em situações mais oligotróficas. Um outro fator que indica uma possível situação de pós-floração algal em BÚZIOS, é a razão entre a profundidade da camada de mistura e a profundidade da zona eufótica (calculada segundo Morel e Maritorena, 2001) e sua relação com o fator de tamanho celular Sf (Ilustração 12). Podemos observar que quão maiores são os valores dessa razão (i.e. menos luz disponível na camada de mistura) menores são os organismos dominantes. Os dados observados durante BÚZIOS sugerem uma situação que sucedeu uma

mistura mais intensa na coluna de água, ou algum processo que erodisse a termoclina localmente.

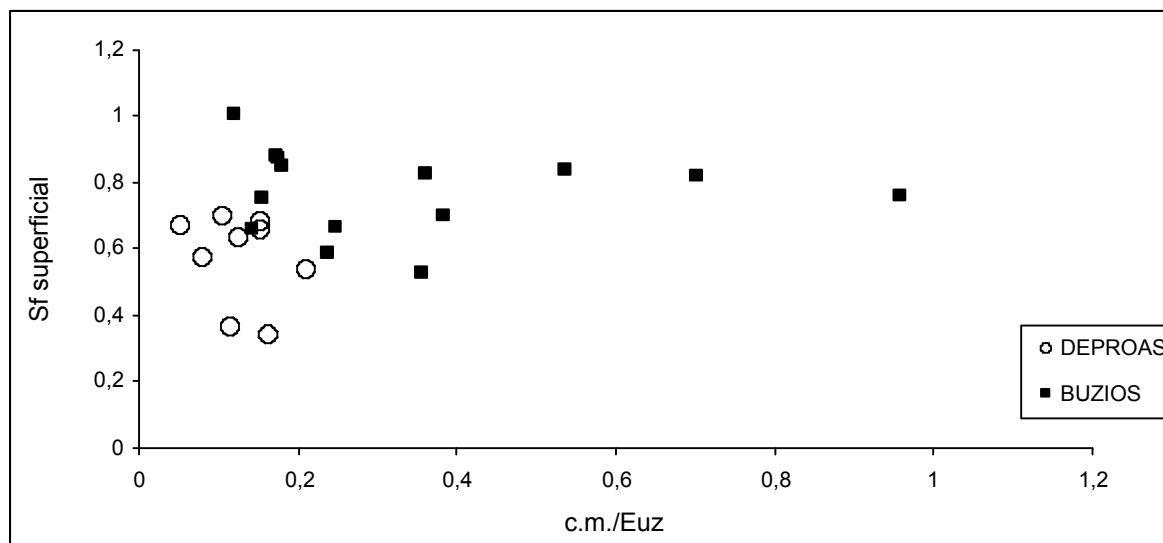


Ilustração 12 – Relação da razão entre a profundidade da camada de mistura e a profundidade da zona eufótica em cada estação com os valores do parâmetro Sf de superfície (camada de mistura).

A existência de vórtices ciclônicos (chamados de “frios”) da Corrente do Brasil, já bem comprovados na região, podem induzir injeções de nutrientes para a zona eufótica e propiciar o crescimento fitoplanctônico. De maneira antagônica, a presença de vórtices anticiclônicos (ou “quentes”) forçaria a termoclina para profundidades maiores (erosão), fazendo com que o fluxo de nutrientes para a zona eufótica fosse reduzido, potencialmente prejudicando o crescimento das células fitoplanctônicas. Imagens de satélite da cor do oceano (sensor MODIS-Aqua) capazes de estimar concentrações superficiais de clorofila-a pela aplicação de algoritmos específicos e também dados da faixa de radiação no infravermelho capazes de estimar a temperatura superficial da água do mar, compiladas semanalmente para períodos que antecederam e seguiram o cruzeiro BÚZIOS (Ilustração 13, gentilmente fornecidas por Andrea Marcela Madambashi) sugerem o desenvolvimento bastante dinâmico de núcleos de águas mais quentes e mais frias nas proximidades da região de estudo. Uma seqüência entre passagens de vórtices poderia potencialmente acumular detritos orgânicos de forma significativa, como sugeridos pelos resultados aqui apresentados. Porém estudos mais específicos são necessários para comprovar tal teoria.

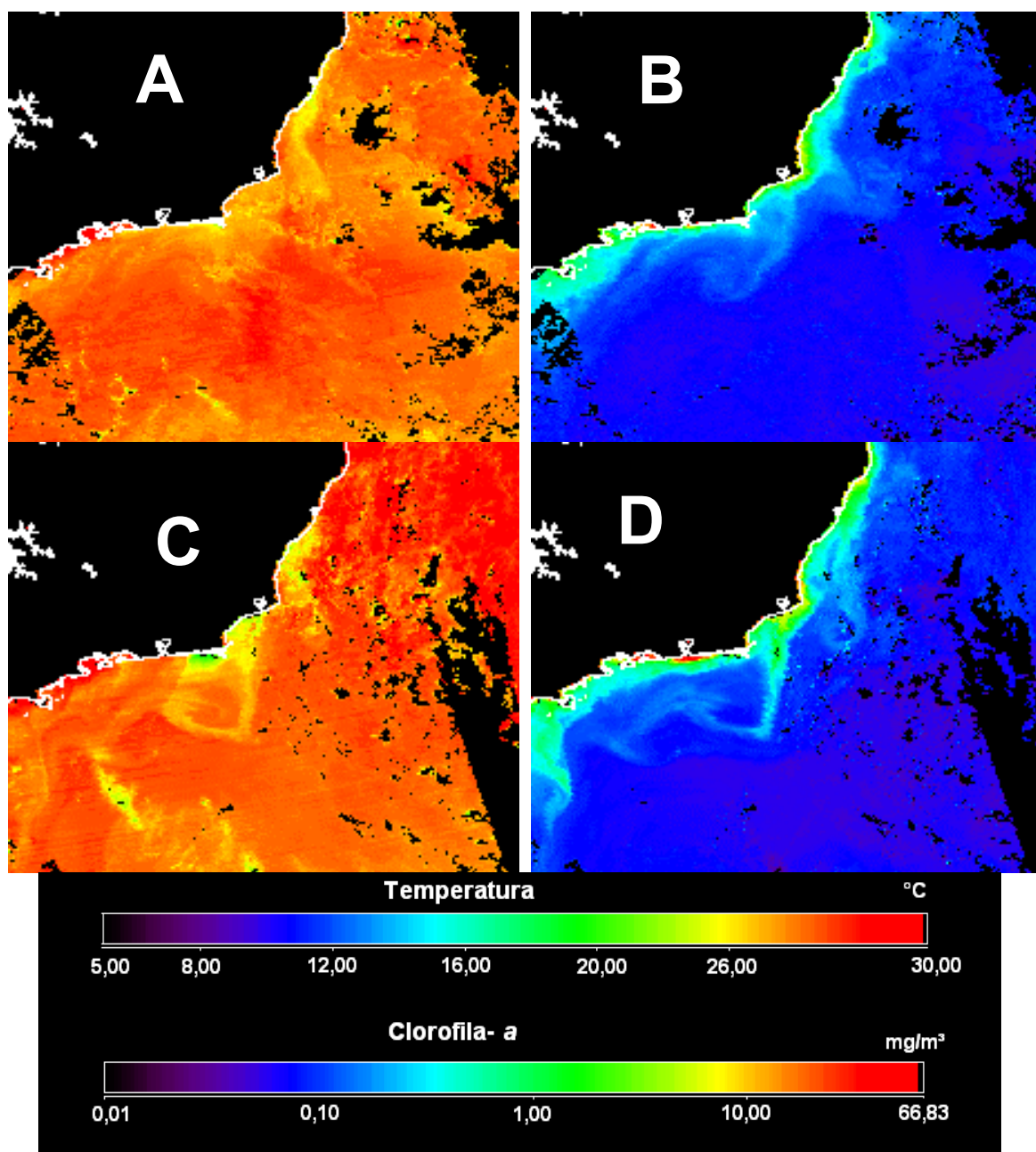


Ilustração 13 - Imagens de satélite com dados do sensor MODIS, nível 3, ilustrando a temperatura superficial (A e C) e estimativas da concentração de clorofila-a superficial (B e D, veja legenda); as imagens representam médias de 8 dias ilustrando as condições entre 9 e 16 de Janeiro de 2003 (A e B), e entre 25 de Janeiro a 1 de Fevereiro de 2003 (C e D)

5 – Conclusões

a) Foram descritas as variações nos parâmetros que descrevem a absorção espectral da luz pelo fitoplâncton e pelos detritos na região compreendida entre a Ilha de São Sebastião (SP) e Ilha Grande (RJ), durante duas campanhas de verão. Variações entre cruzeiros foram observadas entre o fator de tamanho das espécies de fitoplâncton (menores durante a campanha BÚZIOS) e a magnitude da absorção de luz pelos detritos, que foi mais elevada durante a campanha BÚZIOS.

b) Os valores de clorofila-*a* e de absorção da luz pelo fitoplâncton foram mais elevados próximo à costa, aonde águas menos salinas ocorreram e o tamanho médio da comunidade fitoplanctônica tende a ser maior. Todavia, as maiores concentrações foram sempre observadas em subsuperfície, sob influência da ACAS. Os valores de absorção da luz pelo fitoplâncton foram bem explicados pela concentração de clorofila-*a*, mas os resultados mostram uma grande variabilidade com o fator de tamanho Sf. Valores altos da magnitude de absorção de luz pelos detritos foram observados em regiões oceânicas de alta salinidade, durante apenas o cruzeiro BÚZIOS.

c) A estrutura vertical da coluna de água mostra uma influência marcante da ACAS abaixo da picnoclina, que diferencia essa camada devido às altas concentrações de clorofila-*a* e conseqüentemente altos valores de magnitude da absorção da luz pelo fitoplâncton. Essa estrutura vertical parece estar ligada com a dinâmica do meandramento da Corrente do Brasil, que propicia tanto situações de ressurgência (meandros ciclônicos) como subsidência (meandros anticiclônicos). A grande dinâmica desses meandros parece explicar em parte a variabilidade observada durante as campanhas.

Referências

- Babin, M.; Morel, A.; Fournier-Sicre, V.; Fell, F.; Stramski, D. 2003. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration. **Limnology and Oceanography** 48: 843-859.
- Babin, M.; Stramski, D. 2002. Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region. **Limnology and Oceanography**. 47: 911–915.
- Bricaud, A.; Babin, M.; Morel, A.; Claustre, H. 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. **Journal of Geophysical Research** . 100(C7): 13,321-13,332.
- Bricaud, A.; Claustre, H.; Ras, J.; Oubelkheir, K. 2004. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. **Journal of Geophysical Research**, 109, C11010, doi: 10.1029/2004JC002419.
- Bricaud, A.; Morel, A.; Babin, M.; Allali, K.; Claustre, H. 1998. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. **Journal of Geophysical Research**. 103(C13): 31033-31044.
- Bricaud, A.; Morel, A.; Prieu, L. 1981. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. **Limnology and Oceanography** 26(1): 43-53.
- Bukata, R.P.; Jerome, J.H.; Kondratyev, K.Y.; Pozdnyakov, D.V. 1995. **Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters**. CRC Press, Boca Raton, 362 pp.
- Castro, B.M.; Miranda, L.B. 1998. Physical Oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. In Robinson, A. R.; Brink, K.H. (Eds.). *The Sea* – volume 11. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 8, pp 209-251.
- Ciotti, A.M. *Influence of phytoplankton communities on relationships between optical properties of coastal surface waters*. 1999. Tese de Doutorado. Department of Oceanography, Dalhousie University, Halifax, N.S., Canada.

Ciotti, A.M.; Bricaud, A. (submetido). Retrievals of a size parameter for phytoplankton and light absorption by Colored Detrital Matter from water-leaving radiances at SeaWiFS channels in a continental shelf region off Brazil. **Limnology and Oceanography Methods** (em julho de 2005).

Ciotti, A.M.; Cullen, J.J.; Lewis, M.R. 1999. A semi-analytical model of the influence of phytoplankton community structure on the relationship between light attenuation and ocean color. **Journal of Geophysical Research** 104(C1): 1559-1578

Ciotti, A.M.; Gaeta, S.A. 2002. Measurements of CDOM and Phytoplankton Absorption Coefficients in situ and Comparisons Among Semi-Analytical Models Using Satellite Ocean Color Data, Ocean Optics XVI, Santa Fé, New Mexico, CDROM, artigo 167.

Ciotti, A.M.; Gaeta, S. A. (in prep). Seasonal variability of CDOM and phytoplankton light absorption over the Southeastern Brazilian continental shelf.

Ciotti, A.M.; Lewis, M.R.; Cullen, J.J. 2002. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. **Limnology and Oceanography**.

Cullen, J.J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.** 39(5): 791-803.

Cullen, J.J.; Franks, P.J.S.; Karl, D.M.; Longhurst, A. 2002. Physical influences on marine ecosystem dynamics. In: Robinson, A.R., McCarthy, J.J., Rothschild, B.J. (Eds.), *The Sea*, vol. 12. Wiley, New York, pp. 297–335.

Duysens, L.N.M. 1956. The flattening of the absorption spectrum of suspensions as compared to that of solutions. **Biochim. Biophys. Acta** 19:1-12.

Gaeta, S.A. *Produção primária na região oeste do Atlântico Sul*. 1999. Tese de Livre-Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 140 p.

Garver, S.A.; Siegel, D.A. 1994. Variability in near-surface particulate absorption spectra: What can a satellite ocean color imager see? **Limnology and Oceanography** 39(6): 1349-1367.

Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes and J.D.H. Strickland. 1965. Fluorometric determinations of chlorophyll. **Journal du conseil pour l'exploration de la mer** 30(1): 3-15.

Lewis, M.R.; Carr, M.E.; Feldman, G.C.; Esais, W.; McClain, C. 1990. Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific Ocean. **Nature** 347:543-545.

Kirk, J.T.O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, New York, 509 pp.

Mann, K.H.; Lazier, J.R.N. 1996. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Second Edition. Blackwell Science, Inc. 394 pp.

Mantoura, R. F. C., S. W. Jeffrey, C. A. Llewellyn, H. Claustre, and C. E. Morales. 1997. Comparison between spectrophotometric, fluorometric and HPLC methods for chlorophyll analysis, p. 361-380. In S. W. Jeffrey, R. F. C. Mantoura and S. W. Wright [eds.], *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*. UNESCO.

Miller, W.L. 1994. Recent advances in the photochemistry of natural dissolved organic matter. In: G. R. Heltz (ed.). *Aquatic and Surface Photochemistry*. A. F. Lewis, New York, p. 111-127.

Mitchell, B.G. 1990. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT). **Ocean Optics X. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.** (SPIE) 1302:137-148.

Morel, A.; Maritorena, S. 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. **Journal of Geophysical Research**. 106(C4): 7163-7180.

Piola, A.R.; Matano, R.P.; Palma, E.D.; Moller, O.O.; Campos, E.J.D. 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. **Geophysical Research Letters** 32 (1): Art. No. L01603

Platt, T.; S. Sathyendranath, C.M. Caverhill and M.R. Lewis. (1988). Oceanic primary production and available light: further algorithms for remote sensing. **Deep-Sea Research** 35:855-879.

Rowan, K.S. 1989. *Photosynthetic pigments of algae*. Univ. Press, Cambridge, 334 pp.

Shoaf, W. T., and B. W. Lium. 1976. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. **Limnol. Oceanogr.** 21: 926-928.

Silveira, I.C.A.; Schmidt, A.C.K.; Campos, E.J.D.; Godoi, S.S.; Ikeda, Y. 2000. A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**. 48(2).

Stramski, D. and A. Morel. 1990. Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance. **Deep Sea Research** 37(2A): 245-266

Tassan, S.; Ferrari, G.M. 1995. An alternative approach to absorption measurements of aquatic plants retained on filters. **Limnology and Oceanography** 40:1358-1368.

Tassan, S.; Ferrari, G.M. 2002. A sensitivity analysis of the "Transmittance-Reflectance" method for measuring light absorption by aquatic particles. **Journal of Plankton Research**. 24:757-774.

Tassan, S.; Ferrari, G.M.; Bricaud, A.; Babin, M. 2000. Variability of the amplification factor of light absorption by filter-retained aquatic particles in the coastal environment. **Journal of Plankton Research** 22(4): 659-668.

Trees, C.C., D.K. Clark, R.R. Bidigare, M.E. Ondrusek and J.L. Mueller. (2000). Accessory pigments versus chlorophyll a concentrations within the euphotic zone: An ubiquitous relationship. **Limnology and Oceanography** 45(5): 1130–1143.

Vidussi, F.; Claustre, H.; Manca, B.B.; Luchetta, A.; Marty, J.-C. 2001. Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter. **Journal of Geophysical Research** 106, 19939–19956.

Welschmeyer, N.A. 1994. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. **Limnology and Oceanography** 39(8): 1985-1992

Yentsch, C.S.; Phinney, D.A. 1989. A bridge between ocean optics and microbial ecology. **Limnology and Oceanography**. 34(8): 1694-1705.