

VARIAÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO EM GRADIENTES  
DE PROFUNDIDADE NO OCEANO ANTÁRTICO E RELAÇÕES COM  
O AQUECIMENTO GLOBAL

**ELIANE CRISTINA DA SILVA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO - 2012

VARIAÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO EM GRADIENTES  
DE PROFUNDIDADE NO OCEANO ANTÁRTICO E RELAÇÕES COM  
O AQUECIMENTO GLOBAL

**ELIANE CRISTINA DA SILVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Ecologia e Recursos Naturais  
da Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro, como parte das exigências para  
obtenção do título de Mestre em Ecologia e  
Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Marotta Ribeiro

Campos dos Goytacazes – RJ  
Dezembro - 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do Centro de Biociências e Biotecnologia  
da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

518 / 2013

Silva, Eliane Cristina da

Varição do oxigênio dissolvido em gradientes de profundidade no  
Oceano Antártico e relações com o aquecimento global / Eliane Cristina da  
Silva. -- Campos dos Goytacazes, 2012.

xii, 38 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) –  
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de  
Biociências e Biotecnologia. Laboratório de Ciências Ambientais.

Área de concentração: Ecologia de ecossistemas

Orientador: Ribeiro, Humberto Marotta

Bibliografia: f. 34-38

1. Antártica 2. Metabolismo aquático 3. Nutrientes 4. Aquecimento  
global 5. Biodiversidade bentônica I. Universidade Estadual do Norte  
Fluminense Darcy Ribeiro II. Título

577.2  
S586v

VARIAÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO EM GRADIENTES  
DE PROFUNDIDADE NO OCEANO ANTÁRTICO E RELAÇÕES COM  
O AQUECIMENTO GLOBAL

**ELIANE CRISTINA DA SILVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovada em 19 de Dezembro de 2012.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Márcio Murilo Barboza Tenório (Doutor, Oceanografia) - UFRJ

---

Prof. Marcos Sarmet M. B. Salomão (Doutor, Ciências) - UENF

---

Profa. Marina Satika Suzuki (Doutora, Biociências e Biotecnologia) - UENF

---

Prof. Humberto Marotta Ribeiro (Doutor, Ecologia) - UFF  
(orientador)

*Aos meus avós maternos Durval e Onolfina e a  
minha mãe Dete, pilares da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

*“O Senhor é meu Pastor e nada me faltará!” (Salmo 23).*

E por isso tentarei agradecer a todos que colaboraram para eu concluir mais uma etapa em minha vida.

Ao meu orientador Humberto Marotta que me acompanha desde o meu bacharelado. Tenho muito a agradecer ao professor-orientador mas também tenho que agradecer a “pessoa humana” e dedicada que é esse professor! Muito obrigada pela paciência e pela troca de experiências. Nossas reuniões foram muito produtivas. Você foi um orientador preocupado com todas as etapas da construção desse trabalho, dedicou-se com total afinco e esmero, sempre atento aos detalhes, com boas críticas e muito humor, sempre empenhando o melhor de si e fazendo-me acreditar, que mesmo com todas as minhas limitações, o meu trabalho estava “excelente!”.

Ao meu 1º e orientador Alex Prast, que por motivos maiores passou minha orientação ao professor Marotta mas, mesmo com a alteração, esteve presente em todo o processo, em toda a caminhada, especialmente no início, desde a seleção de mestrado até a efetiva alteração. E, apesar de todas suas atribuições e demais orientações, colaborou para o meu crescimento e conclusão dessa dissertação. Obrigada!

Aos professores Jean Valentin e Yocie Yoneshigue que avaliaram meu projeto de mestrado e fizeram contribuições positivas para o andamento da mesma.

A professora Ângela Manzolillo que me orientou com todo afinco e dedicação para conclusão de trabalho de disciplina em meio ao momento também de conclusão de mestrado.

Ao professor Ricardo Pollery, um dos responsáveis pela realização desse trabalho especial, por tratar-se da Antártica. Obrigada pelo apoio, pelas conversas, orientações e pela bela e inesquecível experiência no frio Antártico, a bordo do Napoc Ary Rongel.

A profa. Virginia Tavano e também ao Prof. Ricardo Pollery pela realização das análises de clorofila-a e nutrientes, respectivamente, durante as Operações Antárticas.

Ao Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL) por ter concedido os dados para minha pesquisa.

Ao prof. Maurício Mata e toda a equipe do XXIX Operantar. Muito obrigada pela belíssima e fantástica experiência que foi estar embarcada no Napoc Ary Rongel, realizando coletas, fazendo análises, aprendendo uma gama de coisas novas, aprendendo com as adversidades e, especialmente, convivendo com uma equipe profissional e amiga.

A equipe do Laboratório de Biogeoquímica, do qual faço parte, pela colaboração e compreensão durante a realização desse trabalho. Em especial, agradeço e cito colegas mais próximos que tentaram de alguma forma me auxiliar mais efetivamente Leandro Pontual, Luana Pinho, Nadjane Noval, Alexandre Andrade, Margaretha van Weerelt, Camila Signori, Vinicius Peruzzi, Viviane Figueiredo, Andréa Ferreira, Jackson e M<sup>a</sup>. Carolina. Obrigadíssima!!!! Também agradeço ao aluno Vinicius Ramos que me auxiliou com as planilhas do ODV e mais um obrigado ao Leandro, Margaretha e Vinicius que me socorreram, leram, discutiram e me auxiliaram para a conclusão desse trabalho. Meus bons amigos, muito obrigada pelo *help!*

Aos mais novos colegas de Campos dos Goytacazes, do programa de Ecologia e Recursos Naturais. Foi um prazer conhecer a todos, especialmente quando estivemos em atividade de campo, apesar de todo nosso trabalho foi muito prazerosa nossa convivência. Não posso deixar de citar a querida Albany (Binha), uma pessoa de imenso coração! Graças a você eu sempre estive muito bem em Campos! Obrigada! E para não ser injusta, muito obrigada, meu querido amigo de graduação, Thiago Benevides! Eu sei que eu podia (e posso) contar com você sempre.

A todos meus amigos que convivem comigo nessa longa estrada da vida, que torcem por mim, muito antes mesmo de eu entrar para a faculdade. Agora não será possível eu citar nomes porque sei que posso cometer injustiças ao não escrever algum, então, só posso dizer OBRIGADA porque vocês permanecem comigo e fazem parte da minha vida! Aqui cabe agradecer a amiga Raquel Pires por ter colaborado com as alterações que precisei fazer nos mapas aqui utilizados.

Especialmente quero agradecer ao meu amigo Carlos Alberto (Betinho) pela acolhida em sua casa, onde me refugiei durante os períodos que estive escrevendo minha dissertação. Sua casa, sua acolhida, nossas conversas, foram fundamentais para a conclusão desse trabalho. Não posso esquecer da D. Enerdina (*Nem*), sempre com muito carinho e preocupada com meu bem estar na casa.

Aos insubstituíveis amigos (pedaços de mim mesma) Sandra e Carlinhos, obrigada!

À minha família, especialmente meus avós e minha mãe, a quem dediquei esse trabalho. Sem minha família não tenho chão! Mas graças a eles sou quem sou, minha educação, minha esperança na vida, minha perseverança, meu trabalho dia-a-dia, vem dos ensinamentos que eles me passam, que são mais em exemplos de vida do que palavras em si. Ainda dentro da minha família também agradeço aos meus irmãos e, em particular, ao Evandro e minha cunhada Silvia, por terem me dado minha linda sobrinha Emanuely, o meu mais novo amor!

E a ti, Senhor Deus, porque todas essa estórias, todas essas pessoas, todo o meu trabalho, toda essa dissertação só foi e é possível porque o Senhor me permite todo dia realizar e conviver com todos esses anjos. Obrigada, Senhor!

## INDICE

<b>Índice de Figuras</b> .....	viii
<b>Índice de Tabelas</b> .....	x
<b>Resumo</b> .....	xi
<b>Abstract</b> .....	xii
<b>1.0 Introdução</b> .....	1
<b>2.0 Objetivo</b> .....	4
2.1 Objetivos Específicos.....	4
<b>3.0 Materiais e Métodos</b> .....	5
3.1 Obtenção dos Dados.....	5
3.2 Área de Estudo.....	7
3.2.1 Regiões de Coleta.....	8
3.3 Amostragem e Análises Químicas.....	12
3.4 Tratamento dos Dados e Estatística.....	15
<b>4.0 Resultados</b> .....	17
4.1 Comparação entre as regiões do Estreito de Bransfield, Estreito de Gerlache, Mar de Weddell e proximidades da Ilha James Ross.....	17
4.2 Avaliação de cada região quanto à concentração de nutrientes, temperatura, salinidade, OD e clorofila- <i>a</i> por classe de profundidade.....	18
4.3 Relação do oxigênio dissolvido com as demais variáveis.....	22
<b>5.0 Discussão</b> .....	26
<b>6.0 Conclusão</b> .....	32
<b>7.0 Referências</b> .....	34

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Continente antártico ([www.guiageo-antartica.com/globo-imagem.htm](http://www.guiageo-antartica.com/globo-imagem.htm)) e as regiões do Estreito de Bransfield (A), Estreito de Gerlache (B), Mar de Weddell (C) e proximidades da Ilha James Ross (D), modificado a partir dos relatórios do Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL)..... 10
- Figura 2:** (A) Estações de coleta das Operações Antárticas realizadas no período de 2003 a 2010 pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL). Os dados utilizados neste trabalho referem-se ao período citado, inclusive os dados das coletas realizadas em 2011, estações indicadas em (B). Créditos da figura para o Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (2013). 11
- Figura 3:** (A) Sistema *rosette* com destaque para as garrafas Niskin na parte superior e o aparato do CTD, na porção inferior da *rosette*. (B) Exemplo de operação de manobra com a *rosette* em uma estação de coleta durante a XXIX Operantar em 2011. (Créditos para cabo Cleber, foto B)..... 12
- Figura 4:** (A) Exemplo de coleta de água para determinação de oxigênio dissolvido em uma estação oceanográfica durante a XXIX Operantar e (B) posterior análise em laboratório a bordo. (C) Parte da água também foi coletada para ser filtrada em sistema de bombeamento a vácuo para determinação do teor de clorofila-*a*..... 14
- Figura 5:** Análises de nutrientes dissolvidos das amostras de água obtidas durante a XXIX Operantar: (A) preparação das amostras e (B) equipamento utilizado para a leitura das absorbâncias (Femto 600 Plus)..... 14
- Figura 6:** Concentração de nutrientes dissolvidos (A) fosfato, (B) íon amônio, (C) nitrato e (D) silicato ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), (E) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), (F) salinidade, (G) oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e (H) clorofila-*a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) nas regiões do Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), Estreito de Gerlache (2003 – 2005), Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas para cada variável entre regiões (Kruskal-Wallis,  $p>0,05$ )..... 19
- Figura 7:** Concentração de nutrientes dissolvidos: fosfato, íon amônio, nitrato e silicato ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), (B) Estreito de Gerlache (2003 – 2005), (C) Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e (D) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas entre as classes de profundidade de cada região (Kruskal-Wallis,  $p>0,05$ )..... 20

**Figura 8:** Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidade, concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e clorofila-*a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), (B) Estreito de Gerlache (2003 – 2005), (C) Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e (D) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas entre as classes de profundidade de cada região (Kruskal-Wallis,  $p > 0,05$ ).

Classes de profundidade com menos de 5 amostras não foram consideradas..... 21

**Figura 9:** Regressões múltiplas “mínimos quadrados parciais” (PLS). Os gráficos apresentam a estrutura de correlação das variáveis “X” com a variável chave “OD” nas regiões: (A) Estreito de Bransfield ( $R^2Y = 0,48$ ), (B) Estreito de Gerlache ( $R^2Y = 0,32$ ), (C) Mar de Weddell ( $R^2Y = 0,85$ ) e (D) Mar de Weddell nas proximidades da Ilha James Ross ( $R^2Y = 0,40$ ). O eixo horizontal refere-se a primeira componente da PLS e tem o maior percentual de explicabilidade da variação enquanto que o eixo vertical corresponde a segunda componente. Eixos adicionais foram omitidos visando facilitar a leitura.

OBS.: Demo refere-se ao programa de demonstração do software que foi utilizado (SIMCA 13.0)..... 24

**Figura 10:** Regressões lineares entre oxigênio dissolvido e temperatura as quais são: (■) **Esperadas** pelo efeito físico-químico da temperatura sobre o oxigênio em equilíbrio com a atmosfera e (□) **Observadas**, por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Gerlache (2003 – 2004), (B) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009), (C) Estreito de Bransfield (2003 – 2004, 2008 – 2011) e (D) Mar de Weddell (2008 – 2010). Os símbolos (■) e as linhas preenchidas representam respectivamente, os dados e as regressões lineares significativas **esperadas** ( $p < 0,05$ ), enquanto que os símbolos (□) com ou sem linha preenchida indicam os dados **observados**. Letras iguais ao lado dos valores de inclinação indicam diferença não significativa entre **Esperado** e **Observado** em cada painel (Teste de Comparação de Inclinações de Regressão Linear,  $p > 0,05$ )..... 25

## INDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Operações Antártica realizadas pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes.....	5
<b>Tabela 2:</b> Relação de nutrientes e princípio das análises realizadas durante a XXIX Operantar.....	15
<b>Tabela 3:</b> Simulação de diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e perda de biodiversidade (%) aplicada para a profundidade máxima de cada região estudada, a partir dos dados de oxigênio obtidos e dos cenários de aumento de temperatura apresentados pelo 4º Relatório de Avaliação do GT1 para o IPCC, 2007.....	30

## RESUMO

Este trabalho avaliou as relações entre as concentrações de oxigênio dissolvido (OD), clorofila-*a*, salinidade, temperatura e nutrientes dissolvidos (íon amônio, fosfato, silicato, nitrato), em diferentes regiões do Oceano Antártico, comparando as diferentes regiões e classes de profundidade dentro de cada região. Os dados aqui utilizados fazem parte da pesquisa realizada pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL) em diferentes Operações Antárticas, durante os verões austrais de 2003 a 2011. As regiões de coleta encontram-se nas proximidades da Península Antártica, englobando o Estreito de Bransfield (2003-2005, 2008-2011), Estreito de Gerlache (2003-2005) e Mar de Weddell (2005, 2008-2010), incluindo as proximidades da Ilha James Ross (2008-2009), totalizando 410 estações oceanográficas. A análise dos dados indicou intensas diferenças na magnitude e nas relações de OD com as demais variáveis estudadas. Todas as regiões e profundidades analisadas apresentaram persistência de subsaturação de OD. As águas mais frias (-0,9 °C) da Ilha James Ross apresentaram um caráter mais autotrófico, com as maiores concentrações em mediana de OD (7,2 mg L<sup>-1</sup>) e de clorofila-*a* (1,6 µg L<sup>-1</sup>), enquanto as águas menos frias (0,6 °C) do Estreito de Gerlache, apresentaram as maiores concentrações de nutrientes, entre eles íon amônio (1,1 µmol L<sup>-1</sup>), indicando um possível predomínio de processos heterotróficos. Os resultados observados entre as classes de profundidades também apontaram um predomínio de processos fotossintéticos da superfície aos 100 m e possível predomínio de processos de degradação nas águas de maior profundidade. Este padrão foi melhor evidenciado pelas regressões lineares entre OD e temperatura, pois pelos cálculos físico-químicos esperava-se uma relação negativa na camada superficial da coluna d'água, entretanto, os dados demonstraram uma relação não significativa e até positiva significativa ( $p < 0,05$ ), indicando um predomínio de processos autotróficos. Nas profundidades de 500 a > 3000 m a relação negativa significativa foi mais acentuada do que aquela esperada pelo efeito físico químico da temperatura sobre os gases da água, indicativo de predomínio de processos heterotróficos. Assumindo as regressões lineares entre os dados observados de OD e temperatura e cenários de aquecimento global de acréscimo de + 1,8 e +4,0 °C, apresentados pelo IPCC, evidenciamos, através de simulações, que o aumento de temperatura poderá intensificar ainda mais a queda da concentração de oxigênio dissolvido pelo metabolismo heterotrófico nas águas de fundo podendo resultar em perdas de 1 a 65% da biodiversidade bentônica. Assim, ressaltamos que pesquisas relacionadas aos efeitos metabólicos das mudanças climáticas na Antártica, que podem ter abrangência global, precisam ser intensificadas.

Palavras-chave: Antártica, metabolismo aquático, nutrientes, temperatura, profundidade, aquecimento global, biodiversidade bentônica.

## ABSTRACT

This study evaluated the relationship between the concentrations of dissolved oxygen (DO), chlorophyll-*a*, salinity, temperature and dissolved nutrients (ion ammonium, phosphate, silicate, nitrate) in different regions of the Antarctic Ocean (Southern Ocean), comparing different regions and classes of depth within each region. The data were obtained by Oceanographic Group of High Latitudes (GOAL) in different Antarctic Operations (Operantar) held during the Southern summers (2003 – 2011). The sampling regions were near the Antarctic Peninsula, which included the Bransfield Strait (2003-2005, 2008-2011), the Gerlache Strait (2003-2005), the Weddell Sea (2005, 2008-2010) and the surroundings of James Ross Island (2008-2009) with a total of 410 Oceanographic stations. The data indicated strong differences in magnitude and in the relations of the DO with the other variables studied. All regions and depths analyzed showed a persistent sub saturation of DO. The colder waters (-0.9 °C) of James Ross Island presented a more autotrophic characteristic, with the highest median concentrations of DO (7.2 mg L<sup>-1</sup>) and chlorophyll-*a* (1.6 μg L<sup>-1</sup>), while the warmer waters (0.6 °C) of the Straits of Gerlache, had the highest concentrations of nutrients, including ammonia (1.1 μmol L<sup>-1</sup>), suggesting a possible predominance of heterotrophic processes. The results observed between depth classes also showed a predominance of photosynthetic processes from the surface to 100 m and possibly a predominance of degradation processes in deeper waters. This pattern was best seen with the linear regressions between DO and temperature, because with the physical and chemical calculations, a negative relationship in the surface layer of the water column was expected, however, the data showed a relationship that went from not significant to a positive and significant relationship ( $p < 0.05$ ), indicating a predominance of autotrophic processes. In the bottom the significant negative relationship was stronger than the one expected by the physical and chemical effect of temperature on water gases, indicating a predominance of heterotrophic processes. Assuming the linear regression between the observed DO and temperature data and the global warming scenarios of the IPCC, we noted that the increase in temperature may further intensify the decrease in dissolved oxygen concentration, by the heterotrophic metabolism of the bottom waters, which may result in losses of 1 to 65% in benthic biodiversity. Thus, research related to metabolic effects of climate change in Antarctica, which may have global scope, need to be intensified.

Keywords: Antarctic, water metabolism, nutrients, temperature, depth, global warming, benthic biodiversity.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O continente Antártico, assim como o Ártico, são as regiões mais susceptíveis ao aumento de temperatura do planeta (Alley *et al.*, 2007). O aquecimento global atualmente em curso é causado pela liberação de gases que retém calor na atmosfera, processo denominado Efeito Estufa (Ahn e Brook, 2008; Bastviken *et al.*, 2011). As conseqüências do aquecimento global podem ser evidenciadas em diferentes processos, como a retração da camada superficial (Hughes, 2000) e diminuição da espessura da camada de gelo marinho (Justino *et al.*, 2007), com efetiva perda de manto de gelo que pode ter resultado na elevação do nível do mar de 3,1 mm por ano, no período de 1993 a 2003 (Alley *et al.*, 2007).

Nesse sentido, os processos biológicos estão diretamente relacionados ao aquecimento global, uma vez que a ciclagem orgânica pode ser tanto influenciada (Brown *et al.*, 2004; Dillon *et al.*, 2010) quanto pode favorecer (Tranvik *et al.*, 2009) às mudanças de temperatura. Isso porque o aumento de temperatura tende a favorecer a degradação da matéria orgânica resultando em maior liberação de gases para a atmosfera que por sua vez alimentam o aquecimento global (Walter *et al.*, 2006). Nesse contexto, a principal via metabólica de síntese de matéria orgânica no planeta é o processo de fotossíntese que apreende dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e libera oxigênio (O<sub>2</sub>), enquanto que a respiração é a mais importante via de degradação, apreendendo O<sub>2</sub> e liberando CO<sub>2</sub> (Cole *et al.*, 2000).

Em nível de ecossistema, o metabolismo aquático refere-se ao balanço entre a produção primária e a respiração aquáticas (Odum, 1956). Quando o balanço apresenta maior produção primária, o metabolismo aquático tende a ser autotrófico, mais oxigenado e com capacidade de estocar carbono (C), entretanto, quando o balanço apresenta maior respiração, torna-se heterotrófico, menos oxigenado e uma fonte de gases de carbono à atmosfera (Marotta, 2006).

Ao reduzir a degradação biológica, as temperaturas mais baixas favorecem o estoque de carbono orgânico (Schulz e Conrad, 1996) enquanto que as mais elevadas, mesmo em períodos de curta duração, tendem a estimular a sua degradação (Montagnes *et al.*, 2008). Desse modo, o aumento de temperatura pode contribuir para liberação de carbono à atmosfera pela mineralização da matéria orgânica. As

---

temperaturas mais altas favorecem tanto o aumento da produção quanto da respiração, mas a respiração pode ser efetivamente mais estimulada (López-Urrutia *et al.*, 2006). Assim, a liberação de gases que contribuem para o aquecimento global pode ser favorecida pelas temperaturas elevadas, em um mecanismo de retroalimentação positiva potencializando as mudanças globais no ciclo do carbono (Walter *et al.*, 2006; Zimov *et al.*, 2006).

Além da temperatura, outras condições (como salinidade ou pH Hönlisch *et al.*, 2012) e a disponibilidade de recursos (como nutrientes ou luz solar; Duarte e Agustí, 1998) podem influenciar a biota e a subsequente ciclagem entre apreensão e liberação de carbono nos oceanos.

Nas regiões de baixas temperaturas, como a Antártica, as concentrações de nutrientes podem ser altas, enquanto que as concentrações de clorofila-*a* podem ser baixas, paradoxo denominado HNLC (do inglês, high nutrients low chlorophyll, Mitchell *et al.*, 1991), nestas regiões outros fatores podem limitar a produção primária. Dentre esses estão a disponibilidade de luz (Mitchell *et al.*, 1991), dinâmicas do gelo que envolvem a retração da camada superficial, quantidade e tempo de degelo que contribui para aporte de ferro (Vernet *et al.*, 2008) e o aquecimento das águas superficiais (Mendes *et al.*, 2012) são fatores que contribuem para a estratificação da coluna d'água.

Alguns autores (Garibotti *et al.*, 2005; Vernet *et al.*, 2008) referem-se ao processo de estratificação da coluna d'água como processo chave para que a síntese de matéria orgânica possa acontecer, pois a retração das camadas de gelo bem como aporte de nutrientes vão favorecer o desenvolvimento do fitoplâncton.

Alterações em um ou mais desses fatores podem contribuir para que sejam percebidas variações nas taxas de produção primária e na composição fitoplanctônica, de modo que essas modificações podem refletir na cadeia trófica devido a mudanças na composição das comunidades fitoplanctônicas (Mendes *et al.*, 2012) que podem ser intensificadas pelo aquecimento global podendo afetar a dinâmica de toda a cadeia alimentar (Garibotti *et al.*, 2005).

Evidências consistentes têm sugerido a relação positiva entre o aumento do balanço heterotrófico nos oceanos e o aquecimento (Wohlers *et al.*, 2009; Duarte e Regaudie-de-Gioux, 2009). A redução do oxigênio devido a intensificação dos processos de degradação orgânica tem sido cada vez mais descrita na literatura,

---

dinâmica que pode resultar em hipóxia e subsequente perda de diversidade biológica (Brewer e Peltzer, 2009; Diaz e Rosenberg, 2008; Vaquer-Sunyer e Duarte, 2008).

Estimativas de previsão de aumento de temperatura apresentadas no último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (Alley *et al.*, 2007) sinalizam cenários de acréscimo de 1,8 a 4,0 °C (melhor estimativa). Tais estimativas abrangem uma gama de impactos que já apresentam sinais, como a alteração no nível do mar, diminuição da proporção de áreas congeladas, aquecimento dos oceanos, derretimento de glaciares, modificações na fisiologia de espécies (Hughes, 2000), hipoxia dos ambientes aquáticos (Vaquer-Sunyer e Duarte, 2008) com conseqüente aumento das “zonas mortas” (Diaz e Rosenberg, 2008). As regiões polares apresentam-se como mais suscetíveis a essas alterações, principalmente em função do albedo do gelo marinho, que atua alimentando automaticamente o processo, quanto mais derretimento de gelo maior absorção de luz solar, que reforça o aquecimento (Justino *et al.*, 2007).

Portanto, os oceanos das altas latitudes também poderiam apresentar importantes efeitos da temperatura no balanço heterotrófico e na subsequente queda de oxigênio à maioria dos organismos. Esses potenciais efeitos poderiam ser advindos da típica condição gelada de suas águas, intensamente susceptíveis ao estímulo de decomposição biológica pelo aquecimento (Wadham *et al.*, 2012).

Além disso, o caráter dinâmico do metabolismo do oceano Antártico o torna um importante objeto de estudo, apesar de gelado, consiste de um mosaico de sistemas devido ao fluxo das massas d'água, topografia de fundo, meandros, sazonalidade de áreas de gelo (Treguer e Jacques, 1992) que demandam mais dados para uma melhor compreensão de processos atualmente em curso relacionando aquecimento global e metabolismo dos oceanos (López-Urrutia *et al.*, 2006).

---

## 2.0 OBJETIVO

Avaliar as relações entre oxigênio dissolvido, temperatura, salinidade, clorofila-*a* e nutrientes dissolvidos ao longo do gradiente de profundidade em diferentes regiões do Oceano Antártico, utilizando dados interanuais de verão.

### 2.1 Objetivos Específicos

Nas regiões do Estreito de Bransfield, Estreito de Gerlache, Mar de Weddell e nas proximidades da Ilha James Ross:

- Avaliar as concentrações de nutrientes, clorofila-*a*, oxigênio dissolvido, temperatura e salinidade ao longo do gradiente de profundidade
  - Avaliar as relações das concentrações de oxigênio dissolvido com temperatura e com as demais variáveis
  - Estimar mudanças das concentrações de oxigênio dissolvido em diferentes cenários de aquecimento global
  - Estimar simulações de perda de biodiversidade bentônica em função dos cenários de aquecimento global
-

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Obtenção dos Dados

Todos os dados utilizados nessa dissertação foram obtidos pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL), que durante mais de 10 anos vem realizando pesquisa de caráter multidisciplinar englobando as diferentes áreas da oceanografia química, física e biológica.

Esse projeto de longo prazo está inserido no âmbito do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), sendo sua logística de responsabilidade da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), subordinado à Marinha.

Os dados que serão discutidos nesse trabalho resultam de expedições à Antártica, realizadas pelo GOAL durante os verões dos anos de 2003 a 2005 e 2008 a 2011. Os relatórios referentes a essas expedições estão disponíveis no endereço eletrônico [www.goal.furg.br/index.php/pt/operacoes-antarticas.html](http://www.goal.furg.br/index.php/pt/operacoes-antarticas.html). Minha participação ocorreu durante a XXIX Operação Antártica (Operantar) realizada no verão de 2011, realizando coleta e análises das amostras de água obtidas. Cada ano de atividade do GOAL na Antártica contemplou um projeto de pesquisa, conforme exposto na tabela 1.

**Tabela 1:** Operações Antártica realizadas pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes.

<b>Operação Antartica</b>	<b>Projeto</b>	<b>Ano</b>	<b>Regiões de coleta</b>	<b>Total de Estações</b>
<b>XXI</b>	Goal 2003	2003	Estreitos de Bransfield e Gerlache	53
	Rede 1*	(Jan/Fev)		
<b>XXII</b>	Goal 2004	2004	Estreitos de Bransfield e Gerlache	88
	Rede 1*	(Jan/Fev)		
<b>XXIII</b>	Goal 2005	2005	Estreitos de Bransfield e Gerlache e Mar de Weddell	68
	Rede 1*	(Jan/Fev)		

**Tabela 1:** Operações Antártica realizadas pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (continuação)

<b>Operação Antartica</b>	<b>Projeto</b>	<b>Ano</b>	<b>Regiões de coleta</b>	<b>Total de Estações</b>
<b>XXVI</b>	SOS-Climate I**	2008 (Fev)	Passagem de Drake, Mar de Weddell, Estreito de Bransfield, proximidades Ilha James Ross	63
<b>XXVII</b>	SOS-Climate II**	2009 (Fev/Mar)	Mar de Weddell, Estreito de Bransfield, proximidades Ilha James Ross	57
<b>XXVIII</b>	SOS-Climate III**	2010 (Fev)	Mar de Weddell e Estreito de Bransfield	49
<b>XXIX</b>	PolarCanion I***	2011 (Fev)	Mar de Weddell e Estreito de Bransfield	32

\* Goal/Rede1 - Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes/Rede 1 Antártica, Mudanças Globais e Teleconexões com o Continente Sul-Americano  
2003 e 2004 Subprojeto Oceanografia Física

2005 Processos oceanográficos, distribuição e densidade da biota marinha e possíveis relações com as mudanças ambientais globais

\*\* Southern Ocean Studies for Understanding Global – CLIMATE Issues (Contribuição Brasileira na área de Oceanografia para o Ano Polar Internacional)

2008 SOS-Climate I

2009 SOS-Climate II

2010 SOS-Climate III

\*\*\* PolarCanion (2011) – INCT- Criosfera - Grupos de Estudos do Oceanos Austral e Gelo Marinho – Projeto Circulação Oceânica e Interações Criosfera-Oceano no entorno da península Antártica: uma investigação das ligações entre processos costeiros e o oceano profundo (PolarCanion)

### 3.2 Área de Estudo

A Antártica corresponde à porção de terra mais isolada do planeta. Encontra-se no centro do pólo sul geográfico, 66° 33'S, (Benninghoff, 1987) com uma área total de aproximadamente 14 milhões de Km<sup>2</sup>, considerando também a Península Antártica e as ilhas próximas (Machado e Brito, 2006). O Oceano Antártico, também denominado Oceano Austral, circunda todo o continente e corresponde à cerca de 10% de todos os oceanos, sua superfície congelada varia de 2,7 milhões no verão a 22 milhões km<sup>2</sup> no inverno (Machado e Brito, 2006).

Devido a localização e maior proximidade com a troposfera (Benninghoff 1987) as condições de clima no continente são severas, apresentando temperaturas médias negativas de até -60°C, ocorrência de ventos intensos e fortes (de até 327 km/h) e uma superfície terrestre constantemente coberta por um manto de gelo e neve (Machado e Brito, 2006).

Por outro lado, a Península Antártica, porção mais ao sul do continente com extensão de 2.500 km<sup>2</sup>, apresenta condições climáticas mais amenas devido sua localização. Entretanto, essa localização e proximidade com a Passagem de Drake, que trata-se de região de rota de centros de baixa e alta pressão atmosférica, resultam em constantes variações de tempo. Contudo as temperaturas menos rígidas e que no verão podem atingir alguns graus positivos favorecem o derretimento de geleiras e neve costeira (Machado e Brito, 2006).

Na região da península encontra-se a “Zona de Convergência Antártica” onde às águas frias do Oceano Austral submergem sob as águas do Atlântico e Pacífico (águas mais quentes). O oceano Austral tem comunicação com o oceano Atlântico, Índico e Pacífico conferindo-lhe um caráter circunglobal. Nele se formam as águas mais frias e densas do planeta, tendo influência na regulação global do clima terrestre. As bacias de Weddell-Ederby, Bellingshausen e Mornington, com profundidades superiores a 4 mil metros e separadas por três cordilheiras principais, formam o fundo do oceano Austral (Machado e Brito, 2006).

As regiões escolhidas para a coleta de amostras de água no oceano Austral compreenderam as adjacências a Península Antártica, englobando o Estreito de Bransfield e Estreito de Gerlache e o Mar de Weddell. As regiões dos estreitos são

---

consideradas áreas de relevância para o desenvolvimento da biota, especialmente krill<sup>1</sup>, e apresentam uma estrutura de fonte de águas e fluxo complexos (Zhou *et al.*, 2002). Já o Mar de Weddell é a região onde se encontram as águas mais frias e densas do planeta, responsáveis pela renovação das águas de fundo dos oceanos (Orsi *et al.*, 1999).

### 3.2.1 Regiões de Coleta

- Estreito de Bransfield (EB)

A região do estreito de Bransfield corresponde a uma área de 50.000 km<sup>2</sup> de mar semifechado entre as Ilhas Shetlands do Sul e a Península Antártica (figura 1 – “A”). O estreito tem conexão com o mar de Bellingshausen, a passagem de Drake e o estreito de Gerlache (Garcia *et al.*, 2002), cujas profundidades são superiores a 1000 m (Zhou *et al.*, 2002).

A região pode ser considerada uma área de encontro de massas d'águas, sendo uma delas provenientes do Mar de Weddell (Água Transicional – TWW), correspondendo a águas mais frias e salinas, e outra oriunda do Mar de Bellinghausen (Água Transicional – TBW) mais quentes e menos salinas, resultando numa complexa rede de fluxo de água e de massas d'águas (Lopez *et al.*, 1999; Garcia *et al.*, 2002).

A acessibilidade geográfica do estreito, cobertura de gelo favorável na região e estrutura logística, tem favorecido diversas pesquisas no EB (Garcia *et al.*, 2002), que envolvem: massas d'água (Lopez *et al.*, 1999; Orsi *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2002; Duarte, 2006), distribuição de nutrientes, de comunidades fitoplanctônicas (Pollery, 2005; Lorenzo *et al.*, 2002; Araújo, 2012; Mendes *et al.*, 2012), gelo e neve (Mendes Junior *et al.*, 2009), entre outros estudos.

- Estreito de Gerlache (EG)

O estreito de Gerlache localiza-se entre a costa oeste da Península Antártica e o arquipélago Palmer, podendo ser considerada uma extensão da porção oeste do EB

---

<sup>1</sup> Krill: Invertebrados do Filo Arthropoda, Ordem *Euphauseacea*, cujas espécies são tipicamente gregária ocorrendo em grandes cardumes. Constituem a principal fonte alimentar de animais de grande porte como baleias, lulas e peixes. O krill pode atingir (e até exceder) densidades de 1.000 indivíduos/m<sup>3</sup> (Brusca e Brusca, 2007).

---

(figura 1 – “B”). Por tratar-se de uma extensão, também possui conexão com o Mar de Bellingshausen, porém as Águas de Zona Transicional (TBW), influenciadas por este mar, podem ser menos salinas e mais frias em Gerlache, em função do aporte de água doce das geleiras do estreito (Garcia *et al.*, 2002).

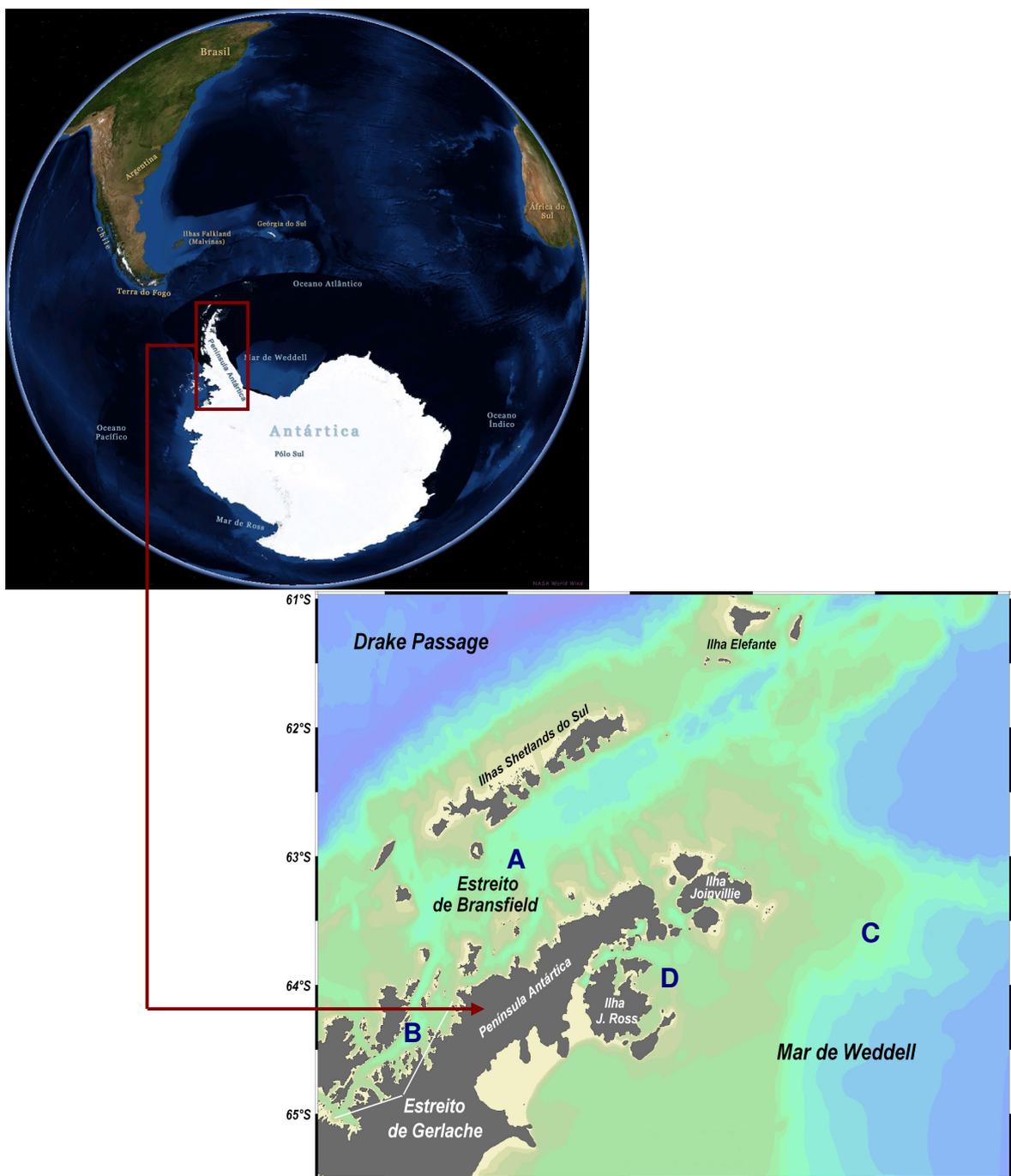
Assim como a região do EB o estreito de Gerlache também é considerado uma região de alta produtividade (Zhou *et al.*, 2002; Pollery, 2005), funcionando como viveiro para diversas espécies (Zhou *et al.*, 1994).

- Mar de Weddell (MW)

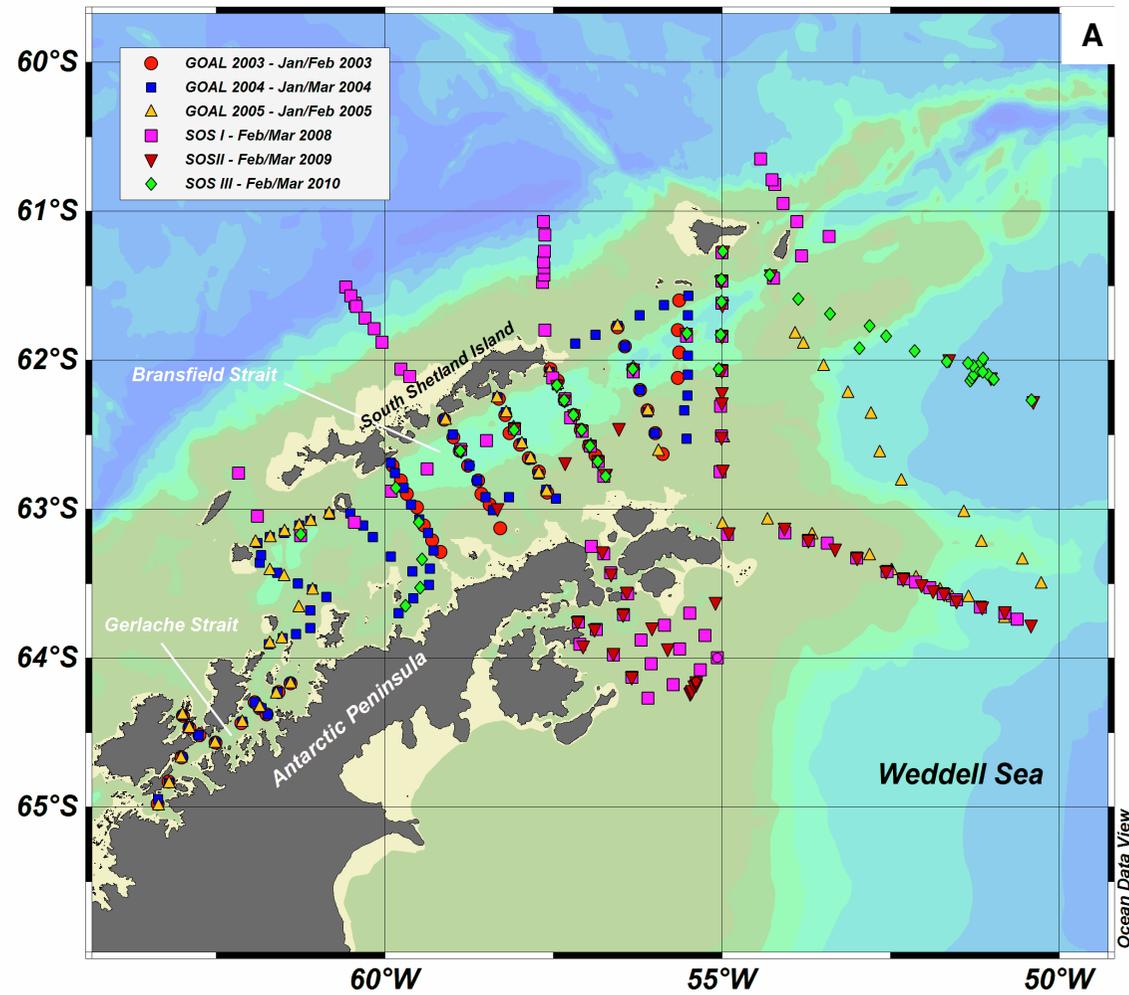
O mar de Weddell corresponde à região de origem das Águas de Fundo Antártica (AABW), responsável pela circulação termohalina global e ventilação dos oceanos (Orsi *et al.*, 1999). No mar de Weddell há quatro tipos de massas d’água, diferenciadas pela salinidade e temperatura, cuja circulação ocorre pelo Giro de Weddell, que se estende além dos domínios do próprio mar (figura 1 – “C”). O MW tem seus limites ao sul pelo continente Antártico e a oeste pela península Antártica (Klatt *et al.*, 2005).

Banhada pelo Mar de Weddell e localizada a leste da Península Trinity, encontra-se a Ilha James Ross (Weddell-IJR, figura 1 – “D”), região que correspondente ao nordeste da península Antártica (Mendes Junior *et al.*, 2009).

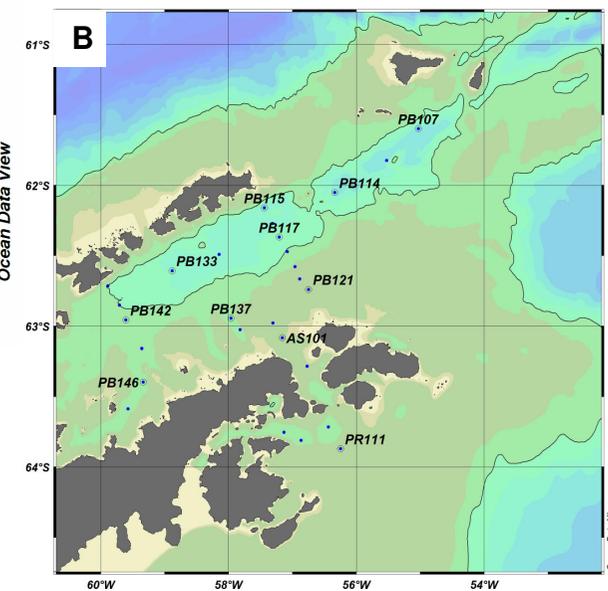
---



**Figura 1:** Continente antártico ([www.guiageo-antartica.com/globo-imagem.htm](http://www.guiageo-antartica.com/globo-imagem.htm)) e as regiões do Estreito de Bransfield (A), Estreito de Gerlache (B), Mar de Weddell (C) e proximidades da Ilha James Ross (D), modificado a partir dos relatórios do Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL).



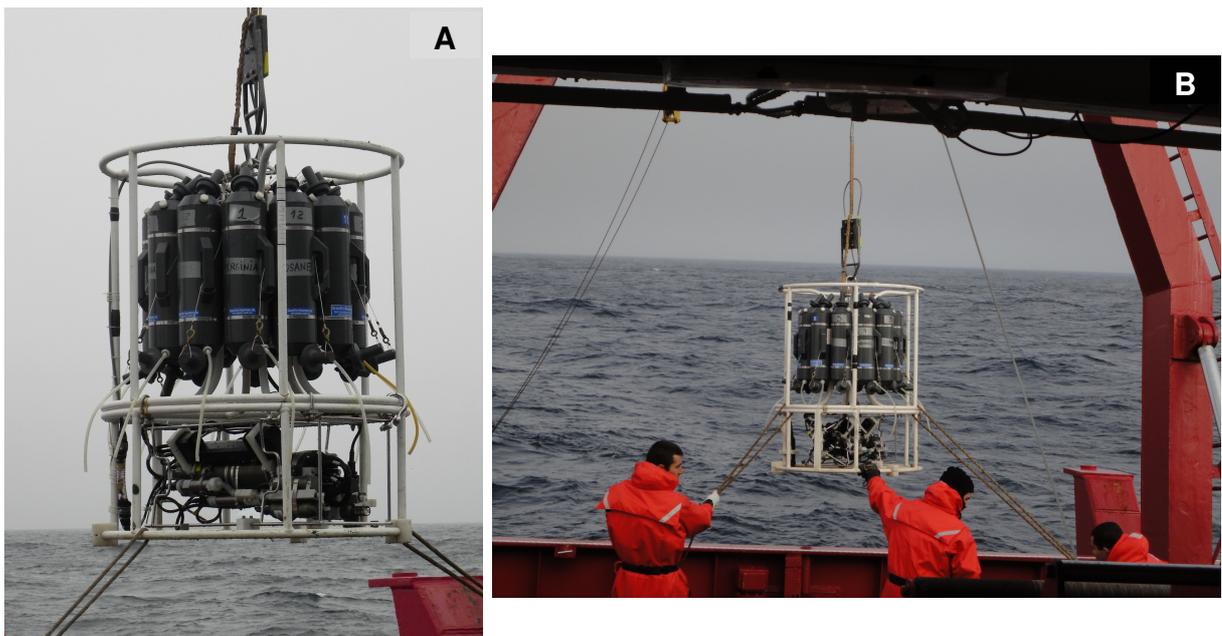
**Figura 2:** (A) Estações de coleta das Operações Antárticas realizadas no período de 2003 a 2010 pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL). Os dados utilizados neste trabalho referem-se ao período citado, inclusive os dados das coletas realizadas em 2011, estações indicadas em (B). Créditos da figura para o Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (2013).



### 3.3 Amostragem e análises químicas

Entre 2003 e 2011, foram amostradas 410 estações oceanográficas a bordo do navio oceanográfico Ary Rongel. Seguindo os mesmos procedimentos dos anos anteriores, em 2011 as amostras de água foram coletadas em diferentes profundidades, ao longo do perfil vertical da coluna d'água, da superfície ao fundo, com a utilização de 12/24 garrafas Niskin de 5 litros organizadas em um carrossel (*rosette*), figura 3A.

A este carrossel foi acoplado um perfilador da marca *Sea-Bird®* modelo SBE 911 *plus*, para obtenção de dados de condutividade, pressão e temperatura (CTD) da água. Nesse CTD foi conectado um sensor para oxigênio dissolvido, modelo SBE 43 (figura 3A). O sistema *rosette*/CTD foi lançando ao mar pelo arco de popa do navio (figura 3B), permitindo a perfilagem completa da coluna d'água.



**Figura 3:** (A) Sistema *rosette* com destaque para as garrafas Niskin na parte superior e o aparato do CTD, na porção inferior da *rosette*. (B) Exemplo de operação de manobra com a *rosette* em uma estação de coleta durante a XXIX Operantar em 2011. (Créditos para cabo Cleber, foto B).

As amostras de água coletadas com as garrafas Niskin foram analisadas quanto à concentração de clorofila-*a*, nutrientes e oxigênio dissolvido. Também foram obtidas

---

amostras de água (350mL) para análise em um Autosal (Guildline 8400b) para calibração/correção dos dados de salinidade obtidos pelo sensor de condutividade do CTD.

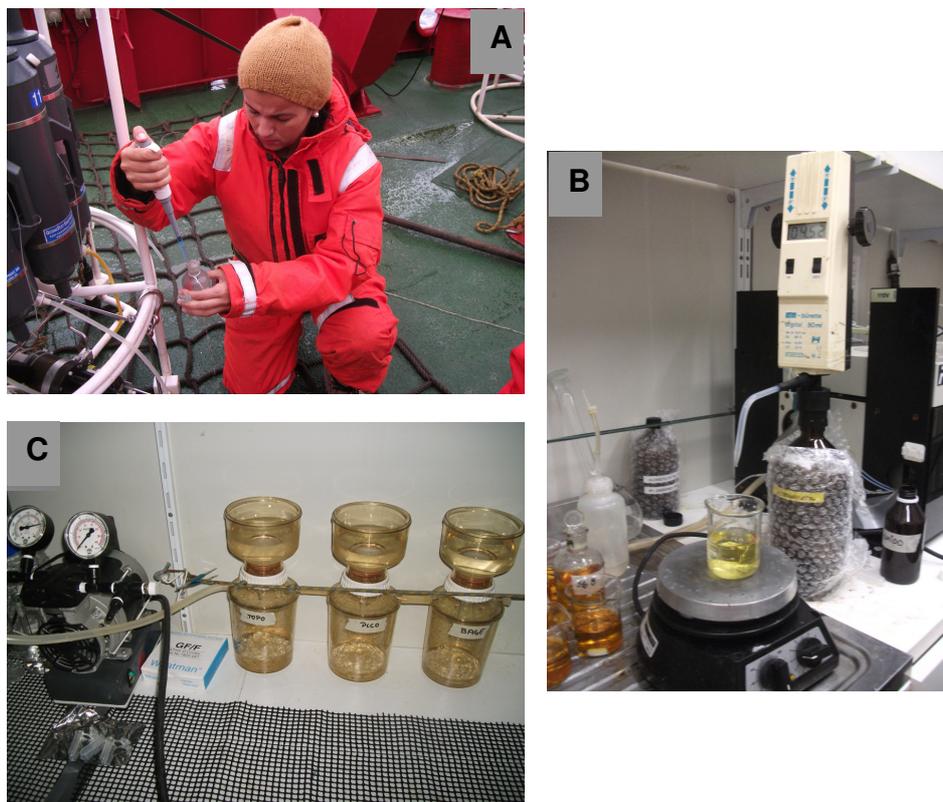
No período de 2003 a 2005, as amostras de água coletadas foram acondicionadas em frascos plásticos de 300 mL para determinação dos nutrientes dissolvidos (íon amônio, nitrito, nitrato, silicato e fosfato) em análise posterior no Laboratório de Oceanografia Química da Universidade Santa Úrsula/RJ. A partir de 2008 as análises têm sido realizadas em laboratório a bordo, com a utilização de um Auto-Analisador (Femto SWS100).

Durante a XXIX Operantar, seguindo os procedimentos aplicados nas expedições anteriores, as análises de oxigênio dissolvido (OD) foram realizadas a partir da primeira amostra de água retirada de cada garrafa Niskin, as quais foram coletadas, fixadas e analisadas segundo a metodologia de Winkler com correção de Aminot e Chaussepied, (1983), figuras 4A e 4B. Devido a contra tempos, as concentrações de OD não puderam ser avaliadas no ano de 2005.

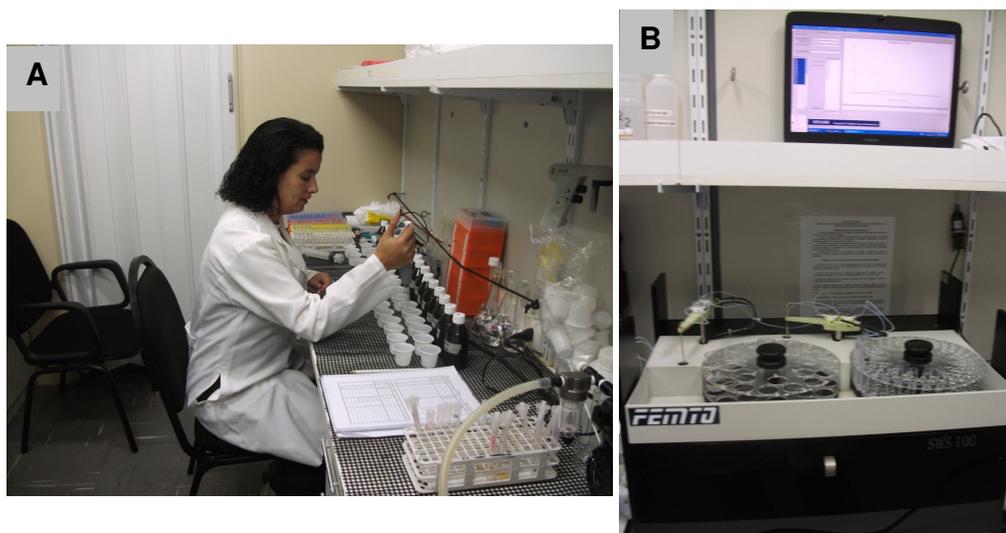
Para a determinação do teor de clorofila-*a*, durante a XXIX Operantar, amostras de água foram coletadas em frascos escuros (500 mL) e filtradas a vácuo, utilizando filtros de microfibras de vidro (GF/F, Whatmann, 47 mm), figura 4C. Esses filtros foram acondicionados em criotubos e conservados em nitrogênio líquido, até o transporte para o Laboratório de Biogeoquímica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). No laboratório fez-se a extração da clorofila, com utilização de acetona a 90% e posterior análise por fluorimetria, segundo Aminot e Chaussepied (1983). Nas demais Operações Antártica às análises para concentração de clorofila-*a* foram realizadas pela professora Dra. Virginia Tavano no laboratório de Fitoplâncton da Universidade Federal do Rio Grande.

As análises de nutrientes foram realizadas pelo método de colorimetria (figura 5A), segundo Aminot e Chaussepied (1983). Todas as reações foram lidas ao espectrofotômetro Femto 600 Plus (figura 5B) na absorbância adequada para cada tipo de análise, conforme exposto na tabela 2. As análises para determinação de nutrientes, em todas as Operações Antártica, contempladas nesse trabalho, foram realizadas sob a coordenação e supervisão do professor Dr. Ricardo Pollery.

---



**Figura 4:** (A) Exemplo de coleta de água para determinação de oxigênio dissolvido em uma estação oceanográfica durante a XXIX Operantar e (B) posterior análise em laboratório a bordo. (C) Parte da água também foi coletada para ser filtrada em sistema de bombeamento a vácuo para determinação do teor de clorofila-*a*.



**Figura 5:** Análises de nutrientes dissolvidos das amostras de água obtidas durante a XXIX Operantar: (A) preparação das amostras e (B) equipamento utilizado para a leitura das absorbâncias (Femto 600 Plus).

**Tabela 2:** Relação de nutrientes e princípio das análises realizadas durante a XXIX Operantar

Nutriente	Princípio da Análise	Absorbância
íon amônio	reação do “azul de indofenol” (método Koroleff, 1969, que mede a totalidade do nitrogênio amoniacal)	630 nm.
nitrato	redução do nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) a nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) em coluna de cádmio tratada com cobre (Wood <i>et al.</i> , 1967)	543 nm
fosfato	reação de redução (coloração azul), Murphy e Riley (1962).	885 nm
silicato	reação de redução ao azul de silicomolibdato (método de Mullin e Riley, 1955, adaptado por Strickland e Parsons, 1977).	810 nm

### 3.4 Tratamento dos Dados e Estatística

Todo o conjunto de dados contemplados por este trabalho foi analisado no tocante às premissas estabelecidas por Zar (1999) e, mesmo após transformações, não atenderam às premissas de parametricidade: não apresentaram distribuição normal (Kolmogorov-Smirnov,  $p > 0,05$ ) e homogeneidade de variâncias (Bartlett,  $p > 0,05$ ) significativas. Desse modo, as diferentes regiões de coleta foram avaliadas por testes não paramétricos Kruskal-Wallis (significativo  $p < 0,05$ ) seguido pelo pós-teste de Dunn (significativo  $p < 0,05$ ), com os dados sendo representados por medianas e intervalos interquartis (percentis 25 e 75).

Para identificar possíveis semelhanças entre os locais de coleta, as quatro regiões foram comparadas quanto à concentração de nutrientes dissolvidos (fosfato, íon amônio, nitrato e silicato), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e clorofila-*a*. Cada região ainda foi avaliada, separadamente, em relação à profundidade local e para este fim, foram estabelecidas 8 classes de profundidade : 0-20, 21-60, 61-100, 101-500, 501-1000, 1001-2000, 2001 a 3000 e >3000 metros. As classes foram determinadas considerando zona fótica (com 03 classes, da superfície a 100 metros), profundidade de fundo comum a todas as regiões (com 02 classes, de 100 a 1000 metros) e levando em

consideração, também, o fundo específico de cada região (com 03 classes de 1000 a >3000 metros). Todas essas análises foram realizadas com a utilização dos testes não paramétricos, citados acima.

Além disso, para verificar uma possível relação entre a variável chave (OD) e as demais foram realizadas regressões lineares simples (significativo,  $p < 0,05$ ) e múltiplas “mínimos quadrados parciais” (do inglês “partial least squares” ou PLS).

A regressão múltipla utilizada, PLS, consiste em uma análise de regressão que decompõe as matrizes originais em conjunto de fatores denominados escores e pesos (Hoskuldsson, 1988). Os escores gerados representam o nível de importância de cada variável “X” para explicar “Y”. Os resultados podem ser expressos em gráfico bidimensional, onde o eixo horizontal refere-se à primeira componente da PLS, que sempre tem maior poder de explicação da variância do que o eixo vertical, que se refere a segunda componente (Sobek *et al.*, 2007).

Neste modelo de gráfico, as variáveis são consideradas positivamente correlacionadas quando próximas umas das outras e negativamente quando dispostas em eixos opostos do gráfico. As variáveis próximas ao centro dos eixos oferecem baixo grau de explicabilidade.

O modelo de explicação gerado pela PLS é expresso em termos de  $R^2Y$  e  $Q^2$ . O  $R^2Y$  expressa quanto da variância de “Y” é explicada por “X”, sendo semelhante ao  $R^2$  da regressão linear simples, enquanto que o termo  $Q^2$  refere-se à medida do poder de predição do modelo, quanto mais próximo estiver  $Q^2$  de  $R^2Y$ , mais robusto é o modelo.

A grande vantagem apontada para a utilização da PLS é que o teste é insensível a covariação entre as variáveis “X” e a ausência de alguns dados dentro do conjunto, além disso, a série de dados pode ter distribuição não normal (Sobek e Tranvik, 2005; Sobek *et al.*, 2007).

As regressões lineares simples foram executadas a partir dos dados de OD reais, ou seja, com utilização dos dados de OD obtidos em cada uma das expedições, agora denominados **observados**. Estas regressões contemplaram também os cálculos da saturação de oxigênio em equilíbrio com a atmosfera para cada região, conforme proposto por Garcia e Gordon (1992) e esses dados de OD, obtidos por cálculo, serão denominados **esperados**. As mesmas amplitudes de salinidade e temperatura foram consideradas em ambas as regressões, as **observadas** e as **esperadas**.

---

Todos os testes estatísticos descritos e gráficos foram executados no programa GraphPad Prism 5.0, exceto a regressão PLS que foi realizada com uma versão demo<sup>2</sup> do programa SIMCA 13.0 (Umetrics AB, Umea, Suécia).

## 4.0 RESULTADOS

### 4.1 Comparação entre as regiões do Estreito de Bransfield, Estreito de Gerlache, Mar de Weddell e proximidades da Ilha James Ross

As menores concentrações, em mediana (intervalo interquartil 25-75%), de íon amônio e fosfato foram observadas na Ilha James Ross, sendo respectivamente 0,5 (0,4 – 0,7) e 1,1 (0,8 – 1,9)  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . O estreito de Gerlache, por sua vez, apresentou as maiores concentrações destes nutrientes, cerca de duas vezes mais elevadas, 1,1 (0,7 – 1,8) e 2,5 (2 – 2,8)  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente (figura 6A e 6B). Nessa região, as concentrações 66,4 (59,6 – 76,6)  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de silicato foram significativamente maiores, em torno de 10%, do que nas demais regiões (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ; figura 6D). Já as concentrações de nitrato não apresentaram diferença significativa entre Bransfield e Weddell (concentrações em torno de 27  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), bem como entre Gerlache e Ilha James Ross (concentrações entre 25 e 26  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), cuja diferença significativa entre esses dois grupos também foi em torno de 10% (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ; figura 6C).

Em relação à temperatura e salinidade da água, todas as regiões foram significativamente diferentes (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ; figura 6E e 6F). As águas mais frias e salinas foram observadas, em mediana (intervalo interquartil 25-75%), na ilha James Ross -0,9 (-1,2 – -0,7) °C e 34,3 (34,3 – 34,4) e no Mar de Weddell -0,7 (-1,2 – -0,2) °C e 34,4 (34,2 – 34,6), respectivamente. Por outro lado, o estreito de Gerlache apresentou as águas mais quentes e menos salinas, 0,6 (0,38 – 1) °C e 34,1 (33,8 – 34,9), respectivamente.

---

<sup>2</sup> Demo: programa de demonstração de um *software* (dicionário Michaelis Inglês-Português)

---

As maiores concentrações significativas (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ) de OD e clorofila-*a* também foram observadas, em mediana (intervalo interquartil 25-75%), na Ilha James Ross 7,2 (6,9 – 7,5)  $\text{mg L}^{-1}$  e 1,6 (0,7 – 3,9)  $\mu\text{g L}^{-1}$ , enquanto as menores no Estreito de Gerlache 5,9 (5,3 – 6,5)  $\text{mg L}^{-1}$  e 0,3 (0,1 – 0,9)  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente (figura 6G e 6H).

#### **4.2 Avaliação de cada região quanto à concentração de nutrientes, temperatura, salinidade, OD e clorofila-*a* por classe de profundidade**

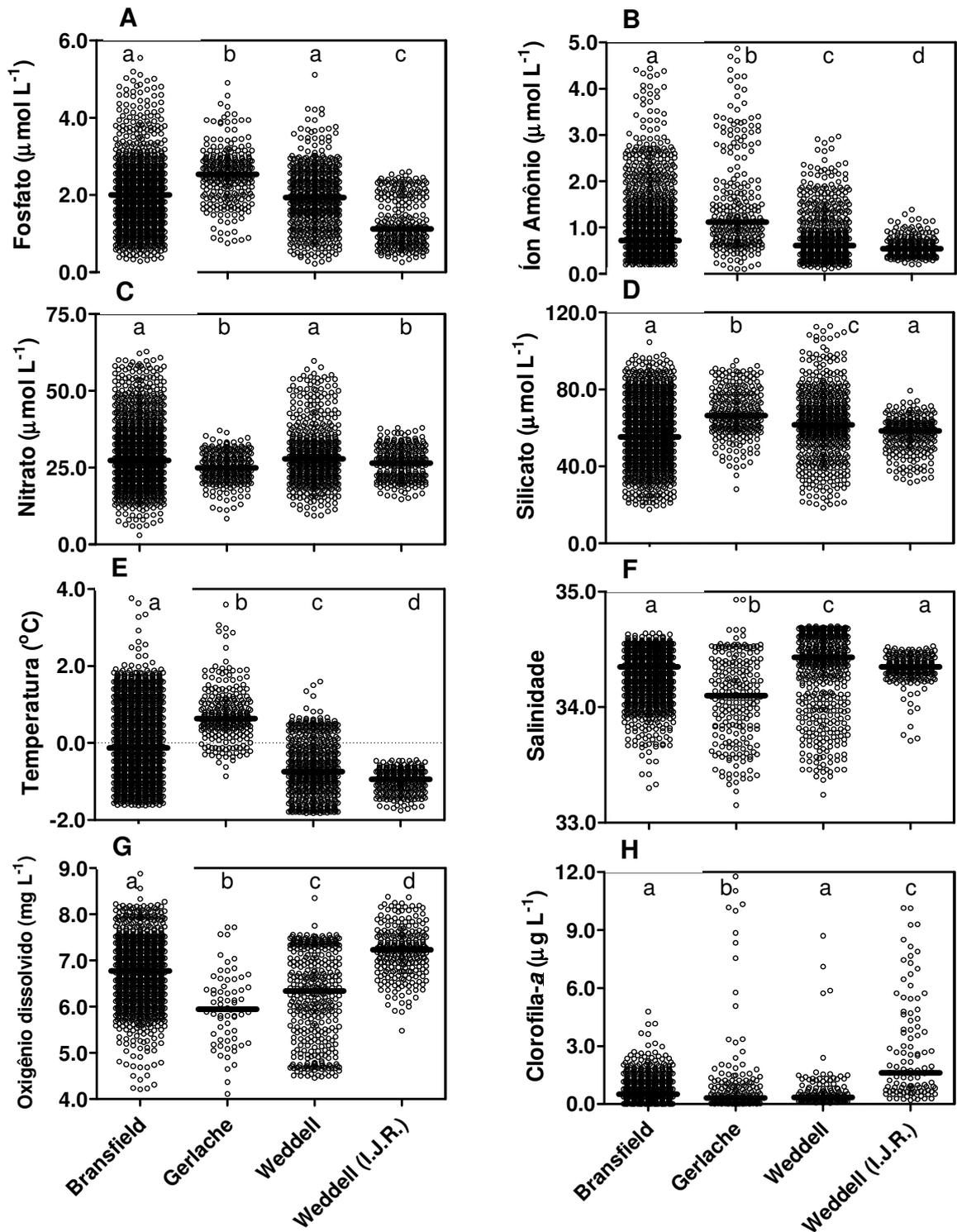
Comparando as diferentes profundidades, as concentrações de nutrientes, na sua maioria, não apresentaram diferenças significativas em cada uma das regiões estudadas (figura 7).

Já a temperatura e a salinidade apresentaram valores significativamente diferentes entre superfície e fundo, sendo as águas mais quentes e menos salinas observadas nas classes de menor profundidade (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ; figura 8). A amplitude de mediana entre essas classes alcançou, no máximo, 5,4 °C no estreito de Bransfield (figura 8A) e salinidade 1,7 no estreito de Gerlache (figura 8B) e, no mínimo, -0,8 °C e salinidade 1,2 na Ilha James Ross (figura 8D).

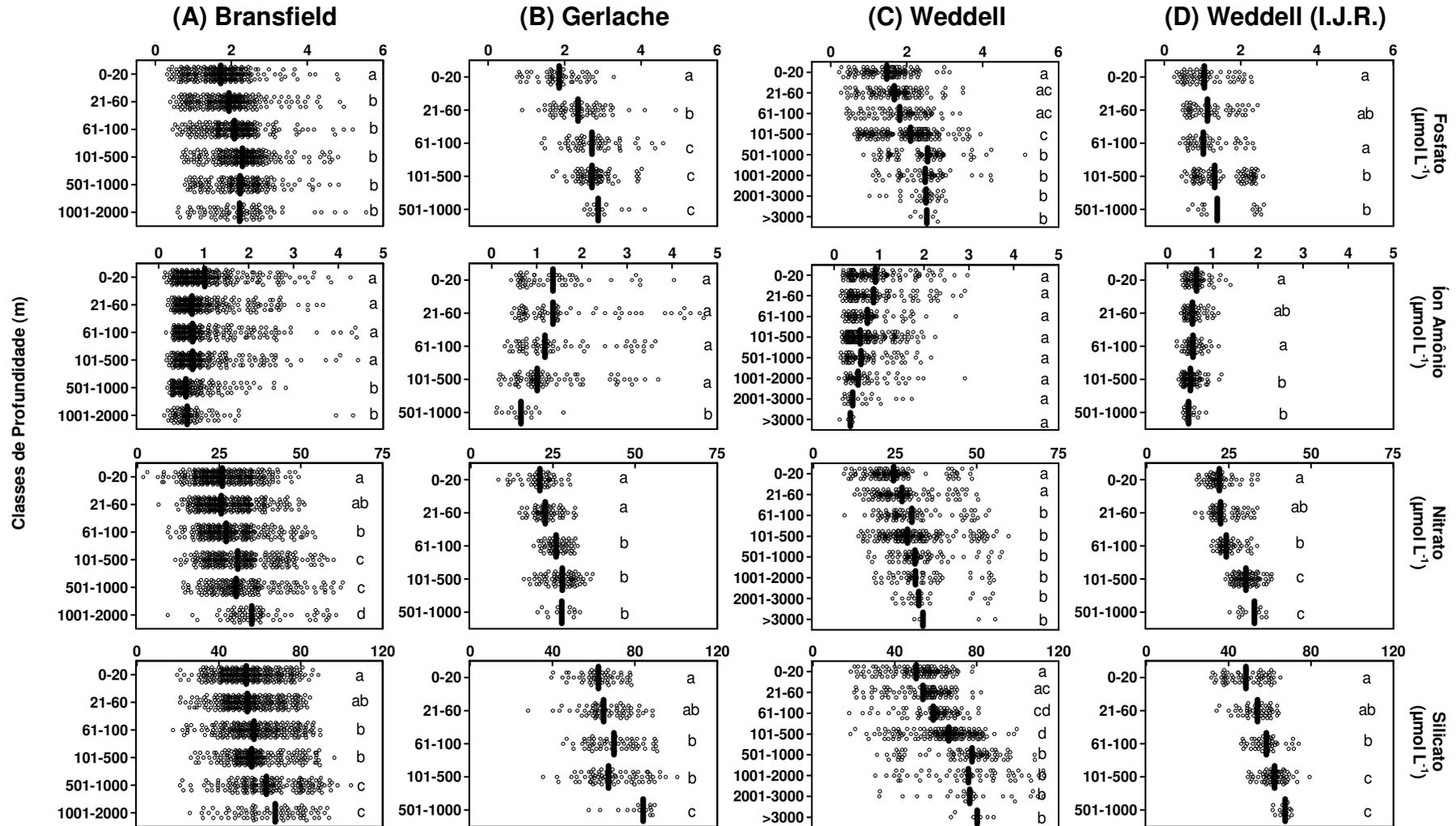
As medianas das concentrações de oxigênio dissolvido e clorofila-*a* tenderam a diminuir significativamente ao longo do perfil vertical desde a superfície ao fundo de cada região (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ; figura 8). As concentrações de OD apresentaram uma amplitude de mediana entre as classes de maior e menor profundidade de 2,9  $\text{mg L}^{-1}$  na ilha James Ross (figura 8D) a 4,9  $\text{mg L}^{-1}$  em Bransfield (figura 8A), enquanto essa amplitude para a clorofila-*a* variou de 3,7  $\mu\text{g L}^{-1}$ , no estreito de Bransfield (figura 8A), a 11,7  $\mu\text{g L}^{-1}$ , no estreito de Gerlache (figura 8B).

O gradiente de queda significativa da temperatura e OD ao longo das classes de maior profundidade só não foi observado no Mar de Weddell (figura 8C), onde a classe 501-1000 m apresentou aumento de temperatura acompanhado de queda mais abrupta do OD, seguido de redução da temperatura e incremento do OD (Teste de Dunn,  $p < 0,05$ ).

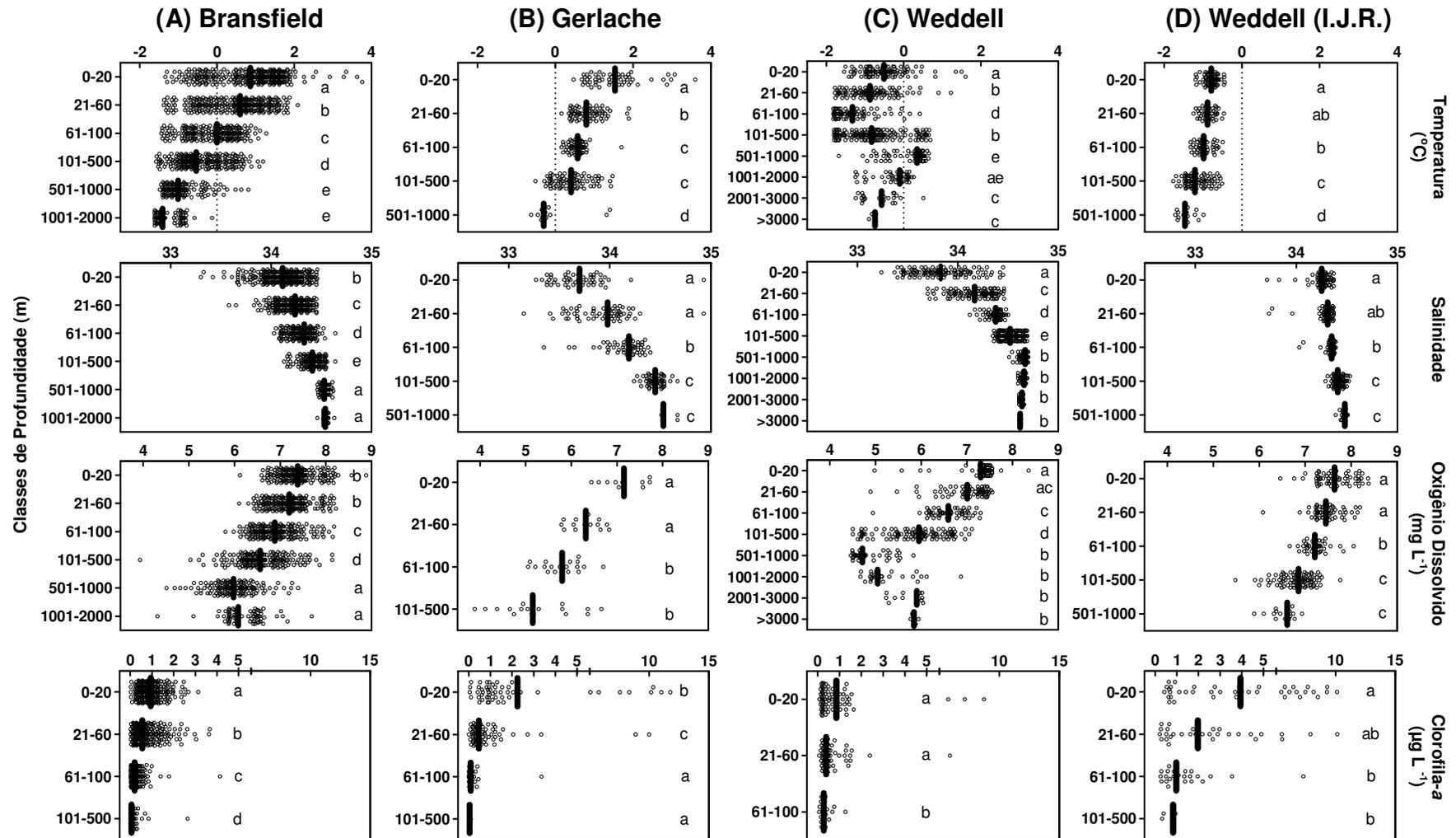
---



**Figura 6:** Concentração de nutrientes dissolvidos (A) fosfato, (B) íon amônio, (C) nitrato e (D) silicato ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), (E) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), (F) salinidade, (G) oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e (H) clorofila-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) nas regiões do Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), Estreito de Gerlache (2003 – 2005), Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas para cada variável entre regiões (Kruskal-Wallis,  $p > 0,05$ ).



**Figura 7:** Concentração de nutrientes dissolvidos: fosfato, íon amônio, nitrato e silicato ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), (B) Estreito de Gerlache (2003 – 2005), (C) Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e (D) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas entre as classes de profundidade de cada região (Kruskal-Wallis,  $p > 0,05$ ).



**Figura 8:** Temperatura (°C), salinidade, concentração de oxigênio dissolvido (mg L<sup>-1</sup>) e clorofila-a (µg L<sup>-1</sup>) por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Bransfield (2003 – 2005, 2008 – 2011), (B) Estreito de Gerlache (2003 – 2005), (C) Mar de Weddell (2005, 2008 – 2010) e (D) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009). As barras horizontais representam a mediana, enquanto que as letras iguais dentro de cada painel indicam diferenças não significativas entre as classes de profundidade de cada região (Kruskal-Wallis,  $p > 0,05$ ).

Classes de profundidade com menos de 5 amostras não foram consideradas.

### 4.3 Relação do oxigênio dissolvido com as demais variáveis

Na regressão múltipla (PLS), o OD apresentou correlação com outras variáveis (figura 9). De modo geral, salinidade, silicato e profundidade apresentaram correlação negativa com o OD, especialmente no estreito de Bransfield (figura 9A) e Gerlache (figura 9B). A PLS extraiu quatro componentes do conjunto de dados de Bransfield (figura 9A) que coletivamente explicou 48% da variação de oxigênio na região ( $R^2Y = 0,48$ ) e 66% da variância em "X" ( $R^2X = 0,66$ ) enquanto que no estreito de Gerlache (figura 9B) a extração de apenas uma componente explicou 32% ( $R^2Y = 0,32$ ) e 36% ( $R^2X = 0,36$ ), respectivamente.

O parâmetro temperatura também se correlacionou negativamente com o OD, assim como salinidade e silicato no Mar de Weddell (figura 9C). Para essa região a PLS resultou em duas componentes que totalizaram 85% de explicabilidade para a variância de OD ( $R^2Y = 0,85$ ) e 44% para as variáveis "X" ( $R^2X = 0,44$ ). A temperatura só esteve positivamente correlacionada na região da Ilha James Ross (figura 9D), juntamente com a clorofila-a. Nessa região também foram obtidas duas componentes que explicaram 40% da variância de OD ( $R^2Y = 0,40$ ) e 50% para a variação de "X" ( $R^2X = 0,50$ ). Em todas as regiões o poder de predição do modelo da PLS foi robusto, pois, os valores de  $Q^2$  sempre estiveram próximos a  $R^2Y$ .

Nas regressões lineares, além das diferenças em mediana entre as classes de superfície e fundo, as concentrações de OD apresentaram distintas relações lineares (positivas e negativas) com a temperatura ao longo do perfil vertical ( $p < 0,05$ ; figura 10).

As águas de superfície apresentaram regressões lineares não significativas ( $p > 0,05$ ) nas classes 0-20 e 61-100 m. Regressões lineares positivas significativas ( $p < 0,05$ ) foram observadas, também, nas classes citadas e foi predominante na classe 21-60 m. Já as classes a partir dos 100 m apresentaram apenas relações negativas entre OD e temperatura ( $p < 0,05$ ; figura 10), exceto as águas mais frias da Ilha James Ross que apresentaram tais regressões lineares não significativas ( $p > 0,05$ ) nestas profundidades.

As relações **observadas** entre o OD e a temperatura também apresentaram o predomínio de inclinações das retas significativamente diferentes às relações negativas

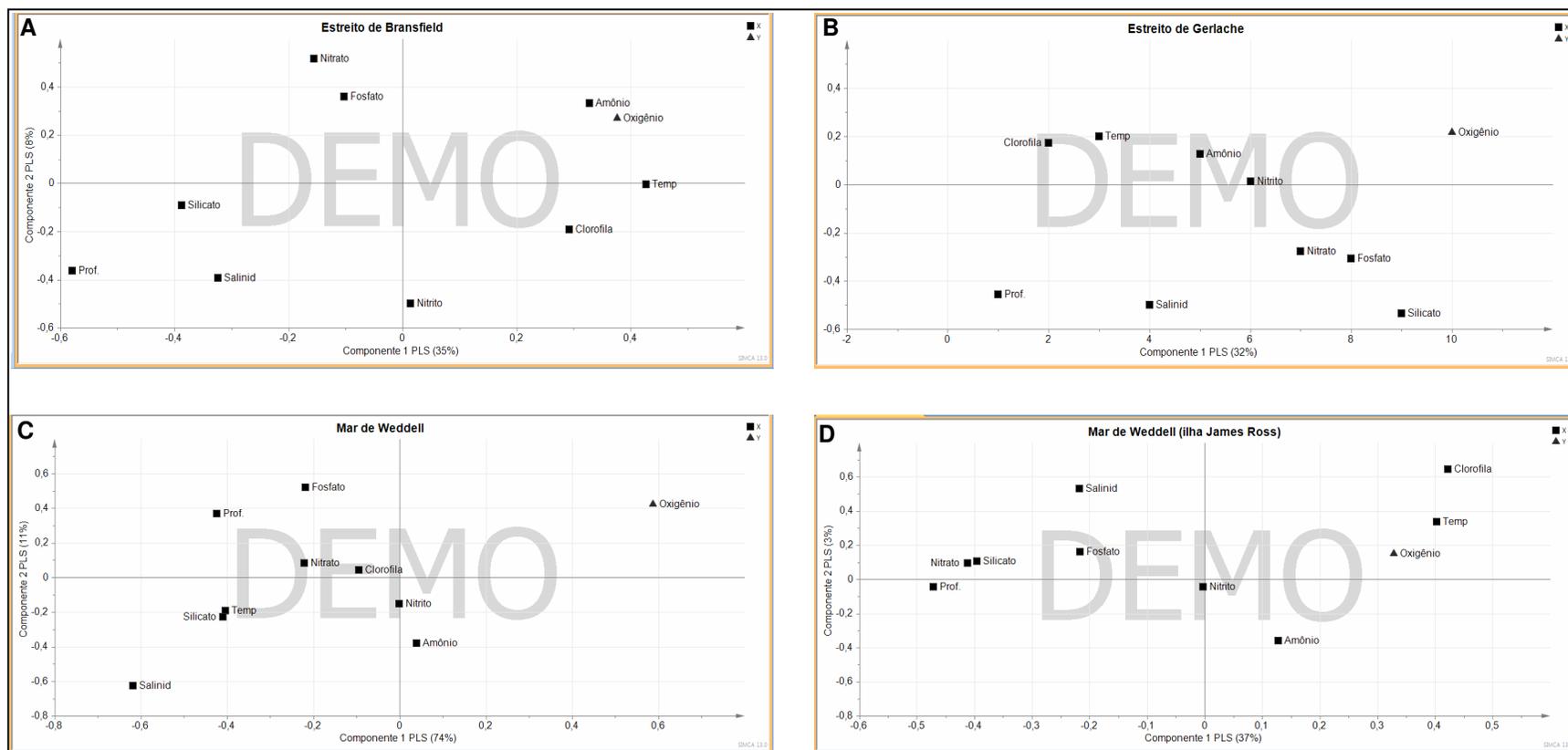
---

**esperadas** entre a saturação de oxigênio em equilíbrio à atmosfera e a temperatura (Teste de Comparação de Inclinações de Regressão Linear,  $p < 0,05$ ).

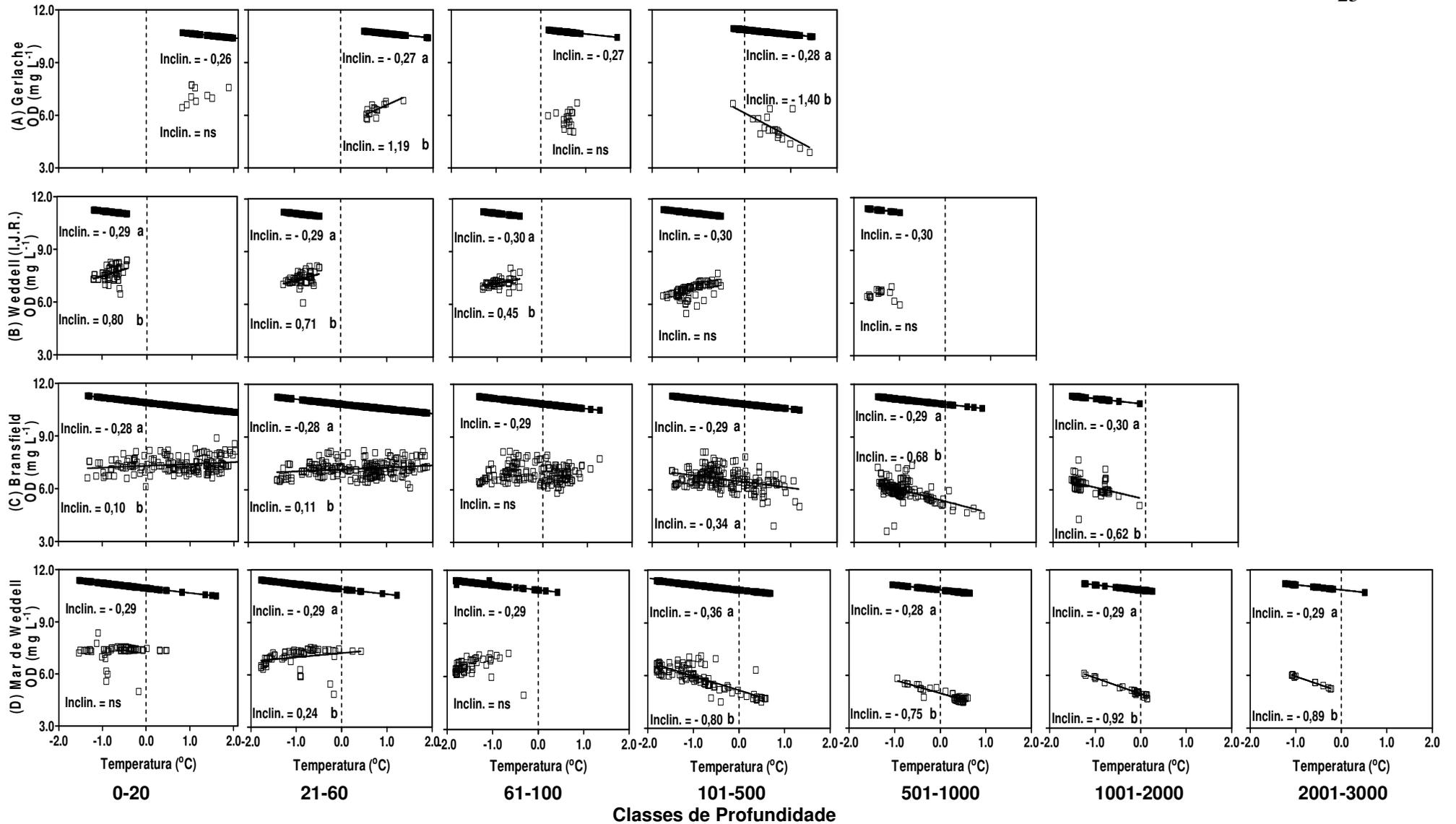
Essas diferenças na taxa de variação de OD com a temperatura, comparando as relações **observadas** (negativa, positiva ou não significativa) e aquelas **esperadas** (todas negativas) pelo efeito físico-químico da temperatura sobre o oxigênio na água em equilíbrio com a atmosfera, não foram similares entre superfície e fundo. Nas classes de menor profundidade (0-20, 21-60 e 61-100 m), as taxas **observadas** contrastaram com as **esperadas** (em torno de  $-0,28 \text{ mg OD L}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), apresentando valores não significativos diferentes de zero ou até mesmo positivos (de 0,10 a 1,19  $\text{mg OD L}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) nas diferentes regiões.

Por outro lado, nas águas mais profundas (classes maiores que 100 m), as taxas significativas **observadas** (de  $-0,34$  a  $-1,40 \text{ mg OD L}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) tenderam a ser mais negativas do que as **esperadas**, exceto na região mais fria do Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross, cujos valores não foram significativamente diferentes de zero. Tanto na superfície quanto no fundo os interceptos das regressões lineares **observadas** tenderam a ser menores do que os respectivos **esperados** pelo efeito físico-químico da temperatura sobre o oxigênio dissolvido na água (Teste de Comparação de Interceptos de Regressão Linear,  $p < 0,05$ ). Além disso, todos os dados observados de OD por temperatura foram significativamente menores do que aqueles esperados pelo efeito físico-químico (Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ).

---



**Figura 9:** Regressões múltiplas “mínimos quadrados parciais” (PLS). Os gráficos apresentam a estrutura de correlação das variáveis “X” com a variável chave “OD” nas regiões: (A) Estreito de Bransfield ( $R^2Y = 0,48$ ), (B) Estreito de Gerlache ( $R^2Y = 0,32$ ), (C) Mar de Weddell ( $R^2Y = 0,85$ ) e (D) Mar de Weddell nas proximidades da Ilha James Ross ( $R^2Y = 0,40$ ). O eixo horizontal refere-se a primeira componente da PLS e tem o maior percentual de explicabilidade da variação enquanto que o eixo vertical corresponde a segunda componente. Eixos adicionais foram omitidos visando facilitar a leitura. OBS.: Demo refere-se ao programa de demonstração do software que foi utilizado (SIMCA 13.0).



**Figura 10:** Regressões lineares entre oxigênio dissolvido e temperatura as quais são: (■) **Esperadas** pelo efeito físico-químico da temperatura sobre o oxigênio em equilíbrio com a atmosfera e (□) **Observadas**, por classes de profundidade (m) nas regiões: (A) Estreito de Gerlache (2003 – 2004), (B) Mar de Weddell próximo a Ilha James Ross (2008 – 2009), (C) Estreito de Bransfield (2003 – 2004, 2008 – 2011) e (D) Mar de Weddell (2008 – 2010). Os símbolos (■) e as linhas preenchidas representam respectivamente, os dados e as regressões lineares significativas **esperadas** ( $p < 0,05$ ), enquanto que os símbolos (□) com ou sem linha preenchida indicam os dados **observados**. Letras iguais ao lado dos valores de inclinação indicam diferença não significativa entre **Esperado** e **Observado** em cada painel (Teste de Comparação de Inclinações de Regressão Linear,  $p > 0,05$ ).

## 5. DISCUSSÃO

Os dados apresentados indicaram intensas diferenças na magnitude e nas relações do OD com as demais variáveis estudadas nas águas Antárticas, comparando tanto as diferentes regiões quanto as profundidades entre si. A heterogeneidade espacial de clorofila-*a* e OD confirmou a relevante variação da produtividade biológica previamente descrita em mares gelados como o oceano Austral, sugerindo a atuação dos processos de produção primária e respiração das comunidades fitoplanctônicas como direcionadores do metabolismo aquático, mesmo em baixas temperaturas (Agustí *et al.*, 2004).

Apesar das diferenças físico-químicas na coluna d'água, todas as regiões e profundidades analisadas apresentaram persistência da subsaturação de OD (figura 10). O consumo líquido de oxigênio mantendo esses níveis de subsaturação evidencia o potencial papel do balanço heterotrófico aquático em relação ao autotrófico (Odum, 1956; Duarte e Agustí, 1998; Duarte *et al.*, 2001; Marotta *et al.*, 2012). Nesse sentido, o metabolismo nas áreas polares e subpolares, frequentemente negligenciado por ser considerado baixo ou muito baixo, tem sido evidenciado por estudos recentes (Street e Paytan, 2005) como uma importante via à ciclagem de elementos químicos em escala global (Wadham *et al.*, 2012).

Entre as diferentes regiões estudadas, as mais altas concentrações de OD, encontradas no mar de Wedell-IJR, onde as temperaturas em mediana foram até 1,6 °C menores do que nas demais regiões, são uma típica evidência do menor consumo de oxigênio pela degradação da matéria orgânica em águas mais frias (del Giorgio e Duarte, 2002; Wadham *et al.*, 2012), também indicado pelas mais baixas concentrações de nutrientes dissolvidos como o íon amônio (Marotta *et al.*, 2010). Esse resultado favorece a relação positiva geral previamente descrita entre a temperatura e o balanço heterotrófico nos oceanos, relacionada ao maior aumento da degradação orgânica em comparação à atividade autotrófica nas águas mais quentes (López-Urrutia *et al.*, 2006; Wohlers *et al.*, 2009).

Além disso, a liberação de oxigênio pela produção primária também poderia contribuir para os valores mais elevados deste gás no meio aquático. A mais intensa participação autotrófica nas águas de Weddell-IJR, indicada pelas maiores

---

concentrações de clorofila-a, é comumente subsidiada pelo aporte de ferro e outros nutrientes advindos do degelo dos glaciares (Garibotti *et al.*, 2005; Mendes *et al.*, 2012). Conseqüentemente, tanto o consumo mais intenso de nutrientes inorgânicos pela autotrofia quanto sua menor liberação pela degradação orgânica poderiam explicar as mais baixas concentrações de nutrientes (especialmente fosfato, íon amônio e silicato), observadas em Weddell-IJR.

Nesse sentido, a condição menos fria e salina das águas do Estreito de Gerlache, provavelmente devido ao aporte das Águas Transicionais com Influência do Mar de Bellingshausen (Garcia *et al.*, 2002), foi relacionada às menores concentrações de OD entre regiões e as maiores concentrações de fosfato, silicato e íon amônio. O papel mais intenso da degradação orgânica aquática nessas águas poderia ter contribuído ao maior consumo de OD e liberação desses nutrientes inorgânicos em relação às demais regiões.

Embora no Estreito de Bransfield percorram as mesmas massas d'águas que ocorrem no EG, as temperaturas mais baixas da coluna d'água do EB comparada ao EG, podem ter favorecido maior produção primária, tendo como indicativo maiores concentrações de clorofila-a e OD. Além disso, as baixas concentrações de clorofila-a nas águas mais superficiais, observadas no Mar de Weddell, confirmaram que regiões marinhas mais afastadas da costa poderiam apresentar menor produção primária (Garibotti *et al.*, 2005; Vernet *et al.*, 2008), possivelmente devido à limitação por ferro e outros micronutrientes advindos de aportes terrestres (Mendes *et al.*, 2012).

Nos gradientes de profundidade, os resultados reforçaram padrões previamente descritos sobre águas superficiais serem mais quentes e menos salinas do que às águas de fundo nos oceanos (Holm-Hansen e Mitchell, 1991; Riser e Johnson, 2008). Além disso, as maiores concentrações de OD e clorofila-a nas águas das classes de menor profundidade, em todas as regiões estudadas, confirmaram a tendência geral de maior produção primária nessa porção da coluna d'água. A estratificação dessa coluna d'água, em função do aporte de degelo, bem como maior disponibilidade de radiação solar são fatores que induzem a maior liberação de oxigênio pela atividade fotoautotrófica observada na zona fótica (Garibotti *et al.*, 2005; Mendes *et al.*, 2012). No entanto, a partir dos 100 m de profundidade, o declínio de OD e clorofila-a indicou uma queda da contribuição autotrófica abaixo da camada de mistura (Hoppema *et al.*, 2002),

---

devido à escassez de luz (Mitchell *et al.*, 1991). O aumento abrupto de temperatura associado à intensa redução de OD, na classe 501-1000 m no Mar de Weddell, também refletiu a complexa hidrografia de massas d'águas que ocorrem nessa região (Klatt *et al.*, 2005).

As diferentes relações do OD com as demais variáveis, obtidas a partir da regressão dos quadrados mínimos parciais (PLS), confirmaram as diferenças observadas no gradiente entre superfície e fundo. As águas mais superficiais, menos frias e mais ricas em fitoplâncton, em todas as regiões estudadas, apresentaram balanço heterotrófico menos intenso, refletindo relações positivas do OD com temperatura e clorofila-*a*. Já as águas mais profundas, frias e salinas apresentaram um balanço mais heterotrófico refletindo relações negativas do OD com profundidade e salinidade.

A potencial diferença metabólica relacionada ao aumento de profundidade poderia ter contribuído para a maior concentração de nutrientes nas águas de fundo em comparação às de superfície. Assim, as maiores concentrações de fosfato estiveram relacionadas com as regiões de maior caráter heterotrófico, MW, EG e EB. A marcante relação negativa do silicato com o OD, em todas as regiões de estudo, pode sugerir um menor consumo pela produção primária de diatomáceas (Dugdale *et al.*, 1995), associado ao seu potencial aporte advindo dos estoques do fundo oceânico (Isla *et al.*, 2004).

No sentido de remover da temperatura a autocorrelação significativa com sua queda nas águas de fundo, foi realizada a regressão linear do OD com essa variável em distintas classes de profundidade. As diferentes relações observadas entre OD e temperatura em cada profundidade confirmaram que as condições menos frias poderiam favorecer o balanço autotrófico na zona fótica superficial da coluna d'água (regressões positiva ou não significativa) e o balanço heterotrófico mais no fundo (regressões negativas). Relações positivas ou mesmo não significativas entre OD e temperatura sugerem o estímulo do balanço autotrófico, uma vez que uma regressão linear negativa seria esperada pelo efeito físico-químico da condição térmica sobre os gases dissolvidos na água (Garcia e Gordon, 1992). Por outro lado, taxas observadas de decréscimo linear de OD significativamente mais acentuadas do que as esperadas pelo efeito físico-químico com o aumento da temperatura (Garcia e Gordon, 1992)

---

indicaram o estímulo do balanço heterotrófico nas águas de fundo. Portanto, a resposta ao aquecimento entre profundidades nas águas do oceano Antártico poderia ser distinta, comparando camadas de balanço metabólico menos e mais heterotrófico na superfície e no fundo, respectivamente.

Contudo essa relação não foi observada para os oceanos que circundam os demais continentes (López-Urrutia *et al.*, 2006). O aumento de temperatura, aplicado aos demais oceanos, contribuiu para o favorecimento do metabolismo heterotrófico, como nas águas frias da Antártica, entretanto esse processo foi evidenciado na zona fótica (López-Urrutia *et al.*, 2006; Wohlers *et al.*, 2009) em vez das águas de fundo. Regaudie-de-Gioux e Duarte (2012) também verificaram uma redução na razão produção/respiração de cerca de 25%, intensificando o balanço heterotrófico relacionado às mais altas temperaturas na zona fótica dos oceanos.

Assumindo as regressões lineares entre os dados observados de OD e temperatura e os cenários de aquecimento global do IPCC, evidenciamos que o aumento de temperatura poderia intensificar ainda mais a queda de oxigênio pelo metabolismo heterotrófico nas águas de fundo. Desse modo, realizamos alguns cálculos visando estimar os efeitos de perda de biodiversidade bentônica devido à possível redução da disponibilidade de O<sub>2</sub> nas águas de fundo, em função dos cenários de aquecimento global (tabela 3).

Nossas estimativas indicaram uma diminuição de oxigênio dissolvido entre -0,3 e -3,7 mg L<sup>-1</sup>, que poderiam corresponder a perdas de 1 a 65% da biodiversidade marinha. No cenário de acréscimo de 1,8 °C na temperatura, as regiões mais sensíveis seriam Mar de Weddell e o Estreito de Bransfield com perdas de 21 e 16%, respectivamente, da biota bentônica. No cenário mais drástico, aumento de 4,0 °C, a região do Mar de Weddell poderia ter perdas de 65% e o Estreito de Gerlache 63%. Weddell-IJR apresentou as perdas mais baixas de 1 e 3% nos cenários mais e menos conservativo, respectivamente.

O diferencial de Weddell-IJR em relação às demais regiões foi o predomínio de metabolismo autotrófico. Essa simulação sugeriu que, apesar da condição de aumento de temperatura, ecossistemas com balanço autotrófico poderiam apresentar baixas alterações de OD e subsequente menor perda de biodiversidade. Por outro lado, as regiões com balanço maior para metabolismo heterotrófico tenderiam a ter aumento

---

ainda mais elevado desses processos, contribuindo com a depleção do oxigênio dissolvido. Dessa forma, a combinação do aumento de temperatura e baixas concentrações de oxigênio poderiam resultar em perdas drásticas da biota bentônica dos oceanos (Vaquer-Sunyer e Duarte, 2008).

**Tabela 3:** Simulação de diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e perda de biodiversidade (%) aplicada para a profundidade máxima de cada região estudada, a partir dos dados de oxigênio obtidos e dos cenários de aumento de temperatura apresentados pelo 4º Relatório de Avaliação do GT1 para o IPCC, 2007.

Cenário IPCC <sup>1</sup>	Melhor Estimativa (°C) <sup>1</sup>	Diminuição de Oxigênio Dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ) <sup>2</sup>				
		Estreito de Bransfield (1001-2000 m)	Estreito de Gerlache (501-1000 m)	Mar de Weddell (2001-3000 m)	Weddell-ilha James Ross (501-1000 m)	
B1	1,8	-1,1	-1,5	-1,7	-0,3	Perda de Biodiversidade <sup>3</sup>
		16%	9%	21%	1%	
A1FI	4,0	-2,5	-3,3	-3,7	-0,8	Perda de Biodiversidade <sup>3</sup>
		26%	63%	65%	3%	

1 – Projeção de aumento de temperatura (melhor e pior cenários) obtida a partir do 4º Relatório de Avaliação do GT1 para o IPCC (Alley *et al.*, 2007)

2 – Diferença (em percentagem) entre as concentrações OD obtidas com os dados reais e as projeções do IPCC (melhor e pior cenários). O cálculo que resultou na [O<sub>2</sub>] foi realizado a partir da equação da reta, referente aos gráficos que foram apresentados na figura 10. Para os cálculos foram consideradas as médias de temperatura e salinidade referentes aos períodos de coleta de cada região.

3 – Para realizar os cálculos percentuais de perda de biodiversidade foi considerado o gráfico de concentração letal de oxigênio, figura 2A apresentado por Vaquer-Sunyer e Duarte (2008).

Nossos resultados (apresentados na figura 10) confirmam que os processos metabólicos podem ser intensamente sensíveis à alteração de temperatura (Duarte *et al.*, 2001; del Giorgio e Duarte, 2002; Wohlers *et al.*, 2009; Gudasz *et al.*, 2010). A variação observada de OD no gradiente de profundidade e em diferentes temperaturas, nas águas de fundo de um oceano gelado (Antártico) sustentou que cenários de aquecimento poderiam substituir importantes processos de síntese por degradação da

matéria orgânica. A produção de gases, que intensificam o próprio aquecimento global, e a hipoxia, importante condição de redução da biodiversidade, poderiam ser estimulados nessas profundidades mais elevadas, sítios preferenciais onde a matéria orgânica é depositada (Isla *et al.*, 2004) e onde relevante biodiversidade é estabelecida (Vaquer-Sunyer e Duarte, 2008).

Portanto, nossos resultados evidenciam que a variabilidade de um gás metabólico importante e fundamental como o oxigênio no oceano Antártico, pode ser sensível a incrementos de temperatura. Potencial depleção de oxigênio poderia levar a modificações na cadeia trófica, alcançando níveis mais baixos que poderiam ser relacionados à mortalidade de espécies, desde produtores primários a consumidores de topo, especialmente em cenários mais drásticos de aquecimento. Assim, reforçamos a necessidade de pesquisas sobre os efeitos metabólicos das mudanças climáticas nas regiões polares como a Antártica, pois estes processos podem ter uma abrangência global.

---

## 6. CONCLUSÃO

- O oceano Antártico apresentou heterogeneidade espacial entre as regiões estudadas em relação às concentrações de nutrientes, de clorofila-*a*, de oxigênio, temperatura e salinidade. O predomínio de processos autotróficos foi evidenciado, em particular em Weddell-IJR, onde as maiores concentrações de OD e clorofila-*a* e as menores de nutrientes foram encontradas, enquanto que nas demais áreas o caráter heterotrófico destacou-se, especialmente para o Estreito de Gerlache, que apresentou os mais elevados níveis de nutrientes, assim como do íon amônio, e as menores concentrações de OD e clorofila-*a*, reforçando um predomínio de processos heterotróficos.
  
  - Os processos autotróficos estiveram mais evidentes onde foram encontradas as maiores concentrações de clorofila-*a*, possivelmente favorecido pela estratificação da coluna d'água, aporte de degelo carreando nutrientes e disponibilidade de luz. A partir dos 100 m as concentrações de OD diminuíram e houve queda de temperatura, as menores concentrações de clorofila-*a*, somados aos demais fatores indicaram menor atividade fotossintética a partir dessa profundidade.  
Essas relações também foram reforçadas pelas análises de regressão múltipla (PLS) que apresentaram relações positivas de OD com clorofila-*a* e temperatura na região de superfície de Weddell-IJR e relações negativas com profundidade, salinidade e temperatura nas águas de fundo das demais regiões.
  
  - O balanço heterotrófico também foi evidenciado pela subsaturação de OD em todas as regiões. O efeito físico-químico da temperatura sobre os gases dissolvidos na água apontou esse caráter heterotrófico, entretanto, a condição menos fria na camada superficial da coluna d'água (superfície aos 100 m) poderia favorecer o metabolismo autotrófico em todas as regiões. Já nas águas
-

de fundo o metabolismo predominante seria de fato o heterotrófico, evidenciado pelas taxas mais acentuadas de queda de oxigênio do que aquelas esperadas pelo efeito físico-químico.

Entretanto, os demais oceanos, em condições de aumento de temperatura da coluna d'água tendem a metabolismo heterotrófico mesmo na zona fótica.

- Pelas projeções apresentadas pelo IPCC (2007), os cenários de aumento de temperatura de +1,8 e +4,0 °C representariam uma diminuição de OD de -0,3 a -3,7 (mg L<sup>-1</sup>) refletindo em perdas de 1 a 65% da biota bentônica dos oceanos. Na simulação realizada por esse trabalho a região de Weddell-IJR sofreria as menores perdas (1 a 3%), possivelmente em virtude de um metabolismo autotrófico mais evidenciado.

Contudo, os ecossistemas de um modo geral já têm apresentado alterações em virtude do aquecimento global, pois os processos biológicos são sensíveis ao aumento de temperatura. A potencial depleção de oxigênio pode acarretar em alterações de diversas ordens, como na cadeia alimentar, composição das comunidades, aumento de hipoxia e de zonas mortas nos oceanos.

Os efeitos metabólicos das mudanças climáticas nas regiões polares como a Antártica, podem ter uma abrangência global.

---

## 7.0 REFERÊNCIAS

- Agustí, S.; Satta, M. P.; Mura, M. P. (2004). Summer community respiration and pelagic metabolism in upper surface Antarctic waters. *Aquatic Microbial Ecology* 35: 197–205.
- Ahn, J.; Brook, E.J (2008). Atmospheric CO<sub>2</sub> and climate on millennial time scales during the last glacial period. *Science*, 322: 83-85.
- Alley, R.; Berntsen, T.; Bindoff, N. L.; Chen, Z.; Chidthaisong, A.; Friedlingstein, P.; Gregory, J.; Hegerl, G.; Heimann, M.; Hewitson, B.; Hoskins, B.; Joos, F.; Jouzel, J.; Kattsov, V.; Lohmann, U.; Manning, M.; Matsuno, T.; Molina, M.; Nicholls, N.; Overpeck, J.; Qin, D.; Raga, G.; Ramaswamy, V.; Ren, J.; Rusticucci, M.; Solomon, S.; Somerville, R.; Stocker, T.F.; Stott, P.; Stouffer, R. J.; Whetton, P.; Wood, R. A.; Wratt, D. (2007). Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas. Sumário para os formuladores de política. *4o Relatório de Avaliação GT1 do IPCC*, 25p.
- Aminot, A.; Chaussepied, M. (1983). *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Paris. Brest. CNEXO. 395p.
- Araujo, R. G. (2012). *Influência dos parâmetros ambientais na variabilidade espacial e interanual do fitoplâncton no Estreito de Bransfield, Antártica*. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica), Rio Grande – RS, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 94p.
- Bastviken, D.; Tranvik, L. J.; Downing, J.A; Crill, P. M.; Enrich-Prast, A. (2011). Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, 331.
- Benninghoff, W. S. (1987). The Antarctic Ecosystem. *Environment International*, 13: 9–14.
- Brewer, P. G.; Peltzer, E. T. (2009). Limits to marine life. *Science*, 324: 347–348.
- Brown, J. H.; Gillooly, J. F.; Allen, A. P.; Savage, V. M.; West, G. B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 85: 1771–1789.
- Brusca, R. C., Brusca, G. J. (2007). *Invertebrados*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 968p.
- Cole, J. J.; Pace, M. L.; Carpenter, S. R.; Kitchell, J. F. (2000). Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnology and Oceanography*, 45: 1718–1730.
- del Giorgio, P. A.; Duarte, C. M. (2002). Respiration in the open ocean. *Nature*, 420: 379–384.
- Diaz, R. J.; Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321: 926–929.
- Dillon, M. E.; Wang, G.; Huey, R. B. (2010). Global metabolic impacts of recent climate warming. *Nature*, 467: 704-788.
- Duarte, C. M.; Agustí, S. (1998). The CO<sub>2</sub> balance of unproductive aquatic ecosystems. *Science*, 281: 234–236.
-

- Duarte, C. M.; Agustí, S.; Arístegui, J.; González, N.; Anadón, R. (2001). Evidence for a heterotrophic subtropical northeast Atlantic. *Limnology Oceanography* 46 (2): 425–428.
- Duarte, C. M.; Regaudie-de-Gioux, A. (2009). Thresholds of gross primary production for the metabolic balance of marine planktonic communities. *Limnology and Oceanography*, 54 (3): 1015–1022.
- Duarte, V. S. (2006). *Estrutura e variabilidade interanual das massas de água no Estreito de Bransfield (Antártica) durante os verões austrais de 2003 e 2004*. Dissertação (Mestrado em Geociências). Porto Alegre-RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – FURG, 143p.
- Dugdale, R. C.; Wilkerson, F. P.; Minas, H. J. (1995). The role of a silicate pump in driving new production. *Deep-Sea Research I*, 42 (5): 697–719.
- Garcia, H. E.; Gordon L. I. (1992). Oxygen solubility in seawater: better fitting equations. *Limnology Oceanography* 37 (6): 1307–1312.
- Garcia, M. A.; Castro, C. G.; Rios, A. F.; Doval, M. D.; Roson, G.; Gomis, D.; Lopez, O. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep-Sea Research II*, 49: 585–602.
- Garibotti, I. A.; Vernet, M.; Smith, R. C.; Ferrario, M. E. (2005). Interannual variability in the distribution of the phytoplankton standing stock across the seasonal sea-ice zone west of the Antarctic Peninsula. *Journal of Plankton Research*, 27 (8): 825–843.
- Gudasz, C.; Bastviken, D.; Steger, K.; Premke, K.; Sobek, S.; Tranvik, L. J. (2010). Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 466: 478–481.
- Holm-Hansen, O.; Mitchell, B. G. (1991). Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Research*, 38: 961–980.
- Hönisch, H.; Ridgwell, A.; Schmidt, D. N.; Thomas, E.; Gibbs, S. J.; Sluijs, A.; Zeebe, R.; Kump, L.; Martindale, R. C.; Greene, S. E.; Kiessling, W.; Ries, J.; Zachos, J. C.; Royer, D. L.; Barker, S.; Marchitto Jr., T. M.; Moyer, R.; Pelejero, C.; Ziveri, P.; Foster, G. L.; Williams, B. (2012). The Geological Record of Ocean Acidification. *Science*, 335: 1058–1063.
- Hoppema, M.; Baar, H. J. W.; Bellerby, R. G. J.; Fahrbach, E.; Bakker, K. (2002). Annual export production in the interior Weddell Gyre estimated from a chemical mass balance of nutrients. *Deep-Sea Research II*, 49: 1675–1689.
- Hoskuldsson, A. (1988). PLS Regression Methods. *Journal of Chemometrics* 2: 211–228.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming is the signal already. *Tree*, 15 (2): 56–61.
- Isla, E.; Masqué, P.; Palanques, A.; Guillén, J.; Puig, P.; Sanchez-Cabeza, J. A. (2004). Sedimentation of biogenic constituents during the last century in western Bransfield
-

- and Gerlache Straits, Antarctica: a relation to currents, primary production, and sea floor relief. *Marine Geology* 209: 265–277.
- Justino, F.; Hastenreiter, F.; Grimm, A.; Schaefer, C. (2007). Impacto da concentração de dióxido de carbono atmosférico no gelo marinho Antártico. *Oecologia Brasiliensis*, 11 (1): 69–77.
- Klatt, O.; Fahrbach, E.; Hoppema, M.; Rohardt, G. (2005). The transport of the Weddell Gyre across the Prime Meridian. *Deep Sea Research II*, 52 (3-4): 513–528.
- Koroleff, F. (1969). Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. ICES, C. M. 1969/C:9 *Hydr. Comm.*
- Lopez, O.; Garcia, M. A.; Gomis, D.; Rojas, P.; Sospedra, J.; Sanchez-Arcilla, A. (1999). Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep-Sea Research I*, 46: 1755–1778.
- Lorenzo, L. M.; Arbones, B.; Figueiras, F. G.; Tilstone, G. H.; Figueroa, F. L. (2002). Photosynthesis, primary production and phytoplankton growth rates in Gerlache and Bransfield Straits during Austral summer: cruise FRUELA 95. *Deep-Sea Research II* 49: 707–721.
- López-Urrutia, A.; Martin, E. S.; Harris, R. P.; Irigoien, X. (2006). Scaling the metabolic balance of the ocean. *PNAS*, 103 (23): 8739–8744.
- Machado, C. M.; Brito, T (ed) (2006). *Antártica: ensino fundamental e ensino médio*. Brasília: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica (Coleção Explorando o Ensino, v. 9), 167p.
- Marotta, H. (2006). Os fatores reguladores do metabolismo aquático. *Oecologia Brasiliensis*, 10 (2): 177–185.
- Marotta, H.; Duarte, C. M.; Guimarães-Souza, B. A.; Enrich-Prast, A. (2012). Synergistic control of CO<sub>2</sub> emissions by fish and nutrients in a humic tropical lake. *Oecologia* 168 (3): 839–847.
- Marotta, H.; Duarte, C. M.; Meirelles-Pereira, F.; Bento, L.; Esteves, F. A.; Enrich-Prast, A. (2010). Long-Term CO<sub>2</sub> Variability in Two Shallow Tropical Lakes Experiencing Episodic Eutrophication and Acidification Events. *Ecosystems* 13 (3): 382–392.
- Mendes Junior, C. W.; Arigony-Neto, J.; Ribeiro, R. R.; Simões, J. C. (2009). Uso de imagens ERS SAR no monitoramento de zonas superficiais de neve e gelo da região nordeste da Península Antártica. *Pesquisas em Geociências* 36 (2): 203–222.
- Mendes, C. R. B.; Souza, M. S.; Garcia, V. M. T.; Leal, M. C.; Brotas, V.; Garcia, C. A. E. (2012). Dynamics of phytoplankton communities during late summer around the tip of the Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research I*, 65: 1–14.
- Mitchell, B. G.; Brody, E. A.; Holm-Hansen, O.; McClain, C.; Bishop, J. (1991). Light limitation of phytoplankton biomass and macronutrient utilization in Southern Ocean. *Limnology and Oceanography*, 36 (8): 1662–1677.
- Montagnes, D. J. S.; Morgan, G.; Bissinger, J. E.; Atkinson, D.; Weisse, T. S. (2008). Short-term temperature change may impact freshwater carbon flux. a microbial perspective. *Global Change Biology*, 14: 2823–2838.
-

- Mullin, J. B.; Riley, J. P. (1955). The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Anal. Chim. Acta*, 12: 162–170.
- Murphy, J.; Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31–36.
- Odum, H. T. (1956). Primary Production in Flowing Waters. *Limnology and Oceanography*, 1 (2): 102–117.
- Orsi, A. H.; Johnson, G. C.; Bullister, J. L. (1999). Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Progress in Oceanography*, 43: 55–109.
- Pollery, R. C. G. (2005). *Disponibilidade e distribuição de nutrientes e clorofila-a nas águas adjacentes à península Antártica (verões de 2000/01, 2001/02, 2002/03)*. Tese (Doutorado em Geociências), Niterói-RJ, Universidade Federal Fluminense - UFF, 159p.
- Regaudie-de-Gioux, A.; Duarte, C. M. (2012). Temperature dependence of planktonic metabolism in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 26 (1).
- Riser, S. C.; Johnson, K. S. (2008). Net production of oxygen in the subtropical ocean. *Nature*, 451: 323–325.
- Schulz, S.; Conrad, R. (1996). Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance. *FEMS Microbiology Ecology*, 20: 1–14.
- Sobek, S.; Tranvik, L. J. (2005). Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemical Cycles* 19 (2).
- Sobek, S.; Tranvik, L. J.; Prairie, Y. T.; Kortelaine, P.; Cole, J.J (2007). Patterns and regulation of dissolved organic carbon: an analysis of 7.5000 widely distributed lakes. *Limnology Oceanography*, 52 (3): 1208–1219.
- Street, J. H.; Paytan, A. (2005). Iron, Phytoplankton Growth, and the Carbon Cycle. In . Sigel, A.; Sigel, H.; Sigel R. K. O. (ed), *Metal Ions in Biological Systems*, vol. 43CRC Press, p 153-167.
- Strickland, J. D. H.; Parsons, T. R. (1977). *A practical handbook of seawater analysis*. 167th ed. Canada. Fisheries Research Board of Canada. 310p.
- Tranvik, L. J.; Downing, J.A.; Cotner, J.B.; Loiselle, S. A.; Striegl, R. G.; Ballatore, T. J.; Dillon, P.; Finlay, K.; Fortino, K.; Knoll, L. B.; Kortelainen, P. L.; Kutser, T.; Larsen, S.; Laurion, I.; Leech, D. M.; McCallister, S. L.; McKnight, D. M.; Melack, J. M.; Overholt, E.; Porter, J. A.; Prairie, Y.; Renwick, W. H.; Roland, F.; Sherman, B. S.; Schindler, D. W.; Sobek, W.; Tremblay, A.; Vanni, M. J.; Verschoor, A. M.; von Wachenfeldt, Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54: 2298–2314.
- Treguer, P.; Jacques, G. (1992). Dynamics of nutrients and phytoplankton, and fluxes of carbon, nitrogen and silicon in the Antarctic Ocean. *Polar Biology*, 12: 149–162.
- Vaquero-Sunyer, R.; Duarte, C. M. (2008). Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *PNAS*, 105 (40): 15452–15457.
-

- Vernet, M.; Martinson, D.; Iannuzzi, R.; Stammerjohn, S.; Kozlowski, W.; Sines, K.; Smith, R.; Garibotti, I. (2008). Primary production within the sea-ice zone west of the Antarctic Peninsula: I - Sea ice, summer mixed layer, and irradiance. *Deep Sea Research II*, 55: 2068–2085.
- Wadham, J. L.; Arndt, S.; Tulaczyk, S.; Stibal, M.; Tranter, M.; Telling, J. et al. (2012). Potential methane reservoirs beneath Antarctica. *Nature*, 488: 633–637.
- Walter, K. M.; Zimov, S.A; Chanton, J.P; Verbyla, D.; Chapin, F.S (2006). Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 443: 71–75.
- Wohlers, J.; Engel, A.; Zollner, E.; Breithaupt, P.; Jurgens, K.; Hoppe, H. G.; Sommer U.; Riebesell, U. (2009). Changes in biogenic carbon flow in response to sea surface warming. *PNAS*, 106 (17): 7067–7072.
- Wood, E. D.; Armstrong, F. A. J.; Richards, Francis A. (1967). Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite. *Journal Marine Biology*, 47: 23–31.
- Zar, J. H. (1999). *Biostatistical Analysis*. Upper Saddle River. Prentice-Hall. 663p.
- Zhou, M.; Nordhausen, W. Huntley M. (1994). ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter. *Deep-Sea Research I* 41 (9): 1425–1445.
- Zhou, M.; Niiler, P. P.; Hu, J. H. (2002). Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep-Sea Research I*, 49: 267–280.
- Zimov, S. A.; Davydov, S. P.; Zimova, G. M.; Davydova, A. I.; Schuur, E. A. G.; Dutta, K.; Chapin, F.S. (2006). Permafrost carbon. Stock and decomposability of a globally significant carbon pool. *Geophysical Research Letters*, 33 (20).
-

