

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA BIOLÓGICA**

**O FITOPLÂNCTON DA
BAÍA DO ALMIRANTADO (ANTÁRTICA):
VARIAÇÕES TEMPORAIS E ESPACIAIS
ENTRE OS ANOS DE 2002 E 2008**

PRISCILA KIENTECA LANGE

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Oceanografia
Biológica da Universidade Federal do
Rio Grande, como requisito parcial à
obtenção do título de MESTRE.

Orientadora:
Dra. Virgínia Maria Tavano

RIO GRANDE
Maio/2011

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Prof. Virgínia Maria Tavano, pela atenção, a confiança, por todos os ensinamentos tanto relacionados ao fitoplâncton quanto ao conhecimento de vida, e principalmente por me mostrar que é possível ser uma pessoa boa nesse mundo de hoje em dia, por me fazer recuperar a boa fé na índole das pessoas ao meu redor. Obrigada por aceitar me orientar, e por ser, como pessoa e professora, o melhor dos exemplos que uma aluna pode ter.

Gostaria também de agradecer imensamente e principalmente a Prof. Denise Rivera Tenenbaum (Laboratório de Fitoplâncton Marinho/UFRJ), pelo carinho, atenção, amizade e confiança durante todos esses 8 anos, por ser a minha eterna orientadora e a principal responsável pelo meu amadurecimento profissional e acadêmico. Agradeço também à Prof. Lúcia de Siqueira Campos (Laboratório de Echinodermata/UFRJ) pelo apoio e credibilidade no trabalho realizado durante estes anos.

À Prof. Clarisse Odebrecht, ao Prof. Eduardo Secchi e à Dra. Irene Schloss por aceitarem ser parte da banca avaliadora desta dissertação, por todas as correções e sugestões que só vieram a acrescentar ao presente trabalho.

Aos companheiros de trabalho e eternos amigos Marcel dos Santos, Josilene da Silva, Karin Elbers e aos professores André Belém, Edson Rodrigues e Rosalinda Montone pelo auxílio nas coletas, conselhos, risadas, companheirismo no trabalho e pela amizade! E ao Rafael Moura, Fábio Gois, Lia Teixeira, Glyvani, Renatão, Sandrinha, Tiagão, Erli, Marcelo grão, Kaia, Edinho e o pessoal do Paraná, Gabriel, Bia Boucinhas, Marcelo Bernardes, Heber (HB) e Mary, Renan, Rafael Colors e Rafael por serem responsáveis por lembranças maravilhosas na Antártica!

Aos oficiais da Marinha do Brasil e membros do Arsenal da Marinha do Brasil pelo apoio logístico e especialmente à Janaina Silvestre, ao Santinho, Cachorro e a todos os que fizeram do trabalho no gelo uma coisa divertida!

À “Fitogangue” e todos os integrantes do Laboratório de Fitoplâncton e Microorganismos Marinhos da FURG, por estes dois anos de aprendizado e trabalho divertidíssimos! Agradeço especialmente ao NG Haig They, Márcio Tenório, Márcio Souza, Amália Detoni e principalmente Rafael Mendes, que ao meu ver foi meu co-orientador, me passou muito conhecimento, obrigada pela paciência e pela atenção!

E finalmente agradeço às minhas eternas irmãs Pryscilla Moura, Renata Mont’Alverne, Martina Prazeres, aos amigos Haig They, Rafael Soriani, Evandro Malanski e Ana Cecília, Samantha Martins, e ao Felipe Kruger, pessoas que entraram na minha vida para nunca mais sair. As maiores lições aprendi com vocês, muito obrigada por todos os momentos que vivemos juntos e certamente fizeram de mim uma pessoa muito melhor. As lembranças são construídas a partir dos momentos do qual queremos lembrar. E quem disse que família a gente não escolhe? Escolhe sim!

Agradeço também ao meu pai Sérgio Carvalheira Lange e principalmente à minha mãe Marlene Kienteca Lange e meu irmão Cláudio, por todo o apoio e por estarem bem pertinho de mim, mesmo quando tão distantes.

Sumário

Índice de Tabelas	IV
Índice de Figuras.....	V
Índice de Anexos	VI
Resumo	1
Abstract.....	2
1. Introdução	3
2. Objetivos.....	6
2.1. Objetivo Geral:	6
2.2. Objetivos Específicos	7
3. Área de estudo	7
4. Material e Métodos	9
4.1. Estratégia amostral.....	9
4.2. Análise do fitoplâncton.....	10
4.3. Dados abióticos e parâmetros ambientais	11
4.4. Análise de dados	12
5. Resumo dos Resultados e Discussão	13
5.1. Parte I - Variações Inter-Anuais	13
5.2. Parte II -Variações espaciais no ano de 2008: bacia central e zona costeira da Baía do Almirantado.....	17
6. Conclusões	21
6.1. Parte I - Variações Inter-Anuais	21
6.2. Parte II -Variações espaciais no ano de 2008: bacia central e zona costeira da Baía do Almirantado.....	23
7. Conclusões gerais	26
8. Referências Bibliográficas	27

Índice de Tabelas

Tabela 1. Datas de coleta, período e ano do verão austral, coordenadas geográficas e locais de todas as estações de amostragem avaliadas no presente estudo.	31
---	----

Índice de Figuras

Figura 1. (a) Continente Antártico; (b) Península Antártica; (c) Ilha Rei George e (d) Baía do Almirantado com as áreas amostradas na zona costeira rasa: CF. Comandante Ferraz; BP. Botany Point; Ez. Enseada Ezcurra; (e) estações de amostragem (A. 20 m; B. 30 m; C. 50 m) e profundidades de coleta (superfície, meio e fundo) em cada umas das estações..... 32

Figura 2. Pontos de amostragem na região costeira, bacia central da Baía do Almirantado e Estreito de Bransfield, durante o início do verão de 2008: CF. Comandante Ferraz; BP. Botany Point; UP. Ullman Point; Ez. Enseada Ezcurra; Re. Refúgio 2. Os pontos amostrados na bacia central têm os nomes correspondentes à sua profundidade local (isóbata). 33

Índice de Anexos

Anexo I.	34
---------------	----

**Temporal changes in the microphytoplankton of Admiralty Bay's coastal waters
(Western Antarctic Peninsula).**

Priscila K. Lange

Denise R. Tenenbaum

Virgínia M. Tavano

Lucia S. Campos

Anexo II.	80
----------------	----

**Variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado (Ilha Rei George,
Noroeste da Península Antártica) durante o início do verão de 2008**

Priscila K. Lange

Denise R. Tenenbaum

Virgínia M. Tavano

Rodolfo Paranhos

Lucia S. Campos

Resumo

O fitoplâncton ($>15\ \mu\text{m}$) da Baía do Almirantado (Ilha Rei George, noroeste da Península Antártica) foi avaliado durante o verão austral dos anos de 2002/3, 2003/4, 2007/8 e 2008/9 nas águas costeiras de três áreas, com o objetivo de descrever suas variações temporais e espaciais e sua relação com parâmetros ambientais. No verão 2008/9, visando observar a distribuição espacial horizontal e vertical do fitoplâncton ($>2\ \mu\text{m}$), este foi amostrado em diversas profundidades de pontos próximos à costa, na bacia central e no Estreito de Bransfield. Em águas costeiras a densidade celular do fitoplâncton ($>15\ \mu\text{m}$) foi baixa ($4,2 \times 10^3\ \text{cel.l}^{-1}$), e o tamanho das células decresceu nos anos mais recentemente amostrados, e a contribuição dos grupos taxonômicos foi modificada. Células maiores ($>80\ \mu\text{m}$) como as diatomáceas *Navicula directa* e *Corethron pennatum*, foram as mais representativas em 2002/3, quando a abundância foi reduzida ($1,2 \times 10^3\ \text{cel.l}^{-1}$). Diatomáceas cêntricas (*Thalassiosira* spp., *Stellarima microtrias*) de tamanho intermediário ($31\text{-}80\mu\text{m}$) foram responsáveis pelas maiores densidades celulares ($10^4\ \text{cel.l}^{-1}$) durante o verão de 2003/4, associadas a ventos fracos de leste ($< 6\ \text{m/s}$). Os verões de 2007/8 e 2008/9 foram caracterizados pela maior contribuição de células menores ($15\text{-}30\ \mu\text{m}$), principalmente dinoflagelados, que atingiram 50% da densidade celular em 2008/9, além de diatomáceas penadas planctônicas (*Pseudo-nitzschia* spp.). Estas flutuações foram associadas com um aumento da temperatura ($0,6$ para $1,0^\circ\text{C}$) e da concentração de nutrientes, junto a uma pequena diminuição na salinidade ($34,3$ para $33,8$). No início do verão de 2008/9, o fitoplâncton apresentou maior densidade celular em águas costeiras, composto por diatomáceas penadas bentônicas e dinoflagelados mixo/heterotróficos ($7,3 \times 10^3 \pm 5,8 \times 10^3\ \text{cel.l}^{-1}$) além de criptófitas ($3,0 \times 10^5 \pm 2,4 \times 10^5\ \text{cel.l}^{-1}$), associados a temperaturas mais altas e salinidades reduzidas em decorrência do degelo terrestre. A intrusão de águas costeiras na bacia central foi evidenciada pela grande representatividade destas microalgas em águas superficiais, principalmente do lado leste da Baía. Dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) ocorreram principalmente nos limites entre águas sob influência costeira e águas oceânicas, estando relacionados a depleções de nitrato. Diatomáceas cêntricas do micropilâncton e diatomáceas penadas do gênero *Pseudo-nitzschia*, que apresentaram densidade celular elevada no Estreito de Bransfield, foram as principais indicadoras da entrada de águas do Estreito de Bransfield na bacia central da Baía, onde diatomáceas cêntricas nanoplânctônicas também foram abundantes.

Abstract

Phytoplankton ($> 15 \mu\text{m}$) was studied in coastal waters of three areas at Admiralty Bay (King George Island, Northwestern Antarctic Peninsula), during the summers of 2002-3, 2003-4, 2007-8 and 2008-9, with the goal of describing its temporal variability and how it is related to environmental parameters. During early summer of 2008/9, aiming to observe the influence of nearshore and oceanic waters inside Admiralty Bay, spatial variations of phytoplankton ($>5 \mu\text{m}$), it was sampled at five coastal areas, six sites located at the central basin and two sites in Bransfield Strait near the bay's opening. During summers 2007-8 and 2008-9, phytoplankton ($>15\mu\text{m}$) abundance was relatively low ($4,2 \times 10^3 \text{ cells.l}^{-1}$), prevailing size of microphytoplankton cells decreased and species composition changed when compared to the previous sampled periods. Largest cells ($> 80\mu\text{m}$), mainly pennate diatoms (i.e. *Gyrosigma fasciola*, *Navicula directa*) and the centric *Corethron pennatum*, were more representative in 2002/3, when phytoplankton abundance was the lowest ($1,2 \times 10^3 \text{ cells.l}^{-1}$). The medium-sized (31-80 μm) centric diatoms like *Thalassiosira* spp., *Stellarima microtrias* and *Charcotia actinochila* had their highest abundances ($10^4 \text{ cells.l}^{-1}$) during the 2003/4 summer, associated with the lowest east wind speeds ($<6 \text{ m/s}$). The contribution of smallest cells (15-30 μm), especially dinoflagellates and also planktonic diatoms (*Pseudo-nitzschia* spp.) increased in the summers of 2007/8 and mainly 2008/9. During the later, small dinoflagellates reached 50% of the total abundance. These temporal changes were associated with the rise of water temperature (0,6 to 1,0°C) and of dissolved inorganic nutrients concentrations, along with a slight lower of salinity (34,3 to 33,8). During early summer 2008/9, phytoplankton ($>5 \mu\text{m}$) abundance was highest in coastal waters, dominated by microplanktonic pennate diatoms and mixo/heterotrophic dinoflagellates ($7,3 \times 10^3 \pm 5,8 \times 10^3 \text{ cells.l}^{-1}$), and nanoplanktonic cryptophytes ($3,0 \times 10^5 \pm 2,4 \times 10^5 \text{ cells.l}^{-1}$). These groups were associated with highest water temperature and lowest salinity due to terrestrial ice melt. The intrusion of coastal waters at the central basin was indicated by the contribution of these algae in surface layer, mainly at the east side of the Bay. Autotrophic dinoflagellates (*Prorocentrum* spp.) occurred mainly in the low nitrate concentration region located on the boundary between coastal waters and the central basin water, influenced by oceanic waters. Micro-sized centric diatoms and the pennate *Pseudo-nitzschia* were more abundant at the offshore waters of Bransfield Strait, and the main indicators of its inflow at the central basin of Admiralty Bay.

1. Introdução

O fitoplâncton do Oceano Antártico é caracterizado pela enorme oscilação sazonal em sua produtividade, a qual é regulada principalmente pelas variações na incidência de radiação solar. O degelo decorrente do aumento da temperatura atmosférica no verão austral ocasiona a redução da salinidade nas camadas superficiais do oceano e, junto ao regime de ventos, controla a estabilidade da coluna de água (Medlin e Priddle, 1990; Ward et al., 2007). Uma coluna de água estável possibilita a retenção do material particulado na camada superficial (células fitoplanctônicas), mantendo-as em contato com a radiação solar. Desta forma, são formadas grandes florações, constituídas principalmente de diatomáceas, que ocorrem principalmente em zonas marginais de plataformas de gelo, icebergs e na região costeira, onde há suprimento adequado de ferro, e sustentam toda a trama trófica do ambiente Antártico (Cornejo-Donoso e Antezana, 2008; Hewes, 2009). As concentrações de macro-nutrientes são altas em todo o Oceano Austral, principalmente nestas regiões sujeitas ao degelo, exceto em situações de florações em senescência (Medlin e Priddle, 1990).

No Continente Antártico e Oceano Austral, o fitoplâncton marinho é o principal produtor primário, uma vez que a produção primária continental é muito baixa. As diatomáceas são responsáveis por florações que ocasionam o maior acúmulo de biomassa. Devido a seu tamanho relativamente grande quando comparado a outros grupos taxonômicos do fitoplâncton, as diatomáceas são o principal alimento dos consumidores primários de grande porte como animais bentônicos, larvas de peixes e o krill antártico, o que possibilita o encurtamento da trama trófica (Medlin e Priddle, 1990; Corbisier et al., 2004; Cornejo-Donoso e Antezana, 2008). Por outro lado, pequenos flagelados, que também são abundantes em águas antárticas, são fonte de

alimento de consumidores primários como ciliados microplanctônicos e dinoflagelados heterotróficos (Medlin e Priddle, 1990).

Entre os fatores que regulam a produção primária nas regiões costeiras antárticas estão o regime de ventos (que desestabiliza a coluna de água mas, em regiões rasas, provoca a ressuspensão do sedimento e algas bentônicas); a redução da salinidade provocada pelo degelo continental; e a incidência da luz solar (Brandini e Rebello, 1994; Schloss et al., 2002). Assume-se que as concentrações de ferro sejam naturalmente elevadas nestas águas costeiras (Brandini, 1993) devido à lixiviação de material continental nas águas de degelo e ao carreamento pelo vento (Nedzarek, 2008).

No oeste da Península Antártica, as diatomáceas microplanctônicas (20-200 μm) são responsáveis pelos maiores acúmulos de biomassa tanto em águas costeiras (Brandini and Rebello, 1994; Moline et al., 1997; Schloss et al., 2002; Kopkzynska, 2008) quanto em oceano aberto (Medlin e Priddle, 1990; Clarke e Leakey, 1996; Froneman et al., 1997; Varela et al., 2002; Montes-Hugo et al., 2008b). Entretanto, em termos de densidade celular o fitoplâncton é dominado por algas nanoplanctônicas (<20 μm) representadas principalmente por flagelados (Garibotti et al., 2003; Montes-Hugo et al., 2008a).

Nos últimos 30 anos, o aquecimento da porção noroeste da Península Antártica (e.g. Estreito de Bransfield) resultou na diminuição da extensão da cobertura de gelo (Montes-Hugo et al., 2009) e no aumento do sombreamento causado pela cobertura de nuvens mais vasta, da velocidade do vento e da profundidade da camada de mistura. Ao mesmo tempo, o tamanho celular predominante do fitoplâncton diminuiu. As diatomáceas foram substituídas por pequenos flagelados, uma vez que a produção destas grandes diatomáceas está normalmente associada às zonas marginais de

plataformas de gelo, que foram deslocadas para o sul, e regiões costeiras onde o degelo continental é intenso. Estas regiões possuem uma camada de mistura relativamente rasa, ocasionada pelo escoamento da água de baixa salinidade do degelo (Montes-Hugo et al., 2009), e assim propiciam a produção fitoplanctônica. O aquecimento desta região também é responsável pelo maior fluxo das águas do Mar de Weddell para o Estreito de Bransfield, em detrimento das águas do Mar de Bellingshausen (Montes-Hugo et al., 2009).

Em águas costeiras, o efeito das consequências do aquecimento desta região sobre o fitoplâncton e a dinâmica do derretimento de geleiras continentais ainda está sob investigação (Schloss et al., 2002; Pichlmaier et al., 2004; Kopkzynska, 2008). Na Baía do Almirantado (Ilha Rei George), o fitoplâncton é composto por algas provenientes do Estreito de Bransfield (Kopkzynska, 2008) e pelo microfitobentos ressuspensionado em pequenas ressurgências costeiras (Brandini and Rebello, 1994; Schloss et al., 2002) e por processos advectivos causados pelo degelo continental (Pichlmaier et al., 2004; Nedzarek, 2008). Estes mesmos processos físicos são também responsáveis pelo aumento da turbidez da água, o que restringe a zona eufótica e a área de produção primária na coluna de água.

As regiões costeiras da Península Antártica estão sujeitas à presença antrópica, através da ocupação das estações de pesquisa, como a Estação Antártica Comandante Ferraz (Brasil), provocando variações ambientais locais (Ribeiro et al., 2011), o que pode influenciar a produção primária e o equilíbrio trófico da biota local (Corbisier et al., 2004; Filgueiras et al., 2007; Nakayama et al., 2011). O monitoramento em longo prazo da biota costeira possibilita a observação de variações temporais, que podem ser

acarretadas pela presença humana ou reflexo das variações ambientais (Underwood, 1994).

As alterações no padrão sucessional do fitoplâncton são consideradas como um marcador mais eficiente para detectar tendências nos ecossistemas do Oceano Austral do que os índices de biomassa ou de produtividade, por estes apresentarem oscilações de curto prazo que são normalmente maiores do que as variações inter-anuais (Moline and Prézelin, 1996).

O monitoramento da biodiversidade na zona costeira rasa da Baía do Almirantado foi implementado em 2002 pelo Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), e o estudo do fitoplâncton esteve inserido nos projetos “Implantação de estratégia de monitoramento de impacto ambiental na fauna bentônica da zona costeira rasa da Baía do Almirantado” (Rede 2 – Rede de pesquisa dedicada ao monitoramento do impacto ambiental no entorno da estação antártica brasileira Comandante Ferraz) e “Vida Marinha Antártica: Biodiversidade em Relação à Heterogeneidade Ambiental na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, e áreas adjacentes (MABIREH)” (Ano Polar Internacional - IPY).

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral:

O objetivo deste trabalho é avaliar as variações temporais (entre anos e entre início e final do verão) e espaciais (entre áreas de coleta) na composição taxonômica e densidade celular do fitoplâncton na Baía do Almirantado (Ilha Rei George, Península

Antártica), visando identificar os possíveis fatores ambientais que influenciem estas variações.

2.2. Objetivos Específicos

Considerando as variações nas condições climáticas que vêm sendo observadas nos últimos anos, na região noroeste da Península Antártica, um dos objetivos deste trabalho é avaliar se as variações temporais e espaciais na estrutura da comunidade fitoplanctônica ($>15\ \mu\text{m}$) da zona costeira rasa da Baía do Almirantado durante os verões de 2002/03, 2003/4, 2007/8 e 2008/9, estão relacionadas às oscilações de variáveis ambientais.

O outro objetivo deste estudo é avaliar a influência de águas costeiras e de águas do Estreito de Bransfield na bacia central da Baía do Almirantado, identificando os possíveis fatores ambientais que influenciem a estrutura da comunidade fitoplanctônica e as condições hidrológicas desta Baía.

3. Área de estudo

A Baía do Almirantado está localizada na Ilha Rei George (Ilhas Shetland do Sul, a oeste da Península Antártica; Fig. 1a,b,c), cobrindo uma área de $122\ \text{km}^2$ e possuindo um relevo de fjörd devido à grande erosão causada pelo gelo, o que ocasiona uma grande profundidade em sua porção central (cerca de 500m). Porém, no interior de suas três enseadas (Ezcurra, Mackellar e Martel) a profundidade máxima não excede 150m (Rakusa-Suszczweski, 1980). A circulação é caracterizada pela entrada de um grande volume de água do Estreito de Bransfield na região central através da grande abertura

localizada ao sul da Baía. A entrada de águas menos salinas se dá através do escoamento de águas originadas do degelo continental, gerando uma contra-corrente de grande velocidade que separa os corpos de água da zona costeira e da zona central (Absher *et al.* 2003). A influência de ventos e marés na circulação de águas é notável, principalmente em águas costeiras, sendo maior no lado oeste da Baía (Robakiewicz e Rakusa-Suszczewski, 1999). O regime de ventos pode também influenciar a produção primária, uma vez que ocasiona pequenas ressurgências costeiras que reduzem a estabilidade da coluna de água e causam a ressuspensão de sedimento e microfitobentos (Brandini e Rebello, 1994).

O aporte de água doce, enriquecida com nutrientes e ferro do solo e de excretas de animais terrestres, é proveniente do derretimento do gelo continental e de geleiras (Nedzarek e Rakusa-Suszczewski, 2004), que escoam tanto pela superfície do solo quanto pelo sub-solo, gerando a ressuspensão de material do fundo e o aumento de turbidez da água (Pichlmaier *et al.*, 2004). Os fragmentos de macroalgas também são uma importante fonte de nutrientes e matéria orgânica, principalmente em águas costeiras rasas, além de servirem de substrato para microalgas epífitas (Nedzarek e Rakusa-Suszczewski, 2004).

4. Material e Métodos

4.1. Estratégia amostral

A zona costeira rasa da Baía do Almirantado foi amostrada durante o início e final do verão de 2002/3 (27/Nov a 10/Dez/2002 e 3 a 10/Fev/2003), início e meio do verão de 2003/4 (1 a 12/Dez/2003 e 16 a 23/Jan/2004), final do verão 2007/8 (21/Fev a 5/Mar/2008) e início do verão 2008/9 (8 a 14/Dez/2008) (Tab. 1). As amostras foram coletadas nas proximidades da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e em duas outras áreas: Botany Point, próximo à geleira *Wanda*, e nas proximidades da Estação de pesquisa polonesa Arctowski, na Enseada Ezcurra (Fig. 1d). As amostras de água foram coletadas em estações localizadas sobre as isóbatas de 10m (A), 30m (B) e 50m (C), nas profundidades de 1m, meio da coluna de água e 5m acima do assoalho (Fig. 1e). As 164 amostras de água foram coletadas com a utilização de garrafas de Van Dorn, à bordo de pequenas embarcações (botes infláveis com motor de popa).

Para o estudo da variação espacial do fitoplâncton, amostras de água foram coletadas entre 1 e 7/Dez/2008 (Tab. 1), utilizando garrafas de Niskin (lingada), a bordo do Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel, em 5 estações na zona costeira, 6 estações na bacia central, sendo duas localizadas sobre cada uma das linhas batimétricas de 100, 300 e 500m, e 2 estações no Estreito de Bransfield, na batimetria de 700m (Fig. 2). Em cada estação, amostras foram tomadas das profundidades de 1, 10, 20, 50 e 10m acima do assoalho. As profundidades de 100, 200 e 500 também foram amostradas, quando existentes. Desta forma, foram estabelecidas três regiões distintas na Baía: as águas costeiras, águas superficiais da bacia central e águas profundas da bacia central. Foram consideradas águas superficiais da bacia central as amostras coletadas até 50m

de profundidade, com base nos perfis de densidade, os quais destacam as águas até 50m das águas mais profundas. Além disso, a classificação de Brandini (1993) estabeleceu a camada até 30m de profundidade como a camada de mistura da Baía do Almirantado sob condições de ventos fracos (até 6m/s), sendo esta aumentada sob a influência de ventos mais fortes como os observados no presente trabalho.

As amostras de água foram acondicionadas em frascos escuros de 1 litro e fixadas com formaldeído (4%) neutralizado com bórax.

4.2. Análise do fitoplâncton

Após o sifonamento das amostras de água que permaneceram decantando por aproximadamente 2 meses, e com o auxílio de um microscópio óptico invertido com contraste de fase, a composição e a abundância do fitoplâncton foram avaliadas a partir de alíquotas de 50 ou 100 ml colocadas em sedimentação durante 48 ou 72 horas, respectivamente, dependendo da concentração de células de cada amostra (Utermöhl, 1958). As células de maior medida (diâmetro, eixo apical ou eixo perivalvar) acima de 15 μm foram quantificadas sob um aumento de 200x, e o aumento de 400x foi utilizado para quantificar células menores que 15 μm , bem como identificar alguns espécimes do microfitoplâncton.

No estudo relativo às variações temporais do fitoplâncton em áreas costeiras (Anexo I), as células de tamanho entre 15 e 20 μm foram avaliadas junto ao microfitoplâncton (20-200 μm) (Sieburth et al., 1978), uma vez que possuem densidade celular equivalente neste ambiente e pertencem aos mesmos grupos taxonômicos (diatomáceas, dinoflagelados, cianobactérias), exercendo assim um papel ecológico

semelhante (Medlin and Priddle, 1990; Schloss et al., 2002; Kopkzynska, 2008). As células foram agrupadas em três classes de tamanho (15-30 μm ; 31-80 μm ; >80 μm), devido à relação entre o tamanho das células e seleção de presas pelos herbívoros locais (krill, salpas, filtradores bentônicos) (Opalinski et al., 1997; Brusca e Brusca, 2003), o que pode influenciar a composição de espécies de herbívoros e todo o equilíbrio trófico. Estas células também foram agrupadas de acordo com o grupo taxonômico ao qual pertencem: diatomáceas cêntricas, diatomáceas penadas, dinoflagelados e cianobactérias.

No estudo de variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado no início do verão de 2008 (Anexo II), foram avaliadas as células do micro (20-200 μm) e nanoplâncton (2-20 μm) (Sieburth et al., 1978). Assim, flagelados e cocolitoforídeos não foram considerados nas análises de variações temporais na zona costeira, porém foram incluídos neste estudo.

A identificação das espécies foi realizada com base em trabalhos clássicos e recentes: Peragallo e Peragallo (1921), Cupp (1943), Medlin e Priddle (1990), Round et al. (1990), Hasle (1972), Balech (1975), Scott e Marchant (2005), Komarek (2007), Al-Handal e Wulff (2008a; 2008b).

4.3. Dados abióticos e parâmetros ambientais

A temperatura foi medida no momento da coleta, com o auxílio de um termômetro digital. Os dados de salinidade, concentração de nutrientes inorgânicos dissolvidos (amônio, nitrito, nitrato, fosfato e silicato) e de pigmentos (clorofila *a* e feofitina) foram fornecidos pela Profa. Elisabeth Braga do Instituto de Oceanografia-USP (2002-4) e o

Prof. Rodolfo Paranhos do Instituto de Biologia-UFRJ (2008). Os dados de direção e velocidade dos ventos e de intensidade da radiação solar foram fornecidos pelo INPE, tendo sido consideradas a velocidade média do vento e a radiação solar média nas 24 horas prévias ao momento da coleta.

4.4. Análise de dados

As variações dos dados ambientais (temperatura da água, salinidade, amônio, nitrito, nitrato, velocidade do vento) e bióticos (densidade celular fitoplanctônica, clorofila total e feofitina) foram avaliadas através da análise de variância ANOVA (teste Fisher-LSD, $p < 0,05$). As relações entre os dados ambientais foram observadas, separadamente em cada ano, através da Análise de Componentes Principais (Statistica[®] 6.0), e sua influência sobre a estrutura da comunidade fitoplanctônica foi identificada através da Análise Canônica de Correspondência (CANOCO[®] 4.5), também realizada com os dados de cada ano de coleta. As amostras foram também agrupadas de acordo com a semelhança em sua composição específica e densidade das espécies, através da Análise de Agrupamento (Método de Ward) (Past[®] 1.8), onde as espécies mais importantes para os grupos de amostras estabelecidos foram identificadas na Rotina SIMPER (Similarity Percentages) (Primer[®] 6.0). A correlação entre algumas variáveis foi estabelecida através do Índice de Correlação de Spearman. Para tais análises estatísticas, os dados biológicos foram normalizados ($\log_{10} x + 1$). Na Análise de Agrupamento e Rotina SIMPER, as espécies consideradas *raras* foram excluídas, uma vez que por possuírem baixa frequência de ocorrência, podem atuar como dimensões aleatórias, estando mais sujeitas ao acaso (Legendre e Legendre, 1983). Foram

consideradas *raras* as espécies que apresentaram frequência de ocorrência inferior à média da frequência de todas as espécies, em cada ano de coleta.

Quanto aos dados relacionados à análise de variação espacial do fitoplâncton no início do verão de 2008/9, além das análises estatísticas explicitadas anteriormente, as relações entre as concentrações de pigmentos (clorofila *a* e feofitina) e os dados de densidade celular de cada fração de tamanho (micro e nanoplâncton) e dos diferentes grupos taxonômicos do fitoplâncton foram detectadas através do teste de Mantel (dados normalizados $\log_{x+1}$, Índice de Bray-Curtis, 15000 permutações), que indicaram quais frações de tamanho e grupos taxonômicos contribuem mais para a biomassa no ambiente. Além disso, a Análise de Agrupamento foi realizada para células do micro e do nanoplâncton separadamente, devido à grande diferença em abundância dos dois grupos.

5. Resumo dos Resultados e Discussão

5.1. Parte I - Variações Inter-Anuais

Esta seção trata de uma síntese dos resultados e principais conclusões sobre as análises da comunidade fitoplanctônica nos quatro anos de amostragem, na região de estudo. A partir destes resultados, foi elaborado um artigo, intitulado “Variações temporais no microfitoplâncton de águas costeiras da Baía do Almirantado, oeste da Península Antártica” (“*Temporal changes in the microphytoplankton of Admiralty Bay’s coastal waters, King George Island, Western Antarctic Peninsula*”; Anexo I).

Durante os verões de 2002/3, 2003/4, 2007/8 e 2008/9, o microfitoplâncton de águas costeiras apresentou baixa densidade celular ($4,2 \times 10^3 \pm 4,8 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$), sendo as diatomáceas o grupo taxonômico mais representativo ($85\% \pm 20\%$). As variações temporais na estrutura da comunidade fitoplanctônica ($>15 \mu\text{m}$) foram evidenciadas pela dominância de células de menores tamanhos nos anos mais recentes, associadas a uma mudança no grupo taxonômico predominante.

Diatomáceas maiores que $80 \mu\text{m}$, como as penadas bentônicas *Pleurosigma* sp., *Gyrosigma fasciola*, e *Navicula directa*, além das epífitas *Pseudogomphonema kamtshaticum* e *Licmophora* spp. e principalmente a epôntica¹ *Corethron pennatum*, foram as mais abundantes durante o verão de 2002/3, quando a densidade celular microfitoplanctônica foi a mais reduzida ($1,2 \times 10^3 \pm 1,4 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) ($p < 0,01$) dentre os anos amostrados. No verão de 2003/4, foram encontradas as mais altas concentrações celulares ($6,8 \times 10^3 \pm 5,1 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) em decorrência da maior contribuição de diatomáceas cêntricas ($> 60\%$) de tamanho entre 31 e $80 \mu\text{m}$ (e.g. *Thalassiosira gravida*, *Stellarima microtrias*, *Charcotia actinochila*, *Porosira* spp.), e sob condições de vento leste com baixa velocidade ($<2,3 \text{ m/s}$). Nos demais anos amostrados, a velocidade média dos ventos foi mais alta (6 m/s), predominantemente de oeste.

Durante o verão 2007/8, diatomáceas penadas voltaram a ser representativas (50%), desta vez representadas pelo gênero *Pseudo-nitzschia* ($>30 \mu\text{m}$), indicando a contribuição de águas do estreito de Bransfield no interior da Baía. Junto a estas, a contribuição de pequenos dinoflagelados ($<30 \mu\text{m}$) tornou-se importante ($> 25\%$), além das diatomáceas cêntricas dos gêneros *Chaetoceros* e *Rhizosolenia*, indicando a influência de águas do mar de Weddell na Baía do Almirantado e a menor intensidade

¹ Epôntico: adaptado à vida no gelo (Horner et al., 1992), p. e. microalgas que vive aderidas ao gelo ou dentro dos canais hipersalinos do gelo.

da ressuspensão de material de fundo na zona costeira. No início do verão de 2008/9 os dinoflagelados se tornaram dominantes (65% da densidade celular), e foram responsáveis pelo aumento na densidade celular do microplâncton, sendo alguns deles heterotróficos e mixotróficos, tais como *Gyrodinium/Gymnodinium* spp. e *Katodinium* sp.1, e outros autotróficos como *Prorocentrum* sp.1 e *Amylax* sp.1. Além disto, as diatomáceas cêntricas foram representadas por espécies menores que 30 μm (e.g. *Thalassiosira* spp.), o que tornou as células de menor tamanho (15-30 μm) as mais representativas em abundância (85%), dentre os produtores primários.

As cianobactérias, tipicamente epônticas continentais (*Oscillatoria* spp., *Leptolyngbya* spp.), apresentaram uma relação inversa com a salinidade e direta com a temperatura da água e a concentração de amônio (indicador de excreção da fauna local), mostrando-se como boas indicadoras locais de degelo continental. Nestas condições, a densidade celular fitoplanctônica ($r = -0,64$ com a salinidade) foi incrementada por diatomáceas bentônicas, e esta situação ocorreu mais frequentemente em Ezcurra e, nos anos mais recentes, Botany Point. Estes pontos localizam-se próximo a geleiras e o aporte de água doce continental pode ser maior que em Comandante Ferraz.

As concentrações de amônio e silicato (e de cianobactérias), que indicam maior lixiviação continental, foram mais altas em períodos em que o inverno prévio foi mais severo (2002/3 e 2007/8) (INPE, 2009) promovendo maior deposição de gelo continental e a formação de gelo marinho na Baía do Almirantado. A predominância de células menores e a mudança do grupo fitoplanctônico dominante nos anos amostrados mais recentemente podem ser conseqüências de diversos fatores, tanto abióticos (temperatura da água, salinidade) quanto bióticos (e.g. forte pastagem seletiva das células de maior tamanho) ou da combinação entre estes. No entanto, isto pode também

ser expressão de mudanças ambientais regionais mais amplas e de prazo mais longo, como observado por Montes-Hugo et al. (2009).

No início do 2008/9, a redução do tamanho celular predominante dos produtores primários e a substituição de diatomáceas por dinoflagelados na zona costeira rasa podem acarretar mudanças em toda a trama trófica local. O principal elo entre os produtores primários e os consumidores secundários, o krill antártico *Euphausia superba*, possui grande parte de sua dieta constituída de diatomáceas bentônicas quando habitam regiões costeiras, enquanto células fitoplanctônicas maiores que 70 μm são rejeitadas. Outros consumidores primários, como animais bentônicos filtradores e herbívoros planctônicos, também ingerem o fitoplâncton de acordo com o tamanho celular.

O abrandamento de processos que acarretam a ressuspensão de diatomáceas bentônicas, como o escoamento da água oriunda do degelo continental, pode ter ocorrido devido ao menor acúmulo de gelo e neve continental durante o inverno. Sendo assim, a substituição de diatomáceas ticoplanctônicas por dinoflagelados e diatomáceas planctônicas menos palatáveis devem ocasionar a substituição de animais que consomem estas células maiores, como o krill, por animais que possuem a dieta menos específica, como as salpas. Mudanças semelhantes poderem ocorrer na fauna bentônica.

A ação dos ventos na ressuspensão costeira e mistura da coluna de água, bem como a ação do aumento da temperatura ocasionando redução da salinidade e intensificação da lixiviação, foram considerados os principais agentes abióticos reguladores da abundância e composição do microfitoplancton na zona costeira rasa da Baía do Almirantado. Como mencionado acima, o aumento da temperatura e a redução da salinidade nos anos mais recentes podem estar refletindo as mudanças climáticas e

ocasionando oscilações na estrutura da comunidade microfitoplanctônica e, possivelmente, em toda a trama trófica da Baía do Almirantado.

Maiores detalhes sobre os resultados encontrados estão apresentados no anexo I.

5.2. Parte II -Variações espaciais no ano de 2008: bacia central e zona costeira da Baía do Almirantado

Esta seção contempla as variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado, durante o início do verão de 2008. A partir destes resultados, foi elaborado um artigo, intitulado “Variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado (Ilha Rei George, oeste da Península Antártica) durante o início do verão de 2008” (Anexo II).

No início do verão de 2008, o fitoplâncton da Baía do Almirantado apresentou densidade celular variando entre $1,4 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$ e $7,8 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$ ($1,0 \times 10^5 \pm 1,4 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$), atrelada a ventos de altas velocidades ($9,4 \pm 3,5 \text{ m.s}^{-1}$), predominantemente de oeste e sudoeste, acompanhados de uma intensa incidência de radiação solar ($177,2 \pm 105,7 \text{ W.m}^{-2}$ nas 24hs anteriores ao momento das coletas). Esta densidade celular foi até 100 vezes inferior a encontrada em anos anteriores (Brandini, 1993; Kopczynska, 2008) e semelhante à observada em dezembro de 1997 (Kopczynska, 2008). Estes autores observaram florações sob condições de ventos fracos e maior estabilidade da coluna de água, que não ocorreram no período amostrado no presente estudo. O mesmo padrão foi observado quanto à concentração de clorofila.

Neste estudo, além da baixa concentração de clorofila ($0,38 \pm 0,19 \mu\text{g.l}^{-1}$), foram observados altos teores de silicato ($59,5 \pm 13,1 \mu\text{mol.l}^{-1}$), fosfato ($1,6 \pm 0,3 \mu\text{mol.l}^{-1}$),

amônio ($0,9 \pm 0,6 \mu\text{mol.l}^{-1}$) e nitrato ($22,3 \pm 9,6 \mu\text{mol.l}^{-1}$) típicos de águas antárticas. Também foram observados os valores de temperatura da água ($0,5 \pm 0,7^\circ\text{C}$) e salinidade ($34,1 \pm 0,5$) relativamente baixa em relação a águas oceânicas. Os nutrientes inorgânicos dissolvidos (nitrato, fosfato e silicato) ocorreram em maiores concentrações nas águas da bacia central quando comparado à região costeira, ao contrário da densidade celular fitoplanctônica, que foi mais elevada em águas costeiras que possuem temperaturas mais elevadas e salinidades reduzidas. A variação horizontal dos pigmentos (clorofila e feofitina) foi distinta nas águas superficiais (até 50m) e profundas (abaixo de 50 m) na bacia central. Na camada superficial, o teor de clorofila foi mais elevado em águas mais externas da Baía quando comparada com águas de locais mais rasos ($p < 0,04$), enquanto a concentração de feofitina relativa (feofitina/clorofila+feofitina) não apresentou alterações. Em águas profundas (abaixo de 50m), a clorofila média não variou. Por outro lado, tanto a feofitina média quanto a feofitina relativa ocorreram em maiores concentrações nos pontos com menor profundidade local ($p < 0,03$), sugerindo a influência do ambiente bentônico na coluna de água (ressuspensão), e sua proporção diminuiu gradativamente com o aumento da batimetria, em direção ao sul.

O nanoplâncton (10^4 a 10^5 cel.l^{-1}) apresentou densidade celular até 100 vezes mais elevada que o microfitoplâncton (10^3 cel.l^{-1}). De maneira geral, flagelados nanoplanctônicos, principalmente criptófitas, foram os mais abundantes em ambas as regiões (93% na zona costeira e 73% na zona central), seguidos das diatomáceas cêntricas (4% na zona costeira e 22% na zona central), dinoflagelados (2%) e diatomáceas penadas (1%). O microfitoplâncton ($>15 \mu\text{m}$) foi 3 vezes mais abundante na região costeira ($7,3 \times 10^3 \pm 5,8 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) quando comparado aos 50m superficiais

da bacia central ($2,2 \times 10^3 \pm 1,2 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) ($p < 0,01$), que por sua vez apresentou densidade celular superior à encontrada em águas abaixo de 50m de profundidade ($1,7 \times 10^3 \pm 1,6 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$; $p = 0,03$). Dinoflagelados foram responsáveis por 49% da densidade celular microfitoplânctônica, seguidos por diatomáceas penadas (31%) e cêntricas (18%). Porém, as diatomáceas penadas foram o grupo taxonômico mais abundante em 40% das amostras na zona costeira, sendo o microfitoplâncton dos outros 60% das amostras dominado pelos dinoflagelados gymnodinióides. Nas águas costeiras da Baía do Almirantado foi observada uma grande contribuição de diatomáceas penadas bentônicas (e.g. *Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Licmophora* spp.), enquanto os nanoflagelados (principalmente criptófitas) e dinoflagelados mixo/heterotróficos (e.g. *Gyrodinium lachryma*, *Katodinium* sp.1) foram abundantes desde os locais mais costeiros até as águas superficiais na isóbata de 100 m. Estas microalgas estiveram associadas às águas menos salinas de temperatura mais elevada, provavelmente em decorrência do aporte de água doce proveniente do degelo terrestre. Os baixos teores de amônio observados nestas águas, ao contrário do esperado devido à lixiviação continental, sugerem o consumo deste nutriente pelas criptófitas, os organismos mais abundantes nestas águas costeiras.

Na isóbata de 100 m, diatomáceas penadas bentônicas (e.g. *Cocconeis* spp.) também foram representativas, principalmente próximo ao fundo. Na isóbata de 300m, o encontro das águas menos salinas e mais quentes com as águas provenientes do Estreito de Bransfield provocou a formação de uma picnoclina, onde as concentrações de fosfato e nitrato foram as mais reduzidas. Nesta região, a densidade celular de dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) foi elevada, uma vez que estes organismos são favorecidos por condições de transição entre águas costeiras rasas e

águas costeiras mais abertas (Smayda e Reynolds, 2003). Diatomáceas penadas do gênero *Pseudo-nitzschia* foram abundantes nas camadas superficiais e na profundidade de 200m da bacia central (isóbata de 500 m). Ao mesmo tempo, em camadas mais profundas na isóbata de 300 m em direção à bacia central da Baía, as diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas (comuns nestas águas durante o inverno segundo Kopczynska, 2008) tornaram-se mais abundantes, assim como diatomáceas cêntricas microplanctônicas, principalmente *Thalassiosira*. Nestas águas foram observadas as maiores concentrações de nutrientes (exceto amônio). Ainda na isóbata de 300 m, próximo ao fundo no ponto mais costeiro (300m-1), foi também observado um aumento na densidade celular de diatomáceas cêntricas microplanctônicas, representadas por espécies bentônicas como *Coscinodiscus* (e.g. *C. asteromphalus* e *C. furcatus*).

A isóbata de 500 m foi marcada pela dominância das diatomáceas cêntricas, além da contribuição de diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia*. A composição e abundância do fitoplâncton nos dois pontos localizados no Estreito de Bransfield, em frente à entrada da Baía do Almirantado (isóbata de 700 m) foram bastante distintos entre si. No ponto localizado mais a oeste (700m-1), diatomáceas *Pseudo-nitzschia* foram dominantes, apresentando densidade celular relativamente elevada em toda a coluna de água, junto a diatomáceas cêntricas (*Thalassiosira* spp.). Por outro lado, o ponto localizado mais a leste (700m-2) apresentou baixa densidade celular fitoplanctônica em toda a coluna de água, exceto nas camadas superficiais (até 50 m) onde criptófitas, dinoflagelados, diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* e diatomáceas cêntricas microplanctônicas foram responsáveis pelo aumento da densidade celular.

Com base nos resultados acima, foi observado uma zonação espacial onde os flagelados são dominantes na região costeira, que possui grande aporte de água doce e

amônio, enquanto dinoflagelados tornaram-se mais abundantes nas águas adjacentes, na pequena frente formada entre águas costeiras e águas da bacia central. Após esta frente, predominam as diatomáceas cêntricas planctônicas e as penadas *Pseudo-nitzschia*, indicadoras da entrada de águas do Estreito de Bransfield. Assim, não foi observada a dominância das diatomáceas na região costeira da Baía do Almirantado, como relatado em anos anteriores por Lange et al. (2007) e Lange et al. (anexo I). Porém, no Estreito de Bransfield próximo à entrada da Baía do Almirantado, foi observada a alta densidade celular de diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp. em um dos pontos amostrados, sendo este gênero também representativo nas águas da bacia central da Baía. Este gênero foi anteriormente reportado em grandes concentrações no Mar de Weddell (Almadoz et al., 2008) e em regiões mais ao norte, próximas à frente polar, na Antártica Oriental (Fiala et al., 1998; Kopczynska et al., 1998; Kopczynska e Fiala, 2003; Kopczynska et al., 2007). Sendo assim, a elevada abundância das diatomáceas *Pseudo-nitzschia* spp. nas águas da Baía do Almirantado e proximidades indicam a influência de águas do Mar de Weddell durante o início do verão de 2008, que pode ser consequência do aquecimento da região noroeste da Península Antártica.

6. Conclusões

6.1. Parte I - Variações Inter-Anuais

O fitoplâncton ($>15\ \mu\text{m}$) de águas costeiras rasas na Baía do Almirantado é dominado por diatomáceas. A contribuição de algas microfitobentônicas na coluna de água está possivelmente relacionada às condições ambientais que ocorreram no inverno

anterior. Invernos mais frios permitem o maior acúmulo de gelo e neve continental, que derretem durante o verão. Os processos físicos associados com o fluxo intenso de água doce do degelo continental intensificam a ressuspensão de material de fundo, incluindo as grandes diatomáceas do microfitobentos, além de cianobactérias epônticas que são carregadas para o mar. As áreas mais suscetíveis a estes processos são Ezcurra e, no verão austral de 2008/9, Botany Point. Porém, o aumento da temperatura da água e o pequeno declínio na salinidade nos verões de 2007/8 e 2008/9 estiveram associados à menor densidade celular de diatomáceas cêntricas planctônicas, e ao aumento da densidade celular de pequenos dinoflagelados. Por outro lado, a diatomácea cêntrica *Corethron pennatum* foi mais abundante nos verões em que o gelo marinho formado no inverno ainda estava presente sobre as águas da Baía durante o verão.

A temperatura mais elevada, menor salinidade, baixa velocidade do vento e alta concentração de amônio estiveram associados à contribuição de cianobactérias e de grandes diatomáceas ($>80\ \mu\text{m}$) na região costeira. Diatomáceas epífitas como *Pseudogomphonema kamtshaticum*, *Achnanthes* spp., *Licmophora* spp. and *Cocconeis* spp. estiveram sempre presentes em Comandante Ferraz e Ezcurra, onde fragmentos de macroalgas são abundantes no infra-litoral. A grande contribuição do microfitobentos para o plâncton, principalmente diatomáceas penadas, corrobora com a importância desta fonte de alimento para os herbívoros planctônicos e bentônicos relatada na literatura.

A composição de espécies do microfitoplâncton foi diferenciada entre os anos amostrados, assim como o tamanho das células foi menor nos verões de 2007/8 e 2008/9, em relação aos demais períodos amostrais. Células grandes ($>80\ \mu\text{m}$) foram

mais abundantes no verão 2002/3, e a contribuição destas células diminuiu em detrimento de células menores (15-30 μm), que foram mais abundantes em 2008/09.

A modificação na composição taxonômica se deu pela substituição de diatomáceas penadas bentônicas (*Licmophora*, *Achnanthes*, *Navicula*), que foram dominantes nos primeiros anos amostrados, por diatomáceas planctônicas (*Pseudo-nitzschia* spp.) e dinoflagelados de porte menor. Diatomáceas cêntricas seguiram uma tendência, onde aquelas de tamanho maior (*Stellarima microtrias*, *Charcotia actinochila*, *Porosira* spp., *Thalassiosira ritscheri*, *Coscinodiscus asteromphalus*) foram mais abundantes em 2002/3 e principalmente em 2003/4, enquanto pequenas cêntricas (*Thalassiosira* spp. e outras) foram mais abundantes nos anos mais recentes.

As mudanças na composição de espécies e no tamanho celular do fitoplâncton nestas águas costeiras estiveram associadas ao aumento da temperatura da água e concentração de nutrientes, e ao pequeno declínio da salinidade devido ao aumento do degelo continental, com uma contribuição importante dos padrões de ventos influenciando os processos físicos na coluna de água. Porém, este processo pode ser parte de uma modificação em larga escala das populações fitoplanctônicas a noroeste da Península Antártica, como relatado na literatura.

6.2. Parte II -Variações espaciais no ano de 2008: bacia central e zona costeira da Baía do Almirantado

O fitoplâncton da Baía do Almirantado durante o início do verão de 2008/9 apresentou densidade celular do nanoplâncton composto principalmente por

diatomáceas cêntricas e criptófitas. Este foi até 100 vezes mais abundante que o microfitoplâncton, dominado por diatomáceas, principalmente penadas.

As variações espaciais na estrutura da comunidade fitoplanctônica foram marcadas pela maior densidade celular na região costeira rasa, tanto do micro quanto do nanoplâncton, quando comparadas com a bacia central da Baía.

Em águas costeiras, o nanoplâncton foi dominado por flagelados, principalmente criptófitas, relacionadas a valores reduzidos de amônio, o que sugere que este nutriente esteja sendo consumido por estes organismos apesar do elevado aporte continental. O microfitoplâncton foi representado principalmente pelos dinoflagelados *Katodinium* sp.1 e *Gyrodinium lachryma*, além de diatomáceas penadas bentônicas, sendo estas o grupo mais abundante do microfitoplâncton em 40% das amostras. Dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) apresentaram densidades celulares mais elevadas nos limites entre águas sob influência costeira e águas oceânicas, estando relacionados a depleções de nitrato.

Na bacia central, onde a concentração de nutrientes é elevada, o fitoplâncton apresentou baixa densidade celular, com maiores concentrações em águas superficiais (<50 m). Diatomáceas cêntricas do micro e nanoplâncton foram as principais representantes do fitoplâncton nesta região, junto às diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp., dominantes também no Estreito de Bransfield.

No lado leste da bacia central, a densidade celular mais elevada de criptófitas, diatomáceas bentônicas e micro-dinoflagelados atecados mixo/heterotróficos (e.g. *Katodinium* sp.1, *Gymnodinium* spp.) em águas superficiais indicaram o maior aporte das águas costeiras da Enseada Martel, onde estes grupos foram dominantes provavelmente devido à menor intensidade de correntes e movimentos turbulentos.

A troca com as águas mais externas do Estreito de Bransfield foi indicada pela maior contribuição de diatomáceas cêntricas do microfitoplâncton, além de diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp.. A presença destes táxons na íngreme região costeira da Enseada Ezcurra refletiu a maior hidrodinâmica decorrente da grande influência das marés e ventos na circulação do lado oeste da Baía, como já mencionado pela literatura. Em Ezcurra, diatomáceas epífitas provenientes de macroalgas foram as principais indicadoras das águas costeiras.

No início do verão de 2008/9, o fitoplâncton da Baía do Almirantado mostrou-se como um bom indicador de massas de água, apresentando diferenças na estrutura da comunidade que acompanharam as características hidrológicas destas: diatomáceas bentônicas, criptófitas e dinoflagelados heterotróficos indicaram em águas costeiras; diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp., e cêntricas *Thalassiosira* spp. apontaram águas oceânicas; e dinoflagelados autotróficos *Prorocentrum* spp. demarcaram a região de encontro destas massas de água. A influência de águas derivadas do degelo terrestre também foi refletida no fitoplâncton, indicada pelas diatomáceas bentônicas, em sua maioria penadas, provenientes da região praial, e de cianobactérias epônticas. Os dinoflagelados heterotróficos do microplâncton e as criptófitas foram dominantes em águas mais rasas e com menor influência dos regimes de marés e ventos na circulação (i.e. Enseada Martel, Enseada Mackellar e leste da bacia central). A elevada densidade celular de *Pseudo-nitzschia* spp. na Baía do Almirantado e arredores durante o mês de dezembro, o que é incomum neste período de acordo com a literatura, pode ser um indício do aquecimento da região noroeste da Península Antártica resultando no maior aporte das águas do Mar de Weddell, onde estas diatomáceas são abundantes.

7. Conclusões gerais

O microfitoplâncton da Baía do Almirantado, durante o período estudado, apresentou mudanças temporais e diferenças em relação ao relatado previamente por outros autores. Em águas costeiras, o tamanho celular foi reduzido nos verões mais recentes (2007/8 e 2008/9) em relação aos primeiros anos amostrados (2002/3 e 2003/4), e a mudança na composição específica destacou a troca da dominância de diatomáceas bentônicas por dinoflagelados mixo/heterotróficos e diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp.. Estes dinoflagelados ocorrem simultaneamente com criptófitas em águas costeiras, como observado no verão de 2008/9.

As mudanças observadas na estrutura da comunidade fitoplanctônica refletem o aumento da temperatura e concentração de nutrientes e redução da salinidade nos anos recentes. O aumento na concentração de nutrientes está relacionado provavelmente ao menor consumo pelas diatomáceas fitoplanctônicas, que ocorreram em menor densidade celular nos verões mais recentes (2007/8 e 2008/9). Os maiores teores de nutrientes em verões precedidos de invernos mais rigorosos (2002/3 e 2007/8), quando comparados aos demais períodos amostrados, indicam um maior aporte continental, devido à intensificação do degelo e consequente lixiviação.

No início do verão de 2008/9, cianobactérias epônticas foram identificadas como boas indicadoras de degelo continental intenso, uma vez que estiveram associadas às águas costeiras de baixa salinidade e alta temperatura. As concentrações mais baixas de amônio encontradas nestas águas estiveram associadas aos nanoflagelados, principalmente criptófitas, junto a dinoflagelados mixo/heterotróficos. Dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) são abundantes no limite entre as águas costeiras,

influenciadas pelo degelo, e águas da bacia central, intensamente supridas pelas águas do Estreito de Bransfield.

As águas da bacia central da Baía do Almirantado são caracterizadas pela baixa densidade celular, sendo dominadas por diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas. A influência das águas externas do Estreito de Bransfield é indicada pelas diatomáceas cêntricas *Thalassiosira* spp. e penadas *Pseudo-nitzschia* spp., presentes na região costeira, águas superficiais (até 100 m) da bacia central e do Estreito de Bransfield. Assim, a elevada densidade celular das diatomáceas *Pseudo-nitzschia* spp. na Baía do Almirantado e arredores indica a maior influência das águas do Mar de Weddel nesta área durante o início do verão 2008/9, o que não foi observado nos verões previamente amostrados.

8. Referências Bibliográficas

- Absher, T. M., Boehs, G., Feijó, A. R., da Cruz, A. C. (2003). Pelagic larvae of benthic gastropods from shallow Antarctic waters of Admiralty Bay, King George Island. *Polar Biology* 26: 359-364.
- Al-Handal, A. Y., Wulff, A. (2008a). Marine benthic diatoms from Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 51-68.
- Al-Handal, A. Y., Wulff, A. (2008b). Marine epiphytic diatoms from the shallow sublittoral zone in Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 411-435.
- Almandoz, G. O., Ferreyra, G. A., Schloss, I. R., Dogliotti, A. I., Rupolo, V., Paparazzo, F. E., Esteves, J. L., Ferrario, M. E. (2008). Distribution and ecology of *Pseudo-nitzschia* species (Bacillariophyceae) in surface waters of the Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biology* 31: 429-442.
- Balech, E. (1975). *Clave Ilustrada de Dinoflagelados Antarticos*. Instituto Antartico Argentino, Direccion Nacional del Antartico, Buenos Aires: 98 pp.
- Brandini, F. P. (1993). Phytoplankton biomass in an Antarctic coastal environment during stable water conditions - implications for the iron limitation theory. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 93: 267-275.

- Brandini, F. P., Rebello, J. (1994). Wind field effect on hydrography and chlorophyll dynamics in the coastal pelagial of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 6 (4): 433-442
- Brusca, R.C., Brusca, G. J (2003). *Invertebrates*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts: 936 pp.
- Clarke, A., Leakey, R. J. G. (1996). The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnology and Oceanography*, 41(6): 1281-1294.
- Corbisier, T. N., Petti, M. A. V., Skowronski, R. S. P., Brito, T. A. S. (2004). Trophic relationships in the nearshore zone of Martel Inlet (King George Island, Antarctica): $\delta^{13}\text{C}$ stable-isotope analysis. *Polar Biology* 27: 75–82.
- Cornejo-Donoso, J., Antezana, T. (2008). Preliminary trophic model of the Antarctic Península Ecosystem (Sub-area CCAMLR 48.1). *Ecological Modelling* 218: 1–17.
- Cupp, E. E. (1943). *Marine Plankton Diatoms of the West of North America*. California: University of California Press. 235pp.
- Fiala, M., Semeneh, M., Oriol, L. (1998). Size-fractionated phytoplankton biomass and species composition in the Indian sector of the Southern Ocean during austral summer. *Journal of Marine Systems* 17: 179-194.
- Filgueiras, V. L., Campos, L. S., Lavrado, H. P., Frensel, R., Pollery, R. C. G. (2007). Vertical distribution of macrobenthic infauna from the shallow sublittoral zone of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polar Biology* 30: 1439-1447.
- Froneman, P.W., Pakhomov, E.A., Laubscher, R.K. (1997). Microphytoplankton assemblages in the waters surrounding South Georgia, Antarctica during austral summer 1994. *Polar Biology* 17: 515-522.
- Hasle, G. R. (1972). The distribution of *Nitzschia seriata* Cleve and allied species. In: *Simonsen, R. ed First Symposium on Recent and Fossil Marine Diatoms*: 171-190.
- Horner, R., Ackley, S. F., Dieckmann, G. S., Gulliksen, B., Hoshiai, T., Legendre, L., Melnikov, I. A., Reeburgh, W. S., Spindler, M., Sullivan, C. W. (1992). 1. Habitat, terminology, and methodology. In: *Ecology of sea ice biota*. *Polar Biology* 12: 417-427.
- INPE (2009) <http://www.cptec.inpe.br/antartica/antartica.shtml>
- Komarek, J. (2007). Phenotype diversity of the cyanobacterial genus *Leptolyngbya* in the maritime Antarctic. *Polish Polar Research* 28 (3): 211-231.
- Kopczynska, E. E., Fiala, M., Jeandel, C. (1998). Annual and interannual variability in phytoplankton at a permanent station off Kerguelen Islands, Southern Ocean. *Polar Biology* 20: 342-351
- Kopczynska, E. E., Fiala, M. (2003). Surface phytoplankton composition and carbon biomass distribution in the Crozet Basin during austral summer of 1999: variability across frontal zones. *Polar Biology* 27: 17-28.
- Kopczynska, E. E., Savoye, N., Dehairs, F., Cardinal, D., Elskens, M. (2007). Spring phytoplankton assemblages in the Southern Ocean between Australia and Antarctica. *Polar Biology* 31: 77-88.

- Kopczynska, E. E. (2008). Phytoplankton variability in Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands: six years of monitoring. *Polish Polar Research* (29) 2: 117–139.
- Lange, P. K., Tenenbaum, D. R., Braga, E. S., Campos, L. S. (2007). Microphytoplankton assemblages in shallow waters at Admiralty Bay (King George Island, Antarctica) during the summer 2002–2003. *Polar Biology* 30: 1483–1492.
- Legendre, L., Legendre, P. (1983). *Numerical Ecology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Medlin, L. K. & Priddle, J. (1990). Introduction. Polar Marine Diatoms. British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council.
- Moline, M. A., Prézélin, B. B. (1996). Long-term monitoring and analyses of physical factors regulating variability in coastal Antarctic phytoplankton biomass, *in situ* productivity and taxonomic composition over subseasonal, seasonal and interannual time scales. *Marine Ecology Progress Series* 145: 143–160.
- Moline, M. A., Prézélin, B. B., Schofield, O., Smith, R.C. (1997). Temporal dynamics of coastal Antarctic phytoplankton: environmental driving forces and impact of a 1991/92 summer diatom bloom on the nutrient regimes. In: *Battaglia, B.J., Valencia, J., Walton, D.W.H. (Eds.), Antarctic Communities*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: 67– 72.
- Montes-Hugo, M. A., Vernet, M., Martinson, D., Smith, R., Iannuzzi, R. (2008a). Variability on phytoplankton size structure in the western Antarctic Peninsula (1997– 2006). *Deep-Sea Research II* 55: 2106– 2117.
- Montes-Hugo, M., Vernet, M., Smith, R., Carder, K. (2008b). Phytoplankton size-structure on the Western shelf of the Antarctic Peninsula: A remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing* 29: 801–829.
- Montes-Hugo, M. A., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E., Schofield, O. (2009). Recent Changes in Phytoplankton Communities Associated with Rapid Regional Climate Change Along the Western Antarctic Peninsula. *Science* 323: 1470–1473.
- Nakayama, C. R., Kuhn, E., Araújo, A.C.V., Alvalá, P.C., Ferreira, W.J., Vazoller, R.F., Pellizari, V.H. (2011). Revealing archaeal diversity patterns and methane fluxes in Admiralty Bay, King George Island, and their association to Brazilian Antarctic Station activities. *Deep-Sea Research II* 58: 128–138.
- Nedzarek, A., Rakusa-Suszczewski, S. (2004). Decomposition of macroalgae and the release of nutrients in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polar Bioscience* 17: 26–35.
- Nedzarek, A. (2008). Sources, diversity and circulation of biogenic compounds in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 20 (2): 135–145.
- Opalinski, K. W., Maciejewska, K., Georgieva, L. V. (1997). Notes on food selection in the Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Polar Biology* 17: 350–357.
- Peragallo, M. H. & Peragallo, M. (1921). Diatomées d'eau douce et diatomées d'eau salée. In *Charcot, J. ed Deuxième Expedition Antarctique Française*, Masson et Éditeurs, Saint-Germain, Paris (VI): 41–102.

- Pichlmaier, M., Aquino, F. E., Da-Silva, C. S., Braun, M. (2004). Suspended sediments in Admiralty Bay, King George Island (Antarctica). *Brazilian Antarctic Research* 4: 77-85.
- Rakusa-Suszczewski, S. (1980). Environmental conditions and the functioning of Admiralty Bay (South Shetland Islands) as part of the near shore Antarctic ecosystem. *Polish Polar Research* 1 (1): 11-27.
- Ribeiro, A. P., Figueira, R. C. L., Martins, C. C., Silva, C. R. A., França, E. J., Bícigo, M. C., Mahiques, M. M., Montone, R. C. (2011). Arsenic and trace metal contents in sediment profiles from the Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin* 62: 192–196.
- Robakiewicz, M., Rakusa-Suszczewski, S. (1999). Application of 3D circulation model to Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polish Polar Research* 20 (1): 43-58.
- Round, F. E., Crawford, R. W., Mann, D. G. (1990). *The Diatoms, Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge: Cambridge University Press: 747pp.
- Schloss, I. R., Ferreyra, G. A., Ruiz-Pino, D. (2002). Phytoplankton biomass in Antarctic shelf zones: a conceptual model based on Potter Cove, King George Island. *Journal of Marine Systems* 36: 129– 143.
- Scott, F. J., Marchant, H. J. (2005). *Antarctic Marine Protists*. ABRS, Canberra and AAD, Hobart:563 pp.
- Sieburth, J. M., Smetacek, V., Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23: 1256-1263.
- Smayda, T. J., Reynolds, C. S. (2003). Strategies of marine dinoflagellate survival and some rules of assembly. *Journal of Sea Research* 49: 95– 106.
- Underwood, A. J. (1994). On Beyond BACI: sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecol. Appl.* 4: 3–15.
- Utermöhl, H. (1958). Perfeccionamento del método cuantitativo del fitoplancton. *Comum. Assoc. Int. Limnol. Teor. Apl.* 9: 1-89.

Tabela 1. Datas de coleta, período e ano do verão austral, coordenadas geográficas e locais de todas as estações de amostragem avaliadas no presente estudo.

verão austral	período	Data da coleta	Estação de amostragem	Latitude	Longitude	profundidade local (m)	número de amostras
2002/3	início do verão	27/11/2002	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	3
				62.082 S	58.380 E	30	3
				62.082 S	58.375 E	50	3
		29/11/2002	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	3
				62.099 S	58.353 E	30	3
				62.097 S	58.353 E	50	3
	final do verão	10/12/2002	Enseada Ezcurra (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	3
				62.157 S	58.482 E	30	3
				62.157 S	58.484 E	50	3
		04/02/2003	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	3
				62.082 S	58.380 E	30	3
				62.082 S	58.375 E	50	3
2003/4	início do verão	11/12/2003	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	3
				62.082 S	58.380 E	30	3
				62.082 S	58.375 E	50	3
		11/12/2003	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	3
				62.099 S	58.353 E	30	3
				62.097 S	58.353 E	50	3
	meio do verão	01/12/2003	Enseada Ezcurra (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	3
				62.157 S	58.482 E	30	3
				62.157 S	58.484 E	50	3
		23/01/2004	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	3
				62.082 S	58.380 E	30	3
				62.082 S	58.375 E	50	3
2007/8	final do verão	28/02/2008	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.380 E	30	2
				62.099 S	58.353 E	30	2
				62.157 S	58.482 E	30	2
	início do verão	08/12/2008	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.380 E	30	2
				62.099 S	58.353 E	30	2
				62.085 S	58.354 E	30	2
		10/12/2008	Refúgio 2 (Re)	62.072 S	58.430 E	30	2
				62.157 S	58.482 E	30	2
				62.157 S	58.484 E	50	3
2008/9	início do verão	01/12/2008	100m #1	62.087 S	58.373 E	100	5
		02/12/2008	100m #2	62.100 S	58.437 E	100	5
		02/12/2008	300m #1	62.110 S	58.424 E	300	5
		02/12/2008	300m #2	62.140 S	58.396 E	300	7
		06/12/2008	500m #1	62.205 S	58.358 E	500	7
		06/12/2008	500m #2	62.157 S	58.421 E	500	7
		07/12/2008	700m #1	62.272 S	58.313 E	700	8
		07/12/2008	700m #2	62.253 S	58.201 E	700	8

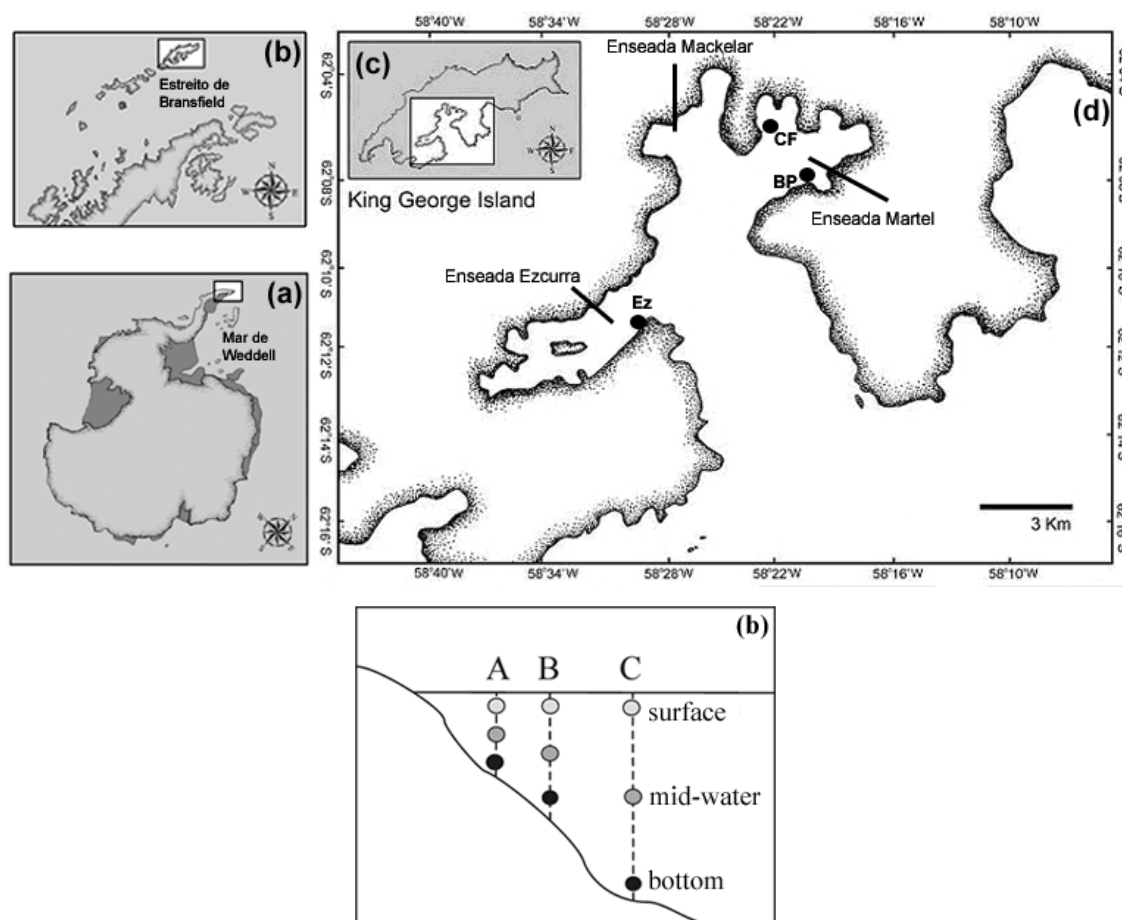


Figura 1. (a) Continente Antártico; (b) Península Antártica; (c) Ilha Rei George e (d) Baía do Almirantado com as áreas amostradas na zona costeira rasa: CF. Comandante Ferraz; BP. Botany Point; Ez. Ensenada Ezcurra; (e) estações de amostragem (A. 20 m; B. 30 m; C. 50 m) e profundidades de coleta (superfície, meio e fundo) em cada umas das estações.

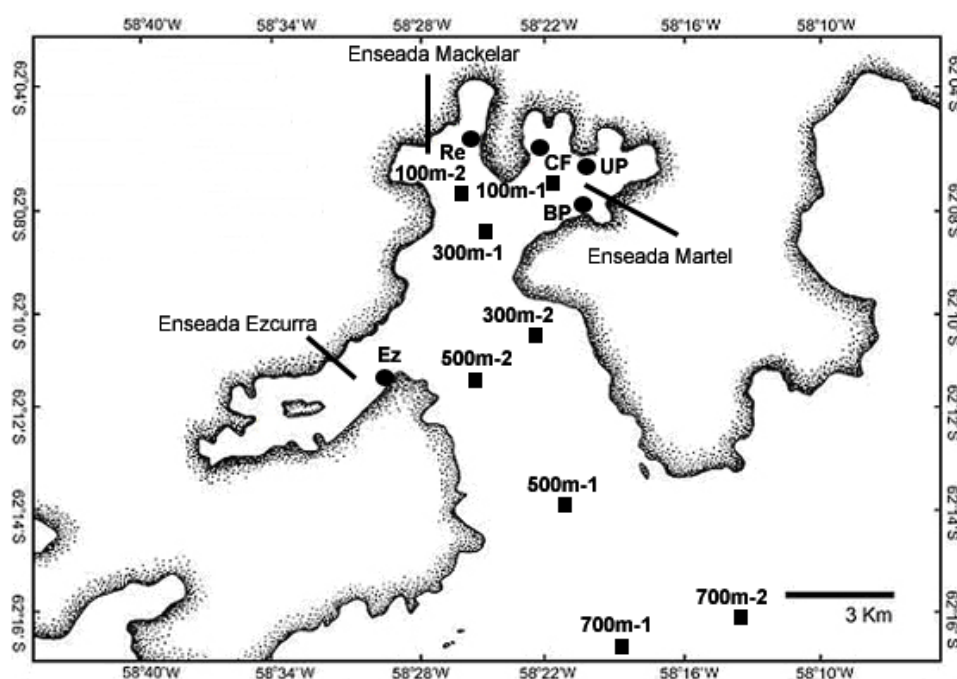


Figura 2. Pontos de amostragem na região costeira, bacia central da Baía do Almirantado e Estreito de Bransfield, durante o início do verão de 2008: CF. Comandante Ferraz; BP. Botany Point; UP. Ullman Point; Ez. Enseada Ezcurra; Re. Refúgio 2. Os pontos amostrados na bacia central têm os nomes correspondentes à sua profundidade local (isóbata).

Anexo I

Temporal changes in the microphytoplankton of Admiralty Bay

(King George Island, Western Antarctic Peninsula)

Priscila Kienteca Lange^{1,2*}, Denise Rivera Tenenbaum², Virgínia Maria Tavano Garcia¹,
Lucia de Siqueira Campos²

¹ Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Laboratório de Fitoplâncton e Microorganismos Marinhos. Av. Italia, Km 8, Rio Grande/RS, 96201-900, Brazil. * prilange@gmail.com;

² Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rua Rodolpho P. Rocco, Prédio CCS, Bl. A, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro/RJ, 21945-900, Brazil.

Abstract

Phytoplankton (>15 µm) was studied in shallow coastal waters of three areas at Admiralty Bay, during the summers of 2002/3, 2003/4, 2007/8 and 2008/9. Phytoplankton abundance was low (10^3 cells l⁻¹), and over time prevailing cells' size decreased and species composition changed. Largest cells (>80 µm), mainly pennate diatoms (e.g. *Gyrosigma fasciola*, *Navicula directa*) and the centric *Corethron pennatum*, were more representative in 2002/3, when phytoplankton abundance was the lowest (10^2 cells l⁻¹). Medium-sized (31-80 µm) centric diatoms (e.g. *Thalassiosira* spp., *Stellarima microtrias*) presented the highest abundance (10^4 cells l⁻¹) during in 2003/4. Nevertheless, the contribution of smallest cells (15-30 µm), especially dinoflagellates and also planktonic diatoms (*Pseudo-nitzschia* spp.) increased in the summers of 2007/8

and mainly 2008/9. During the latter, small dinoflagellates reached 50% of the total abundance. Upon terrestrial ice melting during the summer, terrestrial epontic cyanobacteria and nutrients were carried to coastal waters, where temperature and ammonium concentrations were highest and salinity was lowest. Large benthic diatoms were more representative in the water column during summers that followed cold winters with highest accumulation of continental ice. Epiphytic diatoms (*Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Cocconeis* spp.) were constantly observed at two of the three sampling areas. This suggests that macroalgae tissue might be relevant as substrate for benthic/tychoplanktonic primary producers in Admiralty Bay coastal waters. If the observed decrease in microphytoplankton size continues over time, this may cause a shift in the composition of size-selective herbivores (e.g. from krill to salps) and thereby modify the whole food web in the area.

Keywords: diatoms, wind patterns, ammonium, temperature oscillations, ice melt

Introduction

The Southern Ocean is peculiar for its relatively short food web (Corbisier et al., 2004; Cornejo-Donoso & Antezana 2008), and changes in the phytoplankton community structure may rapidly be reflected in the other food web compartments (Medlin & Priddle 1990, Vergani et al. 2001, Cornejo-Donoso & Antezana 2008, Ribic et al. 2008). Phytoplankton assemblages are influenced by chemical and physical properties of water masses (Hewes 2009), and by environmental factors such as wind

regime and solar radiation. In certain coastal areas of the Western Antarctic Peninsula (WAP), winds induce small upwellings leading to sediments resuspension (Brandini & Rebello 1994, Schloss et al. 2002). Moreover, solar radiation regulates primary production rates and taxonomic composition of phytoplankton assemblages, mainly due to differences in species physiological responses when exposed to different light intensities (Cianelli et al. 2004).

Phytoplankton assemblages in the WAP surface waters are dominated by nanoplankton ($<20\ \mu\text{m}$) (Garibotti et al. 2003, Montes-Hugo et al. 2008a). However, microphytoplanktonic ($20\text{--}200\ \mu\text{m}$) diatoms are associated with blooms that accumulate the highest biomasses in the water column (Clarke & Leakey 1996, Moline et al. 1997, Schloss et al. 2002, Varela et al. 2002).

During the last 30 years, warming of the WAP northern waters (including Bransfield Strait) resulted in increased cloud cover (shading) and wind speed (water column mixing), and decreased ice sheet extent (Montes-Hugo et al. 2009). Although the influence of these processes in coastal areas is still under investigation (Schloss et al. 2002, Pichlmaier et al. 2004, Kopczynska 2008), it has been observed that the prevailing phytoplankton cell size decreased in open ocean waters. Usually, largest microalgae (diatoms) are associated with ice field edges, being dependent on a relatively shallow upper mixing layer (Montes-Hugo et al. 2009). Additionally, changes in the wind regime may have favored advection of poor-chlorophyll Weddell Sea waters into the Bransfield Strait, instead of the more productive waters from the Bellingshausen Sea (Montes-Hugo et al. 2009).

The microphytoplankton in Admiralty Bay, at King George Island, is generally originated from the Bransfield Strait (Kopczynska 2008). Nevertheless, near the coast

microphytobenthos is suspended in the water column through coastal upwellings (Brandini & Rebello 1994, Schloss et al. 2002) and advection caused by the continental ice melt (Pichlmaier et al. 2004, Nedzarek 2008). Physical processes generated by winds and continental freshwater runoff are also responsible for increases in water turbidity, which would decrease light penetration in the water column and, consequently, primary production.

It is possible to detect changes in Antarctic coastal ecosystems by monitoring trends in the phytoplankton successional patterns, as their interannual variations are more evident than changes in biomass or productivity indices, which show a short-term variability higher than interannual variations (Moline & Prézelin 1996). In the Antarctic Peninsula, the strong short-term variability results from the marked influence of physical processes on primary production of coastal areas (Schloss et al. 2002, Turner 2004, Ward et al. 2007) and the dependence of terrestrial biological systems' on the marine environment (Medlin & Priddle 1990, Vergani et al. 2001, Ribic et al. 2008).

Considering the observed temporal variability in climate conditions in the WAP and its influence on the phytoplankton community structure, the objective of this study is to associate the temporal and spatial variation in phytoplankton ($>15\ \mu\text{m}$) size structure and composition to changes in hydrological variables during four summers (2002/3, 2003/4, 2007/8 and 2008/9) in the coastal shallow ($<30\ \text{m}$) waters of Admiralty Bay (King George Island).

Material and Methods

Study area

Admiralty Bay is a deep embayment located at King George Island (South Shetland Islands, Antarctic Peninsula) at approximately 62°S and 58°W (Fig. 1). It covers an area of 122 km² and at the central basin the depth exceeds 600 m, but at the three inlets (Ezcurra, Mackellar and Martel) it does not exceed 150 m (Rakusa-Suszczewski 1980). This fjord-like shape reflects a strong glacial influence, subject to freshwater input and high water column turbidity caused by suspension of soft sediments (Pichlmaier et al. 2004). The connection between inner waters and the open ocean (Bransfield Strait) occurs through a wide southward opening. The influence of winds and tidal variations on water circulation is more intense in the shallow areas, especially at the western side of the bay (Robakiewicz & Rakusa-Suszczewski 1999), where wind plays an important role as primary production regulator (Brandini & Rebello 1994). The runoff of freshwater enriched with guano and fragments of macroalgae are important sources of organic matter and nutrients in the Bay (Nedzarek & Rakusa-Suszczewski 2004).

Sampling methods and phytoplankton analysis

Admiralty Bay was surveyed during the early and late summer of 2002/3 (27 November - 10 December 2002 and 3 - 10 February 2003), early and mid-summer of 2003/4 (1-12 December 2003 and 16 - 23 January 2004), late summer of 2007/8 (21

February - 5 March 2008) and early summer of 2008/9 (8-14 December 2008) (Tab. 1). Samples were collected near the Brazilian Antarctic Station Comandante Ferraz (EACF) and two other sites, one of them (Botany Point) distant from any anthropogenic activity (Fig. 1a). At each site, three sampling stations were established following the bathymetries of 20 m (St. A), 30 m (St. B) and 60 m (St. C) (Fig. 1b). At each station, samples were collected at surface, mid-water and near the bottom (Tab. 1).

The 164 water samples were collected using three liters Van-Dorn bottles, stored in one liter dark polypropylene bottles and mixed with borax-buffered formaldehyde (final concentration 4%). Phytoplankton was analysed according to the method of Utermöhl (1958), where cells were allowed to settle in 50-100 ml chambers for 48-72 h depending upon cell concentration. By using an inverted microscope (Olympus® IX70) equipped with phase contrast at a magnification of $200\times$ (ocular $10\times$, objective $20\times$), organisms larger than $15\text{ }\mu\text{m}$ were analyzed in the whole counting chamber. A higher magnification ($400\times$) was used to identify the smallest taxa, such as some diatoms and dinoflagellates and differential interference contrast (DIC) was also used to help identification of diatoms. Species identification and classification were based on the following literature: Peragallo & Peragallo (1921), Cupp (1943), Hasle (1972), Balech (1975), Medlin & Priddle (1990), Round et al. (1990), Scott & Marchant (2005), Komarek (2007), Al-Handal & Wulff (2008a, 2008b).

Total biovolume was calculated for the large centric diatom *Corethron pennatum* and for mid-sized centrics (*Thalassiosira* spp., *Charcotia actinochila*, *Stellarima microtrias* and *Porosira* spp.) in each sampling period (early and late summer 2002/3 and early and mid-summer 2003/4). The mean diameter and mean height of 50 cells of each species were measured in each period, and biovolume was calculated using a

cylinder volume formula ($\pi \times \text{radius}^2 \times \text{height}$), where the radius is half of the diameter (Olenina et al. 2006). Then, the mean cell volume of each species was multiplied by their total concentration (cells l⁻¹) at each sampling period.

Temperature was measured using protected reversion thermometers, and salinity was measured using a Backman inductive salinometer. Wind and solar radiation data were provided by the Brazilian National Institute for Spacial Research (INPE 2009). The average wind speed used in the statistical analyses was calculated for the 24h previous to sampling.

In 2002/3 and 2003/4, the nutrient samples were collected using Go-flo bottles (General Oceanic®), filtered in Whatman GF/F membrane and stored in polyethylene flasks pre-washed with HCl 1:1, rinsed with distilled water. Then, the filtered water samples were frozen (-20°C) for further analysis. Analyses of nitrate and nitrite were performed using an Auto Analyzer II - Bran-Luebbe®. Silicate and phosphate analyses were processed by a spectrophotometric method and measured in a Genesys II spectrophotometer, Bausch & Lomb®. All these analyses followed the recommendations in Grasshoff et al. (1999). Chlorophyll *a* was extracted from 1 l filtered samples (Whatman GF/F membrane), frozen (-20°C), and determined by fluorimetry after extraction in 90% acetone, using a Turner TD-7000 fluorometer (Parsons et al. 1984).

In 2007/8 and 2008/9, inorganic nutrients were also analyzed using the following methods (Grasshoff et al. 1999): ammoniacal nitrogen by indophenols; nitrite by diazotation; nitrate by reduction in Cd-Cu column followed by diazotation; total nitrogen by digestion with potassium persulfate following nitrate determination; orthophosphate by reaction with ascorbic acid; total phosphorous by acid digestion to phosphate; silicate by reaction with molibdate. Chlorophyll *a* analysis was performed

after vacuum filtration (<25 cm of Hg). The filters (cellulose membrane Millipore HAWP 0.45 μm) were extracted overnight in 90% acetone at 4°C, and analyzed with a UV-VIS Perkin Elmer Lambda 20 spectrophotometer (Perkin Elmer, USA) (Parsons et al. 1984).

Despite the fact that different methods were used for the analyses of nutrients and chlorophyll, their trends would remain the same not affecting the data interpretation in this work.

Data analysis and Statistics

Although microphytoplankton classically groups cells ranging from 20 to 200 μm (Sieburth et al. 1978), in this study 15-20 μm cells were also included, as their abundance and main taxonomic groups (diatoms and dinoflagellates) are similar to conventional microphytoplankton in Antarctica (Medlin & Priddle 1990, Schloss et al. 2002, Kopczynska 2008). Therefore, phytoplankton cells larger than 15 μm were identified and quantified in order to assess variations in the microphytoplankton community structure.

Phytoplankton cells were grouped into three size classes: 15-30 μm , 31-80 μm and >80 μm . As our results shall complement other studies in the area, this was to follow a more detailed trophic approach, taking into account that food selection by local herbivores depends on the size of particles they can capture with their mouth apparatus (Brusca & Brusca 2003). The phytoplankton was further divided in four taxonomic

groups: pennate diatoms, centric diatoms, dinoflagellates and cyanobacteria, for statistical analyses.

In each of the four sampling periods, taxa with abundance lower than the mean abundance of all species were considered *rare*, and were not included in any species level analyses (Cluster Analysis and SIMPER Routine). In order to normalize distributions and eliminate zero values, phytoplankton abundance data were log-transformed as $\log_{10}(x + 1)$. Percentages were normalized using the square root when proportions were compared. Phytoplankton abundance and environmental data from different sampling periods and areas were compared using a One-Way ANOVA with a Fisher-LSD test ($p < 0.05$) and Spearman correlation (r). Samples were grouped according to the abundance of each species through Cluster Analysis using the Ward's Method (Past[®] 1.8) and the Similarity Percentages routine (SIMPER; Primer[®] 6.0) where the most important species in those groups of samples were identified. A Principal Component Analysis (Statistica[®] 6.0) was used to evaluate the relationship between abiotic components, and their influence on phytoplankton communities was evaluated through a Canonical Correspondence Analysis (CANOCO[®] 4.5).

Results

Environmental patterns

The temperature increase in the last two sampling periods was associated with a slight decrease in salinity (Tab. 2). A negative correlation between temperature and

salinity ($r = -0.82$, Fig. 2a) and salinity and phytoplankton abundance ($r = -0.64$) was observed. Conversely, the correlation between salinity and nutrients was positive, especially ammonium ($r = 0.37$, Fig. 2b) and silicate ($r = 0.32$).

As previously described in Lange et al. (2007), the summer of 2002/3 was characterized by lowest water temperatures and highest salinities early in the season, while temperature increased and salinity decreased during late summer (Fig. 2a, Fig. 3a,b), as a result of ice melt throughout the season. Concentrations of nitrate, silicate and phosphate were lowest at the end of summer (Fig. 2c,d) and particularly ammonium concentrations were positively related with salinity (Fig. 2b; 3a).

In the summer of 2003/4, the sum of the variability explained by the first two components of the Principal Components Analysis represented 65.3% of variance (Fig. 3c,d). Temperature and nutrients showed the highest negative and positive weights, respectively. Early summer samples were projected in the positive portion of Axis I (40.7%) as well as nutrients, while the mid-summer samples, water temperature and wind speed were in the negative portion (Fig. 3c,d). Therefore, the early summer was characterized by lowest temperatures (Fig. 2c) and highest nutrients' concentrations (Fig. 2c,d), while the water temperature increased (Fig. 2c) and nutrient's availability decreased in mid-summer (Fig. 2c,d), especially at Ezcurra. Also, the mean wind speed was much lower in early summer (2.2 m s^{-1}) when compared to later in the season (4.4 m s^{-1}).

During late summer of 2007/8, high water temperatures and ammonium concentration occurred simultaneously with low salinity and concentrations of silicate, phosphate, nitrate, as indicated by Axis I (64.3%) of the PCA (83.4%) (Fig. 3e). In this

summer, the highest temperature and lowest salinity occurred at Botany Point instead of Ezcurra, contrary to previous years (Fig. 3f).

During the 2008/9 early summer, temperature was positively correlated to ammonium concentrations and negatively correlated to salinity (Fig. 3g) due to the spatial variations of these variables, as observed in the immediately previous summer. Highest ammonium concentrations and lowest salinities were observed at Botany Point (surface), but the highest nutrients' concentrations (except ammonium) were observed in surface waters at Ezcurra (Fig. 3h).

Basically, the 2002/3 and 2007/8 summers were characterized by a coldest previous winter and late continental ice melt, coinciding with highest nutrient levels (Tab. 2). Water temperature was higher and salinity was lower in mid and late summer when compared to early in the season (Fig. 2a). Ammonium concentrations were associated with highest temperatures, lowest salinities (Fig. 2b), and low wind speed in all sampling periods (except 2002/3). Also, the relationship between salinity and ammonium changed from positive in 2002/3 ($r = 0.29$) to negative in 2007/8 ($r = -0.71$) and 2008/9 ($r = -0.37$). The positive relationship between the concentrations of phosphate, nitrate, and silicate suggest that there is a common source for those nutrients. However, the late summer of 2002/3 was an exception, as the variation of phosphate concentrations was not accompanied by variations in nitrate (Fig. 2d) or silicate concentrations (Fig. 2c).

Variations in phytoplankton size and taxonomic groups

The average abundance of phytoplankton ($>15\ \mu\text{m}$) was generally low ($4.2 \times 10^3 \pm 4.8 \times 10^3\ \text{cells l}^{-1}$), and showed high variability within years with the highest mean observed during the last sampling period (summer 2008/9) associated with lowest nutrient levels (Tab. 2).

Temporal oscillations in phytoplankton ($>15\ \mu\text{m}$) occurred as indicated by the highest abundances during summers of 2008/9 ($7.7 \times 10^3 \pm 7.1 \times 10^3\ \text{cells l}^{-1}$), 2003/4 ($6.8 \times 10^3 \pm 2.8 \times 10^3\ \text{cells l}^{-1}$) and 2007/8 ($4.6 \times 10^3 \pm 2.8 \times 10^3\ \text{cells l}^{-1}$). Conversely, the 2002/3 summer showed the lowest values ($1.2 \times 10^3 \pm 1.4 \times 10^3\ \text{cells l}^{-1}$, $p < 0,01$) (Fig. 4a). Also, changes in the phytoplankton community structure were evidenced by the highest contribution (45%) of cells larger than $80\ \mu\text{m}$ (e.g. *Corethron pennatum*, *Pleurosigma* spp, *Gyrosigma* spp, *Navicula directa*) and lowest contribution (7%) of smallest cells ($15\text{-}30\ \mu\text{m}$) during the 2002/3 summer (Fig. 4a). In 2007/8 there was a smallest contribution of the largest cells (28%) represented by the diatom “*Pseudo-nitzschia seriata*” complex: *P. cf. heimii*.

The relative abundance of large cells was highest in the coldest years (2002/3 and 2007/8) when continental ice was still present during the summer. The 2003/4 summer was characterized by dominance of mid-sized cells ($31\text{-}80\ \mu\text{m}$) represented mainly by centric (*Thalassiosira* spp., *Porosira* spp., *Stellarima microtrias*, *Charcotia actinochila*) and pennate (*Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Achnanthes* spp., *Fragilaria striatula*) diatoms. However, phytoplankton cells in this range ($31\text{-}80\ \mu\text{m}$) had the lowest contribution (10%) in the 2008/9 summer when compared to other years ($>36\%$). In

contrast, smallest cells (15-30 μm) represented by dinoflagellates and some centric diatoms (*Thalassiosira* spp.) showed increased contribution in the most recent sampling periods (2007/8 and 2008/9) (Fig. 4a).

In terms of taxonomic groups (Fig. 4b), there was a shift in dominance from early to recent sampling years. Diatoms represented more than 90% of the phytoplankton abundance in the 2002/3 and 2003/4 summers, while dinoflagellates' contribution significantly increased in 2007/8 (30%), and especially in 2008/9 (65%). Cyanobacteria were more representative during the 2002/3 summer (5%), and their contribution decreased in the following sampling years (Fig. 4b).

Variations in phytoplankton between early and late summer was distinct in the first two sampling years (Fig. 5). In 2002/3, early summer showed a low phytoplankton abundance ($0.5 \times 10^3 \pm 0.7 \times 10^3$ cells l^{-1} , Fig. 5a), and it was dominated by chain-forming pennate diatoms such as *Fragilariopsis* spp., *Navicula* spp. and *Fragilaria striatula*, along with epiphytic species like *Pseudogomphonema kamtschaticum* and *Licmophora* spp. (Fig. 5b). In late summer, there was a rise in phytoplankton abundance ($1.8 \times 10^3 \pm 1.7 \times 10^3$ cells l^{-1} , Fig. 5a) due to an increase in the abundance of the epontic centric diatom *Corethron pennatum* (Fig. 5b). This was a result of the late ice melt that occurred in 2002/3.

In the following year, phytoplankton abundance was highest during early summer ($8.6 \times 10^3 \pm 6.4 \times 10^3$ cells l^{-1} , Fig. 5a) due to the high abundance of planktonic centric diatoms such as *Thalassiosira* spp., *Porosira* spp and *Charcotia actinochila* (Fig. 5b). During mid-summer, the decrease in phytoplankton abundance ($5.1 \times 10^3 \pm 2.6 \times 10^3$ cells l^{-1} , Fig. 5a) resulted from the decrease of those centric diatoms' abundance (Fig. 5b). The large centric diatom *Corethron pennatum* was dominant in the previous

summer, but comparatively, the total biovolume of those mid-sized centrics ($2.8 \times 10^9 \mu\text{m}^3$) in 2003/4 was higher than the biovolume of *C. pennatum* ($1.8 \times 10^9 \mu\text{m}^3$) in 2002/3.

Time variability in the phytoplankton community structure was detected through the cluster analysis relative to the abundance of each species. Five groups can be observed, associated with the different sampling periods (Fig. 6). The most important phytoplankton species in those groups are listed in Table 3.

During the early summer of 2002/3, large benthic diatoms were the most abundant group, along with the centric epontic *Corethron pennatum* and dinoflagellates. By contrast, in late summer, the contribution of *C. pennatum* increased, as well as the typically planktonic diatoms (*Thalassiosira* spp, “*Pseudo-nitzschia delicatissima*” complex).

In 2003/4, the early summer was characterized by the dominance of centric planktonic diatoms (*Stellarima microtrias*, *Porosira* sp., *Thalassiosira* spp., *Charcotia actinochila*) and the epiphytic pennate diatom *Pseudogomphonema kamtschaticum*. Conversely, the contribution of the centric diatoms *C. pennatum*, *Thalassiosira ritscheri*, and the dinoflagellate *Katodinium* sp. increased in mid-summer.

The composition and abundance of taxa were similar during the late summer of 2007/8 and early summer of 2008/9 when planktonic diatoms were the most important primary producers, along with typical species from the shallow areas of Admiralty Bay (e.g. *P. kamtschaticum* and *Katodinium* sp.).

As phytoplankton assemblages and environmental variables did not show significant differences between sampling depths (surface, mid-water and bottom) within

each site, or their local bathymetry (15, 30 and 60 m), the mean values for each site were considered in respect to the spatial variation overview (comparison between sites).

Different patterns in phytoplankton assemblages was evidenced by spatial variations in the contribution of size classes, taxonomic groups and species composition observed throughout the sampling years. In the 2002/3 summer, centric diatoms, especially the centric *Corethron pennatum* (>80 μm), were dominant at Ezcurra and Comandante Ferraz (Fig. 7a,b), but at Botany Point the pennate benthic diatoms were more abundant (Fig. 7b), especially those in the 31-80 μm size range (Fig. 7a), including the chain forming *Fragilariopsis ritscheri* and *Fragilaria striatula*. In 2003/4, the community structure was similar at the three sites, with dominance of 31-80 μm centric diatoms (Fig. 7c,d).

During the 2007/8 summer, Botany Point showed the lowest abundance of small cells (15-30 μm) (Fig. 7e), which led to a highest contribution (40%) of large cells (>80 μm), and cyanobacteria (9%). Conversely, small cells (15-30 μm) prevailed and cyanobacteria were not important at the other two sites (Fig. 7e,f). Dinoflagellates (e.g. *Protoperidinium defectum* and *Amylax* sp.) were dominant at Ezcurra (50%), contrary to the dominance of diatoms (82%) at the other sites (Fig. 7f).

The early summer of 2008/9 was characterized by the dominance (>89%) of small cells (15-30 μm), mainly dinoflagellates, at Comandante Ferraz and Botany Point, while pennate diatoms larger than 31 μm were the most representative at the Ezcurra Inlet (Fig. 7g,h).

There was a clear change in some phytoplankton groups between the first two and the last two sampling years. At Ezcurra, a distinct phytoplankton assemblage was

observed in the 2002/3 and 2003/4 summers, when cyanobacteria (*Oscillatoria* spp., *Leptolyngbya* spp.) represented more than 5% of the total phytoplankton abundance. In 2007/8, the contribution of cyanobacteria decreased at Ezcurra and increased to almost 10% at Botany Point. In 2008/9, cyanobacteria were not so representative at any of the sites.

Nevertheless, some species occurred constantly at those sites. Large ($> 80 \mu\text{m}$) pennate diatoms (*Pleurosigma* spp., *Gyrosigma* spp., *Cylindrotheca closterium*) were always present in Botany Point, and the epiphytic *Pseudogomphonema kamtshaticum* was always present at Comandante Ferraz and Ezcurra, where macroalgae are abundant in the sub-littoral. The genus *Achnanthes* was also frequent at Comandante Ferraz. On the other hand, the abundance of dinoflagellates was constantly highest in Ezcurra, except in 2008/9 when diatoms were more representative at Ezcurra, while dinoflagellates were dominant in the other sites.

Phytoplankton assemblages and Environmental variables

Figure 8 shows the correlation between chemical and physical variables and their influence on phytoplankton abundance, taking into account the three size classes (Fig. 8a,c,e,g) and relative contribution (%) of taxonomic groups (Fig. 8b,d,f,h).

In 2002/3, the Canonical Correspondence Analysis (Fig. 8a,b) showed that cells in the range 31-80 μm , mainly pennate diatoms, appear to be the main silicate consumers (negative relationship), and are associated with the highest salinities. Also, cyanobacteria (e.g. *Oscillatoria* spp., *Leptolyngbya* spp.) were associated with low

nitrogen concentrations (Fig. 8b), which occurred mainly at Ezcurra (see Fig. 7b). Spatial variations in phytoplankton (>15 μm) assemblages were related to ammonium concentration, which was highest where large diatoms (>80 μm) prevailed (mainly *C. pennatum*), as well as cyanobacteria. This condition was observed at Ezcurra during early summer, when wind speed was low. In contrast, 31-80 μm cells showed a negative relationship with ammonium (Fig. 8a), as these occurred where ammonium concentrations were lowest.

In 2003/4, the smallest cells (15-30 μm) were most abundant at low temperatures and high nitrate concentration, in contrast with the largest cells (>80 μm) which presumably consumed more nitrate and, therefore, were most representative in the opposite axis (Fig. 8c,d). High temperatures were also associated with dinoflagellates especially in Ezcurra (see Fig. 7d) where, again, cyanobacteria were more representative than in other areas.

In the late summer of 2007/8, the largest cells (>80 μm) and cyanobacteria were most representative where water temperatures and ammonium concentration were highest and salinity, silicate and phosphate were lowest (Fig. 8e,f). This condition occurred mainly in Botany Point (see Fig. 7f). Conversely, the smallest cells (15-30 μm) were associated with lowest temperatures (Fig. 8e).

During the early summer of 2008/9, dinoflagellates were dominant (see Fig. 4b). However, the highest abundances of pennate diatoms, which were most representative at Ezcurra (see Fig. 7h), were related to the highest silicate and nitrate, and lowest ammonium concentrations (Fig. 8g,h).

Concisely, both cyanobacteria and large ($>80\ \mu\text{m}$) pennate diatoms, mostly benthic, were associated with highest water temperatures and ammonium concentrations and lowest salinities in all sampling periods. High ammonium concentrations were associated with cyanobacteria in 2007/8 and 2008/9. Also, small cells ($15\text{--}30\ \mu\text{m}$) were more abundant in lowest temperatures.

Discussion

The dominance of diatoms amongst the microphytoplankton in the northern region of the Western Antarctic Peninsula has been previously reported by several authors (Brandini (1993), Brandini & Rebello (1990), Moline et al. (1997), Schloss et al. (1998), Schloss et al. (2002), Lange et al. (2007), Kopkzynska (2008) and Uitz et al. (2009). During the earliest years sampled in this work, diatoms have also been the dominant taxonomic group in Admiralty Bay's coastal waters.

The frequent contribution of epiphytic diatoms (*Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Achnanthes* spp., *Licmophora* spp., *Cocconeis* spp.), especially at Comandante Ferraz and Ezcurra, indicate the importance of macroalgae fragments (Oliveira et al. 2009) as substrates to those microalgae. These diatoms were also reported as important sources of food to the antarctic krill in Admiralty Bay (Ligowski 2000).

Interannual changes in the environmental conditions, especially hydrological features, have resulted in the decrease of microphytoplankton cells prevailing size in the most recent years, in Admiralty Bay's coastal waters. Also, there has been a shift in the dominance of phytoplankton taxonomic groups from diatoms to dinoflagellates. This is

likely to be a result from the rise in water temperature from 0.5°C during the 2002/3 and 2003/4 summers to 1.2°C during the 2007/8 and 2008/9 summers, and slight decrease in salinity from 34.3 to 33.8. Kopczynska (2008) also reported the recent reduction of diatoms' abundance in Admiralty Bay, as well as several authors observed changes in the phytoplankton assemblages in adjacent areas, north of the Western Antarctic Peninsula (e.g. Montes-Hugo et al. 2008a, Montes-Hugo et al. 2008b, Montes-Hugo et al. 2009). Montes-Hugo et al. (2009) discussed the influence of climate change and rise in UV radiation in the reduction of diatoms' abundance in those waters, and short-term changes in phytoplankton assemblages as a consequence from wind pattern and ice cover changes.

Strong winds blowing on Admiralty Bay drive an intense turbulence of the water column leading to suspension of bottom material along with benthic microalgae in the coastal area (Brandini & Rebello 1994, Schloss et al. 2002). When those periods are followed by low speed winds, stability of the water column allows benthic cells to bloom in the water column (Brandini & Rebello 1994, Schloss et al. 2002). Wind regime is also responsible for the wide circulation pattern in the Bay, along with tide dynamics (Robakiewicz & Rakusa-Suszczewski 1999). Our study indicates that high speed winds induced high ammonium concentrations and low phytoplankton abundance, with highest contribution of large benthic diatoms in the water column of coastal areas. Some of those diatoms (e.g. *Melosira sol*, *Charcotia actinochila*, *Licmophora* spp., chain forming *Fragilariopsis* spp.) have been regarded as the main phytoplankton species in krill's diet during summer (Perissinotto et al. 1997, Ligowski 2000).

The epontic diatom *Corethron pennatum* (>100 µm), which normally increases in abundance during fast and continental ice melting seasons (Kang et al. 2002), is also mentioned as an important species in krill's diet (Graneli et al. 1993, Perissinotto et al. 1997, Ligowski 2000). However, Opalinski et al. (1997) state that krill clearly rejects cells larger than 70 µm (e.g. benthic pennate diatoms such as *Navicula directa*, *Pleurosigma directum*, *Gyrosigma* sp.1). In this study, along with benthic pennate diatoms (e.g. *Licmophora* spp., *Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Fragilaria striatula*, *Achnanthes* spp.), the centric *C. pennatum* was the most abundant species in the microphytoplankton during the 2002/3 summer, when fast ice remained until mid-summer (January) in Admiralty Bay. Those pennate and centric diatoms were amongst the most frequent species registered in King George Island inlets and bays (Brandini 1993, Schloss et al. 1998, Kang et al. 2002) and other offshore northern areas like South Georgia during the 1990s (Froneman et al. 1997). Nevertheless, in the present work, *C. pennatum* was replaced by *Thalassiosira antarctica*, *Stellarima microtrias*, *Porosira* spp. and other centric mid-sized diatoms (30-80 µm) in the following summer (2003/4), when temperature was lower than in the previous summer (Tab. 2). The mid-sized centric diatoms, which are the most palatable species to krill (Graneli et al. 1993, Opalinski et al. 1997, Ligowski 2000, Haberman et al. 2003), were responsible for the highest abundances (10^4 cells l⁻¹) in the 2003/4 summer, when east winds prevailed. Presumably, this was due to a strong influence from the Bellingshausen Sea waters. In fact, it has been reported that *Thalassiosira* spp., and *Stellarima microtrias* can be detected in the Bransfield Strait (and Admiralty Bay) under east winds influence, as opposed to west winds, which advect Weddell Sea waters with high abundance of *Rhizosolenia* spp. (Montes-Hugo et al. 2009).

The presence of centric diatoms nearshore may indicate a strong mix of coastal and central waters in Admiralty Bay, as those species are more abundant in central waters, which normally do not merge with coastal waters (Kopczynska 2008). In terms of biomass estimated by the cells' biovolume, the dominant large centric diatom *C. pennatum* ($1.8 \times 10^9 \mu\text{m}^3$) showed a lower biovolume in 2002/3 than the abundant mid-sized centrals ($2.8 \times 10^9 \mu\text{m}^3$) in 2003/4.

In contrast, during the late summer of 2007/8 and the early summer of 2008/9, when western winds prevailed, dinoflagellates (*Prorocentrum* sp.1, *Amylax* sp.1, *Protoperidinium defectum*) and planktonic diatoms, like *Rhizosolenia truncata*, *Proboscia alata*, *Chaetoceros socialis*, *Pseudo-nitzschia* spp. and *Tropidoneis antarctica*, became dominant at Admiralty Bay's shallow coastal waters. Those species are typical from the Weddell Sea (Kang et al. 2001) and were also registered in the warmest waters from northwards in Kerguelen Islands (Kopczynska et al. 1998, Armand et al. 2008). Also, they are usually avoided by the antarctic krill *Euphausia superba* (Opalinski et al. 1997, Perissinotto et al. 1997).

The differences in phytoplankton abundance between early and late summer and between the four summers studied here, were mainly associated with changes in abundance of centric diatoms, either the epontic *C. pennatum* or the planktonic *Thalassiosira*, *Porosira*, *Stellarima* and others. Their higher contribution (Fig. 7b) occurred when wind speed was lowest, possibly leading to a higher water column stability. This condition was earlier reported by Brandini (1993) in the central basin of Admiralty Bay during the summer of 1987, when the same species occurred in a low wind speed period. However, the abundance of those centric diatoms (10^3 to 10^4 cells l^{-1}) does not amount to a bloom condition, like the ones previously recorded for this area

(10^5 cells l^{-1}), which were mainly composed by pennate chain-forming diatoms (Brandini & Rebello 1994, Kopczynska 2008).

The consequences of shifts in phytoplankton size and composition on the food web can be drastic, especially in this region. The diet of the herbivore antarctic krill *Euphausia superba*, which is an important link between primary producers and consumers in the Antarctic food web (Medlin & Priddle 1990, Budd 1991, Pakhomov et al. 2002, Corbisier et al. 2004), comprises 46% of benthic diatoms in coastal zones such as those in Admiralty Bay (Ligowski 2000). Therefore, reduction of benthic microalgae in the water column would cause a shortage in food availability to krill, as much as to other planktonic herbivores and benthic suspension feeders (Ahn 1993, Gili et al. 1996, Schloss et al. 1998, Corbisier et al. 2004). Small microalgae, which are not palatable to those herbivores, are preferred by salps and other suspension feeders (Moline et al. 2004, Montes-Hugo et al. 2009). Therefore, the decrease in phytoplankton cell size in coastal zones could lead to a drastic change in Admiralty Bay's food web. It is possible that already the decrease in penguin's abundance (Sander et al. 2007) and shifts in benthic communities (Ahn 1993, Schloss et al. 1998, Montes-Hugo et al. 2009) are a result from these shifts in microphytoplankton assemblages. Although the time scale of the present study is relatively small, the results shown here are most likely signalling largest environmental and biological changes, such as those detected in longer-term studies (e.g. Montes-Hugo et al. 2009).

The observed inverse correlations between the salinity and temperature, ammonium and silicate occurred due to the continental ice melting likely caused by highest temperatures in the most recent sampling years. These conditions lead to a decrease in salinity and phytoplankton abundance in coastal waters. The concentrations of

ammonium and silicate increased due to either lowest consumption by phytoplankton or lixiviation by the freshwater derived from continental ice melt (Medlin & Priddle 1990, Nedzarek & Rakusa-Suszczewski 2004). Similar conditions of continental ice melt due to high temperatures, rise in ammonium concentrations and decrease in salinity have been observed in coastal waters near Anvers Island (Moline et al. 1997), Bransfield Strait and in Admiralty Bay itself (Ligowski 2000). Therefore, the highest nutrients' concentrations (silicate, ammonium and nitrate) observed in periods when the land was covered by ice (2002/3 and 2007/8) compared to periods with more ice-free zones (2003/4 and 2008/9) supports the idea proposed by Nedzarek (2008) that the continental ice melt is the most important nutrient source to shallow coastal zones in Admiralty Bay.

It was assumed that iron limitation is not severe in Admiralty Bay (Brandini 1993) as adjacent areas (e.g. Bransfield Strait) have natural levels of iron always above the limiting concentrations for primary production (Martin et al. 1990). Also, the intense lixiviation of nutrients carried by continental freshwater into the bay possibly contributes to the iron's input (Nedzarek 2008), although iron concentration has never been measured in Admiralty Bay. Another important consequence from the ice melt is the physical process generated by freshwater flow in acclivitous shores, leading to the suspension of bottom material (Pichlmaier et al. 2004). This may include the tychoplanktonic species observed in our study. In addition, freshwater input increases water column stability in Admiralty Bay's central basin, further promoting phytoplankton growth. But, this freshwater input would also cause an increase in turbulence and turbidity in coastal shallow zones, which may reduce primary production.

The water temperature increase and salinity decrease during late summer, compared to the early season (such as observed in the 2002/3 and 2003/4 summers) have been previously reported in King George Island's coastal waters of (Klöser et al. 1993, Lange et al. 2007). However, differences in microphytoplankton assemblages were distinct in those two years. In 2002/3 there was an increase in microphytoplankton abundance in late summer and in 2003/4 phytoplankton abundance decreased with rise in temperature, maybe due to the early ice melt observed in the second year.

The structure of phytoplankton assemblages were very likely influenced by the spatial variations in the environmental variables. The cyanobacteria registered in coastal waters (e.g. *Leptolyngbya*, *Oscillatoria*) are typically found in continental freshwater drainage channels, lakes and snow (Komarek 2007), which may also indicate the influence of continental runoff into the bay (Nedzarek 2008) especially at Ezcurra Inlet and Botany Point. The highest ammonium concentration is also an indication of continental freshwater drainage, and was concomitantly found with the highest cyanobacteria contribution. High ammonium concentrations are derived from terrestrial animals' excretes in admiralty Bay (Nedzarek & Rakusa-Suszczewski 2007, Nedzarek 2008), and are possibly related to the adjacent glaciers melting, such as *Wanda* in Botany Point and *Ecology* in Ezcurra. In fact, some authors (Robakiewicz & Rakusa-Suszczewski 1999, Nedzarek 2008) proposed that the nearshore circulation may induce the flow of a high portion of the freshwater melted from *Ecology Glacier* towards the north through the coastal shallow zone, and consequently flowing over the above mentioned sampling sites. Therefore, the continental ice melt and wind-induced water column mixing are crucial processes that regulate temporal and spatial changes in phytoplankton assemblages in the coastal waters of Admiralty Bay.

Conclusions

Phytoplankton (>15 μm) assemblages in shallow coastal waters of Admiralty Bay are dominated by diatoms. The important contribution of the microphytobenthos, mainly pennate diatoms, to the plankton in coastal waters supports the idea that this compartment may be a significant source of food not only for benthic deposit-feeders but also for suspension feeders and planktonic herbivores.

The presence of microphytobenthic algae in the water column at the coastal zone in Admiralty Bay is probably related to weather conditions during the previous winter. Considering that coldest winters allow the highest accumulation of continental ice, which melts during summer, the intense flow of freshwater from land during summer, may enhance suspension of bottom material, including large diatoms from the microphytobenthos and epontic cyanobacteria. Highest temperatures, lowest salinity, low wind speed and highest ammonium concentrations were associated with significant contributions of cyanobacteria and mainly large diatoms (>80 μm) in the coastal zones. Epiphytic diatoms like *Pseudogomphonema kamtschaticum*, *Achnanthes* spp., *Licmophora* spp. and *Cocconeis* spp. were always present at Comandante Ferraz and Ezcurra, where macroalgae are abundant in the sub-littoral. Areas most liable to the influence of terrestrial ice melt are Ezcurra and, in the most recent years, Botany Point. However, increase in water temperature and a slight decrease in salinity in the most recent sampling period (early summer of 2008/9) were associated with the reduction in abundance of planktonic centric diatoms, and increase in abundance of small

dinoflagellates. Conversely, the centric diatom *Corethron pennatum* was more abundant in summers that followed cold winters, especially when fast ice was still present in the bay.

The prevailing size of phytoplankton cells decreased and the species composition changed in the most recent years. Large cells ($>80\ \mu\text{m}$) were more abundant in the 2002/3 summer, and their contribution decreased, as smaller cells ($15\text{--}30\ \mu\text{m}$) became more abundant in 2008/09. The cell size change in those coastal waters was associated with rise in temperature and nutrients concentrations (except in the early summer of 2008/9) and slight decrease in salinity, probably associated with the increase of continental ice melt. This may be part of a large-scale change in phytoplankton assemblages in the region. Also, there was a shift in the community composition, from large benthic pennate diatoms (*Licmophora* spp., *Achnanthes* spp., *Navicula* spp.) to smallest planktonic diatoms (*Pseudo-nitzschia* spp.) and dinoflagellates. Centric diatom species followed this trend: the largest ones (*Stellarima microtrias*, *Charcotia actinochila*, *Porosira* spp., *Thalassiosira ritscheri*) were more abundant in 2002/3 and mostly in 2003/4, while small *Thalassiosira* spp. and other centric diatoms were most abundant in the most recent years. Those changes were associated with physical-chemical variables, including an important contribution from the wind pattern influencing water column processes.

Acknowledgements

This study first integrated the project “Implementation of a Strategy for Assessment of Environmental Impacts on Coastal Shallow Water Benthic Fauna of Admiralty Bay” (CNPq Process No. 55.0356/2002-9) and later the project “Marine Antarctic Biodiversity in Relation to Environmental Heterogeneity at Admiralty Bay, and adjacent areas” (CNPq Process No. 52.0293/2006-1) in contribution to the South American Consortium on Marine Biodiversity for the Census of Antarctic Marine Life (LA CAML) during the International Polar Year (IPY 2007/2008). This work has been supported by the Brazilian Ministry of Environment (MMA), Ministry of Science and Technology (MCT), National Council for Research and Development (CNPq), and Interministerial Secretariat for the Sea Resources (SECIRM) within the framework of the Brazilian Antarctic Programme. We thank Dr. Elisabete de Santis Braga of Oceanographic Institute-USP for the analyses of salinity, nutrients and chlorophyll during the summers of 2002/3 and 2003/4, Dr. Rodolfo Paranhos of Institute of Biology-UFRJ for the chlorophyll, nutrients and salinity analyses from the summers of 2007/8 and 2008/9, and Rafael B. de Moura for the Admiralty Bay figure. We are also very grateful to Dr. Irene R. Schloss (Instituto Antártico Argentino), Dr. Clarisse Odebrecht (IO-FURG) and Dr. Eduardo Secchi (IO-FURG) for the important advices and suggestions to this manuscript.

References

- Ahn IY (1993) Enhanced particle flux through the biodeposition by the Antarctic suspension-feeding bivalve *Laternula elliptica* in Marian Cove, King George Island. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 171: 75-90.
- Al-Handal AY, Wulff A (2008a) Marine benthic diatoms from Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 51-68.
- Al-Handal AY, Wulff A (2008b) Marine epiphytic diatoms from the shallow sublittoral zone in Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 411-435.
- Armand LK, Cornet-Barthaux V, Mosseri J, Quéguiner B (2008) Late summer diatom biomass and community structure on and around the naturally iron-fertilised Kerguelen Plateau in the Southern Ocean. *Deep-Sea Research II* 55: 653–676.
- Balech E (1975) *Clave Ilustrada de Dinoflagelados Antarticos*. Instituto Antartico Argentino, Direccion Nacional del Antartico, Buenos Aires: 98 pp.
- Brandini FP (1993) Phytoplankton biomass in an Antarctic coastal environment during stable water conditions - implications for the iron limitation theory. *Marine Ecology Progress Series* 93: 267-275.
- Brandini FP, Rebello J (1994) Wind field effect on hydrography and chlorophyll dynamics in the coastal pelagial of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 6 (4): 433-442
- Brusca RC, Brusca GJ (2003) *Invertebrates*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts: 936 pp.

- Budd WF (1991) Antarctica and global change. *Climatic Change* 18: 271-299.
- Cianelli D, D'Alcalà MR, Saggiomo V, Zambianchi E (2004) Coupling mixing and photophysiological response of Antarctic plankton: a Lagrangian approach. *Antarctic Science* 16 (2): 133–142.
- Clarke A, Leakey RJG (1996) The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnology and Oceanography* 41 (6): 1281-1294.
- Corbisier TN, Petti MAV, Skowronski RSP, Brito TAS (2004) Trophic relationships in the nearshore zone of Martel Inlet (King George Island, Antarctica): $\delta^{13}\text{C}$ stable-isotope analysis. *Polar Biology* 27: 75–82.
- Cornejo-Donoso J, Antezana T (2008) Preliminary trophic model of the Antarctic Península Ecosystem (Sub-area CCAMLR 48.1). *Ecological Modelling* 218: 1–17.
- Cupp EE (1943) Marine Plankton Diatoms of the West of North America. California: University of California Press. 235pp.
- Froneman PW, Pakhomov EA, Laubscher RK (1997) Microphytoplankton assemblages in the waters surrounding South Georgia, Antarctica during austral summer 1994. *Polar Biology* 17: 515-522.
- Garibotti IA, Vernet M, Ferrario ME, Smith RC, Ross RM, Quetin LB (2003) Phytoplankton spatial distribution patterns along the western Antarctic Peninsula (Southern Ocean). *Marine Ecology Progress Series* 261: 21–39.
- Gili JM, Alva V, Pages F, Kloser H, Arntz WE (1996) Benthic diatoms as the major food source in the sub-Antarctic marine hydroid *Silicularia rosea*. *Polar Biology* 16 (7): 507-512.

- Graneli E, Graneli W, Rabbani MM, Daugbjerg N, Fransz G, Roudy JC, Alder VA (1993) The influence of copepod and krill grazing on the species composition of phytoplankton communities from the Scotia-Weddell Sea – an experimental approach. *Polar Biology* 13 (3): 201-213.
- Grasshoff K, Erhardt M, Kremling K (1999) *Methods of Seawater Analysis*. Verlag-Chemie, Weinheim: 600 pp.
- Haberman KL, Quetin LB, Ross RM (2003) Diet of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana): I. Comparisons of grazing on *Phaeocystis Antarctica* (Karsten) and *Thalassiosira antarctica* (Comber). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 283: 79-95.
- Hasle GR (1972) The distribution of *Nitzschia seriata* Cleve and allied species. In: Simonsen, R. ed *First Symposium on Recent and Fossil Marine Diatoms*: 171-190.
- Hewes CD (2009) Cell size of Antarctic phytoplankton as a biogeochemical condition. *Antarctic Science*: 1-14.
- INPE (2009) *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. Accessed 15 dec 2009. <http://www.cptec.inpe.br/antartica/antartica.shtml>
- Kang S-H, Kang J-S, Lee S, Chung KH, Kim D, Park MG (2001) Antarctic phytoplankton assemblages in the marginal ice zone of the northwestern Weddell Sea. *Journal of Plankton Research* 23(4): 333–352.
- Kang J-S, Kang S-H, Lee JH, Lee SH (2002) Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in King George Island, Antarctica, 1996. *Marine Ecology Progress Series* 229: 19–32.

- Klöser H, Ferreyra G, Schloss I, Mercuri G, Laturnus F, Curtosi A (1993) Seasonal variation of algal growth conditions in sheltered Antarctic bays: the example of Potter Cove (King George Island, South Shetlands). *Journal of Marine Systems* 4 (4): 289-301.
- Komarek J (2007) Phenotype diversity of the cyanobacterial genus *Leptolyngbya* in the maritime Antarctic. *Polish Polar Research* 28 (3): 211-231.
- Kopczynska EE, Fiala M, Jeandel C (1998) Annual and interannual variability in phytoplankton at a permanent station off Kerguelen Islands, Southern Ocean. *Polar Biology* 20: 342-351.
- Kopczynska EE (2008) Phytoplankton variability in Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands: six years of monitoring. *Polish Polar Research* (29) 2: 117-139.
- Lange PK, Tenenbaum DR, Braga ES, Campos LS (2007) Microphytoplankton assemblages in shallow waters at Admiralty Bay (King George Island, Antarctica) during the summer 2002-2003. *Polar Biology* 30: 1483-1492.
- Ligowski R (2000) Benthic feeding by krill, *Euphausia superba* Dana, in coastal waters off West Antarctica and in Admiralty Bay, South Shetland Islands. *Polar Biology* 23: 619-625.
- Martin JH, Gordon RM, Fitzwater SE (1990) Iron in Antarctic waters. *Nature* 345: 156-158.
- Medlin LK, Priddle J (1990) Introduction. Polar Marine Diatoms. British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council.

- Moline MA, Prézelin BB (1996) Long-term monitoring and analyses of physical factors regulating variability in coastal Antarctic phytoplankton biomass, *in situ* productivity and taxonomic composition over subseasonal, seasonal and interannual time scales. *Marine Ecology Progress Series* 145: 143-160.
- Moline MA, Prézelin BB, Schofield O, Smith RC (1997) Temporal dynamics of coastal Antarctic phytoplankton: environmental driving forces and impact of a 1991/92 summer diatom bloom on the nutrient regimes. In: Battaglia, B.J., Valencia, J., Walton, D.W.H. (Eds.), *Antarctic Communities*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: 67– 72.
- Moline MA, Claustre H, Frazer TK, Schofield O, Vernet M (2004) Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Global Change Biology* 10: 1973–1980.
- Montes-Hugo MA, Vernet M, Martinson D, Smith R, Iannuzzi R (2008a) Variability on phytoplankton size structure in the western Antarctic Peninsula (1997- 2006). *Deep-Sea Research II* 55: 2106- 2117.
- Montes-Hugo M, Vernet M, Smith R, Carder K (2008b) Phytoplankton size-structure on the Western shelf of the Antarctic Peninsula: A remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing* 29: 801-829.
- Montes-Hugo MA, Doney SC, Ducklow HW, Fraser W, Martinson D, Stammerjohn SE, Schofield O (2009) Recent Changes in Phytoplankton Communities Associated with Rapid Regional Climate Change Along the Western Antarctic Peninsula. *Science* 323: 1470-1473.

- Nedzarek A, Rakusa-Suszczewski S (2004) Decomposition of macroalgae and the release of nutrients in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polar Bioscience* 17: 26–35.
- Nedzarek A, Rakusa-Suszczewski S (2007) Nutrients and conductivity in precipitation in the coast of King George Island (Antarctica) in relation to wind speed and penguin colony distance. *Polish Journal of Ecology* 55 (4): 705-716.
- Nedzarek A (2008) Sources, diversity and circulation of biogenic compounds in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 20 (2): 135–145.
- Olenina I, Hajdu S, Edler L, Andersson A, Wasmund N, Busch S, Göbel J, Gromisz S, Huseby S, Huttunen M, Jaanus A, Kokkonen P, Ledaine I, Niemkiewicz E (2006) Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea. *HELCOM Baltic Sea Environment Procedures*, 106: 144pp.
- Oliveira EC, Absher TM, Pellizzari FM, Oliveira MC (2009) The seaweed flora of Admiralty Bay, King George Island, Antarctic. *Polar Biology* 32: 1639–1647.
- Opalinski KW, Maciejewska K, Georgieva LV (1997) Notes on food selection in the Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Polar Biology* 17: 350-357.
- Pakhomov EA, Froneman PW, Perissinotto R (2002) Salp/krill interactions in the Southern Ocean: spatial segregation and implications for the carbon flux. *Deep-Sea Research II* 49: 1881–1907.
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Oxford, Pergamon Press: 173 pp.

- Peragallo MH, Peragallo M (1921) Diatomées d'eau douce et diatomées d'eau salée. In *Charcot, J. ed Deuxième Expedition Antarctique Française*, Masson et Éditeurs, Saint-Germain, Paris (VI): 41-102.
- Perissinotto R, Pakhomov EA, McQuaid CD, Froneman PW (1997) *In situ* grazing rates and daily ration of Antarctic krill *Euphausia superba* feeding on phytoplankton at the Antarctic Polar Front and the Marginal Ice Zone. *Marine Ecology Progress Series* 160: 77-91.
- Pichlmaier M, Aquino FE, Da-Silva CS, Braun M (2004) Suspended sediments in Admiralty Bay, King George Island (Antarctica). *Brazilian Antarctic Research* 4: 77-85.
- Rakusa-Suszczewski S (1980) Environmental conditions and the functioning of Admiralty Bay (South Shetland Islands) as part of the near shore Antarctic ecosystem. *Polish Polar Research* 1 (1): 11-27.
- Ribic CA, Chapman E, Fraser WR, Lawsons GL, Wiebe PH (2008) Top predators in relation to bathymetry, ice and krill during austral winter in Marguerite Bay, Antarctica. *Deep-Sea Research II* 55: 485–499.
- Robakiewicz M, Rakusa-Suszczewski S (1999) Application of 3D circulation model to Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polish Polar Research* 20 (1): 43-58.
- Round FE, Crawford RW, Mann DG (1990) *The Diatoms, Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge: Cambridge University Press: 747pp.
- Sander M, Balbão TC, Polito MJ, Costa ES, Carneiro APB (2007) Recent decrease in chinstrap penguin (*Pygoscelis antarctica*) populations at two of Admiralty Bay's

- islets on King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Biology* 30: 659–661.
- Schloss IR, Ferreyra GA, Curtosi A (1998) Phytoplankton primary production in Potter Cove, King George Island. In: Wiencke, C., Ferreyra, G., Arntz, W., Rinaldi, C. (1998). *The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Ber. Polarforsch.* 299: 67-73.
- Schloss IR, Ferreyra GA, Ruiz-Pino D (2002) Phytoplankton biomass in Antarctic shelf zones: a conceptual model based on Potter Cove, King George Island. *Journal of Marine Systems* 36: 129– 143.
- Scott FJ, Marchant HJ (2005) *Antarctic Marine Protists*. ABRS, Canberra and AAD, Hobart: 563 pp.
- Sieburth JM, Smetacek V, Lenz J (1978) Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23: 1256-1263.
- Turner J (2004) The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica. *International Journal of Climatology* 24: 1-31.
- Uitz J, Claustre H, Griffiths FB, Ras J, Garcia N, Sandroni V (2009) A phytoplankton class-specific primary production model applied to the Kerguelen Islands region (Southern Ocean). *Deep-Sea Research I* 56: 541-560.
- Utermöhl H (1958) Perfeccionamiento del método cuantitativo del fitoplancton. *Comum. Assoc. Int. Limnol. Teor. Apl.* 9: 1-89.

- Varela M, Fernandez E, Serret P (2002) Size-fractionated phytoplankton biomass and primary production in the Gerlache and south Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) in Austral summer 1995-1996. *Deep-Sea Research II* 49: 749-768.
- Vergani DF, Stanganelli ZB, Bilenca D (2001) Weaning mass variation of southern elephant seals at King George Island and its possible relationship with 'El Nino' and 'La Nina' events. *Antarctic Science* 13: 37-40.
- Ward P, Whitehouse M, Shreeve R, Thorpe S, Atkinson A, Korb R, Pond D, Young E (2007) Plankton community structure south and west of South Georgia (Southern Ocean): Links with production and physical forcing. *Deep-Sea Research I* 54: 1871-1889.

Table 1. Information (date and location) on sampling in Admiralty Bay, King George Island.

Austral summer	Period	Date	Sampling area	Latitude	Longitude	Local depth (m)	Sampling depths (m)
2002/3	early summer	11/27/2002	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	1, 7, 14
				62.082 S	58.380 E	30	1, 15, 28
				62.082 S	58.375 E	50	1, 25, 48
		11/29/2002	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	1, 7, 14
				62.099 S	58.353 E	30	1, 15, 28
				62.097 S	58.353 E	50	1, 25, 48
	late summer	12/10/2002	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	1, 7, 14
				62.157 S	58.482 E	30	1, 15, 28
				62.157 S	58.484 E	50	1, 25, 48
		02/04/2003	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	1, 7, 14
				62.082 S	58.380 E	30	1, 15, 28
				62.082 S	58.375 E	50	1, 25, 48
2003/4	early summer	02/07/2003	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	1, 7, 14
				62.099 S	58.353 E	30	1, 15, 28
				62.097 S	58.353 E	50	1, 25, 48
		02/03/2003	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	1, 7, 14
				62.157 S	58.482 E	30	1, 15, 28
				62.157 S	58.484 E	50	1, 25, 48
	mid summer	12/11/2003	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	1, 7, 14
				62.082 S	58.380 E	30	1, 15, 28
				62.082 S	58.375 E	50	1, 25, 48
		12/11/2003	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	1, 7, 14
				62.099 S	58.353 E	30	1, 15, 28
				62.097 S	58.353 E	50	1, 25, 48
2007/8	early summer	12/01/2003	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	1, 7, 14
				62.157 S	58.482 E	30	1, 15, 28
				62.157 S	58.484 E	50	1, 25, 48
	mid summer	01/23/2004	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.385 E	15	1, 7, 14
				62.082 S	58.380 E	30	1, 15, 28
				62.082 S	58.375 E	50	1, 25, 48
2008/9	early summer	01/21/2004	Botany Point (BP)	62.100 S	58.353 E	15	1, 7, 14
				62.099 S	58.353 E	30	1, 15, 28
				62.097 S	58.353 E	50	1, 25, 48
		01/21/2004	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.481 E	15	1, 7, 14
				62.157 S	58.482 E	30	1, 15, 28
				62.157 S	58.484 E	50	1, 25, 48
2007/8	late summer	02/28/2008	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.380 E	30	1, 28
		02/26/2008	Botany Point (BP)	62.099 S	58.353 E	30	1, 28
		03/05/2008	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.482 E	30	1, 28
2008/9	early summer	12/08/2008	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.380 E	30	1, 28
		12/08/2008	Botany Point (BP)	62.099 S	58.353 E	30	1, 28
		12/14/2008	Ezcurra Inlet (Ez)	62.157 S	58.482 E	30	1, 28

Table 2. Number of samples or measurements (n), means and standard deviations (Std. Dev.) of each variable in coastal waters of Admiralty Bay during the sampling years.

	TOTAL			2002/3 - Early summer			2002/3 - Late summer			2003/4 - Early summer			2003/4 - Mid-summer			
	n	Mean	Std.Dev.	n	Mean	Std.Dev.	n	Mean	Std.Dev.	n	Mean	Std.Dev.	n	Mean	Std.Dev.	
Phytoplankton >15 µm (cells l ⁻¹)	120	4.2 x 10 ³	4.8 x 10 ³	27	0.6 x 10 ³	0.6 x 10 ³	27	1.8 x 10 ³	1.6 x 10 ³	27	8.6 x 10 ³	6.4 x 10 ³	27	5.1 x 10 ³	2.6 x 10 ³	
Chlorophyll (µg l ⁻¹)	42	0.348	0.223	9	0.189	0.054	27	0.450	0.215							
Water temperature (°C)	116	0.5	0.9	27	-0.3	0.3	27	1.6	0.3	27	-0.2	0.3	27	1.0	0.4	
Salinity	65	34.2	0.6	27	34.6	0.1	26	33.9	0.5							
Silicate - SiO ₂ (µM)	118	51.05	20.52	27	67.39	14.83	25	60.87	24.58	27	40.88	6.14	27	32.07	8.93	
Phosphate - PO ₄ (µM)	120	2.55	1.77	27	2.52	0.36	27	4.47	2.77	27	2.09	0.95	27	1.54	0.28	
Ammonium - NH ₄ ⁺ (µM)	66	4.01	2.78	27	4.99	3.19	27	4.38	1.94							
Nitrite - NO ₂ (µM)	120	0.22	0.21	27	0.03	0.02	27	0.03	0.01	27	0.34	0.10	27	0.45	0.10	
Nitrate - NO ₃ (µM)	120	23.52	7.45	27	29.55	3.13	27	29.19	4.25	27	22.96	3.83	27	15.73	5.37	
Air temperature (°C) - previous winter					-4.9			-4.9			-3.4			-3.4		
Air temperature (°C) - summer					0.1			0.1			1.0			1.0		
Mean wind speed (m s ⁻¹)	120	4.5	2.0	27	5.6	2.9	27.0	5.2	0.2	27	2.2	0.1	27.0	4.4	0.9	
Prevailing wind direction				West			North and West			East and North			West			
	2007/8 - Late summer			2008/9 - Early summer												
	n	Mean	Std.Dev.	n	Mean	Std.Dev.										
Phytoplankton >15 µm (cells l ⁻¹)	6	4.6 x 10 ³	2.7 x 10 ³	6	7.7 x 10 ³	7.1 x 10 ³										
Chlorophyll (µg l ⁻¹)	6	0.126	0.052													
Water temperature (°C)	6	1.3	0.4	6	1.0	0.5										
Salinity	6	33.8	1.0	6	33.8	0.4										
Silicate - SiO ₂ (µM)	6	71.12	12.27	6	47.61	11.10										
Phosphate - PO ₄ (µM)	6	1.78	0.14	6	1.40	0.18										
Ammonium - NH ₄ ⁺ (µM)	6	1.05	0.29	6	0.93	0.28										
Nitrite - NO ₂ (µM)	6	0.48	0.24	6	0.13	0.03										
Nitrate - NO ₃ (µM)	6	20.85	5.74	6	11.18	4.92										
Air temperature (°C) - previous winter		-6.3			-2.6											
Air temperature (°C) - summer		0.3			1.5											
Mean wind speed (m s ⁻¹)	6	5.0	0.3	6	7.5	1.4										
Prevailing wind direction		North and West			Southwest and North											

Table 3. Species that most contributed to the similarity of samples within groups identified by the Cluster Analysis. Bold numbers in parenthesis show the Average Similarity of the sampling groups at each period. The percentage contribution of each species in the group is also shown. Benthic species are indicated in bold.

Summer 2002/3			
Early Summer (30.2)		Late Summer (43.4)	
	%		%
(CD) <i>Corethron pennatum</i>	14.5	(CD) <i>Corethron pennatum</i>	25.3
(DIN) <i>Katodinium</i> sp.1	12.4	(DIN) <i>Katodinium</i> sp.1	12.8
(PD) <i>Gyrosigma</i> sp.1	11.3	(PD) <i>Pseudogomphonema kamtshaticum</i>	10.8
(PD) <i>Pseudogomphonema kamtshaticum</i>	8.6	(CD) <i>Thalassiosira ritscheri</i>	8.5
(PD) <i>Cylindrotheca closterium</i>	6.1	(PD) " <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> " complex (60-100 µm)	7.7
(PD) <i>Pleurosigma directum</i>	5.2	(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.3	6.1
(DIN) <i>Gymnodinium</i> sp.1	4.5	(DIN) <i>Gyrodinium lachryma</i>	4.5
Summer 2003/4			
Early Summer (61.0)		Mid-Summer (64.3)	
	%		%
(CD) <i>Stellarima microtrias</i>	10.8	(CD) <i>Porosira</i> sp.1	6.8
(CD) <i>Porosira</i> sp.1	9.2	(PD) <i>Pseudogomphonema kamtshaticum</i>	6.5
(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.1	7.8	(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.2	6.1
(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.3	7.6	(CD) <i>Corethron pennatum</i>	5.9
(CD) Centric diatom sp.1	7.6	(DIN) <i>Katodinium</i> sp.1	4.8
(PD) <i>Pseudogomphonema kamtshaticum</i>	6.5	(CD) <i>Thalassiosira ritscheri</i>	4.6
(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.2	5.6	(CD) <i>Stellarima microtrias</i>	4.3
(CD) <i>Charcotia actinochila</i>	4.7		
Summers 2007/8 and 2008/9 (43.8)			
	%		
(DIN) <i>Katodinium</i> sp.1	8.8	(CD) - Centric Diatom	
(CD) <i>Thalassiosira</i> sp.3	8.1	(PD) - Pennate Diatom	
(PD) " <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> " complex (30-50 µm)	7.8	(DIN) - Dinoflagellate	
(PD) " <i>Pseudo-nitzschia seriata</i> " complex	7.0		
(PD) <i>Pseudogomphonema kamtshaticum</i>	6.9		
(CD) Centric diatom sp.1	6.2		
(CD) <i>Porosira</i> sp.1	4.8		

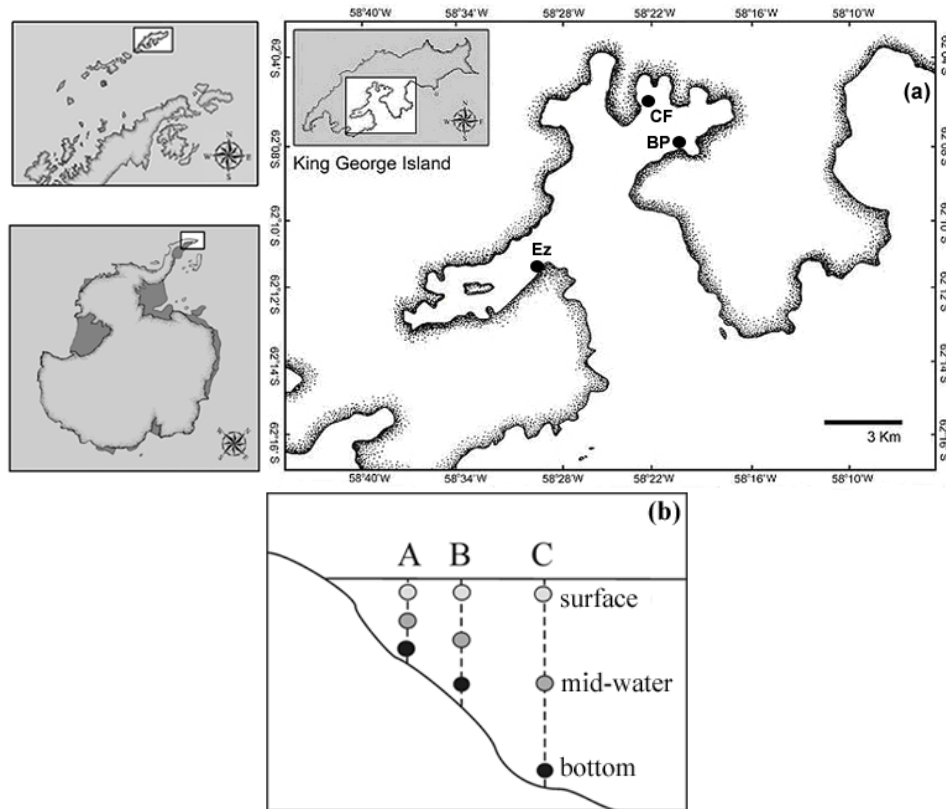


Figure 1. (a) The three sampling sites at Admiralty Bay: CF. Comandante Ferraz (near Comandante Ferraz Station-Brazil); BP. Botany Point; Ez. Ezcurra Inlet (near Arctowski Station-Poland); (b) Local depths (A. 20m; B. 30m; C. 60m) and approximate sampling depths at each sampling site.

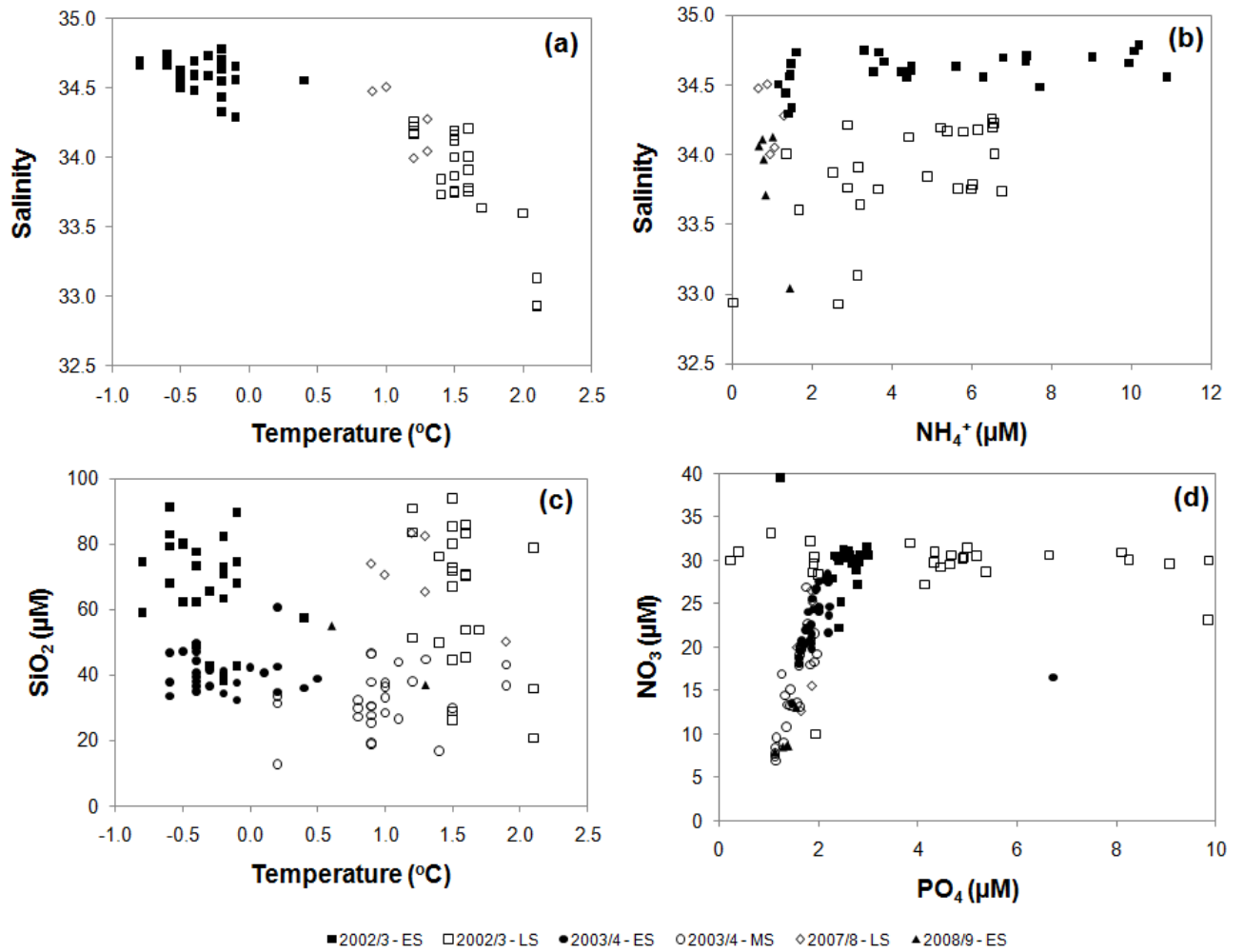


Figure 2. Relationship between temperature and salinity (a), salinity and Ammonium (NH_4) (b), temperature and Silicate (SiO_2) (c), and Phosphate (PO_4) and Nitrate (NO_3) (d) in coastal waters of Admiralty Bay, during the periods when data of both variables are available: ES. Early Summer; MS. Mid-Summer; LS. Late Summer.

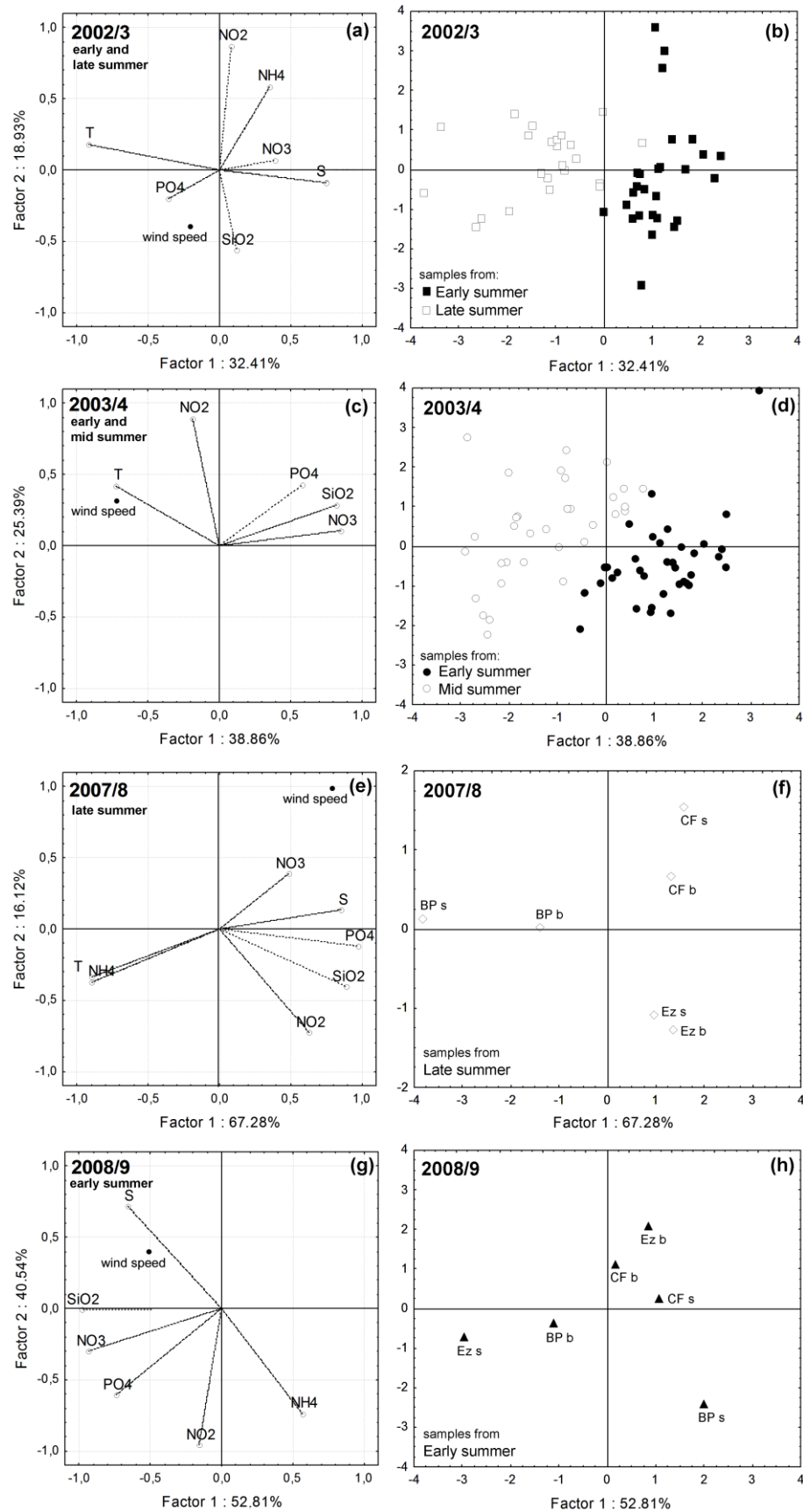


Figure 3. Principal Component Analyses of abiotic variables and samples from the sampling summers of (a,b) 2002/3; (c,d) 2003/4; (e,f) 2007/8; (g,h) 2008/9. T. water temperature; S. salinity; NO₂. nitrite; NO₃. nitrate; NH₄. ammonium; SiO₂. silicate; PO₄. phosphate. CF. Comandante Ferraz; BP. Botany Point; Ez. Ezcurra; s. surface; b. bottom.

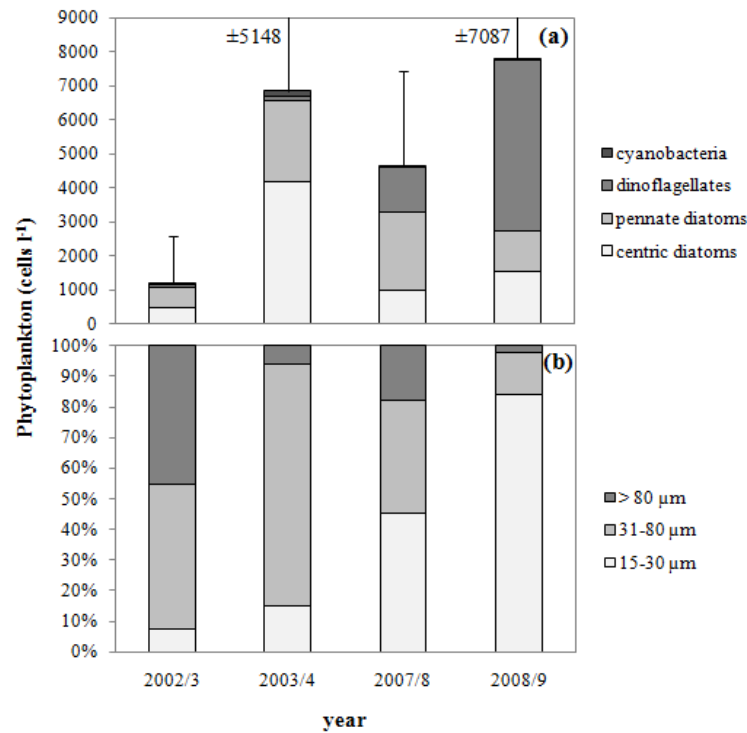


Figure 4. Phytoplankton (>15 µm) mean abundance (and standard deviation) showing the contribution of taxonomic groups (a) and contribution (%) of cell size classes (b) in coastal waters of Admiralty Bay during the sampled summers.

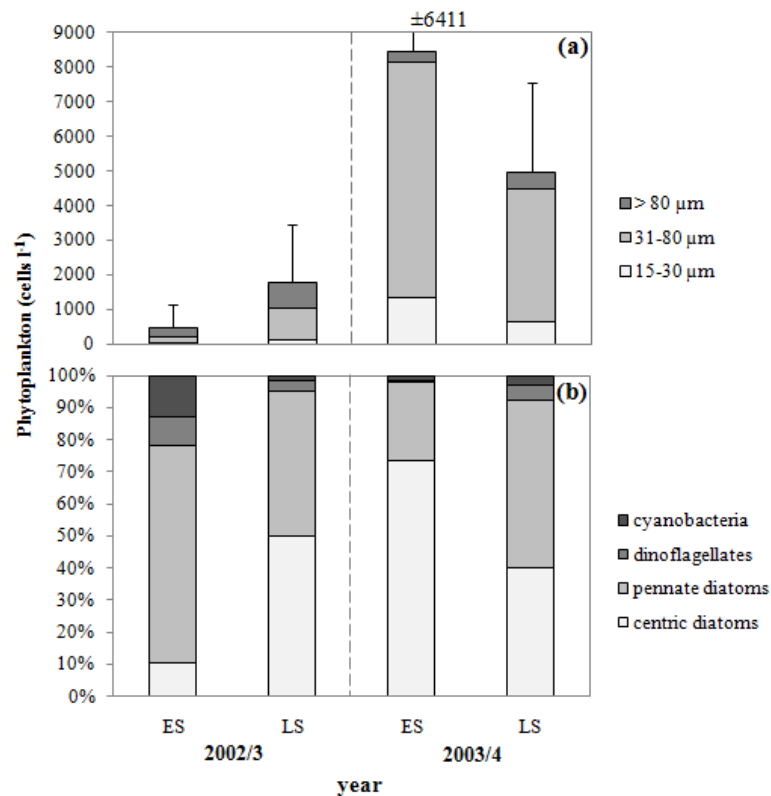


Figure 5. Phytoplankton (>15 µm) abundance (cells l⁻¹) showing the contribution of cell size (a) and contribution (%) of taxonomic groups (b) in shallow waters of Admiralty Bay during early (ES) and late summer (LS) of 2002/3 and early (ES) and mid-summer (MS) of 2003/4.

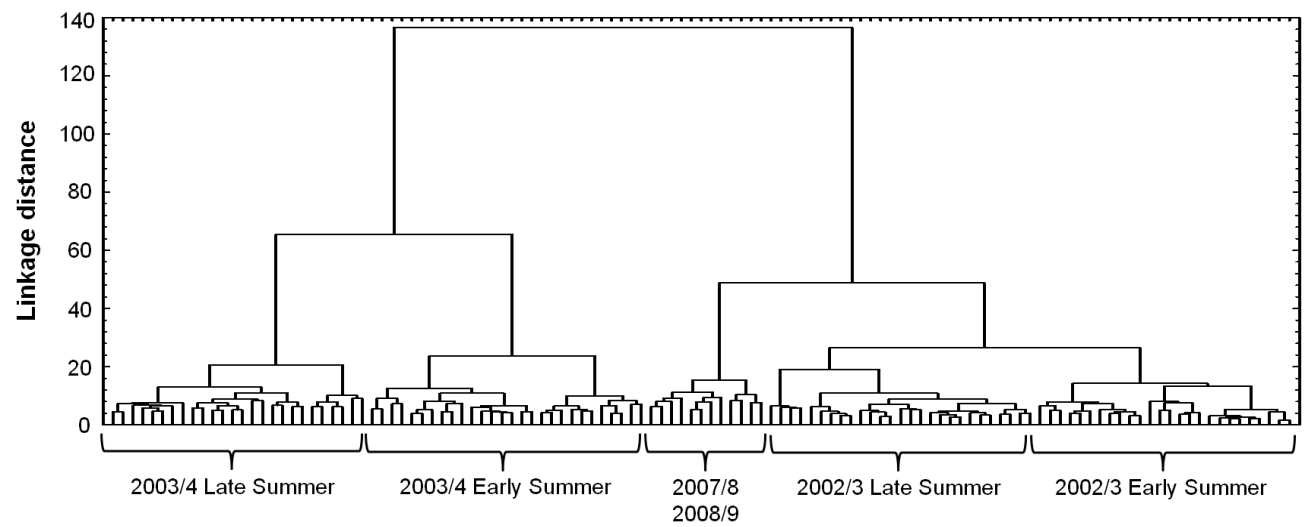


Figure 6. Cluster Analysis of samples from coastal waters of Admiralty Bay, according to the abundance of each species (Ward's Method, Euclidean Distance).

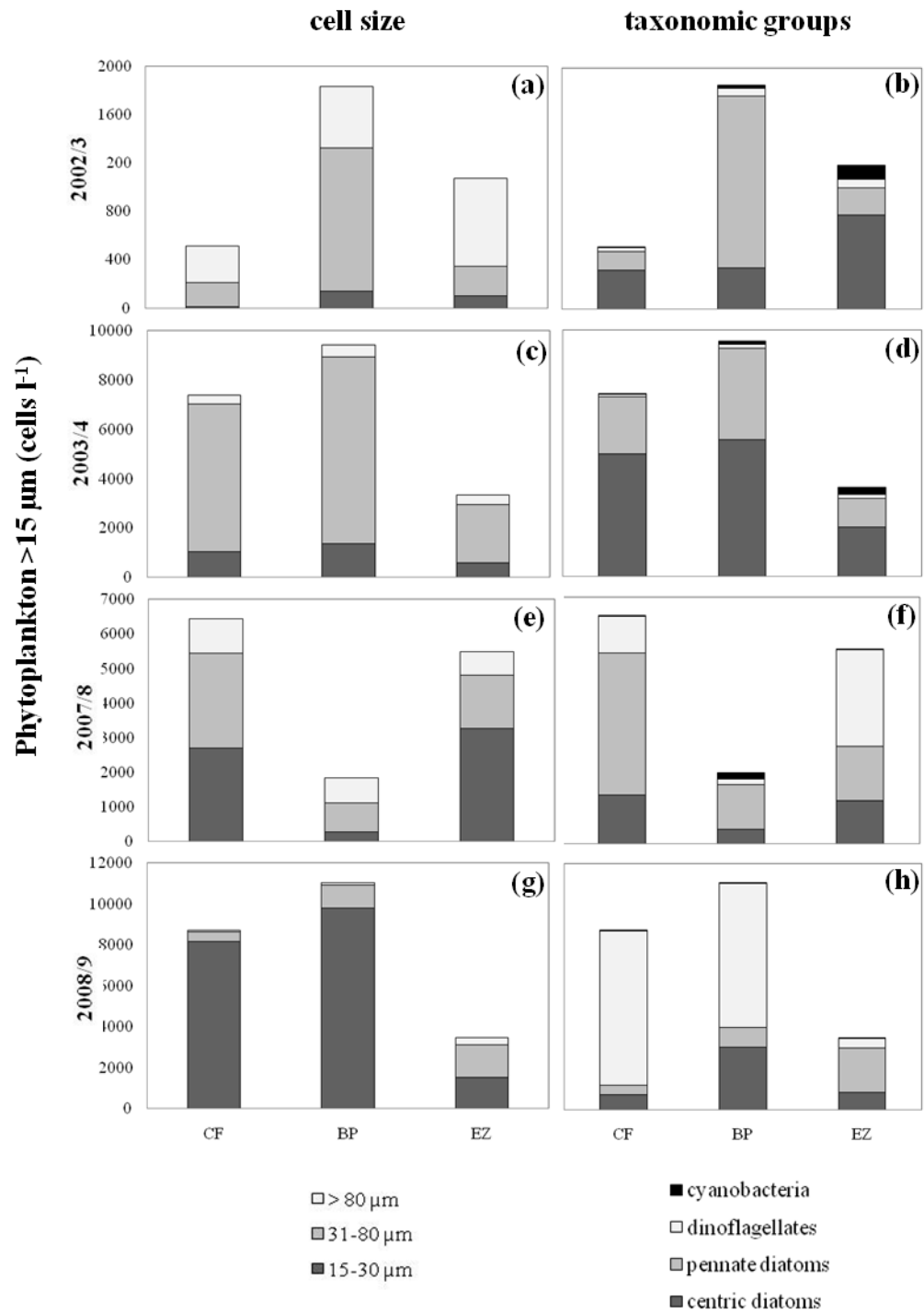


Figure 7. Abundance (cells l^{-1}) of phytoplankton size classes (a,c,e,g) and taxonomic groups (b,d,f,h) in the four sampling periods: (a,b) 2002/3; (c,d) 2003/4; (e,f) 2007/8; (g,h) 2008/9.

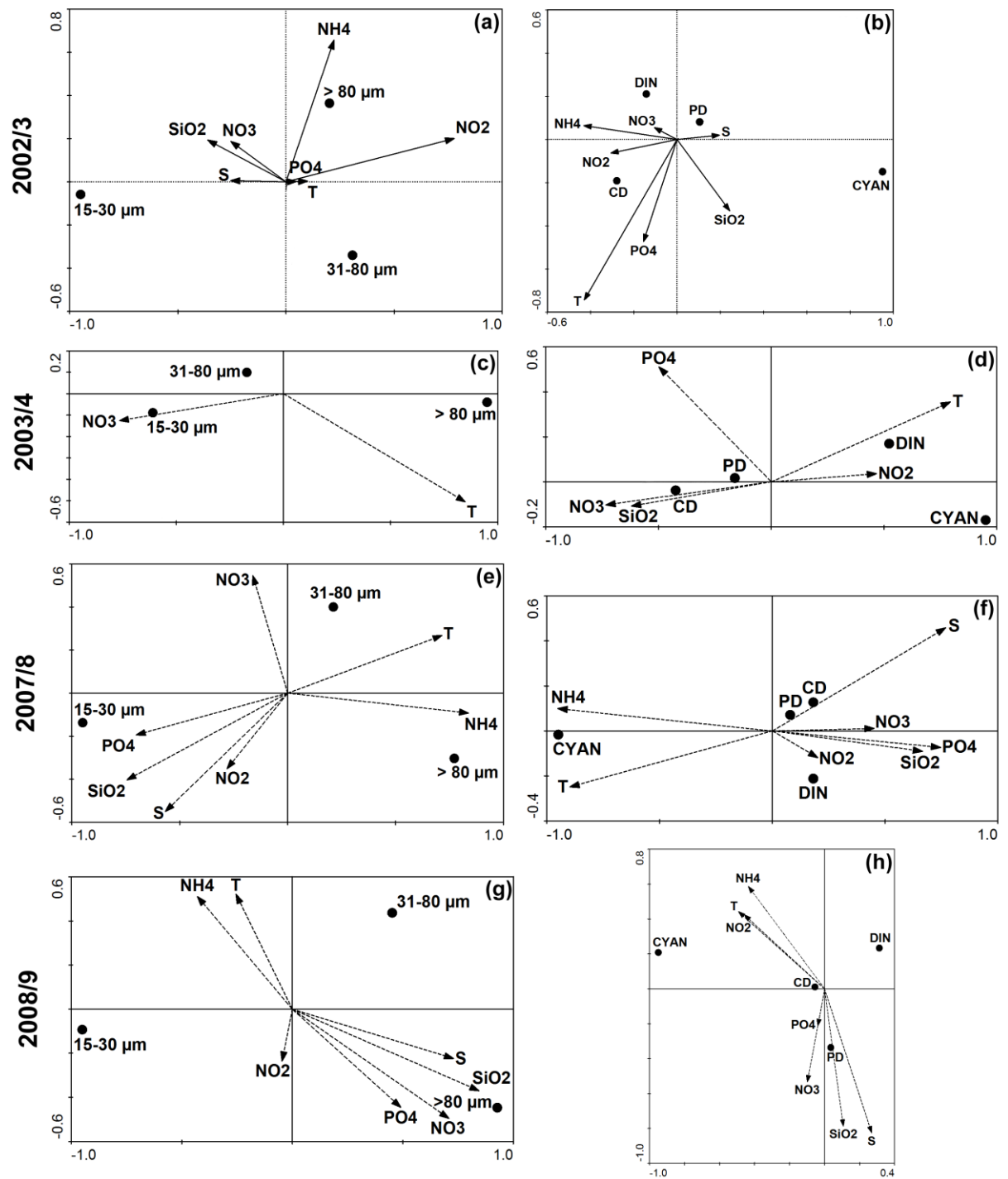


Figure 8. Canonical Correspondence Analyses of phytoplankton abundance (at three size classes) and taxonomic groups $\times$ abiotic variables for the four sampling periods: (a,b) 2002/3; (c,d) 2003/4; (e,f) 2007/8; (g,h) 2008/9. T. water temperature; S. salinity; NO₂. nitrite; NO₃. nitrate; NH₄. ammonium; SiO₂. silicate; PO₄. phosphate; CYAN. cyanobacteria; DIN. dinoflagellates; CD. centric diatoms; PD. pennate diatoms.

Anexo II

Variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado

(Ilha Rei George, Península Antártica) durante o início do verão de 2008/9

Priscila K. Lange^{1,2*}, Denise R. Tenenbaum², Virgínia M. Tavano¹, Rodolfo Paranhos², Lucia S. Campos²

¹ Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Laboratório de Ecologia do Fitoplâncton e de Microorganismos Marinhos. Av. Italia, Km 8, Rio Grande/RS, CEP:96201-900, Brazil. *prilange@gmail.com;

² Instituto de Biologia, Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Resumo

Com o objetivo de avaliar as variações espaciais na estrutura da comunidade fitoplancônica da Baía do Almirantado, o fitoplâncton foi amostrado durante o início do verão de 2008/9 em cinco pontos na região costeira, seis pontos na bacia central e dois pontos no Estreito de Bransfield, em diversas profundidades. A densidade celular do nanoplâncton (10^4 a 10^5 cel.l⁻¹), composto principalmente por diatomáceas cêntricas (33%) e criptófitas (16%), foi até 100 vezes superior à do microfitoplâncton (10^3 cel.l⁻¹), dominado por diatomáceas (79%), principalmente penadas (57%). A zona costeira rasa apresentou maior densidade celular do microplâncton ($7,3 \times 10^3 \pm 5,8 \times 10^3$ cel.l⁻¹), representado por diatomáceas penadas e dinoflagelados, e do nanoplâncton ($3,0 \times 10^5 \pm 2,4 \times 10^5$ cel.l⁻¹), dominado por criptófitas. Estas criptófitas estiveram relacionadas a valores reduzidos de amônio, o que sugere que este nutriente esteja sendo consumido por estes organismos apesar do elevado aporte continental próximo à costa. A intrusão de águas costeiras na camada superficial da bacia central foi notável do lado leste da Baía, provavelmente devido à menor intensidade das correntes e movimentos turbulentos nesta região, indicada pela elevada densidade celular de criptófitas, diatomáceas bentônicas e dinoflagelados heterotróficos. Dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) foram mais abundantes nos limites entre águas costeiras oceânicas, coincidindo com baixas concentrações de nitrato. Na bacia central, onde a concentração de nutrientes é elevada, o fitoplâncton apresentou baixa densidade celular, com águas superficiais (< 50m) apresentando maiores concentrações ($7,4 \times 10^4 \pm 6,3 \times 10^4$ cel.l⁻¹) quando comparadas às águas mais profundas ($4,4 \times 10^4 \pm 3,9 \times 10^4$ cel.l⁻¹) dominadas por diatomáceas cêntricas nanoplancônicas. Diatomáceas cêntricas do microplâncton e diatomáceas penadas do gênero *Pseudo-nitzschia*, que apresentaram densidade celular elevada no Estreito de Bransfield, foram as principais indicadoras da entrada de águas do Estreito de Bransfield na bacia central da Baía.

Palavras-chave: águas costeiras, Península Antártica, criptófitas, diatomáceas

Introdução

O fitoplâncton do Oceano Antártico é caracterizado pela ampla oscilação sazonal em sua produtividade, que é regulada através das variações na incidência de radiação solar (Medlin e Priddle, 1990). O degelo decorrente do aumento da temperatura atmosférica no verão austral ocasiona a redução da salinidade na camada superficial do oceano que, associado ao regime de ventos, controla a estabilidade da coluna de água (Schloss et al., 2002). A formação de uma coluna de água estável possibilita a retenção do material particulado (células fitoplanctônicas) nas camadas superficiais, mantendo-as em contato com a radiação solar (Medlin e Priddle, 1990).

Desta forma, são formadas grandes florações, constituídas principalmente de diatomáceas, que ocorrem em zonas marginais de plataformas de gelo, icebergs e região costeira, e sustentam toda a trama trófica do ambiente Antártico (Hewes, 2009). As concentrações de macro-nutrientes são altas em todo o Oceano Austral, principalmente nestas regiões sujeitas ao degelo, exceto em situações de florações em senescência (Medlin e Priddle, 1990).

Dentre os fatores que regulam a produção primária nas regiões costeiras antárticas estão a intensidade dos ventos, que desestabilizam a coluna de água e, em regiões rasas, provocam a ressuspensão do sedimento e do microfitobentos; a redução da salinidade provocada pelo degelo continental; e a incidência da luz solar (Brandini e Rebello, 1994; Schloss et al., 2002).

No oeste da Península Antártica, as comunidades fitoplanctônicas são dominadas por algas nanoplanctônicas ($< 20 \mu\text{m}$) principalmente flageladas (Garibotti et al., 2003; Montes-Hugo et al., 2008a), entretanto as diatomáceas microplanctônicas ($20\text{-}200 \mu\text{m}$)

são responsáveis pelos maiores acúmulos de biomassa tanto em águas costeiras (Brandini and Rebello, 1994; Moline et al., 1997; Schloss et al., 2002; Kopczynska, 2008) quanto em oceano aberto (Medlin e Priddle, 1990; Clarke e Leakey, 1996; Froneman et al., 1997; Varela et al., 2002; Montes-Hugo et al., 2008b).

Nos últimos 30 anos, o aquecimento da porção noroeste da Península Antártica (p.e. Estreito de Bransfield) resultou no aumento do sombreamento causado pela cobertura de nuvens mais vasta, da velocidade do vento e da profundidade da camada de mistura, além da diminuição da extensão da cobertura de gelo. Como consequência, as diatomáceas foram substituídas por pequenos flagelados, uma vez que a produção destas diatomáceas do microfitoplâncton está normalmente associada às zonas marginais de plataformas de gelo e a regiões costeiras onde o degelo continental é intenso, por dependerem de uma camada de mistura rasa ocasionada pelo escoamento da água de baixa salinidade do degelo (Montes-Hugo et al., 2009).

Na Baía do Almirantado (Ilha Rei George), o fitoplâncton é normalmente dominado por espécies nanoplanctônicas na bacia central (Kopczynska, 2008), que contribuem com cerca de 70% da clorofila a (Brandini e Rebello, 1994) e são provenientes do Estreito de Bransfield (Brandini, 1993; Kopczynska, 2008). Porém, em águas rasas a contribuição das diatomáceas bentônicas é substancial (Lange et al., 2007). Através de processos físicos como pequenas ressurgências costeiras (Brandini and Rebello, 1994; Schloss et al., 2002) e processos advectivos causados pelo degelo continental (Pichlmaier et al., 2004; Nedzarek, 2008), e o microfitobentos é ressuspendido para a coluna de água. Estes processos físicos são também responsáveis pelo aumento da turbidez da água, o que restringe a zona eufótica e consequentemente a produção primária na coluna de água.

As concentrações de clorofila observadas na Baía do Almirantado são normalmente baixas (entre 0,5 e 2 mg/m³), podendo atingir até 4 mg.m⁻³ em situações de floração, quando a densidade celular do microfitoplâncton atinge 10⁵ cel.l⁻¹ (Brandini, 1993; Brandini e Rebello, 1994). Diatomáceas penadas bentônicas formadoras de cadeia (p.e. *Fragilaria striatula*, *Fragilariopsis* spp., *Navicula* spp., *Licmophora* spp.) são as principais constituintes de florações (Brandini e Rebello, 1994). Estas florações normalmente ocorrem em período de ventos fracos, precedidos de períodos de ventos fortes (preferencialmente de norte e oeste) que ocasionam pequenas ressurgências costeiras e aumentam os processos turbulentos na coluna de água. Estes ventos fortes também intensificam a troca de águas com o Estreito de Bransfield (Pruszek 1980, Robakiewicz e Rakusa-Suszczweski, 1999).

As alterações nos padrões sucessionais de comunidades fitoplanctônicas são consideradas um marcador eficiente para detectar tendências nos ecossistemas do Oceano Austral (Moline and Prézelin, 1996). A estrutura da comunidade fitoplanctônica reflete as alterações dos processos físicos em áreas costeiras na Península Antártica (Schloss et al., 2002; Turner, 2004; Ward et al., 2007) e está intimamente relacionada com os sistemas biológicos continentais por serem os principais produtores primários no ambiente Antártico (Medlin e Priddle, 1990; Vergani et al., 2001; Ribic et al., 2008).

O objetivo deste trabalho é avaliar as variações espaciais do fitoplâncton na Baía do Almirantado (Ilha Rei George, Península Antártica), através da análise qualitativa (composição de espécies) e quantitativa (densidade celular), visando identificar possíveis fatores que influenciam estas variações.

Área de estudo

A Baía do Almirantado está localizada na Ilha Rei George (Ilhas Shetland do Sul, a oeste da Península Antártica), cobrindo uma área de 122 km² e possuindo um relevo de fjörd devido à grande erosão causada pelo gelo, o que ocasiona uma grande profundidade em sua porção central (cerca de 500m). Porém, no interior de suas três enseadas (Ezcurra, Mackellar e Martel) a profundidade máxima não excede 150m (Rakusa-Suszczewski, 1980). A circulação de águas é caracterizada pela entrada de um grande volume de águas do Estreito de Bransfield na região central através da abertura localizada ao sul da Baía, e o escoamento de águas pela zona costeira rasa, gerando uma contra-corrente de grande velocidade que pode ser influenciada pelos ventos, o que separa os corpos de água da zona costeira e da zona central (Absher *et al.* 2003). A influência de ventos e marés na circulação de águas é notável, principalmente em águas costeiras, sendo mais intensa no lado oeste da Baía (Robakiewicz e Rakusa-Suszczewski, 1999). O regime de ventos também pode gerar pequenas ressurgências costeiras, regulando a estabilidade da coluna de água e, assim, a produção primária (Brandini e Rebello, 1994).

O aporte de água doce, rica em nutrientes do solo e de excretas de animais terrestres, provem do derretimento do gelo continental e de geleiras (Nedzarek e Rakusa-Suszczewski, 2004) e escoam pela superfície do solo e pelo sub-solo, gerando um processo físico que causa a ressuspensão do material do fundo e aumenta a turbidez da água (Pichlmaier *et al.*, 2004). Os fragmentos de macroalgas também são uma importante fonte de nutrientes e matéria orgânica, principalmente em águas costeiras

rasas, além de servirem de substrato para microalgas epífitas (Nedzarek e Rakusa-Suszczewski, 2004).

Material e Métodos

Estratégia amostral

As amostras de água foram coletadas em 5 estações na zona costeira, 6 estações na bacia central, sendo duas localizadas sobre cada uma das linhas batimétricas de 100, 300 e 500m, e 2 estações no Estreito de Bransfield, na batimetria de 700m (Fig. 1).

A região costeira rasa (30m) foi amostrada entre 8 e 14/Dez/2008 (Tab. 1), com o auxílio de uma garrafa de Van Dorn (3l), à bordo de um bote inflável com motor de popa. As coletadas ocorreram em cinco pontos: nas proximidades da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF); em um ponto próximo da Estação Polonesa Arctowski, dentro da Enseada Ezcurra; e em três outras áreas de referência, sendo duas delas (Botany Point e Ullman Point) dentro da Enseada Martel e a outra localizada na Enseada Mackellar, próximo a um refúgio brasileiro (Fig. 1). Em cada ponto, foram coletadas amostras nas profundidades de 1m e 25m.

Na bacia central da Baía e Estreito de Bransfield, as coletas ocorreram entre 1 e 7/Dez/2008 (Tab. 1), utilizando garrafas de Niskin (10 l) utilizando o método de lingada, e à bordo do Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel. Em cada estação, amostras de 1l foram tomadas das profundidades de 1, 10, 20, 50 e 10m acima do assoalho. As profundidades de 100, 200 e 500 também foram amostradas, quando

existentes. Desta forma, foram estabelecidas três regiões distintas na Baía: as águas costeiras, águas superficiais da bacia central e águas profundas da bacia central. Foram consideradas águas superficiais da bacia central as amostras coletadas até 50m de profundidade, com base nos perfis de densidade, os quais destacam as águas até 50m das águas mais profundas. Além disso, a classificação de Brandini (1993) estabeleceu a camada até 30m de profundidade como a camada de mistura da Baía do Almirantado sob condições de ventos fracos (até 6m/s), sendo esta aumentada sob a influência de ventos mais fortes como os observados no presente trabalho.

Análise do fitoplâncton e variáveis abióticas

As amostras de água foram acondicionadas em frascos escuros de 1 litro e fixadas com formaldeído (4%) neutralizado com bórax e colocadas para decantar por no mínimo dois meses. Após o sifonamento das amostras de água (aproximadamente 700ml de sobrenadante descartado, volume final de 300ml), e com o auxílio de um microscópio óptico invertido com contraste de fase, a composição e a densidade celular do fitoplâncton foram avaliadas a partir de alíquotas de 50 ou 100 ml colocadas em sedimentação durante 48 ou 72 horas, respectivamente, dependendo da concentração celular (Utermöhl, 1958). As células de tamanho superior a 15 μm foram quantificadas sob um aumento de 200x, enquanto o aumento de 400x foi utilizado para identificar alguns espécimes do microfitoplâncton e quantificar em no mínimo 1 transecto células menores que 15 μm . Mesmo quando formando cadeias, as diatomáceas foram quantificadas por unidade celular, enquanto no caso das cianobactérias os filamentos foram considerados como unidade.

A temperatura foi mensurada no momento da coleta, com o auxílio de um termômetro digital. A salinidade foi determinada por titulação do cloreto. Para todos os métodos empregados na análise dos nutrientes, as amostras foram analisadas em triplicata. O ortofosfato reativo foi determinado pelo método fosfomolibídico (Grasshoff et al., 1999). Para o fósforo total, as amostras foram digeridas em meio ácido com persulfato de potássio e determinadas pelo método anterior. O nitrogênio amoniacal ($\text{N-NH}_3 + \text{N-NH}_4^+$) foi determinado pelo método do azul de indofenol (Parsons et al., 1984). A análise de nitrito foi realizada pelo método da diazotação (Grasshoff et al., 1999). O nitrato foi determinado por redução em coluna de Cd-Cu seguido de diazotação (Grasshoff et al., 1999), tendo sido analisado via injeção em fluxo. O silicato foi determinado pelo método silicomolibídico (Grasshoff et al., 1999). A clorofila *a* foi determinada após extração em acetona 90% durante um período de 18 horas a 4°C. Tanto as medidas, em fluorímetro Turner Designs® TD-700, quanto os cálculos foram baseados nos procedimentos e nas equações descritas por Parsons et al., (1984) e a detecção dos métodos foi realizada com enfoque em metrologia (Matos, 2001).

Os dados de direção e velocidade dos ventos e de intensidade da radiação solar foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A velocidade média do vento e a radiação solar média nas 24 horas prévias ao momento da coleta foram utilizadas nas análises de dados.

Análise de dados

Para avaliar as variações espaciais na estrutura da comunidade fitoplanctônica, as células pertencentes ao microfitoplâncton ($>20\ \mu\text{m}$) e ao nanoplâncton ($2\text{-}20\mu\text{m}$) foram analisadas separadamente. Nas análises ecológicas, estas células também foram agrupadas de acordo com o grupo taxonômico ao qual pertencem: diatomáceas cêntricas, diatomáceas penadas, dinoflagelados, flagelados e cianobactérias.

As variações dos dados ambientais (temperatura da água, salinidade, amônio, nitrito, nitrato, velocidade do vento) e bióticos (densidade celular fitoplanctônica, clorofila a e feofitina) foram avaliadas através da análise de variância ANOVA (teste Fisher-LSD, $p<0,05$). As relações entre os dados ambientais foram avaliadas através da Análise de Componentes Principais (Statistica[®] 6.0), e sua influência sobre a estrutura da comunidade fitoplanctônica foi identificada através da Análise Canônica de Correspondência (CANOCO[®] 4.5).

As amostras foram também agrupadas de acordo com a semelhança em sua composição específica e densidade das espécies, através da Análise de Agrupamento (Método de Ward) (Past[®] 1.8), onde as espécies mais importantes para os grupos de amostras estabelecidos foram identificadas na Rotina SIMPER (Similarity Percentages) (Primer[®] 6.0). A correlação entre algumas variáveis foi também estabelecida através do cálculo do Índice de Correlação de Spearman. Para tais análises estatísticas, os dados biológicos foram normalizados ($\log_{10} x+1$). Na Análise de Agrupamento e Rotina SIMPER, as espécies consideradas *raras* foram excluídas, uma vez que, por possuírem baixa frequência de ocorrência, podem atuar como dimensões aleatórias, estando sujeitas ao acaso (Legendre e Legendre, 1983). Foram consideradas *raras* as espécies

que apresentaram frequência de ocorrência inferior à média da frequência de todas as espécies, em cada ano de coleta. A relação entre as concentrações de pigmentos (clorofila e feofitina) e os dados de densidade celular de cada fração de tamanho (micro e nanoplâncton) e dos diferentes grupos taxonômicos do fitoplâncton foram detectadas através do teste de Mantel (dados normalizados $\log_{10}x+1$, Índice de Bray-Curtis, 15000 permutações), que indicaram as frações de tamanho e grupos taxonômicos que mais contribuíram para a biomassa no ambiente. Além disto, a Análise de Agrupamento foi realizada para células do microfitoplâncton e do nanoplâncton separadamente, por possuírem densidade celular de diferentes ordens de grandeza no ambiente estudado.

A identificação das espécies foi realizada com base nos trabalhos: Peragallo e Peragallo (1921), Cupp (1943), Medlin e Priddle (1990), Round et al. (1990), Hasle (1972), Balech (1975), Scott e Marchant (2005), Komarek (2007), Al-Handal e Wulff (2008a;2008b).

Resultados

Durante o início do verão de 2008/9, o fitoplâncton da Baía do Almirantado apresentou baixos valores de densidade celular e de clorofila, apesar das altas concentrações de nutrientes (Tab. 2). A região costeira no interior da Baía do Almirantado apresentou altas temperaturas da água e baixa salinidade em relação às águas oceânicas (Tab. 2). Os ventos com altas velocidades, predominantemente de oeste e sudoeste, foram acompanhados de uma intensa incidência de radiação solar. Os nutrientes (nitrato, fosfato e silicato) ocorreram em maior concentração nas águas da

bacia central quando comparada à região costeira, ao contrário da densidade celular fitoplanctônica, que foi mais elevada em águas costeiras (Tab. 2).

Variáveis ambientais

As relações entre as características hidrológicas no interior da baía obtidas pela análise de componentes principais explicaram 70,9% da variação dos dados no Plano 1x2 (Fig. 2a,b). O Eixo 1 (48,2%) evidenciou a relação entre os nutrientes, enquanto o eixo 2 (21,9%) indicou a relação inversa ($r=-0,27$) entre a salinidade, projetada em sua porção negativa, e a temperatura e os nutrientes projetados na porção positiva deste eixo. De acordo com o eixo 1, a velocidade do vento e a radiação solar apresentaram uma forte correlação positiva ($r=0,84$) com a temperatura, nitrito e amônio, e negativa com o silicato, fosfato e nitrato. Os pigmentos não apresentaram relação significativa com nenhuma variável ambiental, porém esta relação existe quando é considerada apenas a camada superficial (até 50m) da coluna de água (Tab. 3). Nesta camada superficial, a clorofila apresentou correlação negativa com a velocidade média do vento ($r=-0,45$), radiação solar ($r=-0,53$), fosfato ($r=-0,45$) e nitrato ($r=-0,45$), enquanto a feofitina foi negativamente relacionada também ao amônio ($r=-0,53$) (Tab. 3).

Os perfis verticais de densidade da água e nutrientes indicam águas menos densas próximo à costa e na camada superficial da bacia central (Fig. 3a). Na região costeira, todos os nutrientes apresentaram suas menores concentrações (Figs. 3c,d,e), exceto o fosfato (Fig. 3b), que ocorreu em menores teores na camada limite entre as águas costeiras e da bacia central (Fig. 3a). O nitrato também apresentou baixas concentrações nesta camada, além de águas costeiras (Fig. 3c). O amônio esteve menos concentrado

em águas mais externas da bacia central, assim como o silicato (Fig. 3e), e em águas costeiras, apresentando maior teor em águas intermediárias (Fig. 3d).

Pigmentos

A distribuição vertical dos pigmentos na bacia central da Baía do Almirantado foi marcada pela maior concentração de clorofila *a* na camada superficial (< 50m) da coluna d'água ($p=0,04$) quando comparada a águas mais profundas, o que não ocorreu com a feofitina ($p=0,11$; ver Tab. 2). A variação horizontal destes pigmentos foi distinta na camada superficial (< 50m) e águas profundas (> 50m) na bacia central, pois na primeira, o teor de clorofila foi mais elevado em águas externas da Baía quando comparadas com águas rasas ($p<0,04$; Fig. 4a). A concentração de feofitina relativa (feofitina/clorofila+feofitina) não apresentou variação horizontal significativa (Fig. 4a). Em águas profundas (> 50m), existiu maior disponibilidade de clorofila nos locais mais profundos (Fig. 4b) em decorrência de concentrações relativamente elevadas que ocorreram nas camadas de 100 e 200m de profundidade. Por outro lado, a feofitina relativa integrada (Fig. 4b) ocorreu em maior concentração nos pontos com menor profundidade local ($p<0,03$), principalmente na Enseada Martel, sugerindo a influência do ambiente bentônico na coluna de água. Sua proporção diminuiu gradativamente em direção à abertura da baía (Estreito de Bransfield), com o aumento da profundidade do local.

Fitoplâncton

Durante o início do verão de 2008/9, o fitoplâncton da Baía do Almirantado apresentou densidade celular variando entre $1,4 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$ e $7,8 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$, sendo o nanoplâncton (10^4 a 10^5 cel.l^{-1}) até 100 vezes mais abundante que o microfitoplâncton (10^3 cel.l^{-1}) (ver Tab. 2).

Águas superficiais

Em águas superficiais (<50m), a densidade celular média do nanoplâncton foi mais elevada na região costeira ($p < 0,04$) devido à grande contribuição de fitoflagelados (especialmente criptófitas), exceto os pontos Ullman Point (UP) e Ezcurra (Ez) (Fig. 5a). Estes dois pontos são locais mais íngremes na zona costeira, onde a densidade celular foi semelhante à região central da Baía (Fig. 5a). Quando integrados os 50m superficiais, esta diferença de densidade celular não é significativa uma vez que os locais mais rasos possuem apenas 30m de profundidade, exceto em Botany Point onde a densidade celular foi mais elevada (Fig. 5b).

Nas águas superficiais da bacia central houve um aumento na representatividade de diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas, que em alguns pontos excederam a de flagelados nanoplanctônicos (Figs. 5a,b). No Estreito de Bransfield (pontos na isóbata de 700m) os flagelados também foram dominantes, apesar da densidade celular mais reduzida principalmente no ponto #700m-1 (Fig. 5a,b).

O microfitoplâncton de águas superficiais (< 50m) apresentou densidade celular média mais elevada nos pontos Botany Point (BP), Refúgio 2 (Re) e Comandante Ferraz

(CF), na região costeira (Fig. 5c). Porém, quando integrados os 50m superficiais da coluna de água, apenas Botany Point apresentou densidade celular mais elevada que os demais pontos (Fig. 5d). As cianobactérias foram representativas apenas no ponto 100m-2, localizado na Enseada Mackellar (Fig. 5c,d).

Os dinoflagelados foram responsáveis por mais de 50% da densidade celular nos 6 pontos localizados do lado leste da Baía e Estreito de Bransfield (CF, BP e UP na Enseada Martel, 100m-1, 300m-2 e 700m-2; Fig. 5c,d). Porém, quando considerada a densidade celular integrada, este grupo foi mais abundante no interior da Enseada Martel (exceto 100m-1) e no ponto 300m-2 (Fig. 6a). Somente nestes pontos, a densidade celular de dinoflagelados foi superior à de diatomáceas (Fig. 6a).

Desta forma, foi observada a densidade celular mais elevada de criptófitas em águas mais internas e costeiras da Baía do Almirantado, enquanto diatomáceas penadas, especialmente *Pseudo-nitzschia* spp., foram mais abundantes no ponto 700m-1, no Estreito de Bransfield, e na região central da Baía (incluindo a Enseada Mackellar) (Fig. 6b).

Águas profundas

Em águas profundas (> 50m) da bacia central da Baía do Almirantado e Estreito de Bransfield, a densidade celular média do nanoplâncton apresentou valores mais elevados (em média $1,2 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$) na isóbata de 100m (pontos mais internos) devido à proximidade do assoalho, enquanto nos demais pontos esteve abaixo de $0,5 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$ (Fig. 7a). O microfitoplâncton apresentou a maior densidade celular média no ponto 300m-1, localizado no encontro das Enseadas Martel e Mackellar, e no ponto 700m-1 no

Estreito de Bransfield (Fig. 7a). Quando integrada a coluna de água, a concentração de células do microfitoplâncton e do nanoplâncton foi mais elevada nas maiores isóbatas devido à maior extensão da coluna de água (Fig. 7b).

Variações verticais das populações fitoplanctônicas

A análise de Agrupamento identificou quatro grupos de amostras que apresentaram populações fitoplanctônicas descritas pela análise SIMPER (Similarity Percentages) (Tab. 4).

O nanoplâncton foi caracterizado pela dominância de criptófitas e outros flagelados (grupo n2b - Fig. 12; Tab. 4) nas águas próximas à costa, enquanto águas mais externas na bacia central e Estreito de Bransfield foram dominadas por diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas (grupos n1a e n1b – Fig. 8, Tab. 4).

A distribuição de populações microfitoplâncton foi semelhante à do nanoplanctônicas, havendo maior contribuição de diatomáceas bentônicas (11%) na região costeira rasa (grupo M2b – Fig. 8; Tab. 4) e nas isóbatas mais próximas da costa na bacia central, especialmente próximo ao fundo (grupo M2a – Fig. 9; Tab. 4). O dinoflagelado *Katodinium* sp.1 ocorreu principalmente na região costeira, estando associado às menores salinidades. As águas externas à Baía, no Estreito de Bransfield foram caracterizadas pela maior contribuição de diatomáceas *Pseudo-nitzschia* (complexo *Pseudo-nitzschia delicatissima*), diatomáceas cêntricas *Thalassiosira* spp., e de dinoflagelados atecados (grupo M1a - Fig. 9; Tab. 4). A entrada destas águas na Baía é indicada pela população microfitoplanctônica semelhante encontrada nas águas

intermediárias e profundas da bacia central, sendo estas diferenciadas das águas superficiais que possuem populações semelhantes à da região costeira (Fig. 9; Tab. 4).

Portanto, as águas do Estreito de Bransfield e sua influência no interior da Baía são marcadas pela contribuição de diatomáceas do gênero *Pseudo-nitzschia*, dinoflagelados atecados e diatomáceas cêntricas micro e nanoplânctônicas, enquanto as regiões mais internas influenciadas pelas águas costeiras são caracterizadas pela maior contribuição de diatomáceas bentônicas e de criptófitas, acompanhadas pela maior contribuição do dinoflagelado *Katodinium* sp.1.

Em suma, na zona costeira ($3,0 \times 10^5 \pm 2,4 \times 10^5 \text{ cel.l}^{-1}$), o fitoplâncton foi 10 vezes mais abundante ($p < 0,01$) que em águas superficiais ($> 50\text{m}$) da região central da Baía ($7,4 \times 10^4 \pm 6,3 \times 10^4 \text{ cel.l}^{-1}$), onde a densidade celular média foi superior à encontrada em águas profundas ($< 50\text{m}$) desta mesma região ($4,4 \times 10^4 \pm 3,9 \times 10^4 \text{ cel.l}^{-1}$) (Fig. 10a). Flagelados nanoplânctônicos, principalmente criptófitas, foram os mais abundantes em ambas as regiões (93% na zona costeira e 73% na zona central), seguidos das diatomáceas cêntricas (4% na zona costeira e 22% na zona central), dinoflagelados (2%) e diatomáceas penadas (1%) (Fig. 10b). Cianobactérias representaram menos de 1% da densidade celular total.

O microfitoplâncton foi 3 vezes mais abundante na região costeira ($7,3 \times 10^3 \pm 5,8 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) quando comparado aos 50 m superficiais da bacia central ($2,2 \times 10^3 \pm 1,2 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$) ($p < 0,01$), que por sua vez apresentou densidade celular média superior à encontrada em águas abaixo de 50m de profundidade ($1,7 \times 10^3 \pm 1,6 \times 10^3 \text{ cel.l}^{-1}$; $p=0,03$) (Fig. 10c). De maneira geral, os dinoflagelados foram responsáveis por 49% da densidade celular microfitoplânctônica, seguidos por diatomáceas penadas (31%) e cêntricas (18%) (Fig. 10d). Porém, as diatomáceas penadas foram o grupo taxonômico

mais abundantes em 40% das amostras na zona costeira, sendo o microfitoplâncton dos outros 60% das amostras dominado por dinoflagelados, especialmente do gênero *Katodinium*. Cianobactérias representaram apenas 2% da densidade celular do microfitoplâncton.

A distribuição espacial do fitoplâncton na Baía do Almirantado destacou a dominância de criptófitas (Figs. 11a; ver Fig. 6b) e de dinoflagelados mixo/heterotróficos (e.g. *Gyrodinium lachryma*, *Katodinium* sp.1) nos locais mais rasos, sendo representativos até a isóbata de 100m. A contribuição de nanoflagelados (Cryptophyta, Ochrophyta, Prymnesiophyta), dinoflagelados mixo/heterotróficos e, próximo ao fundo, diatomáceas penadas bentônicas (e.g. *Cocconeis* spp.) ocasionaram a grande heterogeneidade da isóbata de 100m (similaridade média entre as amostras - SM = 54).

Na isóbata de 300m, dinoflagelados autotróficos (e.g. *Prorocentrum* spp.) apresentaram densidade celular elevada nas camadas sub-superficiais (Figs. 11b) em detrimento dos nanoflagelados e dinoflagelados mixo/heterotróficos, que permaneceram na camada superficial em toda a bacia central. Em camadas mais profundas em direção à bacia central, as diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas tornaram-se mais abundantes (Figs. 11d) assim como diatomáceas cêntricas microplanctônicas (Figs. 11e), principalmente do gênero *Thalassiosira*. Nesta mesma isóbata, próximo ao fundo no ponto mais costeiro (300m-1), foi também observado um aumento na densidade celular de diatomáceas cêntricas microplanctônicas (Figs. 11e), representadas por espécies bentônicas do gênero *Coscinodiscus* (e.g. *C. asteromphalus* e *C. furcatus*).

Diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp. foram abundantes na camada superficial da bacia central (isóbatas de 300 e 500m) e na camada de 200m de

profundidade na isóbata de 500m (Figs. 11c). Na isóbata de 500m, diatomáceas cêntricas foram dominantes (Figs 11d,e).

Os pontos localizados no Estreito de Bransfield, na entrada da Baía do Almirantado (isóbata de 700m) foram bastante distintos. No ponto localizado à oeste (700m-1; Fig. 11i) diatomáceas *Pseudo-nitzschia* spp. foram dominantes, apresentando densidade celular relativamente elevada em toda a coluna de água (Fig. 11c), junto a diatomáceas cêntricas *Thalassiosira* spp. (Fig. 11e). Por outro lado, o ponto localizado à leste (700m-2) apresentou baixa densidade celular fitoplanctônica em toda a coluna de água, exceto nas camadas superficiais (> 50m) onde criptófitas (Fig. 11a), dinoflagelados (Fig. 11b), diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp. (Fig. 11c) e diatomáceas cêntricas microplanctônicas (Fig. 11e) foram responsáveis pelo aumento da densidade celular.

Diatomáceas penadas do microfitoplâncton (com excessão de *Pseudo-nitzschia*) foram mais abundantes em águas costeiras (Figs. 11f), representadas por espécies bentônicas, enquanto em águas superficiais da bacia central e Estreito de Bransfield as espécies planctônicas (e.g. *Plagiotropsis* spp.) foram mais importantes (Figs. 11f).

Variáveis ambientais X Fitoplâncton

A influência das variáveis ambientais sobre a estrutura da comunidade fitoplanctônica foi observada através da Análise de Correlação Canônica. O principal fator que esteve relacionado com a abundância dos grupos taxonômicos foi o teor de nitrato ($p=0,02$), sendo não significativas as relações com a salinidade ($p=0,12$), fosfato ($p=0,15$), amônio ($p=0,25$), silicato ($p=0,31$) e temperatura ($p=0,73$) (Fig. 12).

De maneira geral, as menores concentrações de nitrato e de fosfato, que ocorreram em águas menos salinas ($r=0,12$), coincidiram com a maior densidade celular de flagelados nanoplanctônicos. Dinoflagelados microplanctônicos também foram favorecidos por estas condições hidrológicas. Por outro lado, as diatomáceas (principalmente cêntricas) ocorreram nas condições opostas, em águas mais salinas e com maiores teores de nitrato e fosfato. Dinoflagelados nanoplanctônicos ocorreram em águas com baixas concentrações de amônio.

A relação entre a abundância dos diferentes táxons do microfitoplâncton e os pigmentos (clorofila a e feofitina) na bacia central da Baía do Almirantado destacou uma maior relação dos pigmentos com células do microfitoplâncton (Mantel $R=0,54$) quando comparadas às células do nanoplâncton (Mantel $R=0,44$). Dentre os grupos taxonômicos, os flagelados nanoplanctônicos apresentaram a maior relação com a clorofila ($r=0,50$), seguidos dos dinoflagelados ($r=0,63$). Os dois táxons mais abundantes (criptófitas e diatomáceas *Pseudo-nitzschia* spp.) apresentaram correlação significativa com a clorofila ($r=0,38$ para ambas), porém apenas as criptófitas foram correlacionadas com o teor de feofitina ($r=0,34$).

Nas camadas superficiais (até 50m), tanto o teor de clorofila quanto o de feofitina apresentaram correlação significativa somente com os dinoflagelados do microplâncton ($r=0,41$ e $0,42$ respectivamente). Os perfis verticais da concentração de feofitina, que chegou a atingir $0,7 \text{ mg.m}^{-3}$ próximo ao fundo na isóbata de 100m, foram acompanhados principalmente pela abundância de células maiores que $70\mu\text{m}$ ($r=0,43$), em sua maioria diatomáceas penadas ($r=0,46$). As densidades celulares mais altas de diatomáceas penadas bentônicas próximo ao fundo na isóbata de 100m pode ser reflexo tanto a sedimentação de células planctônicas, como da introdução do microfitobentos no

plâncton local. Porém, o aumento na abundância do nanoplâncton próximo ao fundo não reflete a concentração de pigmentos.

Discussão

Os resultados encontrados neste estudo retratam a situação das águas da Baía do Almirantado durante o início do verão, quando era esperado o degelo acelerado do gelo marinho e terrestre. Em outros períodos do ano (i.e. meio e final do verão, inverno), espera-se uma grande diferenciação das condições aqui apresentadas.

No início do verão (dezembro) de 2008, a baixa densidade celular do fitoplâncton na bacia central da Baía do Almirantado ($7,4 \times 10^4 \text{ cel.l}^{-1} \pm 6,3 \times 10^4 \text{ cel.l}^{-1}$ na camada superficial) foi semelhante à observada em dezembro de 1996 na Baía do Almirantado (Kopczynska, 2008), na Ilha Signy (Península Antártica) em dezembro de 1988 (Clarke e Leakey, 1996) e inferior à reportada em dezembro de 1997, 2003 e 2004 (Kopczynska, 2008), apresentando composição taxonômica diferenciada. Enquanto diatomáceas cêntricas e penadas ticoplanctônicas eram dominantes nos trabalhos citados, os dinoflagelados, criptófitas, diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas e penadas *Pseudo-nitzschia* spp. foram dominantes neste estudo.

Em períodos mais tardios do verão austral, a densidade celular e o teor de clorofila foram mais elevados, com o domínio de diatomáceas tipicamente planctônicas tais como as cêntricas *Chaetoceros* spp., *Rhizosolenia truncata*, *Odontella weissflogii* e *Eucampia antarctica*, tal como ocorreu em fevereiro de 1997 (Brandini, 1993), e nos verões de 1996 a 1998 por Kopczynska (2008). Em janeiro de 2004 e fevereiro de 2008,

estas diatomáceas foram reportadas também nas águas costeiras da Baía, porém em baixas concentrações (Lange et al., Anexo I). No presente estudo, estas diatomáceas cêntricas não foram observadas, sendo substituídas por penadas tipicamente planctônicas (*Pseudo-nitzschia* spp.) e dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.). Estas diatomáceas *Pseudo-nitzschia* spp. foram anteriormente reportadas com grandes concentrações em regiões mais ao norte, próximas à frente polar, na Antártica Oriental (Fiala et al., 1998; Kopczynska et al., 1998; Kopczynska e Fiala, 2003; Kopczynska et al., 2007). A grande concentração de *Pseudo-nitzschia* spp. na Baía do Almirantado pode ser um indício do deslocamento de comunidades planctônicas para o sul devido ao aquecimento do norte da Península Antártica, sugerindo a entrada no Estreito de Bransfield das águas do Mar de Weddell, (Montes-Hugo et al., 2009), onde estas diatomáceas são dominantes (Almadoz et al., 2008).

Diatomáceas penadas formadoras de cadeia (*Fragilariopsis* spp., *Achnanthes* spp., *Navicula* spp., *Licmophora* spp.) foram responsáveis por florações e elevadas concentrações de clorofila em fevereiro de 1989 (Brandini e Rebello, 1994) e fevereiro de 2003 (Lange et al., 2007). Porém, no presente estudo (dezembro 2008), a densidade celular de diatomáceas penadas foi muito baixa, presente apenas em dois pontos da zona costeira e próximo ao fundo na Enseada Martel. Estas diatomáceas penadas, ao invés de formadoras de cadeia, eram epífitas solitárias (*Cocconeis* spp., *Gomphonema* spp., *Pseudogomphonema kamtshaticum*). Os maiores teores de clorofila estiveram relacionados a diatomáceas penadas planctônicas (*Pseudo-nitzschia* spp.) em águas sub-superficiais (<50 m) no Estreito de Bransfield e interior da Baía (isóbata de 300 m). Diatomáceas cêntricas planctônicas (*Thalassiosira* spp.), que foram representativas em dezembro de 2008, não formaram florações como observado em anos anteriores

(Kopczynska, 2008), uma vez que não ocorreram as condições de ventos fracos favoráveis a tal.

A diatomácea epôntica *Corethron pennatum*, que normalmente está relacionada a períodos de degelo intenso do gelo marinho (Kang et al., 2002), ocorreu com baixas densidades celulares no início do verão de 2008/9. Porém, em verões anteriores, esta apresentou elevada densidade celular (Brandini, 1993; Lange et al., 2007; Kopczynska, 2008; Lange et al, Anexo I). Uma possível explicação seria o inverno precedente mais ameno, onde a temperatura do ar não foi muito baixa (INPE, 2009), reduzindo o depósito de gelo terrestre e formação de gelo marinho. A ausência de gelo marinho e reduzida cobertura de gelo terrestre observada em dezembro de 2008 corrobora esta possibilidade (observação de campo), diferente de anos anteriores.

Em águas costeiras, a relação similar entre a concentração de nitrato e de criptófitas, e nitrato e diatomáceas penadas bentônicas ($r = -0,35$) é intrigante, pois em geral considera-se que os fatores que acarretam a maior abundância desses dois grupos sejam diferentes. Nanoflagelados são favorecidos pela salinidade reduzida e o grande aporte de amônio (Brandini, 1993; Kopczynska et al., 2007), e são consideradas indicadoras do início do degelo terrestre e da estabilidade da coluna de água em águas costeiras (Moline e Prezelin, 1996). Por outro lado, diatomáceas são beneficiadas pela alta disponibilidade de nitrato (Clarke e Leahey, 1996; Kopczynska et al., 2007), e possivelmente de ferro (Detoni, 2010). A densidade celular de diatomáceas em águas costeiras foi mais elevada nos pontos próximos a canais de degelo e geleiras (i.e. Botany Point e Refugio 2), onde o aporte de água doce atingiu e influenciou as características hidrológicas antes do que nos demais pontos. Os canais de degelo são importantes introdutores de nutrientes (e ferro) nas águas costeiras (Nedzarek, 2008). O

inverno relativamente quente de 2008 (INPE, 2009), que antecedeu o período de coleta, teria sido responsável pelo menor acúmulo de gelo terrestre, tornando reduzida a vazão e dispersão da água lixiviada pelos canais de degelo, assim como o aporte de ferro e outros nutrientes. Assim, as diatomáceas foram representativas apenas nos pontos onde os canais de degelo deságuam. Em contraste, em dezembro de 2008, dinoflagelados heterotróficos apresentaram densidade celular superior à das diatomáceas. Este fenômeno já foi observado durante todo o verão de 2004/5, tanto na região costeira rasa (em frente à Estação Polonesa Arctowski) quanto na bacia central (Kopczynska, 2008). Assim como em 2008, o inverno de 2004 foi relativamente quente, apresentando temperatura média de $-2,9^{\circ}\text{C}$ (INPE, 2009). Isto sugere que a elevada abundância destes dinoflagelados esteja relacionada à menor temperatura e deposição de gelo durante o inverno prévio, ao contrario das diatomáceas, que são beneficiadas pelo elevado acúmulo de gelo no inverno e degelo mais intenso durante o verão.

Desta forma, na zona costeira, a densidade celular do microplâncton foi superior à encontrada no início do verão de anos anteriores, havendo uma mudança na composição taxonômica: dinoflagelados foram dominantes neste estudo ao invés das diatomáceas dominantes em dezembro de 2002 e 2003 (Lange et al., 2007; Lange et al., Anexo I).

Junto aos dinoflagelados mixo/heterotróficos, criptófitas foram dominantes em águas costeiras, relacionadas às menores salinidades. Possivelmente estes nanoflagelados, abundantes na Enseada Martel e leste da Enseada Mackellar, foram beneficiados indiretamente por águas menos salinas. O aporte de água doce dentro das Enseadas Martel e Mackellar, atrelado ao menor efeito de marés e ventos na circulação nestas áreas (Robakiewicz e Rakusa-Suszczweski, 1999), pode ter acarretado uma maior estabilidade da coluna de água, beneficiando estes flagelados (Moline e Prezelin,

1996). De fato, criptófitas já foram observadas em grandes concentrações junto aos dinoflagelados heterotróficos na Baía do Almirantado, como ocorreu em dezembro de 2004, quando diatomáceas foram pouco abundantes, como descrito anteriormente (Kopczynska, 2008).

Apesar do grande influxo de água doce na região costeira, o teor de amônio foi reduzido possivelmente devido ao seu consumo pelos nanoflagelados, como proposto por Brandini (1993) e Kopczynska et al. (2007). À medida que a densidade celular de nanoflagelados é reduzida em direção à bacia central, observa-se um aumento na concentração de amônio, que em seguida diminui em direção ao oceano aberto, mais uma vez indicando sua origem terrestre. Clarke e Leakey (1996) sugerem que há uma preferência para o consumo de amônio no início do verão (possivelmente por nanoflagelados), enquanto durante as florações do verão austral as diatomáceas consomem preferencialmente o nitrato. A baixa concentração de amônio, principalmente na Enseada Martel, pode estar relacionada também à sua oxidação realizada por bactérias Archea abundantes nesta área (Nakayama et al, 2011).

O fitoplâncton observado na Enseada Martel foi diferenciado do restante da Baía do Almirantado, apresentando características costeiras no período estudado (dominância de criptófitas), e elevada densidade celular de dinoflagelados gimnodinióides mixo/heterotróficos (e.g. *Gyrodinium lachryma*, *Katodinium* sp.1). Esta população fitoplanctônica também observada no ponto 300m-2, podendo ser um indicador do escoamento das águas da Enseada Martel pelo lado leste da Baía do Almirantado. O menor efeito de correntes de maré e ventos nesta porção oriental, principalmente (Robakiewicz e Rakusa-Suszczweski, 1999) ocasionando uma maior estabilidade da coluna de água também favoreceria, além das criptófitas (Moline e Prezelin, 1996), os

dinoflagelados (Smayda e Reynolds, 2003), que também são beneficiados pela oferta de alimento (nanoflagelados). A semelhança entre a flora fitoplanctônica de águas costeiras e da bacia central leste da Baía também foi reportada por Brandini e Rebello (1994), que observou florações em decorrência da introdução de diatomáceas penadas bentônicas formadoras de cadeia provenientes de águas costeiras, próximo ao ponto 300m-2.

Na Enseada Mackellar, a dominância de criptófitas e a contribuição de diatomáceas epilíticas e epífitas (e.g. *Licmophora* spp.) abundantes na zona de praia (Ligowski, 2002) foi estendida desde a zona costeira rasa até a camada superficial na entrada da Enseada (ponto 100m-2). No interior da Enseada Ezcurra, o terreno íngreme restringiu a zona costeira à estreita zona rasa, apresentando reduzida densidade celular de criptófitas, grande influência de águas da bacia central (*Pseudo-nitzschia* spp.) e o incremento de diatomáceas penadas epífitas (Ligowski, 2002) provenientes das macroalgas (e.g. *Himantothalus grandifolius*, Oliveira et al., 2009) abundantes em encostas íngremes nesta região (Sicinski et al., 2011).

As águas da bacia central, ricas em nutrientes (silicato, nitrato e fosfato), foram dominadas por diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas, comuns nestas águas durante o inverno (Kopczynska, 2008). Em fevereiro de 1987, nanoflagelados e dinoflagelados heterotróficos foram os mais abundantes na bacia central (Brandini, 1993), diferente de dezembro de 2008, quando estes grupos taxonômicos foram encontrados em águas costeiras. Isto pode ser um indício do deslocamento da frente entre águas costeiras e oceânicas no decorrer do verão, o que possibilitaria que as condições hidrológicas e ecológicas das águas da bacia central no final do verão (Brandini 1993) fossem semelhantes às águas costeiras no início do verão de 2008 (este estudo). A contribuição

de diatomáceas cêntricas *Thalassiosira* spp. e penadas *Pseudo-nitzschia* spp. indica a entrada de águas do Estreito de Bransfield (Kopczynska, 2008) na bacia central.

Na região em que ocorre o encontro das águas costeiras (menos salinas e mais quentes) com as águas provenientes do Estreito de Bransfield (mais salinas e frias), a densidade celular de dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) é elevada e as concentrações de fosfato e nitrato são as mais reduzidas. Isto corrobora a teoria de Smayda e Reynolds (2003), que aponta estes dinoflagelados autotróficos como sendo favorecidos por condições de transição entre águas costeiras rasas e águas costeiras mais abertas. Estes dinoflagelados já foram reportados anteriormente (fevereiro de 1996) em altas concentrações na Baía do Almirantado, associados à florações de diatomáceas (Kopczynska, 2008).

Próximo ao assoalho na bacia central, a relação negativa dos nutrientes como o silicato e o nitrato com os grupos taxonômicos aponta as diatomáceas penadas, em sua maioria bentônicas, como as principais assimiladoras destes compostos. A contribuição de grandes diatomáceas (e.g. *Coscinodiscus* spp.) próximo ao fundo em locais mais rasos da bacia central (100 e 300 m) sugere tanto a sedimentação destas células, contribuindo como oferta alimentar para animais bentônicos e demersais, como a introdução do microfitobentos no plâncton local. Mesmo quando integrada a coluna de água, os maiores valores de feofitina relativa observados em locais mais rasos da bacia central indicam a maior influência do ambiente bentônico em locais mais rasos, principalmente na Enseada Martel (e.g. feofitina = $0,7 \text{ mg.m}^{-3}$ e feofitina relativa = 0,42 no ponto 100m-1).

A maior contribuição de diatomáceas cêntricas e de diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp. na porção ocidental da Baía, inclusive em águas costeiras, sugeriu uma

maior troca de águas com o Estreito de Bransfield, em decorrência da grande influência de correntes de maré e ventos na circulação nesta região (Robakiewicz e Rakusa-Suszczweski, 1999). Ainda nesta porção ocidental, Kopczynska (2008) observou que as florações próximas à costa possuem uma composição taxonômica diferente das que são formadas na bacia central, não havendo troca entre esses dois corpos de água. Assim, ao contrário do observado do lado oriental, ela sugere que no lado leste da baía as florações originadas nas águas costeiras, formadas principalmente por diatomáceas penadas bentônicas, não atingem a bacia central. As florações originadas na bacia central são formadas de pequenos flagelados e diatomáceas cêntricas tipicamente planctônicas, e por sua vez não atingem a costa.

Considerando o depósito de gelo durante o inverno e seu derretimento durante o verão como fatores reguladores da vazão de água doce no interior da Baía, é possível estimar o alcance das águas costeiras no interior da Baía do Almirantado através da observação das microalgas indicadoras de águas costeiras e oceânicas, além do dinoflagelado *Prorocentrum* spp. como possível localizador do encontro entre estas massas de águas. A densidade celular de diatomáceas e criptófitas também se mostraram um bom indicador do degelo terrestre em águas costeiras, assim como podem identificar se o degelo é recente ou está ocorrendo há algum tempo (Moline e Prezelin, 1996). A estabilidade da coluna de água ocasionada pela salinidade reduzida de camadas superficiais pode ser indicada pela densidade celular de criptófitas e dinoflagelados heterotróficos, enquanto quando provocada pela redução na velocidade do vento, diatomáceas tornam-se as mais abundantes.

Conclusões

O fitoplâncton da Baía do Almirantado durante o início do verão de 2008/9 apresentou densidade celular do nanoplâncton composto principalmente por diatomáceas cêntricas e criptófitas. Este foi até 100 vezes mais abundante que o microfitoplâncton, dominado por diatomáceas, principalmente penadas.

As variações espaciais na estrutura da comunidade fitoplanctônica foram marcadas pela maior densidade celular na região costeira rasa, tanto do micro quanto do nanoplâncton, quando comparadas com a bacia central da Baía.

Em águas costeiras, o nanoplâncton foi dominado por flagelados, principalmente criptófitas, relacionadas a valores reduzidos de amônio, o que sugere que este nutriente esteja sendo consumido por estes organismos apesar do elevado aporte continental. O microfitoplâncton foi representado principalmente pelos dinoflagelados *Katodinium* sp.1 e *Gyrodinium lachryma*, além de diatomáceas penadas bentônicas, sendo estas o grupo mais abundante do microfitoplâncton em 40% das amostras. Dinoflagelados autotróficos (*Prorocentrum* spp.) apresentaram densidades celulares mais elevadas nos limites entre águas sob influência costeira e águas oceânicas, estando relacionados a depleções de nitrato.

Na bacia central, onde a concentração de nutrientes é elevada, o fitoplâncton apresentou baixa densidade celular, com maiores concentrações em águas superficiais (<50 m). Diatomáceas cêntricas do micro e nanoplâncton foram as principais representantes do fitoplâncton nesta região, junto às diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp., dominantes também no Estreito de Bransfield.

No lado leste da bacia central, a densidade celular mais elevada de criptófitas, diatomáceas bentônicas e micro-dinoflagelados atecados mixo/heterotróficos (e.g. *Katodinium* sp.1, *Gymnodinium* spp.) em águas superficiais indicaram o maior aporte das águas costeiras da Enseada Martel, onde estes grupos foram dominantes provavelmente devido à menor intensidade de correntes e movimentos turbulentos.

A troca com as águas mais externas do Estreito de Bransfield foi indicada pela maior contribuição de diatomáceas cêntricas do microfitoplâncton, além de diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp.. A presença destes táxons na íngreme região costeira da Enseada Ezcurra refletiu a maior hidrodinâmica decorrente da grande influência das marés e ventos na circulação do lado oeste da Baía, como já mencionado pela literatura. Em Ezcurra, diatomáceas epífitas provenientes de macroalgas foram as principais indicadoras das águas costeiras.

No início do verão de 2008/9, o fitoplâncton da Baía do Almirantado mostrou-se como um bom indicador de massas de água, apresentando diferenças na estrutura da comunidade que acompanharam as características hidrológicas destas: diatomáceas bentônicas, criptófitas e dinoflagelados heterotróficos indicaram em águas costeiras; diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* spp., e cêntricas *Thalassiosira* spp. apontaram águas oceânicas; e dinoflagelados autotróficos *Prorocentrum* spp. demarcaram a região de encontro destas massas de água. A influência de águas derivadas do degelo terrestre também foi refletida no fitoplâncton, indicada pelas diatomáceas bentônicas, em sua maioria penadas, provenientes da zona de praia, e de cianobactérias epônticas. Os dinoflagelados heterotróficos do microplâncton e as criptófitas foram dominantes em águas mais rasas e com menor influência dos regimes de marés e ventos na circulação (i.e. Enseada Martel, Enseada Mackellar e leste da bacia central). A elevada densidade

celular de *Pseudo-nitzschia* spp. na Baía do Almirantado e arredores durante o mês de dezembro, o que é incomum neste período de acordo com a literatura, pode ser um indício do aquecimento da região noroeste da Península Antártica resultando no maior aporte das águas do Mar de Weddell, onde estas diatomáceas são abundantes.

Agradecimentos

Este estudo está inserido no projeto “Vida Marinha Antártica: Biodiversidade em Relação à Heterogeneidade Ambiental na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, e áreas adjacentes (MABIREH)” (Ano Polar Internacional - IPY). Agradeço ao biólogo e amigo Marcel Gonçalves dos Santos e à equipe do projeto MABIREH pelo companheirismo e auxílio na realização das coletas.

Referências Bibliográficas

- Absher, T. M., Boehs, G., Feijó, A. R., da Cruz, A. C. (2003). Pelagic larvae of benthic gastropods from shallow Antarctic waters of Admiralty Bay, King George Island. *Polar Biology* 26: 359-364.
- Al-Handal, A. Y., Wulff, A. (2008a). Marine benthic diatoms from Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 51-68.
- Al-Handal, A. Y., Wulff, A. (2008b). Marine epiphytic diatoms from the shallow sublittoral zone in Potter Cove, King George Island, Antarctica. *Botanica Marina* 51: 411-435.
- Almandoz, G. O., Ferreyra, G. A., Schloss, I. R., Dogliotti, A. I., Rupolo, V., Paparazzo, F. E., Esteves, J. L., Ferrario, M. E. (2008). Distribution and ecology of

- Pseudo-nitzschia* species (Bacillariophyceae) in surface waters of the Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biology* 31: 429-442.
- Balech, E. (1975). *Clave Ilustrada de Dinoflagelados Antarticos*. Instituto Antartico Argentino, Direccion Nacional del Antartico, Buenos Aires: 98 pp.
- Brandini, F. P. (1993). Phytoplankton biomass in an Antarctic coastal environment during stable water conditions - implications for the iron limitation theory. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 93: 267-275.
- Brandini, F. P., Rebello, J. (1994). Wind field effect on hydrography and chlorophyll dynamics in the coastal pelagial of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 6 (4): 433-442
- Clarke, A., Leakey, R. J. G. (1996). The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 41(6): 1281-1294.
- Cupp, E. E. (1943). *Marine Plankton Diatoms of the West of North America*. California: University of California Press. 235pp.
- Detoni, A. M. S. (2010). *Fatores ambientais durante florações próximas à Ilha James Ross, Península Antártica (verão 2008 e 2009)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica, Universidade Federal do Rio Grande: 103 pp.
- Fiala, M., Semeneh, M., Oriol, L. (1998). Size-fractionated phytoplankton biomass and species composition in the Indian sector of the Southern Ocean during austral summer. *Journal of Marine Systems* 17: 179-194.
- Froneman, P.W., Pakhomov, E.A., Laubscher, R.K. (1997). Microphytoplankton assemblages in the waters surrounding South Georgia, Antarctica during austral summer 1994. *Polar Biology* 17: 515-522.
- Garibotti, I. A., Vernet, M., Ferrario, M. E., Smith, R. C., Ross, R. M., Quetin, L. B. (2003). Phytoplankton spatial distribution patterns along the western Antarctic Peninsula (Southern Ocean). *Marine Ecology Progress Series* 261: 21–39.

- Grasshoff, K., Erhardt, M., Kremling, K. (1999). *Methods of Seawater Analysis*. Verlag-Chemie, Weinheim: 600 pp.
- Hasle, G. R. (1972). The distribution of *Nitzschia seriata* Cleve and allied species. In: *Simonsen, R. ed First Symposium on Recent and Fossil Marine Diatoms*: 171-190.
- Hewes, C. D. (2009). Cell size of Antarctic phytoplankton as a biogeochemical condition. *Antarctic Science*: 1-14.
- INPE (2009) <http://www.cptec.inpe.br/antartica/antartica.shtml>
- Kang, J. –S. Kang, S. –H., Lee, J. H., Lee, S. H. (2002). Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in King George Island, Antarctica, 1996. *Marine Ecology Progress Series* 229: 19–32.
- Komarek, J. (2007). Phenotype diversity of the cyanobacterial genus *Leptolyngbya* in the maritime Antarctic. *Polish Polar Research* 28 (3): 211-231.
- Kopczynska, E. E., Fiala, M., Jeandel, C. (1998). Annual and interannual variability in phytoplankton at a permanent station off Kerguelen Islands, Southern Ocean. *Polar Biology* 20: 342-351
- Kopczynska, E. E., Fiala, M. (2003). Surface phytoplankton composition and carbon biomass distribution in the Crozet Basin during austral summer of 1999: variability across frontal zones. *Polar Biology* 27: 17-28.
- Kopczynska, E. E., Savoye, N., Dehairs, F., Cardinal, D., Elskens, M. (2007). Spring phytoplankton assemblages in the Southern Ocean between Australia and Antarctica. *Polar Biology* 31: 77-88.
- Kopczynska, E. E. (2008). Phytoplankton variability in Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands: six years of monitoring. *Polish Polar Research* (29) 2: 117–139.
- Lange, P. K., Tenenbaum, D. R., Braga, E. S., Campos, L. S. (2007). Microphytoplankton assemblages in shallow waters at Admiralty Bay (King George Island, Antarctica) during the summer 2002–2003. *Polar Biology* 30: 1483–1492.
- Legendre, L., Legendre, P. (1983). *Numerical Ecology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

- Matos, A.G.B. (2001). *Análise da confiabilidade metrológica na determinação de pigmentos em ambientes marinhos por fluorimetria*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Metrologia Para Qualidade Industrial – Instituto Tecnológico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil: 142 pp.
- Medlin, L. K. & Priddle, J. (1990). Introduction. Polar Marine Diatoms. British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council.
- Moline, M. A., Prézelin, B. B. (1996). Long-term monitoring and analyses of physical factors regulating variability in coastal Antarctic phytoplankton biomass, *in situ* productivity and taxonomic composition over subseasonal, seasonal and interannual time scales. *Marine Ecology Progress Series* 145: 143-160.
- Moline, M. A., Prézelin, B. B., Schofield, O., Smith, R.C. (1997). Temporal dynamics of coastal Antarctic phytoplankton: environmental driving forces and impact of a 1991/92 summer diatom bloom on the nutrient regimes. In: Battaglia, B.J., Valencia, J., Walton, D.W.H. (Eds.), *Antarctic Communities*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: 67– 72.
- Montes-Hugo, M. A., Vernet, M., Martinson, D., Smith, R., Iannuzzi, R. (2008a). Variability on phytoplankton size structure in the western Antarctic Peninsula (1997- 2006). *Deep-Sea Research II* 55: 2106– 2117.
- Montes-Hugo, M., Vernet, M., Smith, R., Carder, K. (2008b). Phytoplankton size-structure on the Western shelf of the Antarctic Peninsula: A remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing* 29: 801-829.
- Montes-Hugo, M. A., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E., Schofield, O. (2009). Recent Changes in Phytoplankton Communities Associated with Rapid Regional Climate Change Along the Western Antarctic Peninsula. *Science* 323: 1470-1473.
- Nakayama, C. R., Kuhn, E., Araújo, A. C. V., Alvalá, P. C., Ferreira, W. J., Vazoller, R. F., Pellizari, V. H. (2011). Revealing archaeal diversity patterns and methane fluxes in Admiralty Bay, King George Island, and their association to Brazilian Antarctic Station activities. *Deep-Sea Research II* 58: 128-138.

- Nedzarek, A., Rakusa-Suszczewski, S. (2004). Decomposition of macroalgae and the release of nutrients in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polar Bioscience* 17: 26–35.
- Nedzarek, A. (2008). Sources, diversity and circulation of biogenic compounds in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Science* 20 (2): 135–145.
- Oliveira, E. C., Absher, T. M., Pellizzari, F. M., Oliveira, M. C. (2009). The seaweed flora of Admiralty Bay, King George Island, Antarctic. *Polar Biology* 32: 1639–1647.
- Parsons, T. R.; Maita, Y., Lalli, C. M. (1984). *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Oxford, Pergamon Press: 173 pp.
- Peragallo, M. H. & Peragallo, M. (1921). Diatomées d'eau douce et diatomées d'eau salée. In Charcot, J. ed *Deuxième Expedition Antarctique Française*, Masson et Éditeurs, Saint-Germain, Paris (VI): 41-102.
- Pichlmaier, M., Aquino, F.E., Da-Silva, C.S., Braun, M. (2004). Suspended sediments in Admiralty Bay, King George Island (Antarctica). *Brazilian Antarctic Research* 4: 77-85.
- Pruszek, Z. (1980). Currents circulation in the waters of Admiralty Bay (region of Arctowski Station on King George Island). *Polish Polar Research* 1: 55-74.
- Rakusa-Suszczewski, S. (1980). Environmental conditions and the functioning of Admiralty Bay (South Shetland Islands) as part of the near shore Antarctic ecosystem. *Polish Polar Research* 1 (1): 11-27.
- Ribic, C. A., Chapman, E., Fraser, W. R., Lawson, G. L., Wiebe, P. H. (2008). Top predators in relation to bathymetry, ice and krill during austral winter in Marguerite Bay, Antarctica. *Deep-Sea Research II* 55: 485–499.
- Robakiewicz, M., Rakusa-Suszczewski, S. (1999). Application of 3D circulation model to Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Polish Polar Research* 20 (1): 43-58.
- Round, F. E., Crawford, R. W., Mann, D. G. (1990). *The Diatoms, Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge: Cambridge University Press: 747pp.

- Schloss, I. R., Ferreyra, G. A., Ruiz-Pino, D. (2002). Phytoplankton biomass in Antarctic shelf zones: a conceptual model based on Potter Cove, King George Island. *Journal of Marine Systems* 36: 129– 143.
- Scott, F. J., Marchant, H. J. (2005). *Antarctic Marine Protists*. ABRS, Canberra and AAD, Hobart: 563 pp.
- Sicinski, J., Jazdzewski, K., De Broyer, C., Presler, P., Ligowski, R., Nonato, E. F., Corbisier, T. N., Petti, M. A. V., Brito, T. A. S., Lavrado, H. P., Blazewicz-Paszkowycz, M., Pabis, K., Jazdzewska, A., Campos, L. S. (2011). Admiralty Bay Benthos Diversity - A census of a complex polar ecosystem. *Deep-Sea Research II* 58: 30-48.
- Smayda, T. J., Reynolds, C. S. (2003). Strategies of marine dinoflagellate survival and some rules of assembly. *Journal of Sea Research* 49: 95– 106.
- Turner, J. (2004). The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica. *International Journal of Climatology* 24: 1-31.
- Utermöhl, H. (1958). Perfeccionamento del método cuantitativo del fitoplancton. *Comum. Assoc. Int. Limnol. Teor. Apl.* 9: 1-89.
- Varela, M., Fernandez, E., Serret, P. (2002). Size-fractionated phytoplankton biomass and primary production in the Gerlache and south Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) in Austral summer 1995-1996. *Deep-Sea Research II* 49: 749-768.
- Vergani, D. F., Stanganelli, Z. B., Bilenca, D. (2001). Weaning mass variation of southern elephant seals at King George Island and its possible relationship with ‘El Nino’ and ‘La Nina’ events. *Antarctic Science* 13: 37–40.
- Ward, P., Whitehouse, M., Shreeve, R., Thorpe, S., Atkinson, A., Korb, R., Pond, D., Young, E. (2007). Plankton community structure south and west of South Georgia (Southern Ocean): Links with production and physical forcing. *Deep-Sea Research I* 54: 1871–1889.

Tabela 1. Datas de coleta, período, Coordenadas geográficas, datas de coleta e profundidades amostradas na Baía do Almirantado, início do verão de 2008/9.

verão austral	período	Data da coleta	Estação de amostragem	Latitude	Longitude	profundidade local (m)	profundidades amostradas (m)
2008/9	início do verão	08/12/2008	Comandante Ferraz (CF)	62.082 S	58.380 E	30	1, 25
		08/12/2008	Botany Point (BP)	62.099 S	58.353 E	30	1, 25
		08/12/2008	Ullman Point (UP)	62.085 S	58.354 E	30	1, 25
		10/12/2008	Refúgio 2 (Re)	62.072 S	58.430 E	30	1, 25
		14/12/2008	Enseada Ezcurra (Ez)	62.157 S	58.482 E	30	1, 25
		01/12/2008	100m #1	62.087 S	58.373 E	100	1, 10, 20, 50, 90
		02/12/2008	100m #2	62.100 S	58.437 E	100	1, 10, 20, 50, 90
		02/12/2008	300m #1	62.110 S	58.424 E	300	1, 10, 50, 100, 200, 290
		02/12/2008	300m #2	62.140 S	58.396 E	300	1, 10, 20, 50, 100, 200, 290
		06/12/2008	500m #1	62.205 S	58.358 E	500	1, 10, 20, 50, 100, 200, 490
		06/12/2008	500m #2	62.157 S	58.421 E	500	1, 10, 20, 50, 100, 200, 490
		07/12/2008	700m #1	62.272 S	58.313 E	700	1, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 690
		07/12/2008	700m #2	62.253 S	58.201 E	700	1, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 690

Tabela 2. Variáveis ambientais e biológicas nas águas da Baía do Almirantado durante o início do verão de 2008/9: Número de amostras (n), média e desvio padrão (desv. pad.).

	TOTAL			águas costeiras			bacia central e Estreito de Bransfield					
	n	média	desv. pad.	n	média	desv. pad.	águas superficiais			águas profundas		
							n	média	desv. pad.	n	média	desv. pad.
Microfitoplâncton (cel.l ⁻¹)	61	1,5 x 10 ³	1,5 x 10 ³	10	2,9 x 10 ³	2,9 x 10 ³	29	1,3 x 10 ³	0,9 x 10 ³	22	1,1 x 10 ³	1,0 x 10 ³
Nanoplâncton (cel.l ⁻¹)	61	1,0 x 10 ⁵	1,4 x 10 ⁵	10	3,0 x 10 ⁵	2,4 x 10 ⁵	29	7,2 x 10 ⁴	6,2 x 10 ⁴	22	4,2 x 10 ⁴	3,8 x 10 ⁴
Clorofila total (mg.m ⁻³)	52	0.38	0.19				30	0.47	0.14	22	0.26	0.18
Feofitina (mg.m ⁻³)	52	0.27	0.10				30	0.29	0.07	22	0.25	0.13
Temperatura (°C)	50	0.5	0.7	6	1.1	0.6	26	0.7	0.8	18	0.0	0.3
Salinidade	61	34.1	0.5	10	33.7	0.4	30	34.2	0.5	22	34.2	0.3
Silicato (µM)	53	59.54	13.08	10	46.30	11.79	25	59.44	12.96	18	67.04	7.07
Ortofosfato (µM)	46	1.66	0.34	10	1.30	0.33	22	1.71	0.32	14	1.83	0.19
Amônio (µM)	52	0.92	0.69	10	1.05	0.36	25	0.95	0.84	17	0.80	0.60
Nitrito (µM)	53	0.18	0.06	10	0.15	0.05	25	0.20	0.06	18	0.17	0.05
Nitrato (µM)	45	22.27	9.66	9	10.46	4.93	22	23.84	8.74	14	27.42	6.95
Radiação solar média / 24hs (W.m ⁻²)	61	177.2	105.7	10	245.8	71.9						
Velocidade média do vento / 24hs (m.s ⁻¹)	61	9.4	3.5	10	8.4	2.1						
Direção predominante do vento		Oeste e Sudoeste			Sudoeste						Oeste e Sudoeste	

Tabela 3. Correlação de Spearman entre as principais variáveis ambientais. Os valores são significativos ($p < 0,05$) estão indicados pelo símbolo (*).

	Temperatura	Salinidade	Silicato	Fosfato	Amônio	Nitrito	Nitrato	Radiação solar média em 24h	Velocidade do vento média em 24h	Clorofila	Feofitina
Temperatura	1										
Salinidade	-0.23	1									
Silicato	-0.24	0.29	1								
Fosfato	0.00	0.12	0.83 *	1							
Amônio	0.29	-0.35 *	-0.64 *	-0.49 *	1						
Nitrito	0.23	-0.15	0.09	0.33	0.42 *	1					
Nitrato	0.02	0.17	0.80 *	0.91 *	-0.50 *	0.44 *	1				
Radiação solar média em 24h	0.39 *	-0.31 *	-0.36 *	-0.07	0.55 *	0.47 *	-0.18	1			
Velocidade do vento média em 24h	0.45 *	-0.21	-0.23	0.08	0.51 *	0.62 *	0.00	0.84 *	1		
Clorofila	-0.07	0.32	0.06	-0.45 *	-0.21	-0.43 *	-0.45 *	-0.53 *	-0.45 *	1	
Feofitina	-0.29	0.10	0.26	-0.16	-0.53 *	-0.64 *	-0.06	-0.63 *	-0.67 *	0.69 *	1

Tabela 4. Contribuição (%) das principais espécies do microfitoplâncton e principais grupos taxonômicos do nanoplâncton para a similaridade das amostras que compõem os grupos de amostras estabelecidos nas análises de agrupamento. As espécies ticoplanctônicas estão indicadas com o símbolo (*).

MICROFITOPLÂNCTON	M1a	M1b	M2a	M2b
Similaridade média	32,7	57,2	52,8	44,4
<i>Achnanthes vicentii</i> *			1,3	5,1
Cianobactéria filamentosa *	4,2			2,3
complexo <i>Pseudonitzschia "delicatissima"</i> sp.1	22,4	11,8	7,0	12,5
complexo <i>Pseudonitzschia "delicatissima"</i> sp.2	1,4	5,3	4,2	1,4
complexo <i>Pseudonitzschia "seriata"</i>		3,6		3,9
<i>Corethron pennatum</i>		3,4	1,0	1,1
Dinoflagelado atecado sp.1		4,6	0,9	1,6
Dinoflagelado atecado sp.2	12,4	3,9	4,5	3,8
<i>Gomphonema</i> sp.1 *			3,4	1,1
<i>Gymnodinium</i> cf. <i>soyai</i>	1,9	3,5		
<i>Gymnodinium minor</i>	6,0	9,6	5,2	5,8
<i>Gymnodinium</i> sp.1		4,1	5,2	0,9
<i>Gymnodinium guttula</i>	4,5	3,3	1,8	
<i>Gyrodinium lachryma</i>				3,0
<i>Katodinium</i> sp.1	1,4	3,9	1,2	5,2
<i>Porosira</i> sp.1	1,3	3,1	2,5	3,3
<i>Prorocentrum</i> cf. <i>minimum</i>	3,4	7,4	7,3	3,9
<i>Pseudogomphonema kamtschaticum</i> *			4,1	4,9
<i>Thalassiosira</i> cf. <i>frenguelli</i>	4,4	2,3	3,3	
<i>Thalassiosira</i> sp.1	14,6	11,1	5,5	10,4
<i>Thalassiosira</i> sp.2	7,1	6,7	5,8	8,8
NANOPLÂNCTON	n1a	n1b	n2a	n2b
Similaridade média	51,4	74,0	73,3	71,3
Coccolithoforídeos		4,0		
Criptófitas	12,1	28,8	26,4	34,5
Diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas	69,9	30,4	21,9	11,4
Mônadas			7,6	6,2
Nanoflagelado 1 (Parnales)	5,1	13,9	14,0	16,4
<i>Phaeocystis</i> spp.		14,7	12,5	13,7
Prasinofíceas			6,1	8,7

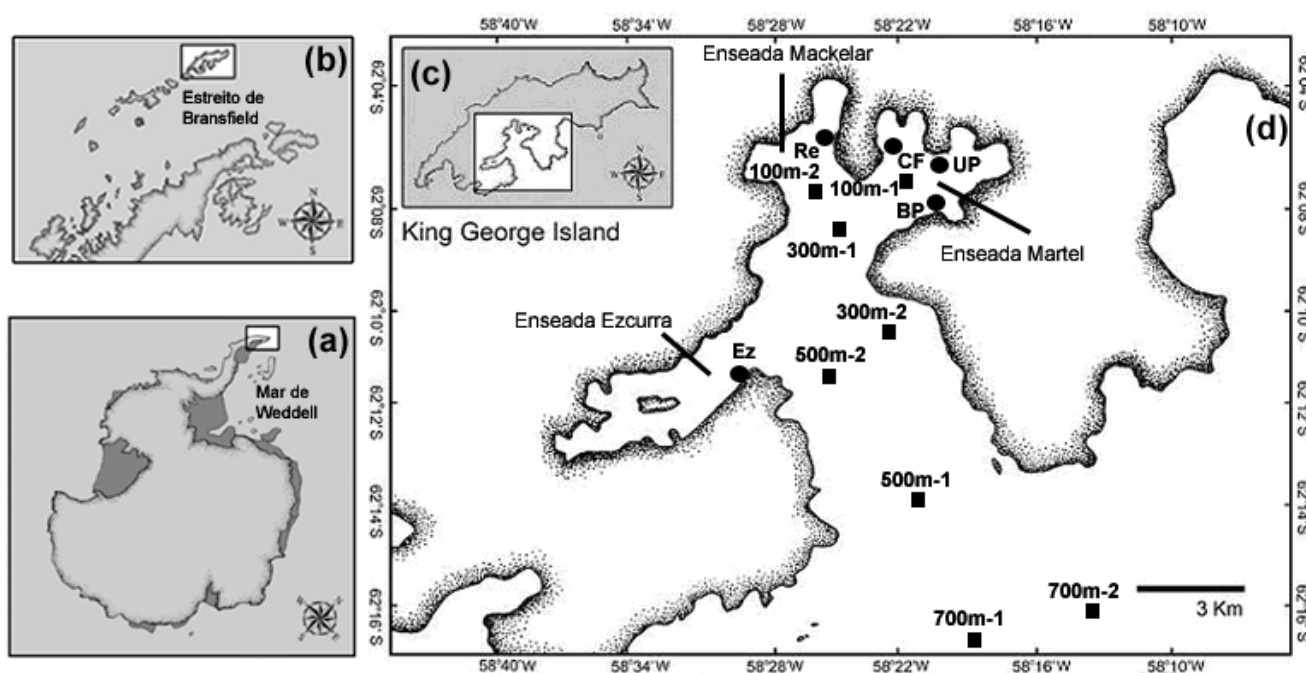


Figura 1. Posicionamento da área de estudo: (a) Continente Antártico; (b) Península Antártica; (c) Ilha Rei George; (d) Baía do Almirantado, contendo os pontos de amostragem na bacia central e Estreito de Bransfield: Ez. Ezcurra; Re. Refúgio 2; CF. Comandante Ferraz; UP. Ullman Point; BP. Botany Point.

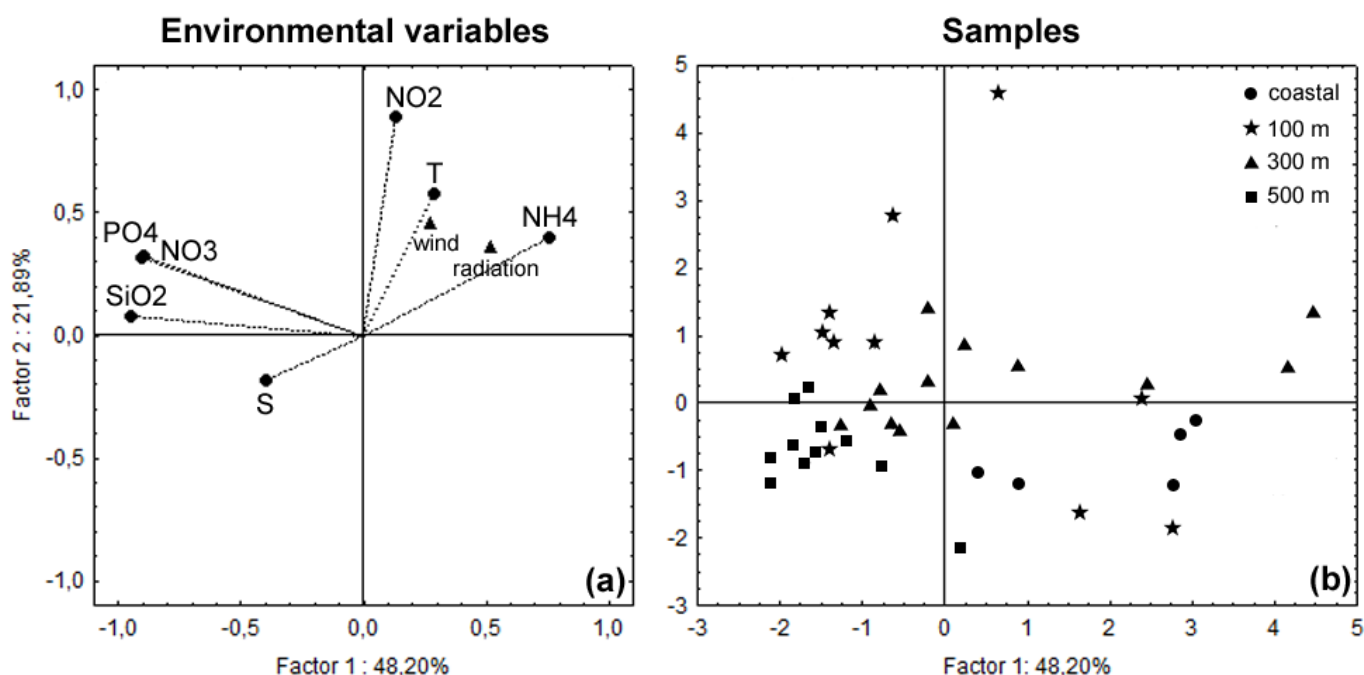


Figura 2. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis ambientais (a) e projeção das amostras (b) da Baía do Almirantado, início do verão de 2008/9: S. salinidade; T. temperatura; NO₂. nitrito; NO₃. nitrato; NH₄. amônio; SiO₂. silicato; PO₄. fosfato; wind. velocidade média do vento; radiation. radiação solar média. As amostras coletadas no Estreito de Bransfield não foram consideradas nesta análise devido à falta de dados ambientais.

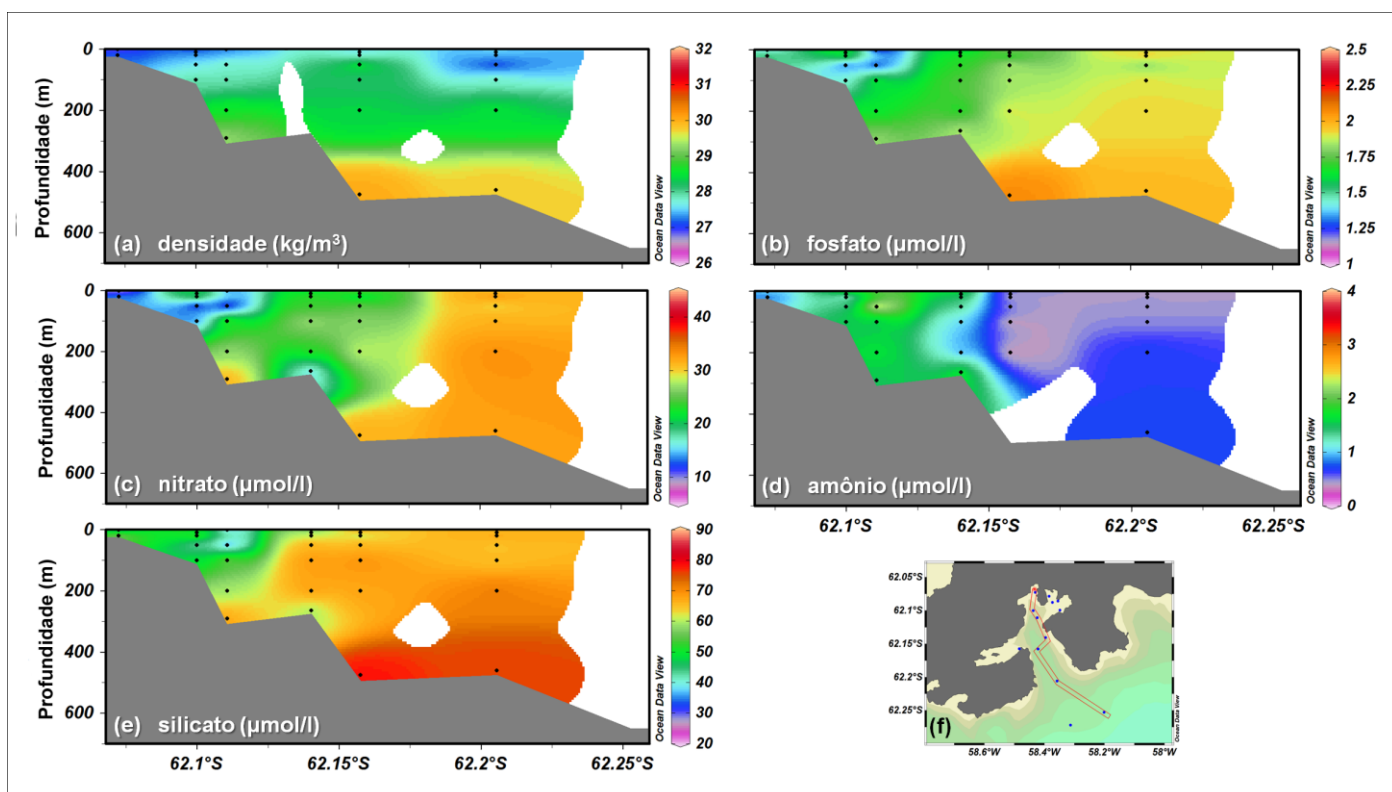


Figura 3. Perfis verticais da densidade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (a) e concentrações ($\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$) de fosfato (b), nitrato (c), amônio (d) e silicato (e) em um transecto (f) que abrange desde a zona costeira da Baía do Almirantado (Enseada Mackellar) até o Estreito de Bransfield, durante o início do verão de 2008/9.

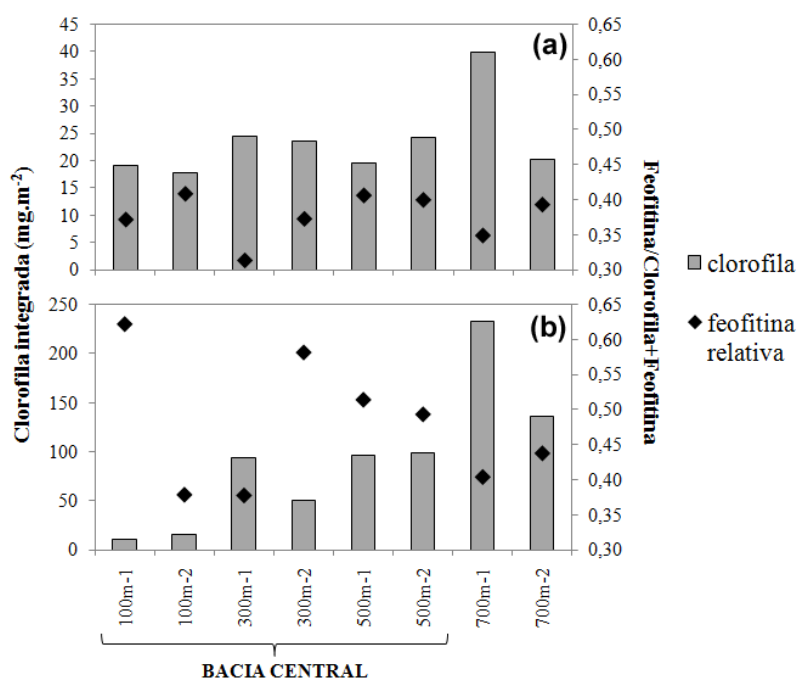


Figura 4. Concentração integrada ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) de clorofila *a* e feofitina relativa ($\text{feo relat} = \text{feo}/\text{clo} + \text{feo}$) em águas superficiais ($< 50\text{m}$) (a) e em águas profundas ($> 50\text{m}$) (b) da bacia central da Baía do Almirantado e Estreito de Bransfield, início do verão de 2008/9.

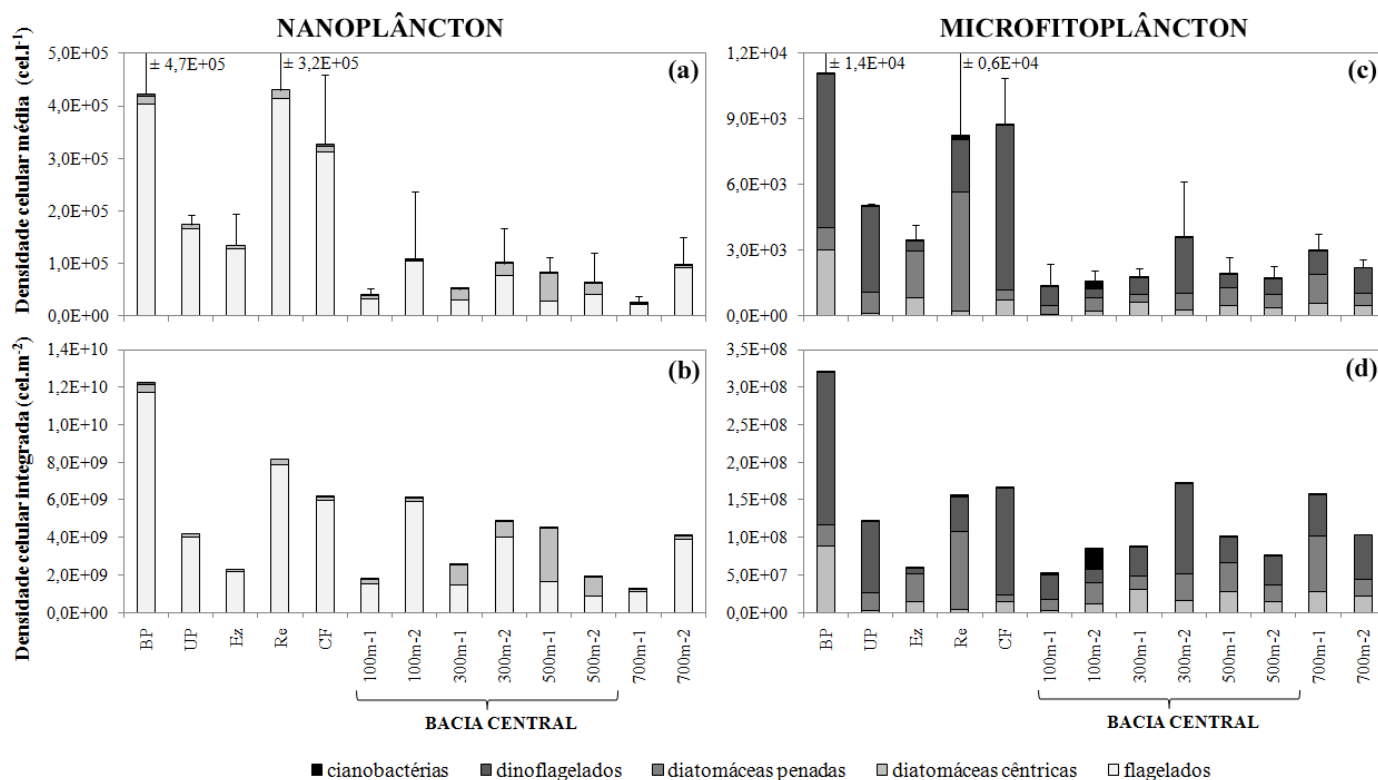


Figura 5. Densidade celular média e integrada do nanoplâncton (a,b) e do microfitoplâncton (c,d), com a contribuição dos grupos taxonômicos, na camada superficial (< 50m) da coluna de água da Baía do Almirantado, início do verão de 2008/9.

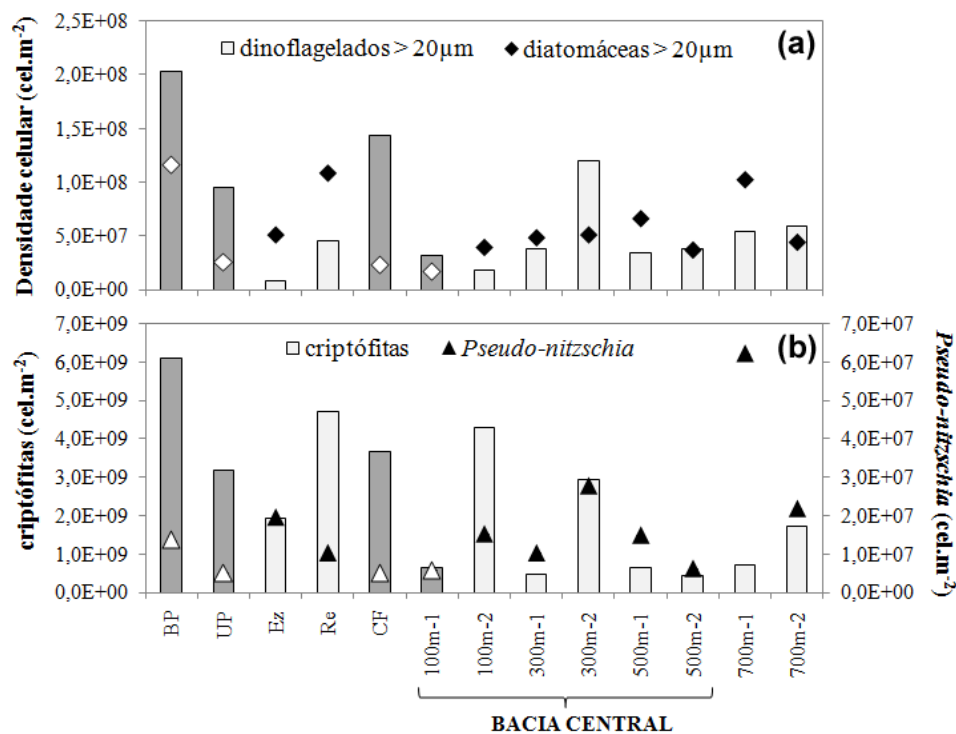


Figura 6. Densidade celular integrada (cel.m⁻²) de dinoflagelados e das diatomáceas do microfitoplâncton (a) e de criptófitas e diatomáceas *Pseudo-nitzschia* (b) na camada superficial (< 50m) da Baía do Almirantado, início do verão de 2008/9. As cores diferenciadas referem-se aos pontos localizados na Enseada Martel.

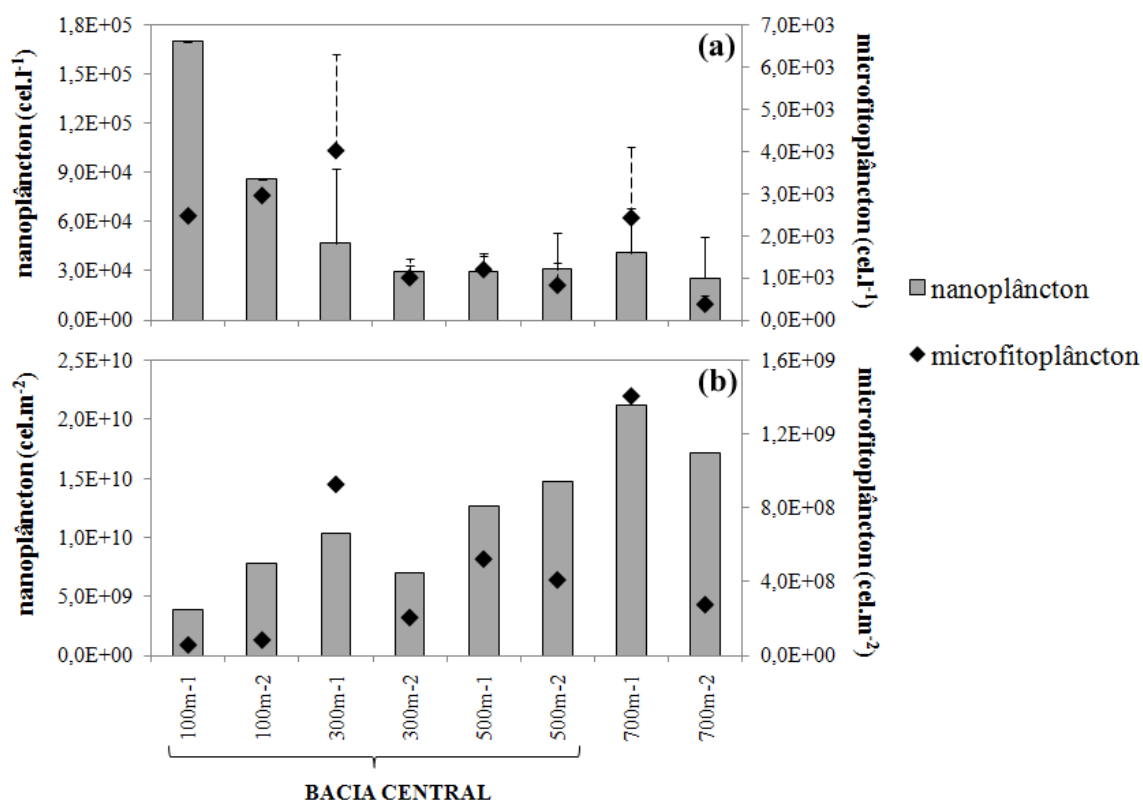


Figura 7. Densidade celular média (cel.l^{-1}) (a) e integrada (b) do nanoplâncton e do microfitoplâncton em águas profundas ($> 50\text{m}$) na bacia central da Baía do Almirantado, início do verão de 2008/9.

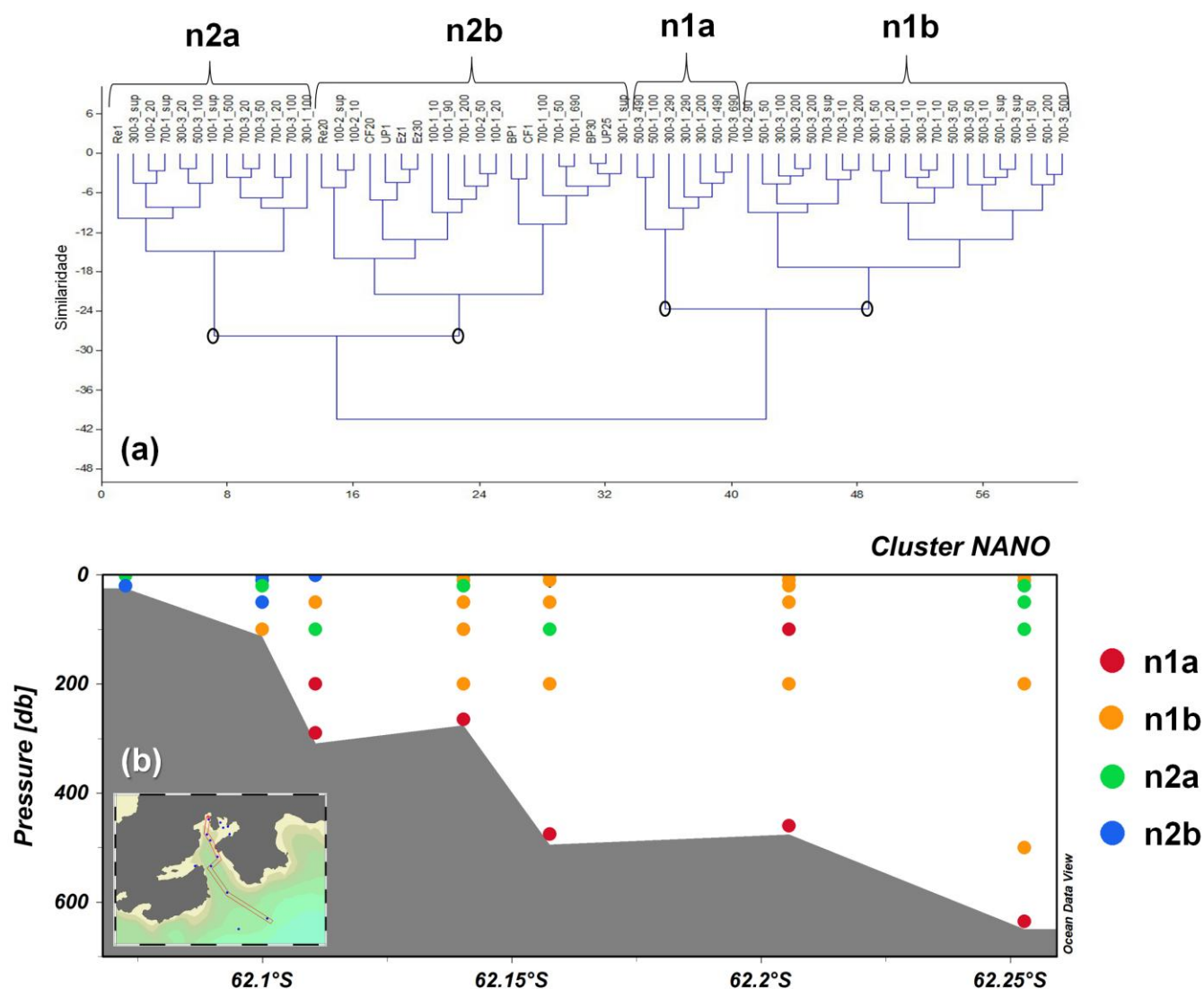


Figura 8. Agrupamento das amostras de acordo com a abundância dos grupos taxonômicos do nanoplâncton (a) e distribuição vertical das populações nanoplantônicas no transecto indicado (b) na Baía do Almirantado, início do verão 2008/9. Em (b), cores quentes indicam o grupo n1 (n1a e n1b) e cores frias indicam o grupo n2 (n2a e n2b).

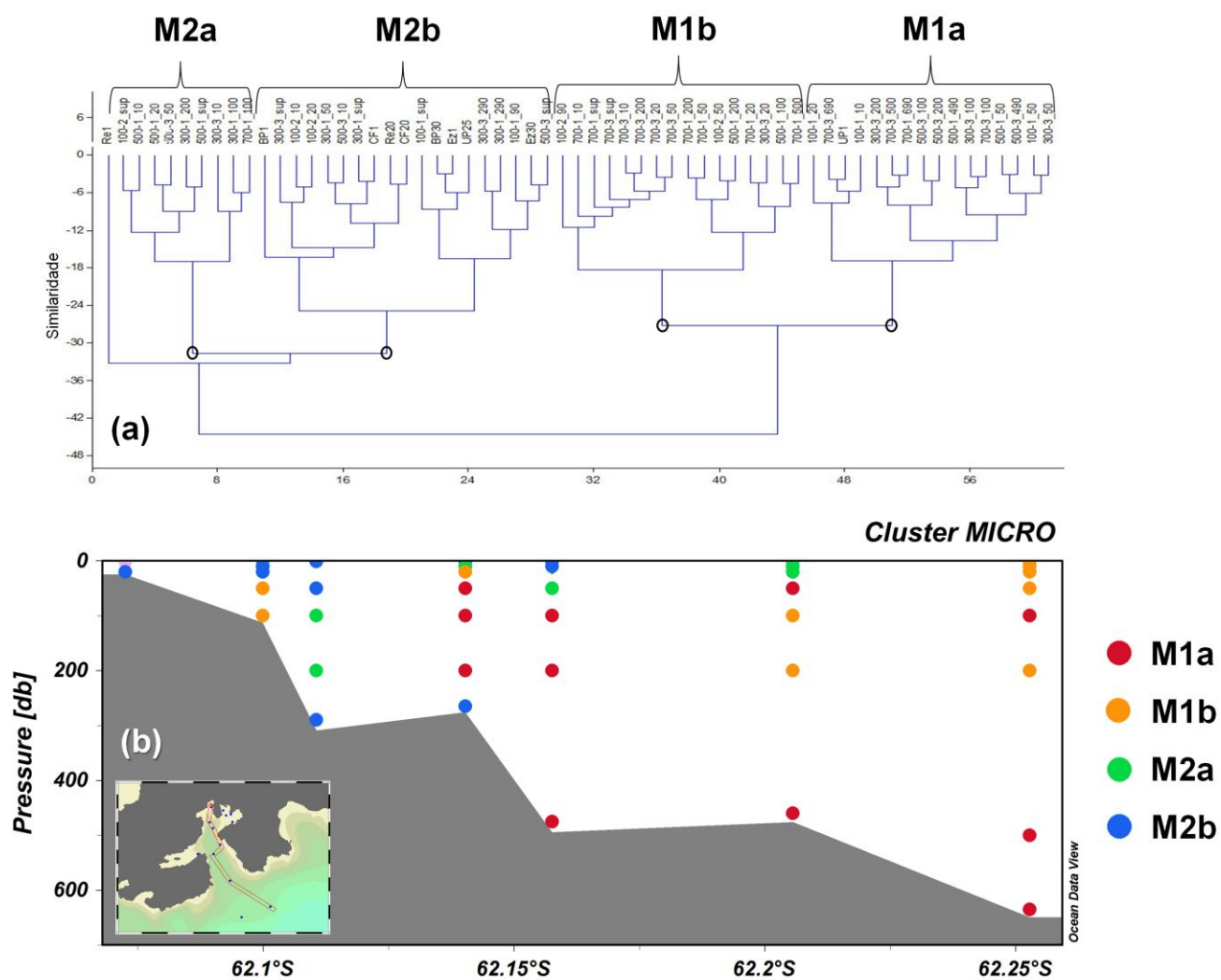


Figura 9. Agrupamento das amostras de acordo com a abundância das espécies do microfitoplâncton (a) e distribuição vertical das populações microfitoplanctônicas no transecto indicado (b) na Baía do Almirantado, início do verão 2008/9. Em (b), cores quentes indicam o grupo M1 (M1a e M1b) e cores frias indicam o grupo M2 (M2a e M2b).

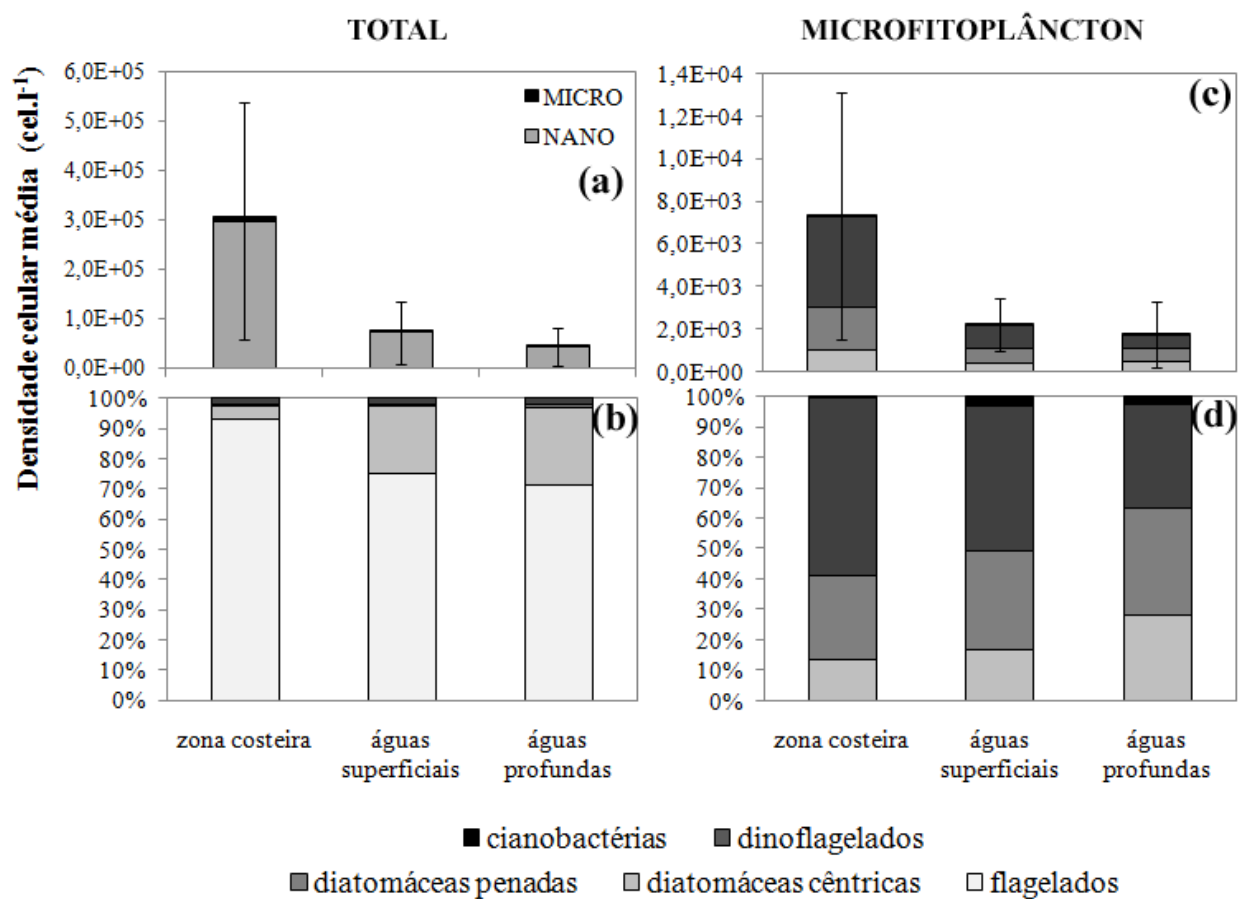


Figura 10. Densidade celular média e contribuição dos grupos taxonômicos do fitoplâncton total (a,b) e do microfitoplâncton (b) nas três áreas da Baía do Almirantado e Estreito de Bransfield, início do verão de 2008/9.

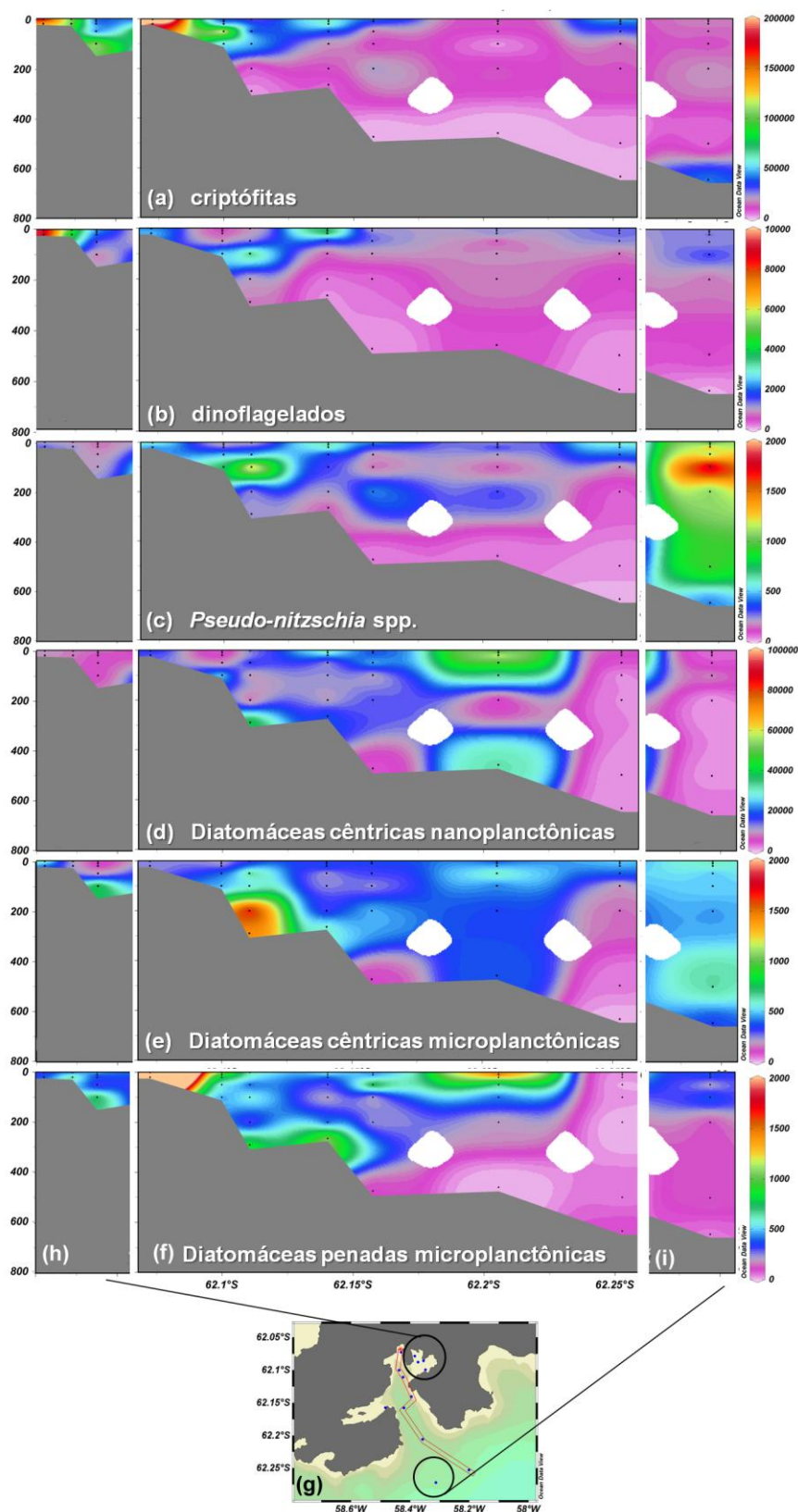


Figura 11. Perfis verticais da densidade celular (cel.L⁻¹) de criptófitas (a), dinoflagelados (b), diatomáceas penadas *Pseudo-nitzschia* (c), diatomáceas cêntricas nanoplanctônicas (d), diatomáceas cêntricas do microfitoplâncton (e) e diatomáceas penadas do microfitoplâncton com excessão de *Pseudo-nitzschia* (f) em um transecto que abrange desde a zona costeira Enseada Mackellar até o Estreito de Bransfield (g); na Enseada Martel (h); e no ponto 700m-1 no Estreito de Bransfield (i).

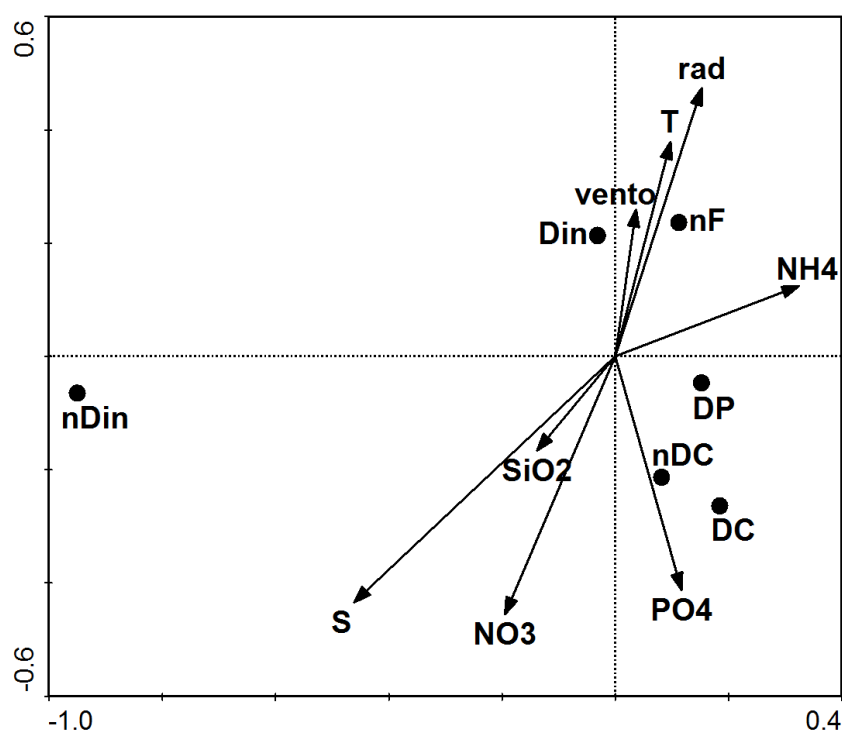


Figura 12. Análise de Correlação Canônica (CCA) entre os grupos taxonômicos e as variáveis ambientais: T. temperatura; S. salinidade; NO₂. Nitrito; NO₃. Nitrato; NH₄; amônio; PO₄. Fosfato; SiO₂. Silicato; vento. Velocidade média do vento nas 24hs anteriores ao início da coleta; rad. radiação solar média nas 24hs anteriores ao momento da coleta. Microfitoplâncton: DC. Diatomáceas cêntricas; DP. Diatomáceas penadas; Din. Dinoflagelados. Nanoplâncton: nDC. Diatomáceas cêntricas; nDin. Dinoflagelados; nF. Flagelados.