ANA BEATRIZ LEITE CAVALCANTE

**Indicadores biogeoquímicos de massas d'água costeiras e oceânicas no sudoeste do
oceano Atlântico Sul, com ênfase em um transecto em 34,5 °S
(Rede Transatlântica SAMOC)**

São Paulo

2020

ANA BEATRIZ LEITE CAVALCANTE

**Indicadores biogeoquímicos de massas d'água costeiras e oceânicas no sudoeste do oceano Atlântico Sul, com ênfase em um transecto em 34,5 °S
(Rede Transatlântica SAMOC)**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Elisabete de Santis Braga da Graça Saraiva

São Paulo

2020

CAVALCANTE, Ana Beatriz Leite. **Indicadores biogeoquímicos de massas d'água costeiras e oceânicas no sudoeste do oceano Atlântico Sul, com ênfase em um transecto em 34,5 °S (Rede Transatlântica SAMOC).** Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Química.

Aprovado em: 16/06/2020.

Versão corrigida

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivone e
Sebastião, por todo o esforço, apoio e carinho ao
longo da minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Elisabete Braga, que me acolheu tão bem quando cheguei em São Paulo, pela orientação, amizade, carinho e por todas as experiências boas que vivi durante esses dois anos, que muito contribuíram para o meu crescimento científico e pessoal.

Ao Prof. Dr. Edmo Campos, pela confiança, atenção e oportunidades que me deu ao longo desses dois anos de trabalho.

Ao Instituto Oceanográfico e a todos que lá trabalham, pela estrutura para realização da pesquisa e disciplinas. Agradeço à secretaria de pós-graduação, Daniel, Letícia e especialmente à Ana Paula, pelo auxílio, disponibilidade, desabafos e caronas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de mestrado que possibilitou a realização desse trabalho e à Universidade de São Paulo pelo auxílio da bolsa do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo fomento do projeto “Variabilidade interanual dos transportes meridionais através da rede transatlântica SAMOC” (SAMBAR), no qual este trabalho está inserido.

À tripulação do N/Oc. *Alpha Crucis* e aos pesquisadores que participaram das campanhas de 2018 e 2019 do projeto SAMBAR, por possibilitarem a aquisição dos dados obtidos neste trabalho e pelo apoio e amizade nos dias de mar.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Osmar Möller e Prof. Dr. Milton Kampel por terem se disposto a participar e fazer contribuições valiosas para a melhoria deste trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Biogeoquímica de Nutrientes, Micronutrientes e Traços nos Oceanos (Labnut): Amanda, Ana Sofia, Bruno Sutti, Bruno Pegoraro, Carol, Chiara, Eduardo, Giovana, Gláucia, Henrique, Luanny, Luma e Nixon. Muito obrigada pela acolhida, companhia diária e por todo o auxílio e amizade durante as análises e campos. Este trabalho também é um pouquinho de cada um de vocês.

Ao Dr. Vitor Chiozzini, por ter sido um anjo em minha vida, pelas conversas, ensinamentos, ideias, acompanhamento durante as análises e por oferecer calma em momentos de desespero.

Aos meus pais, Ivone e Sebastião, por serem meus maiores torcedores em tudo o que eu faço. Obrigada por todo o amor, confiança e dedicação, desde sempre. Sei de todo o esforço que vocês tiveram para que eu pudesse estar aqui e espero deixar vocês orgulhosos! Nunca vou conseguir agradecer o suficiente.

À Cristina e Rafael, pelo auxílio durante o período de mudança e por terem sempre feito me sentir mais perto de casa durante as visitas. À tia Nena e Sérgio, que também foram fundamentais no período de mudança para São Paulo, obrigada pelo abrigo, acolhida e pelas palavras inspiradoras.

Ao 152 A, Débora e Jamille, por termos construído juntas um lar tão acolhedor, palco de muitas alegrias, tristezas, conquistas e perrengues. O convívio diário com vocês tornaram a vida em São Paulo muito mais leve e divertida, fico feliz em ver o quanto a gente cresceu nesses dois anos.

Aos amigos “perdidos” na USP, Basílio, Derley, João Pedro, Luanny, Lucas, Mattheus, Paty, Tony e Veni, por serem minha família, apoio e por termos compartilhado tantos momentos bons e alegres desde o início. Agradeço também à colônia cearense no IO, Igor Uchôa, por toda a paciência, auxílio na elaboração de gráficos e ombro amigo e ao Felipe Rodrigues, pela motivação, apoio, abrigo (literalmente) e risadas.

Ao Talles Felix, por ter sido meu suporte (e saudade) ao longo desses dois anos, pelo carinho, cuidado, por sempre acreditar em mim, me tranquilizar e alegrar.

A todos os amigos de Fortaleza, que mesmo de longe se fizeram presentes e a todos aqueles que vieram trazer alegria com suas visitas a São Paulo (Patroas, labomarianos), muito obrigada. Um agradecimento especial à Letícia Melo, pela ajuda essencial no período final de confecção desta dissertação, pela sua paciência, calma e sábias palavras que me fizeram respirar fundo e seguir em frente.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Quando saímos da zona de conforto, a gente não entra na zona de desconforto, e sim na zona de aprendizagem.”

(Murilo Gun)

RESUMO

CAVALCANTE, Ana Beatriz Leite. **Indicadores biogeoquímicos de massas d'água costeiras e oceânicas no sudoeste do oceano Atlântico Sul, com ênfase em um transecto em 34,5 °S (Rede Transatlântica SAMOC)**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico é um importante mecanismo de distribuição de calor, sal, carbono e nutrientes entre hemisférios, possuindo um papel fundamental na regulação climática. Essa circulação é composta por massas d'água originárias do Atlântico Norte e Sul, caracterizadas por manterem as propriedades específicas do seu local de formação em seu deslocamento pelos oceanos. Entretanto, pequenas alterações nas propriedades dessas massas d'água podem causar mudanças substanciais na circulação, afetando a distribuição de calor e consequentemente, o clima. As massas d'água são comumente identificadas a partir de dados de temperatura (T), salinidade (S) e densidade, porém, propriedades biogeoquímicas, como o oxigênio dissolvido (OD) e nutrientes podem ser associados aos parâmetros termohalinos para complementar o monitoramento e fornecer evidências de processos hidrodinâmicos e biogeoquímicos que podem estar ocorrendo em águas costeiras e oceânicas. Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo principal associar indicadores biogeoquímicos (OD, silicato, fosfato e nitrato) às características termohalinas (T, S e densidade) de identificação das massas d'água presentes no sudoeste do Atlântico Sul, com foco na região costeira próxima à desembocadura do rio da Prata e ao longo da porção oeste de um transecto oceânico em 34,5°S. Os dados foram adquiridos durante duas campanhas realizadas em períodos sazonais diferentes, em abril de 2018 (outono) e junho de 2019 (inverno), tornando-se possível avaliar as diferenças sazonais observadas entre os períodos, especialmente sobre águas costeiras. Nove massas d'água foram observadas na região, com as seguintes características principais: *i*) baixa salinidade ($<33,5$) e altas concentrações de silicato (máx. $46,72 \mu\text{mol kg}^{-1}$ no inverno) em águas superficiais relacionadas à Água da Pluma do Prata, que foi observada até $51,8^{\circ}\text{W}$; *ii*) alta concentração de nutrientes e o menor valor de oxigênio ($152,95 \mu\text{mol kg}^{-1}$) dentre as duas campanhas em uma área mais profunda da plataforma continental ocupada pela Água Subtropical de Plataforma, evidenciando um canal em $33,6^{\circ}\text{S}/52,2^{\circ}\text{O}$ e processo de regeneração de nutrientes; *iii*) Água Tropical com salinidade máxima ($37,04$ no outono) e baixas concentrações de nutrientes; *iv*) aumento relativo das concentrações de nitrato (máx. $23,17 \mu\text{mol kg}^{-1}$) na Água Central do Atlântico Sul, que atuou

como o melhor indicador biogeoquímico dessa massa, também observada ao fim da plataforma continental; *v*) Água Intermediária Antártica apresentou altos valores de OD (máx. 256,53 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação às massas d'água adjacentes e valores relativamente altos de fosfato e nitrato; *vi*) Água Circumpolar Superior foi distinta principalmente pela baixa concentração de OD (mín. 182,94 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) e máximo vertical de nutrientes; *vii*) um ligeiro aumento de salinidade acompanhado por uma elevação dos teores de OD e diminuição de nutrientes foi observado na Água Profunda do Atlântico Norte; *viii*) os níveis de oxigênio voltaram a diminuir (mín. 208,93 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) indicando a presença da Água Circumpolar Inferior; e *ix*) a Água Antártica de Fundo foi acompanhada por valores máximos de silicato (máx. 144,92 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). Os dados aqui apresentados reforçaram a concepção de que indicadores biogeoquímicos podem ser utilizados como traçadores complementares de massas d'água, fornecendo uma base mais robusta de informações sobre as massas d'água do Atlântico Sul, que certamente auxiliarão futuros trabalhos de monitoramento.

Palavras-chave: Oxigênio dissolvido. Nutrientes. Traçadores biogeoquímicos. Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico. Rio da Prata.

ABSTRACT

CAVALCANTE, Ana Beatriz Leite. **Biogeochemical indicators of coastal and oceanic water masses in the Southwestern Atlantic Ocean, with emphasis on a transect at 34.5 °S (SAMOC transatlantic network)**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

The Atlantic Meridional Overturning Circulation is an important mechanism for the distribution of heat, salt, carbon and nutrients between hemispheres, having a fundamental role in climate regulation. This circulation is formed by water masses of Northern and Southern origin, which are characterized by the maintenance of specific properties from their formation region along their displacement through the oceans. However, small changes in water masses properties can cause substantial modifications in circulation, affecting the heat distribution and, consequently, the climate. Water masses are commonly identified from temperature (T), salinity (S) and density data, however, biogeochemical properties, such as dissolved oxygen (DO) and nutrients, can be associated with thermohaline parameters to complement monitoring studies and provide evidence of hydrodynamic and biogeochemical processes that might be occurring in coastal and ocean waters. Thus, the main objective of this work was to associate biogeochemical indicators (DO, silicate, phosphate and nitrate) to the thermohaline characteristics (T, S and density) of identification of the water masses present in the southwestern region of the South Atlantic, focusing on the coastal region near the La Plata River mouth and along the western portion of an oceanic transect at 34.5 °S. The data were acquired during two campaigns carried out in different seasonal periods, in April 2018 (fall) and June 2019 (winter), making it possible to assess the seasonal differences observed between the periods, especially on coastal waters. Nine water masses were observed in the region, with the following main characteristics: *i*) low salinity (<33.5) and high silicate concentrations (max. $46.72 \mu\text{mol kg}^{-1}$ in winter) in surface waters related to Plata Plume Water, which was observed up to 51.8°W ; *ii*) high concentration of nutrients and the lowest oxygen value ($152.95 \mu\text{mol kg}^{-1}$) among the two campaigns in a deeper area of the continental shelf occupied by Subtropical Shelf Water, evidencing a channel at $33.6^\circ\text{S}/52.2^\circ\text{W}$ and nutrient regeneration process; *iii*) Tropical Water with maximum salinity (37.04 during fall) and low nutrient concentrations; *iv*) relative increase in nitrate concentrations (max. $23.17 \mu\text{mol kg}^{-1}$) in South Atlantic Central Water, which was the best biogeochemical indicator of this mass, also observed at the end of the continental shelf; *v*) Antarctic Intermediate Water showed high DO values (max. $256.53 \mu\text{mol kg}^{-1}$) in relation to

adjacent water masses and relatively high phosphate and nitrate values; *vi*) Upper Circumpolar Deep Water was distinguished mainly by the low DO concentration (min. 182.94 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) and vertical maximum of nutrients; *vii*) a slight increase in salinity followed by an increase in DO levels and a decrease in nutrients were observed in North Atlantic Deep Water; *viii*) oxygen levels decreased again (min. 208.93 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) indicating the presence of Lower Circumpolar Deep Water; and *ix*) Antarctic Bottom Water was followed by maximum silicate values (max. 144.92 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). The data presented here reinforced the concept that biogeochemical indicators can be used as complementary water mass tracers, providing a more robust base of information about the South Atlantic water masses, which will certainly help future monitoring works.

Keywords: Dissolved oxygen. Nutrients. Biogeochemical tracers. Atlantic Meridional Overturning Circulation. La Plata river.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do padrão de circulação superficial entre 20 °S e 50 °S no oceano Atlântico Sul. CA: Corrente das Agulhas.	21
Figura 2 - Desenho esquemático da circulação de larga escala do oceano Atlântico Sul, no qual as setas representam os principais caminhos percorridos por massas d'água em diferentes níveis verticais: superficial e central (vermelho, Água Tropical e Água Central do Atlântico Sul), intermediário (amarelo, Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Superior), profundo (azul, Água Profunda do Atlântico Norte) e abissais (verde, Água Circumpolar Inferior e Água Antártica de Fundo).....	23
Figura 3 - Localização da área de estudo no sudoeste do oceano Atlântico Sul.	29
Figura 4 - Variação sazonal na distribuição da pluma do rio da Prata (linha preta) sobre a plataforma continental do sudoeste do oceano Atlântico Sul considerando os valores de salinidade (< 33,5) durante a) verão (janeiro-março) e b) inverno (julho a setembro).	30
Figura 5 - Principais componentes da circulação superficial que influenciam a região sudoeste do oceano Atlântico Sul.....	31
Figura 6- Localização dos pontos de amostragem no oceano Atlântico Sul, em a) abril de 2018 e b) junho de 2019, durante campanhas do Projeto SAMBAR.	33
Figura 7- Profundidades nas quais foram coletadas amostras de água no Atlântico Sul durante os cruzeiros do Projeto SAMBAR, onde a) são as profundidades amostradas na plataforma continental e b) no talude e oceano aberto durante a campanha de abril de 2018 e c) são as profundidades amostradas na plataforma continental e d) no talude e oceano aberto durante a campanha de junho de 2019.....	35
Figura 8 – Localização do ponto próximo ao início do estuário do rio da Prata no qual foram obtidos os dados médios mensais de descarga fluvial ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em abril de 2018 e junho de 2019.....	43
Figura 9 – Média de velocidade e direção de ventos atuantes sobre a região sudoeste do oceano Atlântico Sul durante o período compreendido entre a) 25 de abril a 1 de maio de 2018 (outono) e b) 21 a 29 de junho de 2019 (inverno). Os vetores representam a velocidade dos ventos, onde o tamanho do vetor relativo a 2 m s^{-1} de velocidade está indicado na figura. A escala de cores é representativa da magnitude da velocidade dos ventos.....	45
Figura 10 – Temperatura média do ar na região sudoeste do Atlântico Sul para os períodos entre a) 25 de abril a 1 de maio de 2018 e b) 21 a 29 de junho de 2019. Os valores de temperatura estão apresentados em graus Kelvin ($0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$).	47
Figura 11 - Histórico da ocorrência de fenômenos ENSO de janeiro de 1980 a julho de 2019. O eixo vertical do gráfico representa o valor da anomalia global de temperatura, enquanto os trechos coloridos em cinza, vermelho e azul retratam os meses de neutralidade, El Niño e La Niña, respectivamente, de acordo com o Oceanic Niño Index (ONI). A linha preta no canto superior direito do gráfico representa o período entre abril de 2018 a junho de 2019.....	48

Figura 12 - Diagramas TS das amostras coletadas na porção sudoeste do oceano Atlântico Sul durante campanha do projeto SAMBAR, em a) abril de 2018 (outono) e b) junho de 2019 (inverno). As isolinhas destacadas no diagrama representam a densidade potencial (kg m^{-3}).	50
Figura 13 - Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na plataforma continental adjacente a fronteira Brasil-Uruguaí durante a) outono 2018 (estações 1 a 8) e b) inverno 2019 (estações 1 a 7) e de salinidade durante c) outono 2018 e d) inverno 2019. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.	52
Figura 14 - Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e salinidade no talude e oceano aberto durante a) e b) outono de 2018 e c) e d) inverno de 2019. Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções. As isolinhas tracejadas em cinza representam os limites de densidade neutra (γ , kg m^{-3}) de cada massa d'água identificada. O campo em branco nas seções de inverno representa a região onde não houve amostragem devido às más condições de tempo.	54
Figura 15 – Seção sinótica de velocidade ao longo da costa (V , em cm s^{-1}) obtida utilizando dados de LADCP coletados durante cruzeiro do Projeto SAMOC-BR, que ocupou a porção oeste do paralelo $34,5^{\circ}\text{S}$ em julho de 2012. Os valores negativos (em azul) indicam um fluxo para sul e os valores positivos (em vermelho) representam um fluxo para norte.	56
Figura 16 - Seção vertical de densidade neutra no talude e oceano aberto durante a campanha de outono 2018. A identificação das massas d'água foi realizada segundo intervalos de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018). Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções.	61
Figura 17 – Distribuição das propriedades biogeoquímicas dentro dos limites de temperatura e salinidade das diferentes massas d'água presentes na plataforma continental (estações de 1 a 8) durante a campanha de abril de 2018 (outono) do Projeto SAMBAR. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros biogeoquímicos.	65
Figura 18 - Distribuição das propriedades biogeoquímicas dentro dos limites de temperatura e salinidade das diferentes massas d'água presentes na plataforma continental (estações de 1 a 7) durante a campanha de junho de 2019 (inverno) do Projeto SAMBAR. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros biogeoquímicos.	66
Figura 19 - Seções verticais de a) temperatura, c) salinidade, e) oxigênio dissolvido e g) porcentagem de saturação de oxigênio durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f, h) do Projeto SAMBAR, realizadas no sudoeste do oceano Atlântico Sul. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.	68
Figura 20 - Seções verticais de a) silicato, c) fosfato, e) nitrito e g) nitrato durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f, h) do Projeto SAMBAR, realizadas no sudoeste do oceano Atlântico Sul. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.	69

Figura 21 - Perfis de salinidade x silicato das amostras coletadas na plataforma continental sudoeste do Atlântico Sul durante o a) outono de 2018 e b) inverno de 2019. A linha em preto representa a regressão linear e o R^2 é o coeficiente de determinação.....	72
Figura 22 - Seções verticais de a) material particulado total em suspensão (MPS), c) material orgânico particulado em suspensão (MOPS) e e) clorofila-a durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f) do Projeto SAMBAR. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.	75
Figura 23 - Diagramas TS referentes aos dados obtidos na campanha do Projeto SAMBAR de abril de 2018 (outono) ao longo da borda oeste do paralelo 34,5 °S. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração de a) oxigênio dissolvido, b) silicato, c) fosfato e d) nitrato.	84
Figura 24 - Diagramas TS referentes aos dados obtidos na campanha do projeto SAMBAR de junho de 2019 (inverno). Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros químicos.	85
Figura 25 – Distribuições verticais de a) oxigênio dissolvido, b) silicato, c) fosfato e d) nitrato no talude e oceano aberto durante a campanha de outono de 2018 do Projeto SAMBAR. As isolinhas tracejadas em cinza representam os limites de densidade neutra (γ , kg m ⁻³) propostos por Valla et al. (2018) para a identificação das massas d'água presentes na região. Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções.	87
Figura 26 - Distribuição vertical de oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato obtida na estação 24 da campanha de outono de 2018 do Projeto SAMBAR. A linha tracejada representa os limites de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018) para identificação das massas d'água presentes na porção oeste do paralelo 34,5 °S.	89
Figura 27 - Estações oceanográficas cujos dados foram utilizados para realizar a comparação interanual das propriedades biogeoquímicas das massas d'água encontradas no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do Projeto SAMBAR. Os números em preto acima do símbolo da estações (estrela) se referem à nomeação das estações em 2018 e os números em cinza abaixo da estrela são relativos à nomenclatura adotada em 2019.	96
Figura 28 – Distribuições de a) temperatura, b) salinidade, c) oxigênio dissolvido, d) silicato, e) fosfato e f) nitrato ao longo da profundidade obtidas em estações semelhantes no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do projeto SAMBAR. Os pontos plotados em forma de “círculo” representam amostras da campanha de 2018 e os triângulos coloridos são referentes as amostras de 2019.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos de temperatura e salinidade empregados na identificação das massas d'água costeiras (relativas à costa norte da Argentina e sul do Brasil) e oceânicas (Atlântico Sul) propostos por vários autores.	24
Tabela 2 - Dados (média e desvio padrão em mL L ⁻¹) de réplicas de amostras de oxigênio dissolvido (OD) obtidas em diferentes profundidades de coleta em 2018 e a 20 m em 2019 para verificação das condições analíticas a bordo.....	37
Tabela 3 - Concentração média, desvio padrão e erro relativo referente às análises dos materiais certificados de referência para fosfato e silicato (KANSO Co. Ltd).....	38
Tabela 4 - Concentração média, desvio padrão e erro relativo referente às análises dos materiais certificados de referência para nitrito e nitrato (KANSO Co. Ltd).....	39
Tabela 5 - Limites de variáveis termohalinas (temperatura potencial e salinidade) propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008) que foram utilizados para identificar as massas d'água encontradas na plataforma continental (até 200 m) adjacente a desembocadura do rio da Prata (sudoeste do Atlântico Sul).	41
Tabela 6 - Limites de densidade neutra (γ , kg m ⁻³) propostos por Valla et al. (2018) para identificar as massas d'água encontradas no talude e oceano aberto ao longo da porção oeste do paralelo 34,5 °S...42	42
Tabela 7 - Faixas de profundidade (m), temperatura (°C), salinidade e densidade neutra (kg m ⁻³) em que as massas d'água presentes na região sudoeste do oceano Atlântico Sul foram observadas durante as campanhas de abril de 2018 (outono) e de julho de 2019 (inverno) do Projeto SAMBAR. As massas d'água presentes sobre a plataforma continental foram identificadas segundo os referenciais termohalinos propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008) e as massas d'água de talude e oceano aberto foram classificadas por faixas de densidade neutra indicados em Valla et al. (2018). Os asteriscos indicam os limites da ACAS em amostras sobre a plataforma continental.	63
Tabela 8- Faixas de variação dos parâmetros termohalinos e biogeoquímicos observados para as massas d'água presentes na plataforma continental durante as campanhas de outono de 2018 e inverno de 2019 do Projeto SAMBAR.	71
Tabela 9 - Faixas de variação dos parâmetros termohalinos e biogeoquímicos observados para as massas d'água presentes no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do Projeto SAMBAR. Nessa região, as massas d'água foram identificadas de acordo com os limites de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018).....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAF	Água Antártica de Fundo
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
ACI	Água Circumpolar Inferior
ACS	Água Circumpolar Superior
AIA	Água Intermediária Antártica
AMOC	<i>Atlantic Meridional Overturning Circulation</i> (Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico)
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
APP	Água da Pluma do Prata
ASTP	Água Subtropical de Plataforma
AT	Água Tropical
CB	Corrente do Brasil
CBg	Corrente de Benguela
CCA	Corrente Circumpolar Antártica
CCPO	Corrente de Contorno Profundo Oeste
Cl- <i>a</i>	Clorofila- <i>a</i>
CNB	Corrente Norte do Brasil
CSA	Corrente do Atlântico Sul
CSE	Corrente Sul Equatorial
ENSO	<i>El Niño Southern Oscillation</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IO	Instituto Oceanográfico
Kg	Quilo
Km	Quilômetros
Labnut	Laboratório de Biogeoquímica de Nutrientes, Micronutrientes e Traços nos oceanos
m	Metros
MOC	<i>Meridional Overturning Circulation</i> (Circulação de Revolvimento Meridional)
MOPS	Material Particulado Orgânico em Suspensão
MPS	Material Particulado em Suspensão
N/Oc	Navio Oceanográfico

OD	Oxigênio dissolvido
S	Salinidade
SAMBAR	Variabilidade interanual dos transportes meridionais através da rede transatlântica SAMOC
SAMOC	<i>South Atlantic Meridional Overturning Circulation</i> (Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico Sul)
T	Temperatura
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
γ	Densidade neutra
σ	Densidade potencial
μ	Micro
®	Registrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	28
2.1 OBJETIVO GERAL	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 ÁREA DE ESTUDO	29
3.2 AMOSTRAGEM	32
3.2.1 <i>Amostragem de parâmetros biogeoquímicos</i>	36
3.2.1.1. Oxigênio dissolvido (OD)	36
3.2.1.2 Nutrientes dissolvidos, material particulado em suspensão e clorofila-a	36
3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS DOS PARÂMETROS BIOGEOQUÍMICOS	37
3.3.1 <i>Oxigênio dissolvido</i>	37
3.3.2 <i>Nutrientes inorgânicos dissolvidos</i>	37
3.3.2.1 Fosfato e Silicato dissolvidos	38
3.3.2.2 Nitrito e nitrato dissolvidos	38
3.3.3 <i>Clorofila-a</i>	39
3.3.4 <i>Material particulado total em suspensão e material orgânico particulado em suspensão</i>	40
3.4 IDENTIFICAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA	41
3.5 COMPONENTES METEOROLÓGICAS	42
3.6 TRATAMENTO DE DADOS	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	45
4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS MASSAS D'ÁGUA POR MEIO DE PARÂMETROS FÍSICOS	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO BIOGEOQUÍMICA DAS MASSAS D'ÁGUA	64
4.3.1 <i>Plataforma continental</i>	64
4.3.2 <i>Talude e oceano aberto</i>	83
4.3.3 <i>Variações interanuais – campanhas 2018 e 2019</i>	96
5 CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS	105

**APÊNDICE A – COORDENADAS GEOGRÁFICAS E PROFUNDIDADE TOTAL
DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM NO OCEANO ATLÂNTICO SUL, COLETADOS
DURANTE CRUZEIROS DO PROJETO SAMBAR EM ABRIL DE 2018 E JUNHO
DE 2019.**

114

1 INTRODUÇÃO

O oceano Atlântico é o segundo maior oceano do mundo, possuindo $106,6 \times 10^6 \text{ km}^2$ de área (TOMCZAK; GODFREY, 2003). Ele possui suma importância na circulação global, sendo responsável por grande parte da distribuição de calor, sal e gases entre os hemisférios (LIU et al., 2019), além de conter recursos vivos e não-vivos que constituem fontes de alimento e renda para nações costeiras (JOHNS et al., 2011; BARBIER, 2017).

A circulação superficial em sua bacia sul é movida por um giro ciclônico tropical, pela Corrente Circumpolar Antártica (CCA) e por um giro anticiclônico subtropical (Fig. 1), composto pela Corrente do Brasil (CB), que flui em direção sul ao longo da costa da América do Sul, pela Corrente do Atlântico Sul (CSA), corrente de Benguela (CBg) e pela Corrente Sul Equatorial (CSE), que se ramifica a oeste na Corrente do Brasil e Corrente Norte do Brasil (CNB) (TALLEY et al., 2011).

Figura 1 - Representação esquemática do padrão de circulação superficial entre 20 °S e 50 °S no oceano Atlântico Sul. CA: Corrente das Agulhas.

Fonte: Adaptado de Stramma e England (1999)

Além da circulação superficial, movimentada principalmente por ação dos ventos, no oceano Atlântico existe uma circulação profunda, mais lenta, e que junto ao ramo superficial é responsável por maior parte do transporte de calor entre hemisférios, possuindo um importante papel na regulação do clima global (KOSTOV; ARMOUR; MARSHALL, 2014; FERREIRA;

KERR, 2017). Essa circulação, chamada de Circulação de Revolvimento Meridional (do inglês *Meridional Overturning Circulation*, MOC), está associada a eventos de aquecimento, resfriamento, evaporação, precipitação, escoamento e à formação de gelo marinho, processos estes que alteram a densidade das parcelas de água, resultando na estratificação da coluna d'água (TALLEY et al., 2011).

A MOC é composta por massas d'água, parcelas de água com características específicas que são formadas em superfície e mantêm as características básicas de seu local de formação ao longo de seu deslocamento pelos oceanos (TSUCHIYA et al., 1994). As massas d'água estão presentes em todos os oceanos e são organizadas verticalmente por faixas de densidade, parâmetro este que irá determinar sua posição na coluna d'água, podendo ser classificadas em massas d'água superficiais, centrais, intermediárias, profundas ou de fundo (EMERY, 2003).

As massas d'água presentes em cada faixa de densidade irão apresentar um fluxo principal de transporte, de acordo com as forçantes locais, local de origem e suas características físicas, como temperatura e salinidade, parâmetros estes que afetam a densidade da parcela de água. O sentido principal de movimentação da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation*, AMOC) consiste em um fluxo profundo para sul de águas frias e salinas da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) e um fluxo para norte de uma mistura de águas superficiais e centrais (quentes e salinas) e águas intermediárias, mais frias e menos salinas (HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017). Dessa forma, diferentemente do que ocorre em outras bacias, esse padrão de circulação no Atlântico Sul (águas quentes fluindo em direção ao Equador e frias em direção ao pólo) provoca um transporte de calor resultante em direção ao Equador (GARZOLI; MATANO, 2011; BUCKLEY; MARSHALL, 2016).

O oceano Atlântico Sul faz a conexão entre os oceanos Atlântico Norte, Índico e Pacífico, sendo assim, composto por águas de diferentes origens e com características físicas, químicas e biológicas distintas (GARZOLI et al., 2013). Ele não atua somente como passagem para massas d'água formadas em locais remotos, mas também as influencia através de interações oceano-atmosfera e processos de mistura, subducção e advecção (GARZOLI; MATANO, 2011).

De acordo com Stramma e England (1999), as principais massas d'água encontradas no oceano Atlântico Sul são a Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), Água Circumpolar Superior (ACS) e Inferior (ACI) e Água Antártica de Fundo (AAF) (Fig. 2). Estas possuem

diferentes origens e carregam consigo, assinaturas próprias que as distinguem umas das outras nos oceanos (EMERY, 2003).

Figura 2 - Desenho esquemático da circulação de larga escala do oceano Atlântico Sul, no qual as setas representam os principais caminhos percorridos por massas d'água em diferentes níveis verticais: superficial e central (vermelho, Água Tropical e Água Central do Atlântico Sul), intermediário (amarelo, Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Superior), profundo (azul, Água Profunda do Atlântico Norte) e abissais (verde, Água Circumpolar Inferior e Água Antártica de Fundo).

DWBC – Corrente de Contorno Profundo Oeste; NBC – Corrente Norte do Brasil; SEC – Corrente Sul Equatorial; BC – Corrente do Brasil; MC – Corrente das Malvinas; ACC – Corrente Circumpolar Antártica; AC – Corrente das Agulhas.

Fonte: Valla et al. (2018)

As massas d'água são identificadas a partir de dados de temperatura e salinidade (diagramas TS), parâmetros conservativos os quais são mantidos constantes ou quase constantes desde a região de formação até a região onde a massa d'água foi encontrada (STRAMMA; ENGLAND, 1999; EMERY, 2003; TALLEY et al., 2011). As características termohalinas que caracterizam as massas d'água presentes no oceano Atlântico Sul estão amplamente descritas na literatura (Tabela 1), podendo sofrer algumas pequenas variações em suas faixas de temperatura e salinidade devido à mistura com massas d'água adjacentes (KLEIN; TOMCZAK, 1994).

Tabela 1 - Intervalos de temperatura e salinidade empregados na identificação das massas d'água costeiras (relativas à costa norte da Argentina e sul do Brasil) e oceânicas (Atlântico Sul) propostos por vários autores.

Massa d'água	Intervalo	Autores
Água da Pluma do Prata (APP)	$T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S \leq 33,5$	Piola et al. (2000); Möller et al. (2008)
Água Subtropical de Plataforma (ASTP)	Inverno $T > 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $33,5 < S < 35,3$ $T > 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35,3 \leq S < 36$ Verão $T > 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35,3 < S < 36$ $T > 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $33,5 < S \leq 35,3$	Piola et al. (2000); Möller et al. (2008)
Água Tropical (AT)	$T \geq 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S \geq 36\text{ }^{\circ}\text{C}$	Piola et al. (2000); Möller et al. (2008)
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	$10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35,0 < S < 36,0$	Bianchi et al. (1993)
Água Intermediária Antártica (AIA)	$3\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $34,2 < S \leq 34,6$ $3,7\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ $S \sim 34,2$	Sverdrup et al. (1942) Piola e Gordon (1989)
Água Circumpolar Superior (ACS)	$3,3\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 3,4$ $34,42 < S < 34,59$ Mínimo OD e máximo nutrientes	Tsuchiya et al. (1994)
Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)	$3\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ $34,6 < S < 35,0$	Reid (1989); Silveira et al. (2000) e Tsuchiya et al. (1994)
Água Circumpolar Inferior (ACI)	Mínimo de OD e máximo de nutrientes	Tsuchiya et al. (1994)
Água Antártica de Fundo (AAF)	$T \leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S \leq 34,8$	Emery (2003); Boswell et al. (2002)

Além de temperatura e salinidade, propriedades biogeoquímicas, como oxigênio dissolvido e os nutrientes (e.g. nitrato, fosfato e silicato) também podem ser utilizados para refinar os limites de identificação de massas d'água. Apesar de serem propriedades com caráter não-conservativo na camada eufótica (são influenciados pela atividade biológica e pela dissolução química de material orgânico morto que precipita ao longo da coluna d'água), adquirem caráter quase-conservativo abaixo dela, podendo então ser utilizados como traçadores complementares de massas d'água, conforme foi aplicado para diversos oceanos mundiais (OUDOT et al., 1999; KRESS; HERUT, 2001; BRAGA; NIENCHESKI, 2006; SARDESSAI et al., 2010).

Segundo os estudos de Jones et al. (2003) e Falk et al. (2011), que analisaram massas d'água na região polar do Ártico, a razão N:P (nitrogênio:fósforo) pode fornecer melhores informações e detalhes acerca da origem de determinadas massas d'água, como as provenientes do oceano Pacífico, em regiões onde não há grandes diferenças de salinidade na coluna d'água, e que portanto, não é possível se fazer a fácil distinção entre os limites utilizando apenas diagramas TS.

Assim como os trabalhos de Jones et al. (2003) e Falk et al. (2011), o estudo de Sardesai et al. (2010) também obteve sucesso em utilizar a razão N:P para aferir sobre a circulação e mistura de águas na porção leste do oceano Índico Equatorial. Além disso, através da análise da distribuição da concentração de nutrientes, foi possível identificar os processos biogeoquímicos associados a fenômenos físicos ocorrentes na região, como elevação sazonal da termoclina e transporte meridional e zonal.

No oceano Atlântico, Wanninkhof et al. (2010) utilizou dados de oxigênio dissolvido, carbono inorgânico dissolvido total, nitrato e silicato, associados a parâmetros termohalinos, para avaliar a distribuição da APAN ao longo da bacia Atlântica e assim inferir sobre os principais caminhos nos quais esta massa, importante componente do ramo profundo da AMOC, percorre. De acordo com os autores acima citados, compreender as vias pelas quais as massas d'água se movimentam é crucial para quantificar os transportes de calor, água doce e gás carbônico (CO₂) no Atlântico Sul e para assim, avaliar a estabilidade da AMOC.

Os oceanos são considerados os grandes amortecedores dos efeitos das alterações climáticas, sendo a AMOC um importante mecanismo modulador, pois redistribui o excesso de calor e carbono presente em superfície para as camadas profundas do oceano (KOSTOV; ARMOUR; MARSHALL, 2014). Entretanto, sob essas condições, Buckley e Marshall (2016) apontam para a possibilidade de um enfraquecimento do transporte da AMOC, principalmente devido ao aumento das temperaturas no oceano Atlântico Norte e ao aumento do aporte de água doce pelo derretimento de geleiras nos pólos.

Segundo Palastanga et al. (2011), a redução na capacidade de transporte de calor pela AMOC pode ter sido uma das responsáveis por causar a Pequena Idade do Gelo, período de frio intenso ocorrente entre os séculos 16 e 19, que resultou em alterações nos padrões de circulação atmosférica, temperatura de superfície do mar e cobertura de gelo, além de causar consequências socioeconômicas à população. Dessa maneira, é necessário promover melhorias nos sistemas observacionais de monitoramento para que se possa melhorar a compreensão e previsão de possíveis modificações a longo prazo na AMOC.

Grandes aprimoramentos no conjunto de medições realizadas no oceano Atlântico vêm sendo executados nas últimas décadas (GARZOLI et al., 2015), iniciados com os cruzeiros hidrográficos de programas internacionais como o *Geochemical Ocean Sections Program* (GEOSECS), *South Atlantic Ventilation Experiment* (SAVE) e *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE). Mais recentemente, outros esforços internacionais (e. g. *Rapid Climate Change–Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array – RAPID/MOCHA*) estão sendo empregados para melhor entender o funcionamento da AMOC e distribuição de massas d’água no Atlântico. Porém, estes estudos focam no Atlântico Norte e os dados coletados sobre a evolução da AMOC no Atlântico Sul ainda são escassos (GARZOLI; MATANO, 2011).

De acordo com Gent (2018), a estabilidade da AMOC é dependente do fluxo de água doce que atravessa 33 °S. Essa região é considerada local de ocorrência de muitos processos oceânicos, com a entrada de águas provenientes do oceano Índico por propagação de vórtices da Corrente das Agulhas, na borda leste do Atlântico Sul (GORDON et al., 1992), a entrada de águas do Pacífico pela passagem de Drake (REID, 1989) e a presença da zona de confluência Brasil-Malvinas, na borda oeste do Atlântico Sul (PIOLA; MATANO, 2017).

Com o intuito de investigar questões relacionadas às mudanças climáticas e distribuição de calor no oceano Atlântico Sul, foi criado em outubro de 2017 o projeto “Variabilidade interanual dos transportes meridionais através da rede transatlântica SAMOC” (SAMBAR), surgindo para dar continuidade ao programa “*South Atlantic Meridional Overturning Circulation*” (SAMOC-BR), um esforço internacional financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (nº de processo 2017/09659-6).

O projeto SAMBAR possui como objeto de estudo a região sudoeste do oceano Atlântico Sul, mais precisamente nas imediações do paralelo 34,5 °S (um transecto iniciado na costa e se estendendo até aproximadamente 44,5 °O). Este é um ambiente de passagem de massas d’água de origem Antártica e do Atlântico Norte, importantes para o balanço da AMOC (MEINEN et al., 2017; VALLA et al., 2018). Além disso, a região está sob a influência do aporte de água doce proveniente do rio da Prata, que influencia diretamente a distribuição de salinidade, nutrientes, matéria orgânica sobre a plataforma (CARRETO et al., 1986, CALLIARI, 2005; GUERRERO et al., 2014).

De acordo com Calliari (2008), as águas costeiras da costa uruguaia possuem um gradiente zonal com características físicas, químicas e biológicas contrastantes, constituindo um importante local de absorção de CO₂ atmosférico devido à sua elevada produção primária (principalmente durante a primavera e verão) (BIANCHI et al., 2005), que sustentam a

produtividade pesqueira da região, movimentando a economia de estados costeiros do norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil (BISBAL, 1995).

As massas d'água costeiras presentes sobre plataforma adjacente à desembocadura do rio da Prata também estão sujeitas a modificações provocadas por alterações sazonais no regime de ventos (PIOLA et al., 2000; MÖLLER et al., 2008), intrusões de águas oceânicas frias e ricas em nutrientes e processos de regeneração de nutrientes (BRAGA et al., 2008), que também possuem um papel na manutenção da produtividade primária ao longo do ano (BORDIN et al., 2019).

Tendo em vista tudo que foi abordado acima, sugere-se que informações sobre a distribuição de nutrientes na coluna d'água podem auxiliar na identificação de massas d'água através da atribuição de assinaturas específicas para cada uma, de modo a favorecer o seu acompanhamento segundo o comportamento dos identificadores agregados. A avaliação dos parâmetros biogeoquímicos, considerados mais sensíveis perante variações climáticas (MOORE et al., 2008; DUNCAN et al., 2019; GOTTSCHALK et al., 2020), deve ser considerada fundamental para complementar estudos de monitoramento de características das massas d'água e seu papel na circulação de revolvimento meridional.

Em resultados do Programa REVIZEE, iniciado em 1995 ao longo da costa brasileira, Braga e Niencheski (2006) apontam a carência de informações físicas e biogeoquímicas na costa brasileira, em especial às observações de propriedades abaixo de 200 m de profundidade. Além disso, Johnson et al. (2014) observaram que devido a baixa frequência de revisitações das mesmas seções hidrográficas e ao período relativamente curto da maioria das observações, não é ainda claro que as modificações observadas, como aquecimento e diminuição da salinidade em alguns locais do Atlântico, fazem parte ou não de uma variabilidade a longo prazo.

Dessa maneira, a visitação anual da porção oeste do paralelo 34,5 °S no âmbito do projeto SAMBAR (2017 – 2022) tende a preencher lacunas científicas e construir uma robusta base de dados físicos e biogeoquímicos na região, que possibilitem o seu uso em demais trabalhos de avaliação de alterações climáticas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Utilizar indicadores biogeoquímicos, como oxigênio e nutrientes dissolvidos, associados aos índices termohalinos para identificar complementarmente as diferentes massas d'água presentes na borda oeste do oceano Atlântico Sul, tendo como objeto de estudo um transecto transversal em 34,5 °S, com início na costa e se estendendo até 44,5 °O.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar a presença das diferentes massas d'água na região de estudo, inicialmente com base nas características termohalinas (temperatura potencial, salinidade e densidade neutra), de modo a formar a base para avaliação dos indicadores biogeoquímicos;
- Associar dados de oxigênio dissolvido e nutrientes aos identificadores termohalinos das massas d'água, verificando a potencialidade de seu uso na melhoria da identificação das massas, bem como na discriminação de processos biogeoquímicos, auxiliando nos estudos de circulação oceânica e de aportes terrestres;
- Avaliar variações na presença das massas d'água costeiras e oceânicas na região de estudo, considerando as observações de duas campanhas do Projeto SAMBAR, realizadas em dois períodos sazonais diferentes (outono de 2018 e inverno de 2019);
- Analisar a distribuição das concentrações de oxigênio e nutrientes inorgânicos dissolvidos (fosfato, silicato, nitrito e nitrato), assim como de material particulado em suspensão e clorofila-*a*, buscando investigar os processos biogeoquímicos que podem estar ocorrendo junto a região mais costeira sob influência da pluma do Rio da Prata;
- Verificar a ocorrência de variações interanuais nas características das massas d'água de talude e oceano aberto, considerando os indicadores físicos e biogeoquímicos, de modo a contribuir para a avaliação de alterações que sinalizem a influência das mudanças climáticas nestas águas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A região de estudo está localizada na porção sudoeste do oceano Atlântico Sul (Fig. 3), próxima à fronteira do Brasil e Uruguai. Esta área, especialmente a plataforma continental, está sob influência direta do aporte de água doce proveniente do rio da Prata, que é considerado o segundo maior rio da América do Sul (PIOLA; ROMERO; ZAJACZKOVSKI, 2008; CAMPOS et al., 2008).

A bacia de drenagem do rio da Prata ocupa cerca de 20% da área superficial da América do Sul, tendo sua origem na Cordilheira dos Andes, 4000 m acima do nível do mar (PIMENTA, 2005). O rio da Prata e seus tributários abrangem uma área de 3,1 milhões de km² (FAO, 2016), desaguando com uma vazão média de 23.000 m³ s⁻¹ na região de fronteira entre a Argentina e o Uruguai, em aproximadamente 35 °S (PIOLA; ROMERO; ZAJACZKOVSKI, 2008). Dessa forma, o rio da Prata é considerado o principal exportador de material terrígeno para a plataforma continental sudoeste do Atlântico Sul (CAMPOS et al., 2008; NAGAI et al, 2014), contribuindo com a entrada de um importante volume de água doce nesta região.

Figura 3 - Localização da área de estudo no sudoeste do oceano Atlântico Sul.

Fonte: Autor

Modificações no regime de ventos e na descarga fluvial são os principais responsáveis pelo deslocamento da pluma do rio da Prata sobre a plataforma continental sul americana. Entretanto, considerando essas duas forçantes atuantes no espalhamento da pluma do rio, sugere-se que as alterações no regime de ventos sejam o maior fator controlador da distribuição das águas de menor salinidade na plataforma (PIOLA et al., 2005; PIMENTA et al. 2005).

A variabilidade temporal na extensão da distribuição meridional da pluma do rio da Prata é regida primariamente pela sazonalidade. Durante o verão (dezembro – março), período de maior precipitação pluviométrica e portanto, de alta descarga fluvial (Fig. 4a), a pluma fica confinada em 32°S e se estende para sul (~ 37,5 °S) devido à influência de um padrão de ventos de nordeste (MÖLLER et al., 2008; PIOLA et al., 2008; GUERRERO et al. 2014). Já no inverno (junho – setembro), período de baixa descarga fluvial (Fig. 4b), a pluma é deslocada para nordeste sob influência de ventos de sudoeste, podendo chegar a 27°S (PIMENTA et al. 2005; MÖLLER et al., 2008; BORDIN et al. 2019).

Figura 4 - Variação sazonal na distribuição da pluma do rio da Prata (linha preta) sobre a plataforma continental do sudoeste do oceano Atlântico Sul considerando os valores de salinidade (< 33,5) durante a) verão (janeiro-março) e b) inverno (julho a setembro).

Fonte: Adaptado de Piola et al. (2000)

Além da sazonalidade, fenômenos de El Niño-Oscilação Sul (ENSO) também afetam o padrão de ventos e a vazão fluvial na região de estudo (ROPELEWSKI; HALPERT, 1987). Existem evidências de que sob condições de El Niño, há um aumento na descarga do rio da Prata (DOGLIOTTI; RUDDICK; GUERRERO, 2016), o que teoricamente deveria levar a um

maior avanço em direção ao mar aberto e um maior deslocamento para nordeste da pluma do rio. Entretanto, foi observado que períodos de El Niño favorecem a atuação anômala de ventos de nordeste, que se opõem ao espalhamento das águas de baixa salinidade (PIOLA et al., 2005).

Ao contrário do que acontece durante períodos de El Niño, em eventos de La Niña há uma redução na precipitação, ocasionando um relativo decréscimo na descarga do rio da Prata e consequente diminuição da influência fluvial na plataforma continental adjacente a sua desembocadura (BARREIRO, 2010). García-Rodríguez et al. (2014) analisaram os efeitos sobre vazão do rio da Prata causados por fenômenos ENSO ocorridos entre 2009 e 2010 e observaram que durante a fase “quente” (El Niño), a vazão média do rio foi de aproximadamente $33.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto que em sua fase “fria” (La Niña), este fluxo médio caiu para cerca de $22.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A região de estudo, observada em larga escala, está situada ao norte da confluência Brasil-Malvinas, uma das regiões mais oceanograficamente dinâmicas do planeta, localizada por volta de 39°S (Fig. 5) (COMBES; MATANO, 2014). Nessa área, o segmento superficial da coluna d’água é dominado pela convergência de águas subtropicais e subantárticas associadas à Corrente do Brasil e a Corrente das Malvinas (CM), respectivamente. O encontro destas duas correntes acarreta em uma zona de alta mistura de águas, com a geração de vórtices que auxiliam a propagação meridional de propriedades, como calor e sal (PIOLA; MATANO, 2017), e consequentemente, demais parâmetros biogeoquímicos.

Figura 5 - Principais componentes da circulação superficial que influenciam a região sudoeste do oceano Atlântico Sul.

Fonte: Piola e Matano (2017)

3.2 Amostragem

A amostragem foi realizada a bordo do N/Oc. *Alpha Crucis* em duas campanhas (campanhas AC33 e AC37) entre 25 e 30 de abril de 2018 (outono austral) e entre 21 a 28 de junho de 2019 (início do inverno austral), no âmbito do projeto SAMBAR (FAPESP 2017/09659-6). No total, foram realizadas 24 e 17 estações oceanográficas em 2018 e 2019, respectivamente, ao longo da porção sudoeste do oceano Atlântico Sul (Fig. 6 a e b).

As coletas foram iniciadas na região da plataforma continental sul brasileira a partir da latitude 33,2 °S, descendo até a latitude 34,5 °S e então estendendo-se ao largo do Atlântico Sul até atingir a longitude 44,5 °O. Na campanha de 2019, inicialmente estavam programadas as mesmas 24 estações realizadas no ano anterior, porém, devido às condições agitadas do mar acarretadas pela passagem de frentes frias, não foi possível efetuar a coleta de água em todas as estações programadas.

No apêndice A constam as latitudes e longitudes das estações oceanográficas realizadas ao longo das campanhas de 2018 e 2019. Neste estudo, as estações consideradas referentes à plataforma continental foram as de 1 (prof. total de 16,6 m) a 8 (prof. total de 165,0 m) em 2018 e de 1 (prof. total de 14,0 m) a 7 (prof. total de 127,7 m) em 2019, enquanto as demais estiveram localizadas no talude e oceano aberto. A diferença nos valores de profundidade total entre as estações foi utilizada como critério para esta separação zonal entre plataforma continental e talude e oceano aberto, sendo o limite entre a última estação de plataforma continental e a primeira de talude definido pelo alto declínio relativo na batimetria local (diferença maior que 250 m entre os dois pontos).

As coletas de água foram realizadas com o auxílio de uma rosette (*Sea-Bird®*) equipada com 24 garrafas de Niskin (5 L), enquanto dados de temperatura, salinidade e pressão foram obtidos a bordo utilizando um CTD (*Sea-Bird®* 911Plus), acoplado à rosette. Para realizar a calibração dos dados de salinidade obtidos com o CTD, a salinidade também foi determinada a partir de amostras de água coletadas pelas garrafas de Niskin em alguns pontos da coluna d'água. As amostras de salinidade foram armazenadas em frascos âmbar de 250 mL e analisadas a bordo utilizando um salinômetro *Guildline*, com precisão de $\pm 0,001$.

Figura 6- Localização dos pontos de amostragem no oceano Atlântico Sul, em a) abril de 2018 e b) junho de 2019, durante campanhas do Projeto SAMBAR.

Fonte: Autor

As profundidades de amostragem de água foram escolhidas de acordo com o perfil de temperatura e salinidade mostrado pelo CTD, de modo a representar os núcleos das massas d'água e zonas de alterações de interesse nos perfis. No total, em 2018 foram realizadas coletas de água em 345 profundidades, que variaram entre 2,2 e 4758,3 m (Fig. 7 a e b), enquanto em 2019 foram amostradas 220 profundidades, variando de 2,3 a 4760,0 m, como apresentado na Figura 7 (c e d).

Figura 7- Profundidades nas quais foram coletadas amostras de água no Atlântico Sul durante os cruzeiros do Projeto SAMBAR, onde a) são as profundidades amostradas na plataforma continental e b) no talude e oceano aberto durante a campanha de abril de 2018 e c) são as profundidades amostradas na plataforma continental e d) no talude e oceano aberto durante a campanha de junho de 2019.

Fonte: Autor

3.2.1 Amostragem de parâmetros biogeoquímicos

3.2.1.1. Oxigênio dissolvido (OD)

As amostras para a análise de oxigênio dissolvido foram as primeiras a serem retiradas das garrafas amostradoras, utilizando um redutor de fluxo para impedir a formação de bolhas. As amostras foram coletadas em frascos de vidro com volume conhecido (calibrados), dotados de tampas mergulhadoras. Foram coletadas 344 e 219 amostras de oxigênio dissolvido em 2018 e 2019, respectivamente, as quais foram fixadas imediatamente após a coleta com a adição dos reagentes, sendo em seguida mantidas ao abrigo da luz e em temperatura constante no laboratório do navio até o momento de análise, a qual foi realizada com no máximo 8h de intervalo após a coleta.

3.2.1.2 Nutrientes dissolvidos, material particulado em suspensão e clorofila-a

Após a amostragem para a determinação de oxigênio dissolvido, garrafas de polietileno de baixa densidade com volume de 2 L, previamente lavadas com solução ácida (10% HCl), enxaguadas com água destilada e identificadas, foram usadas para coletar a água destinada às filtrações para determinação clorofila-*a* (95 amostras em 2018 e 105 em 2019), material particulado em suspensão (total e orgânico) (95 amostras em 2018 e 105 em 2019) e para a análise dos nutrientes inorgânicos (fosfato, silicato, nitrito e nitrato) dissolvidos, que totalizaram 345 amostras em 2018 e 220 amostras em 2019.

As amostras provenientes de profundidades menores que 200 m (zona eufótica) foram filtradas a bordo utilizando dois kits de filtração Millipore® e uma bomba a vácuo também Millipore®. Para as amostras de Material Particulado em Suspensão (MPS) foram utilizados filtros de fibra de vidro GF/F Whatman® (porosidade nominal de 0,45 µm), previamente pesados e calcinados em mufla.

Já para a análise de clorofila-*a* (cl-*a*) foram utilizados filtros de fibra de vidro Sartorius® GMF/5, também com porosidade nominal de 0,45 µm. Após a filtração, os filtros foram armazenados em congelador a -20°C até a posterior análise. As amostras referentes a profundidades maiores que 200 m não foram filtradas, pois apresentam valor muito baixo de material particulado em suspensão e concentrações de cl-*a* nulas ou abaixo do limite de detecção do método.

3.3 Análises laboratoriais dos parâmetros biogeoquímicos

3.3.1 Oxigênio dissolvido

As amostras de oxigênio dissolvido foram analisadas a bordo utilizando um titulador automático (Titrand *Metrohm*[®]), seguindo o método de Winkler (1888), descrito em Grasshoff (1983), dentro de um prazo de 2 a 8 horas. O método apresenta precisão de $\pm 0,01 \text{ mL L}^{-1}$ para teores até 2 mL L^{-1} e $\pm 0,02 \text{ mL L}^{-1}$ para teores superiores. Posteriormente, os teores de OD foram convertidos de mL L^{-1} para $\mu\text{mol kg}^{-1}$, unidade mais comumente utilizada em trabalhos de caracterização de massas d'água, multiplicando o valor obtido em mL L^{-1} por 44,661 (fator de conversão para $\mu\text{mol m}^{-3}$) e posteriormente dividindo pelo valor de densidade neutra de cada amostra.

Em cada ano, ainda a bordo e antes do início das coletas, foi realizada uma estação teste para verificar a precisão metodológica e a qualidade da amostragem, onde foram coletadas réplicas de amostras pertencentes a diferentes profundidades (2018) e a mesma profundidade (2019), coletadas em garrafas diferentes, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 - Dados (média e desvio padrão em mL L^{-1}) de réplicas de amostras de oxigênio dissolvido (OD) obtidas em diferentes profundidades de coleta em 2018 e a 20 m em 2019 para verificação das condições analíticas a bordo.

2018			
Nº de réplicas	Prof. (m)	Média (mL L^{-1})	Desvio padrão (mL L^{-1})
5	1827,1	4,488	0,013
3	834,6	5,690	0,000
2	588,8	4,690	0,000
3	130,0	4,647	0,006
2019			
18	20,0	4,417	0,014

3.3.2 Nutrientes inorgânicos dissolvidos

As determinações analíticas de nutrientes dissolvidos foram realizadas no Laboratório de Biogeoquímica de Nutrientes, Micronutrientes e Traços no Oceano (Labnut) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) nas semanas seguintes às campanhas. As amostras preservadas a -20°C foram descongeladas e seguiram os métodos analíticos para cada parâmetro a ser analisado, sendo as precisões apresentadas nos tópicos seguintes.

3.3.2.1 Fosfato e Silicato dissolvidos

O fosfato (PO_4^{3-}) e o silicato (Si(OH)_4) dissolvidos foram determinados seguindo a técnica colorimétrica proposta por Grasshoff et al. (1999). As leituras das absorbâncias foram realizadas no espectrofotômetro Thermo Scientific® Evolution 201, utilizando como comprimento de onda 880 e 810 nm, para o fosfato e o silicato, respectivamente. A precisão do método é de 0,01 μM para o fosfato e de 0,1 μM para o silicato.

Foram realizadas análises de materiais certificados de referência (KANSO Co. Ltd) de três diferentes concentrações durante quatro dias de análise para se testar a acurácia das determinações e o correto manuseio das amostras. Os resultados relativos à concentração média obtida para cada material de referência, seu desvio padrão e erro relativo à concentração certificada estão presentes na Tabela 3. Os valores foram corrigidos de acordo com a concentração do material de referência mais baixo, como indicado no manual GO-SHIP para determinação de nutrientes em água do mar (HYDES et al., 2010).

Tabela 3 - Concentração média, desvio padrão e erro relativo referente às análises dos materiais certificados de referência para fosfato e silicato (KANSO Co. Ltd).

Fosfato				
Material certificado de referência	Concentração certificada ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Concentração média obtida ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Desvio padrão ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Erro relativo (%)
CK (concentração baixa)	0,048	0,048	0,000	-0,20
CJ (concentração média)	1,190	1,190	0,021	-0,07
CB (concentração alta)	2,520	2,540	0,032	0,98
Silicato				
CK (concentração baixa)	0,73	0,73	0,000	0,96
CJ (concentração média)	38,50	38,87	0,174	-0,10
CB (concentração alta)	109,20	110,66	1,823	1,33

3.3.2.2 Nitrito e nitrato dissolvidos

Nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) dissolvidos foram determinados utilizando o método de fluxo contínuo com arraste por bolhas baseada em Tréguer e Le Corre (1975) e Braga (1997a, 1997b). A análise foi realizada em equipamento automático – *AutoAnalyzer II* (Bran-Luebbe®),

com precisão de 0,01 μM para nitrito e 0,02 μM para nitrato. A determinação do nitrato envolve o uso de coluna de cádmio cuperizado para a redução do nitrato a nitrito. O valor de nitrito total (nitrito + nitrato reduzido) menos o valor do nitrito fornece o valor de nitrato, dessa forma, para a análise de nitrato também se fez necessária a determinação de nitrito.

Assim como para fosfato e silicato, materiais certificados de referência (KANSO Co. Ltd) também foram analisados nas mesmas três concentrações determinadas anteriormente. Os resultados de concentração média obtida para cada material, seu desvio padrão e erro relativo à concentração certificada estão presentes na Tabela 4. Dessa maneira, os dados aqui obtidos representam uma base sólida para comparação com trabalhos futuros.

Tabela 4 - Concentração média, desvio padrão e erro relativo referente às análises dos materiais certificados de referência para nitrito e nitrato (KANSO Co. Ltd).

Material certificado de referência	Concentração certificada ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Concentração média obtida ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Desvio padrão ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Erro relativo (%)
Nitrito				
CK (concentração baixa)	0,011	0,011	0,000	-4,545
CJ (concentração média)	0,031	0,030	0,001	-1,613
CB (concentração alta)	0,110	0,110	0,004	-2,273
Nitrato				
CK (concentração baixa)	0,02	0,02	0,000	0,000
CJ (concentração média)	16,20	16,12	0,053	-0,509
CB (concentração alta)	35,79	35,53	0,247	-0,717

3.3.3 Clorofila-a

A clorofila-a foi estimada por espectrofotometria na faixa de luz visível, segundo a metodologia descrita por Jeffrey e Humphrey (1975). As amostras de água foram filtradas em membrana de fibra de vidro Sartorius® GMF/5, com aproximadamente 0,45 μm de porosidade nominal e 47 mm de diâmetro. Os filtros foram armazenados em tubos *Falcon* em polipropileno, e posteriormente em dessecadores contendo sílica gel, que foram mantidos sob refrigeração a -20°C até o momento da extração.

A extração da clorofila foi feita pela adição de 10 mL de solução de acetona a 90% nos tubos contendo os filtros, os quais foram macerados e receberam agitação através de um vortex,

ocorrendo a liberação da clorofila contida nos filtros. As amostras foram então acondicionadas a 4°C por 22 horas. No dia seguinte, os tubos foram centrifugados a 3200 r.p.m. durante 10 minutos. O sobrenadante foi analisado em cubetas de 50 mm de percurso óptico, em diversos comprimentos de onda, utilizando um espectrofotômetro Thermo Scientific® modelo *Evolution* 201.

3.3.4 Material particulado total em suspensão e material orgânico particulado em suspensão

A análise de Material Particulado em Suspensão (MPS) foi realizada utilizando o método gravimétrico de Strickland e Parsons (1968). Inicialmente, os filtros foram pré-pesados em laboratório utilizando balança analítica BEL Engineering®, modelo MARK 210A, com precisão de $\pm 0,0001$ g, para obtenção do peso 1 (M1). Após a filtração das amostras, os filtros foram secos em estufa a 60°C por no mínimo 4h e foram novamente pesados para obtenção do peso 2 (M2). A concentração total de MPS foi então calculada de acordo com a equação 1.

$$\mathbf{MPS} = \frac{\mathbf{m_2 - m_1}}{\mathbf{V}} \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

MPS - teor de material particulado em suspensão;

m₁ - massa do filtro novo e seco;

m₂ - massa do filtro seco após a filtração, contendo material retido;

V – volume de amostra filtrado.

Após a segunda pesagem, os filtros foram levados a mufla a 450°C por 4h para serem calcinados e todo o material orgânico ser retirado. Após o resfriamento, os filtros foram pesados e então foi obtido o peso 3 (M3), sendo possível o cálculo da concentração do material orgânico particulado em suspensão (MOPS), de acordo com a equação 2.

$$\mathbf{MOPS} = \frac{\mathbf{m_2 - m_3}}{\mathbf{V}} \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

MOPS - teor de material orgânico particulado em suspensão;

m₂ - massa do filtro seco após a filtração, contendo material retido;

m₃ - massa do filtro contendo material retido após a calcinação;

V - volume de amostra filtrado.

3.4 Identificação de massas d'água

As massas d'água presentes na seção estudada durante as duas campanhas foram inicialmente identificadas a partir de suas características físicas (temperatura potencial, salinidade e densidade neutra). Após a sua identificação de acordo com os parâmetros clássicos, os valores de concentração de oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato obtidos em cada amostra foram atribuídos às características da massa d'água correspondente (previamente identificada a partir dos dados físicos da amostra em questão).

As massas d'água encontradas na região da plataforma continental foram identificadas de acordo com os limites termohalinos propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008), enquanto as massas d'água localizadas no talude e oceano aberto foram identificadas seguindo intervalos de densidade neutra, propostos por Valla et al. (2018). Estes autores utilizaram dados obtidos em 6 cruzeiros do projeto SAMOC (entre julho de 2009 e dezembro de 2012) para propor os intervalos de densidade neutra para cada massa d'água que cruza a região sudoeste do paralelo 34,5 °S, tornando assim uma classificação adequada para o tratamento dos dados obtidos neste estudo.

A Tabela 5 contém os valores das variáveis termohalinas e na Tabela 6 estão apresentados os intervalos de densidade neutra que foram utilizados para identificar as massas d'água encontradas próximo à borda oeste do oceano Atlântico Sul (plataforma continental) e ao longo do transecto zonal em 34,5 °S, alvos deste estudo.

Tabela 5 - Limites de variáveis termohalinas (temperatura potencial e salinidade) propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008) que foram utilizados para identificar as massas d'água encontradas na plataforma continental (até 200 m) adjacente a desembocadura do rio da Prata (sudoeste do Atlântico Sul).

Massa d'água	Intervalo
Água da Pluma do Prata (APP)	$T > 10\text{ °C}, S \leq 33,5$
Água Subtropical de Plataforma (ASTP)	Inverno
	$T > 14\text{ °C}, 33,5 < S < 35,3$
	$T > 18,5\text{ °C}, 35,3 \leq S < 36$
	Verão
Água Tropical (AT)	$T > 18,5\text{ °C}, 35,3 < S < 36$
	$T > 21\text{ °C}, 33,5 < S \leq 35,3$
	$T \geq 18,5\text{ °C}, S \geq 36$
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	$T \leq 18,5\text{ °C}, S \geq 35,3$

Tabela 6 - Limites de densidade neutra (γ , kg m^{-3}) propostos por Valla et al. (2018) para identificar as massas d'água encontradas no talude e oceano aberto ao longo da porção oeste do paralelo 34,5 °S.

Massa d'água	Densidade neutra (kg m^{-3})
Água Tropical (AT)	< 26,35
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	26,35 – 27,10
Água Intermediária Antártica (AIA)	27,10 – 27,60
Água Circumpolar Superior (ACS)	27,60 – 27,90
Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)	27,90 – 28,10
Água Circumpolar Inferior (ACI)	28,10 – 28,27
Água Antártica de Fundo (AAF)	> 28,27

3.5 Componentes meteorológicas

Os dados relativos as componentes zonal e meridional de ventos em 10 m e temperatura do ar (2 m) foram extraídos das reanálises do *National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), que possuem cobertura espacial global e resolução horizontal de 2,5° x 2,5° (KALNAY et al., 1996). Os dados da reanálise foram utilizados para se obter uma média dos resultados de cada parâmetro atmosférico durante os dias de amostragem. Para cada dia estão disponíveis dados em 4 diferentes horários (0Z, 6Z, 12Z e 18Z) e foram calculadas médias do período compreendido entre 25 de abril e 1 de maio (0Z) de 2018 e entre 21 a 29 (0Z) de junho de 2019.

Informações acerca da ocorrência de El Niño/La Niña durante o período de amostragem foram obtidos no *NOAA'S National Centers for Environmental Information* e também foram feitas médias mensais da descarga fluvial nos meses de abril de 2018 e junho de 2019. Como o cálculo da vazão fluvial foi utilizado mais a título de breve comparação entre os períodos de amostragem, usou-se dados de um único ponto localizado próximo ao início do estuário do rio da Prata (Fig. 8). Os dados diários de descarga fluvial neste ponto foram obtidos a partir do modelo *Global Flood Awareness System* (GloFAS), parte do *Copernicus Emergency Management Service* (CEMS), com resolução horizontal de 0,1° x 0,1°.

Figura 8 – Localização do ponto próximo ao início do estuário do rio da Prata no qual foram obtidos os dados médios mensais de descarga fluvial ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em abril de 2018 e junho de 2019.

Fonte: *Global Flood Awareness System (GloFAS)*

3.6 Tratamento de dados

O software *Python 2.3* foi utilizado para realizar a conversão dos dados de pressão (dbar) em profundidade (metros), para a elaboração dos diagramas TS e para o cálculo da densidade potencial (kg m^{-3}) representada em isolinhas nos diagramas TS. O cálculo da conversão de pressão em profundidade e da densidade potencial foi realizado através do pacote *Seawater*, que utiliza a fórmula de Fofonoff e Millard (1983) baseada em dados de pressão e latitude para a conversão em profundidade e em dados de temperatura potencial e salinidade para o cálculo da densidade potencial.

Os cálculos de densidade neutra (γ^n) foram realizados com software *Ocean Data View* (SCHLITZER, 2013), seguindo a fórmula proposta por Jackett e McDougall (1997), que utiliza além de dados de temperatura potencial, salinidade e pressão, dados geográficos de latitude e longitude para calcular a densidade. Utilizando o mesmo software, foram elaborados gráficos de seções verticais de propriedade vs. profundidade utilizando a interpolação “*Data-Interpolating Variational Analysis*” (DIVA), que utiliza método de elementos finitos. Para realizar a interpolação espacial, o software leva em consideração a distância entre a análise e os dados, a regularidade da análise e as leis físicas, tendo em vista a linha de costa, batimetria e advecção.

O planilhamento dos dados e cálculos das concentrações de fosfato, silicato, nitrito, nitrato, material particulado em suspensão e clorofila-*a* foram realizados com o software Excel® 2016.

Para análise dos resultados, inicialmente foram discutidos os dados referentes às condições das variáveis ambientais (vento, temperatura do ar e descarga fluvial) que estavam presentes durante as duas campanhas do projeto SAMBAR. Logo após, os dados obtidos foram divididos em três tópicos principais de acordo com os objetivos do estudo: (1) identificação das massas d'água presentes na região por meio de parâmetros físicos, (2) associação dos parâmetros biogeoquímicos aos indicadores termohalinos de cada massa d'água e (3) análise da variabilidade interanual (abril de 2018/junho de 2019) dos parâmetros biogeoquímicos em 34,5° S.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições meteorológicas

Considerando a importância dos ventos nos aspectos de distribuição das propriedades biogeoquímicas, sobretudo na área de plataforma, a Figura 9 (a e b) apresenta informações acerca da condição dos ventos atuantes sobre a área de estudo durante os dias de amostragem em abril de 2018 (outono) e junho de 2019 (início de inverno).

Figura 9 – Média de velocidade e direção de ventos atuantes sobre a região sudoeste do oceano Atlântico Sul durante o período compreendido entre a) 25 de abril a 1 de maio de 2018 (outono) e b) 21 a 29 de junho de 2019 (inverno). Os vetores representam a velocidade dos ventos, onde o tamanho do vetor relativo a 2 m s^{-1} de velocidade está indicado na figura. A escala de cores é representativa da magnitude da velocidade dos ventos.

Fonte: NOAA's NCEP/NCAR Reanalysis (2020)

Foi observado que durante ambas as campanhas, o segmento norte da área de estudo (acima de 34°S) esteve sob influência de ventos de norte/nordeste, especialmente na região de oceano aberto. Entretanto, durante a amostragem de 2019 (Fig. 9b), a magnitude da velocidade desses ventos de nordeste foi superior à observada no ano anterior, fator que pode ter sido

responsável pelo aumento na altura das ondas no local, o que resultou na inviabilidade da realização de parte das estações previamente programadas para a amostragem de 2019, como mencionado anteriormente no tópico 3.2.

Na região da plataforma continental foi observado que, durante a campanha de outono de 2018, a distribuição dos ventos direcionam a pluma do rio da Prata para um provável confinamento, ou seja, uma dificuldade de espalhamento de suas águas. Já durante a campanha de inverno de 2019, a menor magnitude dos ventos sobre a plataforma continental uruguaia/sul brasileira poderia ter auxiliado o maior espalhamento da pluma para as latitudes onde se localizavam as estações de amostragem sobre a plataforma continental ($33,2^{\circ}\text{S}$ - $34,2^{\circ}\text{S}$), conforme será visto adiante pela observação da intensificação de seus sinais termohalinos e biogeoquímicos na plataforma .

Piola, Romero e Zajackovski (2008), observando uma série histórica de dados mensais de estresse do vento (1998-2005) na região norte da desembocadura do rio da Prata, mostraram um estresse do vento para sudoeste ao longo da costa entre outubro e março e um estresse do vento predominantemente para nordeste nos meses de abril a setembro. No caso deste estudo, o estresse do vento não foi um parâmetro calculado, entretanto, a partir dos dados de direção e velocidade dos ventos atuantes sobre a área, pressupõe-se que tenham levado a um maior deslocamento das águas do rio da Prata para nordeste durante a campanha de junho de 2019 que durante a amostragem de abril de 2018, corroborando com o estudo acima mencionado.

Os valores de temperatura do ar (Fig. 10 a e b) foram ligeiramente inferiores durante a campanha de junho de 2019, realizada no início do inverno austral, quando comparados aos de abril de 2018, período de outono no hemisfério sul.

Figura 10 – Temperatura média do ar na região sudoeste do Atlântico Sul para os períodos entre a) 25 de abril a 1 de maio de 2018 e b) 21 a 29 de junho de 2019. Os valores de temperatura estão apresentados em graus Kelvin ($0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$).

Fonte: NOAA's NCEP/NCAR Reanalysis (2020)

Em relação aos episódios de fenômenos ENSO (Fig. 11), de acordo com o boletim publicado em junho de 2018 da *World Meteorological Organization* (WMO) foi observada a ocorrência de um período de La Niña entre 2017/2018, sendo abril de 2018 o mês no qual as condições no Pacífico leste-central retornaram ao estado neutro. Após o retorno do índice ao estado neutro, foi observado o início de um evento de El Niño no final de 2018, cuja anomalia de aquecimento no Pacífico perdurou até o mês de junho de 2019 (WMO, 2019).

Figura 11 - Histórico da ocorrência de fenômenos ENSO de janeiro de 1980 a julho de 2019. O eixo vertical do gráfico representa o valor da anomalia global de temperatura, enquanto os trechos coloridos em cinza, vermelho e azul retratam os meses de neutralidade, El Niño e La Niña, respectivamente, de acordo com o *Oceanic Niño Index* (ONI). A linha preta no canto superior direito do gráfico representa o período entre abril de 2018 a junho de 2019.

Fonte: NOAA's *National Centers for Environmental Information* (2019)

Em relação aos dados mensais de descarga fluvial, foram obtidos valores médios de aproximadamente 18.000 e 15.000 m³ s⁻¹ em abril de 2018 e junho de 2019, respectivamente, no ponto localizado próximo ao estuário superior do rio da Prata, sob influência do rio Paraná (GloFAS, 2020). Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Jaime e Menéndez (2002), que analisaram as variações no regime hidrológico dos rios Paraná e Uruguai entre 1931 a 2001 e constataram que a vazão fluvial mensal máxima no rio Paraná (maior tributário contribuinte para o fluxo do rio da Prata) ocorre entre março e abril, enquanto os valores mínimos de descarga ocorrem em setembro, no fim do período de inverno no hemisfério sul.

Entretanto, apesar dos valores de fluxo fluvial encontrados terem respondido à sazonalidade, o efeito esperado em anos de ocorrência de eventos ENSO é que haja um aumento na descarga do rio da Prata em meses de El Niño e uma redução na vazão em meses de La Niña (PIOLA et al. 2005), o que não foi refletido na média mensal dos meses de amostragem. Contudo, Barreiro (2010) aponta que os efeitos dos fenômenos ENSO sobre a região de estudo sejam mais pronunciados durante os meses de primavera, quando, por exemplo, os eventos de El Niño tendem a aumentar a precipitação sobre a porção sudeste da América do Sul.

Dessa maneira, é provável que os impactos do El Niño/La Niña sobre a descarga fluvial e no regime de ventos da região de estudo ainda estivessem fracos durante o período das campanhas do projeto SAMBAR. Além disso, foi levado em consideração neste trabalho o fluxo fluvial de apenas um mês em cada ano, dentre todos os meses de ocorrência do evento. Deste modo, para se avaliar efetivamente a influência dos fenômenos ENSO sobre a vazão fluvial do rio da Prata e sobre o padrão de ventos no local seria necessário o cálculo da média desses parâmetros dentre todos os meses afetados.

4.2 Identificação das massas d'água por meio de parâmetros físicos

A partir do conjunto de dados obtidos nas campanhas de abril de 2018 e junho de 2019 do projeto SAMBAR, as principais massas d'água presentes na região de estudo foram primeiramente identificadas de acordo com seus valores de temperatura potencial, salinidade e densidade neutra.

A figura 12 (a e b) mostra os diagramas de salinidade por temperatura plotados juntamente com isolinhas de densidade potencial referentes aos dados obtidos durante as campanhas de 2018 e 2019, respectivamente. Nela, é possível observar a presença de uma rica estrutura vertical na região, representada pelas seguintes massas d'água: Água da Pluma do Prata (APP), Água Subtropical de Plataforma (ASTP), Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Circumpolar Superior (ACS), Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), Água Circumpolar Inferior (ACI) e Água Antártica de Fundo (AAF).

Figura 12 - Diagramas TS das amostras coletadas na porção sudoeste do oceano Atlântico Sul durante campanha do projeto SAMBAR, em a) abril de 2018 (outono) e b) junho de 2019 (inverno). As isolinhas destacadas no diagrama representam a densidade potencial (kg m^{-3}).

Fonte: Autor

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Iniciando a análise dos perfis, foi observada a presença de águas com baixos valores de salinidade (entre 32,36 e 33,50 em 2018 e 27,71 e 33,39 em 2019) e temperaturas acima de 15 °C (entre 19,47 e 22,78 °C em 2018 e entre 15,80 e 18,57 °C em 2019) concentradas em

profundidades superficiais em ambos os períodos. Essas águas relativamente menos salinas estiveram presentes nas estações mais costeiras (1 a 7, em ambas as campanhas), onde há influência de águas menos densas ($< 24,22 \text{ kg m}^{-3}$) provenientes da descarga do rio da Prata, indicando a presença da APP.

A APP apresentou variações sazonais marcantes em suas propriedades termohalinas, evidenciadas pelos menores valores de temperatura e salinidade observados durante a campanha realizada no início do inverno de 2019 (junho). De acordo com Lucas et al. (2005), a temperatura da água sobre a plataforma norte-argentina é controlada pelas trocas de calor na interface ar-mar, o que explica os menores valores desse parâmetro observados nas amostras de inverno de 2019, período no qual também foram verificados os menores valores relativos de temperatura do ar do presente estudo.

A maior influência fluvial sobre a plataforma continental (sinalizada pelos menores valores de salinidade) observada durante a amostragem do inverno de 2019 indica que, nesse período, possivelmente houve um maior espalhamento da pluma do rio da Prata em direção nordeste. De acordo com Piola et al. (2000), o deslocamento nordeste da pluma do rio da Prata é provocado pela atuação de ventos de sudoeste sobre a plataforma, ou seja, o mesmo padrão de ventos que foram atuantes na porção sul da região de estudo durante a campanha de inverno de 2019 (Fig. 9b).

As diferenças sazonais de temperatura e salinidade verificadas na plataforma continental (estações 1-8 em 2018 e de 1-7 em 2019, Fig. 6) podem ser observadas em maior detalhe nas seções verticais presentes na Figura 13 a-d. Em ambas as campanhas, a presença da APP foi observada em quase toda a extensão da plataforma, sendo encontrada até a estação 7 em 2018 e 2019, a aproximadamente 140 km de distância da costa, e em profundidades inferiores a 37,5 m (2018) e 43,1 m (2019), respectivamente.

Figura 13 - Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na plataforma continental adjacente a fronteira Brasil-Uruguai durante a) outono 2018 (estações 1 a 8) e b) inverno 2019 (estações 1 a 7) e de salinidade durante c) outono 2018 e d) inverno 2019. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul

Fonte: Autor

Além da extensão da distribuição da APP na plataforma continental, na Figura 13 também é possível observar que os valores mínimos de temperatura e salinidade que ocorreram em superfície não estão localizados na estação mais próxima à costa, área onde pressupõe-se haja maior influência das águas do rio da Prata. Dessa forma, os sinais mínimos de temperatura e salinidade superficiais obtidos para a APP foram observados na estação 6 em 2018 (21,48 °C de temperatura e 32,36 de salinidade, a 116,8 km da costa) e na estação 4 (15,85 °C de temperatura e 27,70 de salinidade), a 72,7 km da costa, durante a campanha de 2019.

Mais distante da costa e a partir da estação 4, em ambas as campanhas foi observada a presença da Água Subtropical de Plataforma (ASTP), caracterizada por valores de salinidade maiores em relação à APP e menores comparados aos da Água Tropical (AT) (i. e. $33,5 < S < 36,0$), além de valores de temperatura que podem variar entre 14 e 21 °C dependendo da influência sazonal sobre a região (PIOLA et al. 2000; MÖLLER et al., 2008).

A ASTP ocupa parte da camada de subsuperfície da plataforma continental sul do Brasil (GUERRERO et al., 2014) e é formada pela mistura da Água Tropical com as fontes de aportes continentais da região, como o rio da Prata, a Lagoa dos Patos e o rio Itajaí (CAMPOS et al., 2013). Neste estudo, com exceção de duas amostras com salinidade próxima a 33,6 e densidade neutra mínima de 22,83 kg m⁻³ obtidas durante a campanha de 2018, a ASTP foi encontrada em faixas menores de temperatura (18,63 a 21,80 °C) e de salinidade (34,52 a 35,94) durante a campanha de inverno 2019, seguindo o padrão observado para a APP. Por sua vez, durante o outono de 2018, a ASTP foi observada em intervalos de temperatura variando entre 19,94 a 23,92 °C e de salinidade entre 33,57 a 35,94, resultando em valores de densidade neutra entre 22,83 e 24,92 kg m⁻³.

A ASTP, apesar de ter sido observada essencialmente sobre a plataforma, também esteve presente em superfície em estações localizadas no talude continental, chegando até a estação 11 (a 231 km da costa) em 2018 e até a estação 10 (a 184 km da costa) em 2019, assim como também foi observado nas campanhas realizadas anteriormente durante o projeto SAMOC-BR (VIEIRA, 2018) e por dados de satélite analisados por Guerrero et al. (2014).

Seguindo a análise do diagrama, observa-se uma zona com valores máximos de salinidade relativos à Água Tropical (AT). Sua presença durante os dois períodos sazonais foi notada tanto no fim da plataforma continental (uma língua de salinidade acima de 36,0 situada abaixo da APP e da ASTP) (Fig. 13 c e d), como na região do talude e oceano aberto (Fig. 14 a-d), marcada por valores de densidade neutra entre 24,57 e 26,33 kg m⁻³ em 2018 e entre 25,14 e 26,32 kg m⁻³ em 2019.

Figura 14 - Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e salinidade no talude e oceano aberto durante a) e b) outono de 2018 e c) e d) inverno de 2019. Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções. As isolinhas tracejadas em cinza representam os limites de densidade neutra (γ , kg m^{-3}) de cada massa d'água identificada. O campo em branco nas seções de inverno representa a região onde não houve amostragem devido às más condições de tempo.

ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

A AT esteve presente em todas as estações do talude e oceano aberto, ocupando os primeiros 300,7 m (estação 15, a 409,3 km de distância da costa) da coluna d'água em 2018 e, chegando somente até 199,8 m em 2019. Em relação à temperatura, os maiores valores foram observados em superfície durante o outono de 2018 (24,79 °C a 4,3 m), enquanto no inverno de 2019, a temperatura máxima obtida para a AT foi de 23,56 °C a 58,2 m de profundidade (estação 7), evidenciando a presença de uma termoclina invertida, comum na região sul do Brasil (MÖLLER et al., 2008).

Os valores mínimos de temperatura, por sua vez, foram de 15,63 °C (a 139,6 m) durante o outono de 2018 e de 16,12 °C (a 199,8 m) no inverno de 2019. Levando em consideração somente a classificação de massas d'água baseada em valores de temperatura e salinidade, muitos trabalhos clássicos (EMILSON, 1961; TSUCHIYA et al., 1994) caracterizam a AT como uma massa d'água com valores de temperatura sempre acima de 20 °C, o que portanto, categorizaria as amostras que obtiveram os valores mínimos de temperatura neste trabalho como pertencentes a outra massa d'água do Atlântico Sul (e.g. Água Central do Atlântico Sul).

Dessa forma, neste trabalho, optou-se por utilizar índices de densidade neutra para identificar as massas d'água presentes fora da região da plataforma continental, o que permitiu a observação de uma maior variabilidade nos valores de temperatura e salinidade dentro de uma mesma massa d'água, possibilitando, assim, uma melhor avaliação de suas alterações.

Se para a temperatura foi possível observar uma pequena diferença sazonal entre seus valores, a salinidade se manteve em intervalos semelhantes entre os dois anos, com mínimo de 35,57 e máximo de 37,04 no outono de 2018 e mínimo de 35,71 e máximo de 36,88 no inverno de 2019. Um padrão similar de distribuição foi observado por Vieira (2018), que verificou que a AT ocupou os primeiros 224,3 m da coluna d'água durante uma campanha hidrográfica realizada na região oeste do paralelo 34,5 °S em setembro de 2016 (fim do inverno), obtendo variações de temperatura e salinidade de 15,32 a 20,17 °C e de 35,59 a 36,46, respectivamente.

As águas quentes e salinas da AT ocupam a porção superficial do sudoeste do Atlântico Sul, tendo origem em baixas latitudes e sendo transportada para sul pela Corrente do Brasil (PIOLA; MATANO, 2017). De acordo com os mesmos autores, as características da AT vão sendo modificadas em seu percurso, onde as relativamente altas temperaturas são resultado do calor adquirido em baixas latitudes e sua salinidade marcante é derivada das perdas de água doce para atmosfera em latitudes médias, onde a evaporação é predominante.

Entretanto, apesar do fluxo predominante para sul da AT, Valla et al. (2018) observaram um padrão de recirculação da CB ao longo da borda oeste de 34,5 °S (Fig. 15). Esse padrão ocorre, pois após o encontro da CB com a Corrente das Malvinas (a sul de 34,5 °S), a CB se

divide em dois ramos, sendo que um segue fluindo para sul e o outro retorna em direção ao equador, resultando em dois sentidos diferentes de transporte nessa região.

Figura 15 – Seção sinótica de velocidade ao longo da costa (V , em cm s^{-1}) obtida utilizando dados de LADCP coletados durante cruzeiro do Projeto SAMOC-BR, que ocupou a porção oeste do paralelo $34,5^\circ\text{S}$ em julho de 2012. Os valores negativos (em azul) indicam um fluxo para sul e os valores positivos (em vermelho) representam um fluxo para norte.

Fonte: Adaptado de Valla et al. (2018)

Dessa forma, o observado por Valla et al. (2018) foi de que a oeste de $49,5^\circ\text{O}$, a AT geralmente apresenta valores de temperatura e salinidade maiores do que a porção da mesma massa d'água localizada a leste de $49,5^\circ\text{O}$. Esse padrão de distribuição das propriedades termohalinas também foi observado no presente estudo, conforme representado na figura 14 (a e b), onde nota-se uma relativa elevação das isotermas e isohalinas a partir de 400 km de distância da costa ($\sim 49,0^\circ\text{O}$) na campanha de 2018.

Abaixo dos 100 metros de profundidade, a isoterma de $18,5^\circ\text{C}$ e a isohalina de 35,3 estabelecem o limite entre a AT e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) (MÖLLER et al., 2008). Águas marcadas por essas características de temperatura e salinidade foram observadas nas últimas estações da plataforma continental (Fig. 13), em ambas as campanhas, indicando uma intrusão da ACAS a profundidades de 124,7 m em 2018 e de 99,5 e 126,2 m em 2019.

No outono de 2018, foi observada a presença da ACAS em apenas um ponto, na região externa da plataforma continental (estação 7), que apresentou temperatura de 17,61 °C, salinidade de 35,99 e densidade neutra de 26,17 kg m⁻³. Já durante a campanha de inverno de 2019, foram encontrados dois pontos com características da ACAS na mesma estação na qual foi observada em 2018 (estação 7), com valores de temperatura de 17,56 e 17,91 °C, de salinidade de 35,94 e 35,99 e densidade neutra de 26,09 e 26,14 kg m⁻³, resultados estes semelhantes aos obtidos no ano anterior.

Rodrigues e Lorenzzetti (2001), ao analisarem fenômenos de ressurgência na costa sudeste brasileira, observaram que a ACAS ressurge em superfície em resposta a ventos de nordeste atuantes na área. Entretanto, Campos et al. (2013) sugerem que dependendo da extensão vertical da APP na plataforma continental, a presença dessa massa menos densa em superfície impede a ACAS de atingir a superfície na plataforma continental, como foi observado no presente estudo, no qual a APP ocupou quase toda a porção superior da plataforma.

A intrusão da ACAS na parte externa da plataforma continental uruguaia/brasileira também foi observada no trabalho desenvolvido por Vieira (2018), realizado na mesma área de estudo em questão. Para o período compreendido no fim do inverno (setembro) de 2016, a ACAS foi observada na plataforma em profundidades que variaram de aproximadamente 50 a 160 m, com faixas de temperatura e salinidade de 14,30 a 18,34 °C e de 35,30 a 35,87, respectivamente, corroborando com os resultados deste estudo.

Fora da região de plataforma continental, a presença da ACAS continuou a ser observada em todo o restante das estações, em uma profundidade média de 468,6 m e 371,4 m no outono de 2018 e no inverno de 2019, respectivamente. Nessa região, a ACAS foi caracterizada por uma zona de transição de propriedades, marcada pela presença de uma termoclina e haloclina acentuadas. De acordo com Liu e Tanhua (2019), a ACAS é formada na área próxima à costa da América do Sul (entre 30 e 45 °S) durante o período de inverno, quando há a subducção de águas superficiais que passam a ocupar a região da termoclina, sendo transportadas para leste pela Corrente do Atlântico Sul.

Dentro da faixa de densidade neutra ocupada pela ACAS (26,35 a 27,10 kg m⁻³) foram observadas variações de temperatura entre 7,16 e 15,83 °C e salinidade de 34,42 a 35,91 durante o outono de 2018, valores semelhantes aos encontrados durante a campanha de inverno de 2019 (7,85 °C < T < 16,15 °C e 34,49 < S < 35,80). Resultados similares aos observados no presente estudo foram obtidos por Valla et al. (2018), que ao analisarem as características termohalinas da ACAS presente na região oeste de 34,5 °S observaram variações de temperatura entre 5,0 e 16,0 °C e de salinidade entre 34,25 e 35,75.

Assim como foi observado para a AT, a influência da recirculação ao longo de 34,5 °S também foi notada nas características termohalinas da ACAS. Adotando como base dados da campanha de outono de 2018, quando foi possível ter uma maior malha de amostragem, foram obtidos valores médios de temperatura e salinidade superiores em 51,5 °O ($T \sim 12,3$ °C e $S \sim 35,15$) e 49,5 °O ($T \sim 12,8$ °C e $S \sim 35,22$) quando comparados ao setor leste do transecto, especialmente em 47,5 °O ($T \sim 10,7$ °C e $S \sim 34,89$), a 600 km de distância da costa (Fig 14 a e b).

De acordo com Valla et al. (2018), abaixo de 34,5 °S e a medida em que a ACAS vai seguindo seu caminho para sul ela vai tendo suas propriedades erodidas pelo contato com águas mais frias e menos salinas de origem Antártica e por isso retorna para norte, no setor a leste de 49,5 °O, com valores de temperatura e salinidade inferiores aos observados na sua fração localizada mais a oeste de 49,5 °O, como verificado neste estudo.

A diminuição de temperatura e salinidade observada na ACAS perdurou até atingir uma região caracterizada principalmente por seu mínimo de salinidade em profundidade ($\sim 34,30$ a uma profundidade média de 937,1 m em 2018 e 889,7 m em 2019), indicando a presença da Água Intermediária Antártica (AIA). Além dos relativamente baixos valores de salinidade comparados com os da ACAS, a AIA também apresentou baixos valores de temperatura, que variaram entre 3,13 °C (em 1236,5 m) e 6,32 °C (em 635,2 m) em 2018 e 3,05 °C (em 1285,2 m) e 7,24 °C (em 401,6 m) em 2019.

De acordo com Talley (1996), a AIA é formada em superfície (> 200 m) na região norte da Corrente Circumpolar Antártica e a leste da passagem de Drake e possui um fluxo predominantemente para norte em uma profundidade média de 1000 m, até aproximadamente 40 °N.

Entretanto, Valla et al. (2018) observaram que na região a oeste de 49,5 °O do paralelo 34,5 °S, uma fração da AIA é transportada embaixo da CB e está se dirigindo de volta ao pólo sul, enquanto a leste dessa longitude, outra fração da AIA se desloca predominantemente para norte. Dessa forma, assim como observado na AT e ACAS, indica-se que a porção da AIA presente no setor mais a oeste do transecto em 34,5 °S apresenta salinidade mais elevada ($> 34,25$) que sua porção presente no setor leste ($< 34,25$), característica que pôde ser observada na Figura 14 b, onde nota-se uma relativa elevação das isohalinas a partir de 400 km de distância da costa e em profundidades acima de 1000 m.

Ainda de acordo com Valla et al. (2018), a porção da AIA encontrada a oeste de 49,5 °O possui propriedades mais similares às observadas na AIA presente na Bifurcação de Santos, a norte da região de estudo. Os autores sugerem que o ramo da AIA vindo de norte está

recirculando junto ao giro subtropical e vêm sendo erodida em seu caminho para sul por misturas com a ACAS e a Água Circumpolar Superior (ACS), que são massas d'água relativamente mais salinas. Já a porção da AIA observada a leste de 49,5 °O possui características semelhantes às encontradas na Escarpa das Malvinas e portanto, consiste em uma forma mais pristina da AIA.

Abaixo da AIA foi observada a presença da ACS, em uma profundidade média de 1561,3 m em 2018 e 1543,0 m em 2019. A ACS é o ramo superior da Água Circumpolar Profunda, uma massa d'água formada no oceano Austral originária da mistura entre a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) e águas que circulam dentro da Corrente Circumpolar Antártica (EMERY, 2003). Ao fluir para norte transportada pela Corrente das Malvinas (CM) ao longo da bacia oeste do Atlântico Sul, a Água Circumpolar Profunda vai de encontro a APAN e se divide em dois ramos, formando a ACS e a Água Circumpolar Inferior (ACI) (HERNANDÉZ-GUERRA et al., 2019).

No presente estudo, a ACS foi marcada por uma faixa estreita de variação de valores de temperatura (2,74 a 3,58 °C) – iguais aos observados por Valla et al. (2018) – e salinidade (34,39 a 34,82), o que dificultou a sua identificação por meio unicamente de parâmetros termohalinos. Apesar da pequena faixa de variação de temperatura e salinidade, Tsuchiya et al. (1994) e Oudot et al. (1999) observaram que a ACS possui uma assinatura química bem definida, caracterizada por um mínimo relativo de oxigênio dissolvido e máximo de nutrientes, que serão melhor discutidos adiante neste trabalho.

Assim como observado para a AIA, os resultados relativos a ACS também mostraram indícios da alteração na direção de fluxo de propagação entre os setores oeste e leste do transecto estudado. Corroborando com o que foi verificado anteriormente por Valla et al. (2018), ao analisarem dados hidrográficos derivados de duas campanhas (2003 e 2011) do programa *GO-SHIP* em 30 °S, Hernández-Guerra et al. (2019) também observaram que uma parcela da ACS flui para sul próximo à quebra do talude, se deslocando por baixo da CB devido à presença de um vórtice ciclônico entre 44,8 e 41,2 °O.

Assim como nos trabalhos de Valla et al. (2018) e Hernández-Guerra et al. (2019), mudanças nas propriedades físicas da ACS também foram observadas ao longo das longitudes. As principais alterações foram observadas para a temperatura, a qual apresentou médias ligeiramente superiores no setor a oeste de 49,5 °O ($T \sim 3,16$ °C em 51,5 °O e $T \sim 2,98$ °C em 49,5 °O) quando comparadas às médias obtidas no setor a leste de 49,5 °O, como exemplo em 47,5 °O onde foi observada média de temperatura de 2,84 °C para a ACS.

Logo abaixo da ACS foi encontrada a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), em uma profundidade média de aproximadamente 2412,0 m em ambos os anos. Assim como observado na literatura (REID, 1989; EMERY, 2003), a APAN foi caracterizada principalmente por sua baixa temperatura potencial (que variou de 2,29 a 3,55 °C em 2018 e de 2,27 a 3,60 °C em 2019) e por um ligeiro aumento relativo dos valores de salinidade quando comparados aos da ACS.

Entretanto, assim como ocorreu para a ACS, a faixa de variação nas propriedades termohalinas da APAN foi pequena, especialmente para a salinidade, que obteve variações em seus valores de 34,75 a 34,94 em 2018 e de 34,79 a 34,93 em 2019. Valores semelhantes aos encontrados neste estudo foram observados por Piola e Matano (2017), que em sua revisão bibliográfica verificaram que a APAN em 30 °S pode ser caracterizada por uma temperatura potencial média de 3,5 °C e salinidade de 34,9.

Segundo Hernández-Guerra et al. (2019), a APAN é formada em altas latitudes do oceano Atlântico Norte, por misturas entre a Água do Mar do Labrador e águas do Mar Nórdico. Depois de formada, a APAN flui para sul transportada pela Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP), sendo o talude continental da América do Sul seu caminho principal de deslocamento em direção à região polar (GARZOLI et al., 2015).

Assim como observado para as massas d'água localizadas acima da APAN, a recirculação a leste de 49,5 °O também atingiu a faixa de densidade ocupada por essa massa d'água em 34,5 °S (MEINEN et al., 2017, VALLA et al., 2018). Entretanto, na profundidade na qual a APAN é encontrada, o componente para norte dessa célula de recirculação já está enfraquecido (5-10 cm s⁻¹ em 47 °O) quando comparado ao componente da CCOP que flui para sul próximo ao talude continental (15 cm s⁻¹ em 49 °O) (VALLA et al., 2018).

Contudo, mesmo com a reduzida velocidade do fluxo para norte, ainda sim foi possível observar a presença de uma porção ligeiramente mais fria e menos salina da APAN a leste de 49,5 °O, quando comparada a sua componente a oeste dessa longitude. Em mais detalhes, foram observadas médias de temperatura e salinidade de 2,99 °C e 34,93 nas amostras da APAN observadas na região do talude (51,0 °O), enquanto valores de 2,76 °C e 34,86 foram observados para as amostras da APAN coletadas em 47,5 °O.

De acordo com Valla et al. (2018), a pequena diferença observada nas propriedades da APAN a leste e oeste de 49,5 °O indicam que uma forma mais erodida por misturas verticais com as massas d'água adjacentes está presente na região mais externa do transecto em 34,5 °S, enquanto uma forma menos modificada, semelhante à forma encontrada mais a norte da região de estudo é observada próxima ao talude continental.

Além das diferenças nas propriedades termohalinas observadas ao longo da borda oeste do paralelo 34,5 °S, também foi verificado que mais a leste do transecto houve um pequeno “espessamento” na camada ocupada pela APAN, conforme pode ser visto pelo distanciamento das isopícnais durante a campanha de outono de 2018 na Figura 16.

Figura 16 - Seção vertical de densidade neutra no talude e oceano aberto durante a campanha de outono 2018. A identificação das massas d'água foi realizada segundo intervalos de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018). Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções.

ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

Abaixo da APAN foram observadas águas com propriedades condizentes às da Água Circumpolar Inferior (ACI) em uma profundidade média de 3356,7 m em 2018 e 3335,5 m em 2019. Em relação aos intervalos das propriedades termohalinas, durante a campanha de abril de

2018 a ACI foi marcada por variações de temperatura entre 0,26 e 2,25 °C e de salinidade entre 34,69 e 34,88. Faixas termohalinas semelhantes foram observadas para essa massa d'água durante a amostragem de 2019, marcada por intervalos de temperatura entre 0,22 e 2,03 °C e de salinidade entre 34,68 e 34,84.

Apesar da semelhança de comportamento com a ACS, a ACI apresentou valores de temperatura e salinidade relativamente mais baixos e uniformes que seu ramo superior, aproximando-os aos encontrados na Água Antártica de Fundo (AAF), massa d'água subjacente a ACI.

A AAF é mais densa e profunda (> 3736,2 m) entre as massas d'água que cruzam a porção oeste do paralelo 34,5 °S. A AAF é formada no Mar de Weddel, em uma região ao sul da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) e segue predominantemente para norte, acompanhando o perfil de fundo devido a sua alta densidade (LIU; TANHUA, 2019). No presente estudo, a AAF foi marcada por valores de temperatura inferiores a 0,26 °C e superiores a -0,12 °C em ambos os períodos estudados e por uma baixa variação de salinidade (entre 34,67 e 34,69 em 2018 e 34,66 e 34,68 em 2019).

Apesar dos valores de temperatura observados para a AAF neste trabalho tenham sido os menores entre todas as massas d'água presentes na seção estudada do Atlântico Sul, Vieira (2018) apresentou dados de temperatura ligeiramente mais baixos que os observados aqui. Em seu trabalho, Vieira (2018) observou variações de temperatura na AAF entre -0,13 e -0,07 °C durante campanha em dezembro de 2012 e entre -0,10 e -0,02 °C durante campanha em setembro de 2016, indicando a ocorrência de um possível pequeno aumento de temperatura nessa massa d'água ao longo dos anos, como foi verificado por Johnson et al. (2016).

Em resumo, a Tabela 7 reúne os dados de temperatura, salinidade e densidade neutra apresentados neste trabalho. Nela, estão contidos os valores mínimos e máximos de cada parâmetro físico observado para as 9 massas d'água encontradas na plataforma continental sul brasileira e na região de talude e oceano aberto ao longo da borda oeste do paralelo 34,5 °S.

Tabela 7 - Faixas de profundidade (m), temperatura (°C), salinidade e densidade neutra (kg m^{-3}) em que as massas d'água presentes na região sudoeste do oceano Atlântico Sul foram observadas durante as campanhas de abril de 2018 (outono) e de julho de 2019 (inverno) do Projeto SAMBAR. As massas d'água presentes sobre a plataforma continental foram identificadas segundo os referenciais termohalinos propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008) e as massas d'água de talude e oceano aberto foram classificadas por faixas de densidade neutra indicados em Valla et al. (2018). Os asteriscos indicam os limites da ACAS em amostras sobre a plataforma continental.

Outono 2018				
Massa d'água	Prof. (m)	T (°C)	Salinidade	Densidade neutra (kg m^{-3})
Água da Pluma do Prata (APP)	2,2 – 37,5	19,47 – 22,78	32,36 – 33,50	22,31 – 23,74
Água Subtropical de Plataforma (ASTP)	3,6 – 68,9	19,94 – 23,92	33,57 – 35,94	22,83 – 24,92
Água Tropical (AT)	2,4 – 300,7	15,63 – 24,79	35,57 – 37,04	24,57 – 26,33
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	124,7* – 698,1	7,16 – 17,62*	34,42 – 35,99*	26,17* – 27,08
Água Intermediária Antártica (AIA)	554,8 – 1236,5	3,13 – 6,32	34,18 – 34,39	24,14 – 27,56
Água Circumpolar Superior (ACS)	1185,3 – 1974,0	2,74 – 3,58	34,39 – 34,81	27,60 – 27,89
Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)	1855,4 – 2959,2	2,29 – 3,55	34,75 – 34,94	27,90 – 28,09
Água Circumpolar Inferior (ACI)	2516,7 – 3931,1	0,26 – 2,25	34,69 – 34,88	28,10 – 28,27
Água Antártica de Fundo (AAF)	3736,2 – 4758,3	-0,12 – 0,26	34,67 – 34,69	28,28 – 28,35
Inverno 2019				
Água da Pluma do Prata (APP)	2,7 – 43,1	15,80 – 18,57	27,71 – 33,39	20,08 – 24,22
Água Subtropical de Plataforma (ASTP)	2,3 – 68,3	18,63 – 21,80	34,52 – 35,94	24,53 – 25,00
Água Tropical (AT)	3,2 – 199,8	16,12 – 23,56	35,71 – 36,88	25,14 – 26,32
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	99,5* – 640,9	7,85 – 17,91*	34,49 – 35,99*	26,09* – 27,05
Água Intermediária Antártica (AIA)	401,6 – 1290,0	3,05 – 7,24	34,20 – 34,50	27,12 – 27,58
Água Circumpolar Superior (ACS)	1234,6 – 1857,9	2,78 – 3,52	34,39 – 34,82	27,60 – 27,88
Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)	1975,4 – 2959,8	2,27 – 3,60	34,79 – 34,93	27,91 – 28,09
Água Circumpolar Inferior (ACI)	2947,9 – 3846,9	0,22 – 2,03	34,68 – 34,84	28,11 – 28,27
Água Antártica de Fundo (AAF)	3806,2 – 4761,1	-0,12 – 0,26	34,66 – 34,68	28,28 – 28,34

4.3 Caracterização biogeoquímica das massas d'água

Após a identificação inicial das massas d'água de acordo com os parâmetros físicos clássicos, foram associadas propriedades biogeoquímicas a elas. As massas d'água observadas na plataforma continental, por estarem sob influência direta de aportes continentais, possuem respostas biogeoquímicas diferentes daquelas observadas na região do talude e oceano aberto. Dessa forma, para melhor interpretação dos dados, os resultados obtidos para as massas d'água presentes nessas duas regiões serão tratadas em tópicos diferentes.

4.3.1 Plataforma continental

Como observado pelas características físicas das massas d'água apresentadas anteriormente, a plataforma continental adjacente à fronteira do Brasil com Uruguai esteve majoritariamente ocupada pela Água da Pluma do Prata (APP), Água Subtropical de Plataforma (ASTP) e Água Tropical (AT), com intrusão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) no limite da plataforma com o talude continental.

Considerando as quatro massas d'água mencionadas acima, estas foram caracterizadas quanto às suas propriedades biogeoquímicas utilizando dados de oxigênio dissolvido (OD), silicato, fosfato, nitrito, nitrato dissolvidos, porcentagem de saturação de oxigênio, material particulado em suspensão total (MPS) e orgânico (MOPS) e clorofila-*a* (cl-*a*), cujas distribuições estão apresentadas nas figuras 17 (dados de outono de 2018) e 18 (dados de inverno de 2019). Nelas, os dados biogeoquímicos estão distribuídos por massa d'água seguindo os limites termohalinos propostos por Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008).

Figura 17 – Distribuição das propriedades biogeoquímicas dentro dos limites de temperatura e salinidade das diferentes massas d'água presentes na plataforma continental (estações de 1 a 8) durante a campanha de abril de 2018 (outono) do Projeto SAMBAR. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros biogeoquímicos.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul

Fonte: Autor

Figura 18 - Distribuição das propriedades biogeoquímicas dentro dos limites de temperatura e salinidade das diferentes massas d'água presentes na plataforma continental (estações de 1 a 7) durante a campanha de junho de 2019 (inverno) do Projeto SAMBAR. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros biogeoquímicos.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul

Fonte: Autor

Água da Pluma do Prata (APP)

A partir das figuras 17a e 18a foi observado que, entre todas as massas d'água presentes na plataforma continental, a APP (caracterizada por $T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $S \leq 33,5$ de acordo com Piola et al., 2000 e Möller et al., 2008) apresentou as maiores concentrações de OD nos dois períodos, com diferenças sazonais entre eles. Essas concentrações variaram entre $169,77\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 3 a 32,3 m) e $228,92\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 6 a 3,8 m) no outono de 2018 e entre $179,73\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 5 a 33,5 m) e $255,13\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 3 em 4,6 m) durante a campanha de inverno de 2019.

Segundo Liu e Tanhua (2019), as características tanto conservativas como não-conservativas da camada de mistura possuem alta variabilidade sazonal. Dessa forma, os maiores teores de OD observados na APP durante a campanha de inverno de 2019 devem estar relacionados aos menores valores de temperatura e de salinidade obtidos durante esse período (em relação aos dados de outono), fatores estes que influenciam a solubilidade dos gases na água.

De acordo com a lei de solubilidade dos gases (Lei de Henry), os gases se dissolvem com maior facilidade em águas de menor temperatura e salinidade, conforme foi demonstrado em várias regiões do mundo, como estuários (ONABULE et al., 2020) e regiões oceânicas adjacentes a desembocadura de rios (CHI et al., 2017), incluindo a região sul do Brasil (BRAGA; NIENCHESKI, 2006). Neste último trabalho, ao analisarem dados da plataforma do Rio Grande do Sul (Brasil) os autores observaram teores mais elevados de OD ($5,80$ a $6,15\text{ mL L}^{-1}$, equivalente a aproximadamente $252,96$ e $268,23\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) no inverno que durante o período de outono, quando foram encontrados teores de OD variando entre $4,6$ a $6,0\text{ mL L}^{-1}$ (cerca de $200,63$ e $261,69\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$), corroborando aos resultados observados neste estudo.

Mais ao sul, Braga et al. (2008) também verificaram altos valores de OD ($\geq 218\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$), assim como porcentagens de saturação de oxigênio superiores a 100% em alguns pontos coletados sobre a plataforma continental adjacente à foz do rio da Prata, sobretudo durante a campanha realizada no inverno (águas mais frias e menos salinas). Águas apresentando supersaturação de oxigênio também foram observadas na região durante os dois períodos sazonais amostrados neste trabalho, com valores máximos de 102,6% no outono de 2018 (estação 6 a 3,8 m de profundidade) e de 101,7% no inverno de 2019 (estação 7 a 8,0 m) para a APP.

Para melhor visualização da distribuição dos parâmetros biogeoquímicos sobre a plataforma continental ao norte da desembocadura do rio da Prata, elaborou-se as figuras 19

(com seções verticais de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e porcentagem de saturação de oxigênio) e 20 (seções de silicato, fosfato, nitrito e nitrato) relativas às duas campanhas do projeto SAMBAR (outono 2018 e inverno 2019).

Figura 19 - Seções verticais de a) temperatura, c) salinidade, e) oxigênio dissolvido e g) porcentagem de saturação de oxigênio durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f, h) do Projeto SAMBAR, realizadas no sudoeste do oceano Atlântico Sul. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul

Fonte: Autor

Figura 20 - Seções verticais de a) silic[ato], c) fosfato, e) nitrito e g) nitrato durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f, h) do Projeto SAMBAR, realizadas no sudoeste do oceano Atlântico Sul. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.

Fonte: Autor

Em 32,3 m de profundidade da estação 3 (~ 57 km da costa) da campanha de outono de 2018 foi observado o teor mínimo de OD na APP ($169,77 \mu\text{mol kg}^{-1}$), que correspondeu ao menor valor de porcentagem de saturação de oxigênio de toda a campanha (76,0 %). Ao mesmo tempo, altas concentrações de nutrientes ($12,57 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de silicato, $0,76 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato e os valores máximos de nitrito $\sim 0,49 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e nitrato $\sim 2,60 \mu\text{mol kg}^{-1}$) estiveram associadas a esse valor mínimo de saturação, indicando a ocorrência de um processo de regeneração de nutrientes nessa massa d'água (Fig. 20).

Durante a regeneração, microrganismos atuam na decomposição da matéria orgânica, consumindo o oxigênio disponível e disponibilizando nutrientes inorgânicos, como fosfato e produtos nitrogenados, em sua forma dissolvida de volta para a coluna d'água (HARRISON, 1980; KIRCHMAN, 1994). Dessa forma, o resultado de um processo de regeneração é uma redução nos teores de oxigênio dissolvido e na porcentagem de saturação desse gás, acompanhados por altos teores relativos de nutrientes inorgânicos dissolvidos, característica que foi observada neste ponto (estação 3 a 32,3 m da campanha de outono 2018), revelando evidências de oxidação de matéria orgânica.

Cenário semelhante ao observado no presente estudo foi observado por Bordin et al. (2019), que verificaram altas concentrações de silicato ($8,16 \pm 2,40 \mu\text{mol kg}^{-1}$), fosfato ($0,46 \pm 0,23 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato ($1,66 \pm 0,90 \mu\text{mol kg}^{-1}$) na porção da APP presente sobre plataforma continental de Santa Catarina (~ 27°S) nos invernos de 2015 e 2016. Os autores atribuíram os altos valores de fosfato e nitrato principalmente a ocorrência de processos de regeneração de nutrientes nas camadas de fundo, sinalizados pela baixa porcentagem de saturação de oxigênio ($78,25 \pm 7,55\%$) durante as campanhas.

Em geral, a APP apresentou concentrações elevadas dos quatro nutrientes analisados (silicato, fosfato, nitrito e nitrato) em relação as demais massas d'água encontradas na plataforma continental nas duas campanhas (Fig. 17 e 18 c,d,e,f). Dentre os nutrientes avaliados, as concentrações de silicato foram as que apresentaram maiores diferenças sazonais entre massas d'água, sendo os maiores valores observados durante a amostragem de inverno de 2019.

Durante a campanha de outono de 2018, os valores de concentração de silicato variaram entre $4,69 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 2 a 13,7 m de profundidade) e $20,42 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 1 a 7,3 m de profundidade), concentrações estas relativamente mais baixas que as observadas durante o inverno de 2019, no qual foram verificadas concentrações de silicato entre $6,03 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 6 a 19,6 m) e $46,72 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 4 a 3,4 m).

Para facilitar o acompanhamento das faixas de parâmetros biogeoquímicos observadas para as massas d'água presentes na plataforma continental durante as campanhas de outono de

2018 e inverno de 2019, foi elaborada a Tabela 8 reunindo todos os dados que serão apresentados neste tópico.

Tabela 8- Faixas de variação dos parâmetros termohalinos e biogeoquímicos observados para as massas d'água presentes na plataforma continental durante as campanhas de outono de 2018 e inverno de 2019 do Projeto SAMBAR.

Outono 2018				
Massa d'água	APP (n=16)	ASTP (n=5)	AT (n=8)	ACAS (n=1)
Profundidade (m)	2,2 – 37,5	3,6 – 68,9	27,8 – 158,0	124,7
Temperatura (°C)	19,5 – 22,8	19,94 – 23,02	20,18 – 24,72	17,62
Salinidade	32,36 – 33,50	33,57 – 35,57	36,49 – 37,00	35,99
OD ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	169,77 – 228,92	152,95 – 220,94	203,30 – 219,56	198,90
% Sat de OD	76,0 – 102,6	69,4 – 102,6	91,5 – 105,5	85,1
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	4,69 – 20,42	3,31 – 15,9	0,97 – 7,97	3,13
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,09 – 0,84	0,22 – 1,02	0,03 – 0,13	0,36
Nitrito ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	< LD – 0,49	0,01 – 0,25	< LD – 0,28	0,03
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	< LD – 2,60	0,02 – 5,34	< LD – 1,07	3,83
MPS (mg L^{-1})	26,00 – 44,24	29,40 – 35,22	31,46 – 39,22	31,34
MOPS (mg L^{-1})	6,00 – 8,94	6,40 – 8,33	6,29 – 9,56	7,11
Cl-a (mg m^{-3})	0,32 – 2,74	0,21 – 0,52	0,10 – 0,52	< LD
Inverno 2019				
Massa d'água	APP (n=37)	ASTP (n=8)	AT (n= 2)	ACAS (n=2)
Profundidade (m)	2,6 – 43,1	20,0 – 68,3	58,2 – 80,3	99,5 – 126,2
Temperatura (°C)	15,80 – 18,57	18,63 – 20,44	21,69 – 23,56	17,56 – 17,91
Salinidade	27,71 – 33,39	34,52 – 35,05	36,52 – 36,88	35,94 – 35,99
OD ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	179,73 – 255,13	180,01 – 224,92	199,03 – 202,57	195,42 – 195,86
% Sat de OD	76,0 – 101,7	80,4 – 100,4	92,1 – 97,0	83,5 – 84,3
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	6,03 – 46,72	4,70 – 16,21	1,53 – 2,63	3,67 – 4,54
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,55 – 1,64	0,31 – 0,72	0,11 – 0,24	0,41
Nitrito ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,03 – 3,39	0,03 – 0,08	0,05 – 0,23	0,04 – 0,06
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,26 – 6,13	0,05 – 3,14	0,12 – 1,22	3,64 – 3,83
MPS (mg L^{-1})	12,50 – 143,23	14,29 – 28,27	16,90 – 18,22	15,73 – 17,03
MOPS (mg L^{-1})	3,45 – 35,16	3,69 – 7,22	4,81 – 5,11	4,22 – 4,67
Cl-a (mg m^{-3})	0,03 – 2,42	0,03 – 1,05	0,03	0,03

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; LD – Limite de Detecção

Como pode ser visto nas letras a e b da Figura 20, em geral, as maiores concentrações de silicato foram observadas nas estações mais próximas à costa, especialmente na estação 1, que está sob a influência direta da descarga do rio (Fig.19 a-d). Entretanto, na campanha realizada no inverno de 2019, um segundo pico de silicato em superfície foi observado na estação 4, a aproximadamente 75,6 km da costa, local onde também foi observado o menor valor de salinidade para a APP, conforme visto no tópico 4.2.

De acordo com Frings et al. (2016), cerca de 60% de todo o silicato dissolvido que entra nos oceanos possui origem continental, e, dessa forma, pode ser considerado um ótimo traçador de aportes terrestres (BRAGA et al., 2004; SOSPEDRA et al., 2018; BORDIN et al., 2019). As maiores concentrações desse parâmetro verificadas durante a campanha de inverno de 2019 corroboram com a hipótese de que houve um maior espalhamento para nordeste das águas menos salinas provenientes do rio da Prata (Fig. 9 b), aumentando a influência fluvial sobre a região de estudo nesse período e, consequentemente, elevando os teores de silicato sobre a plataforma.

A associação do silicato com a salinidade auxilia na observação da influência continental em águas oceânicas (BELL, 1994). Ao realizar a correlação linear entre a salinidade e os valores de silicato dissolvido obtidos durante as duas campanhas (Fig. 21 a e b), observou-se uma melhor correlação entre esses dois parâmetros no inverno de 2019, no qual a presença de águas menos salinas e mais ricas em silicato foi proeminente. Dessa forma, o estudo da distribuição das concentrações de silicato sobre a plataforma continental pode além de auxiliar na caracterização da APP, também fornecer indícios, juntamente com a salinidade, da intensidade da influência fluvial sobre a região.

Figura 21 - Perfis de salinidade x silicato das amostras coletadas na plataforma continental sudoeste do Atlântico Sul durante o a) outono de 2018 e b) inverno de 2019. A linha em preto representa a regressão linear e o R^2 é o coeficiente de determinação.

A boa relação entre a influência fluvial e a distribuição de silicato sobre a plataforma também foi observada por Calliari et al. (2009), ao observarem concentrações máximas de silicato em torno de $115,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$ no interior do estuário do rio da Prata, enquanto concentrações bastante inferiores ($\sim 15,60 \mu\text{mol kg}^{-1}$) foram observadas na zona de mistura com águas costeiras, entretanto, ainda considerada altas em relação as observadas em superfície próximo a isóbata de 100 m ($0,43 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

Assim como o silicato, o principal meio de entrada de fosfato nos oceanos é pelo aporte de rios (PAYTAN; MCLAUGHLIN, 2007), podendo também ser considerado um traçador secundário de águas continentais (BRAGA et al., 2008). Durante a amostragem de inverno de 2019 (Fig. 18d), notou-se que as concentrações de fosfato foram superiores ($0,55 - 1,64 \mu\text{mol kg}^{-1}$) às verificadas durante a amostragem de outono de 2018 ($0,09 - 0,84 \mu\text{mol kg}^{-1}$) (Fig. 17d), resultando em uma média de concentração de $1,10 \pm 0,28 \mu\text{mol kg}^{-1}$ durante o inverno, quase o dobro da média obtida durante o outono ($0,62 \pm 0,17 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

De acordo com a figura 20 (c e d), em ambos os períodos as maiores concentrações de fosfato foram obtidas principalmente próximas à costa, com uma redução dos teores ao se afastar dessa região. Entretanto, durante a campanha de inverno de 2019, assim como verificado anteriormente na distribuição de silicato, foi observado um segundo pico de fosfato ($1,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$) na estação 4 a 15,0 m de profundidade ($\sim 75,6 \text{ km}$ da costa).

Braga et al. (2008), ao compararem a distribuição de silicato e fosfato na plataforma continental entre Mar del Plata (Argentina) e Itajaí (Brasil) verificaram grandes diferenças sazonais na concentração desses parâmetros durante o verão de 2004 (silicato máx. $40,31 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e fosfato máx. $2,21 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e o inverno de 2003 (silicato máx. $81,56 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e fosfato máx. $3,22 \mu\text{mol kg}^{-1}$). As concentrações de silicato e fosfato observadas para a APP durante as campanhas de outono e inverno apresentadas no presente estudo foram bastante inferiores as encontradas no estudo de Braga et al. (2008), porém, revelam que os valores aqui obtidos se enquadraram no intervalo característico da área descrito na literatura.

Na maior parte das amostras pertencentes à APP foram observadas baixas concentrações de nitrito em ambos os anos, com valores inferiores a $0,49 \mu\text{mol kg}^{-1}$ durante o outono de 2018 (Fig. 17e) e inferiores a $0,83 \mu\text{mol kg}^{-1}$ durante a campanha de inverno de 2019 (Fig. 18e), com exceção das amostras coletadas na primeira estação de 2019. Teores de nitrito relativamente altos ($> 2,79 \mu\text{mol kg}^{-1}$) foram observados nessa estação, com um valor máximo de $3,39 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 11,6 m de profundidade.

O nitrito é um componente intermediário do ciclo do nitrogênio e geralmente é encontrado em baixas concentrações, sobretudo em águas oceânicas, onde são observados

teores próximos ao limite de detecção dos métodos tradicionais devido a abundância de oxigênio dissolvido na água, condição esta que propicia a oxidação do nitrito a nitrato (NIENCHESKI, 2015). Entretanto, de acordo com Ciotti et al. (1995), em zonas costeiras esse comportamento é alterado, devido a influência de aportes continentais que atuam como fonte de nutrientes e matéria orgânica para a plataforma continental, sendo possível encontrar concentrações mais elevadas de nitrito nestes locais. Assim, valores de nitrito mais acentuados na área de plataforma continental revelam a atuação de processos biogeoquímicos que favorecem o acúmulo desse nutriente, como processos de nitrificação e denitrificação, que dependem da disponibilidade de oxigênio e da carga de matéria orgânica (BRAGA et al., 2008).

As concentrações mais altas de nitrito na APP observadas durante o inverno de 2019 foram acompanhadas por altas concentrações de nitrato, que chegaram a um máximo de $6,13 \mu\text{mol kg}^{-1}$ na primeira estação (Fig. 20 h). Isso indica que apesar do nitrito estar sendo convertido em nitrato no processo de nitrificação, pois há disponibilidade de oxigênio, a carga de material orgânico em suspensão variou bastante, atingindo $35,16 \text{ mg L}^{-1}$ na estação 1, podendo estar assim contribuindo de forma mais acentuada ao acúmulo dessa forma intermediária de nitrogênio na plataforma continental durante o inverno, período de maior regeneração de nutrientes.

Ao contrário do observado na campanha de inverno de 2019, no outono de 2018 as concentrações de nitrato na APP não ultrapassaram $1,12 \mu\text{mol kg}^{-1}$ na estação 1, atingindo seu teor máximo ($2,60 \mu\text{mol kg}^{-1}$) na estação 3 a 32,3 m (~ 57 km da costa) (Fig. 20 g).

Como observado para silicato e fosfato, a distribuição das concentrações de nitrato durante a campanha de inverno de 2019 também apresentaram um segundo pico máximo ($5,72 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em uma região mais afastada da costa, na estação 5 (~ 94,7 km de distância) em 33,5 m de profundidade (Fig. 20 h). Nesse ponto, também foi observado o valor mínimo de OD e de porcentagem de saturação de oxigênio para a APP durante a campanha de 2019, baixo teor de nitrito ($0,07 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e alto valor de fosfato ($1,30 \mu\text{mol kg}^{-1}$), indicando que deve estar ocorrendo um intenso processo de regeneração de nutrientes no local, com o uso de oxigênio para os processos de oxidação, resultando assim nos maiores valores de nitrato e fosfato em relação áreas adjacentes (VAN AKEN, 2007).

As concentrações de material particulado total em suspensão (MPS) e material orgânico particulado em suspensão (MOPS) na APP também foram máximas nas estações próximas ao continente (Fig. 22 a-d). Durante a amostragem de outono de 2018, as concentrações de MPS variaram entre $26,00 \text{ mg L}^{-1}$ (estação 4 a 15,8 m) e $44,24 \text{ mg L}^{-1}$ (estação 1 a 3,2 m) e as de

MOPS entre 6,00 e 8,94 mg L⁻¹, nas mesmas estações onde ocorreram o mínimo e máximo de MPS.

Figura 22 - Seções verticais de a) material particulado total em suspensão (MPS), c) material orgânico particulado em suspensão (MOPS) e e) clorofila-*a* durante a campanha de outono de 2018 e de inverno de 2019 (b, d, f) do Projeto SAMBAR. Dados de profundidade total de cada estação adquiridos durante os cruzeiros foram utilizados para compor a batimetria da seção vertical.

Fonte: Autor

Em 2019, observou-se concentrações mínimas e máximas de MPS para a APP de 12,50 mg L⁻¹ (estação 3 a 12,6 m) e 143,23 mg L⁻¹ (estação 1 a 11,6 m), respectivamente. A distribuição do MOPS na APP apresentou comportamento similar ao observado no outono de 2018, com os valores mínimo (3,45 mg L⁻¹) e máximo (35,16 mg L⁻¹) presentes no mesmo local de mínimo e máximo de MPS.

As altas concentrações de MPS (> 59,47 mg L⁻¹) e MOPS (> 16,84 mg L⁻¹) observadas durante a campanha de inverno de 2019 se restringiram a estação 1, onde foram obtidos valores máximos desses parâmetros, confirmando que a carga de material particulado está entrando na plataforma pelo rio da Prata, o que também foi indicado pelas altas concentrações de silicato.

Observou-se que em todo o restante da plataforma continental os teores de MPS e MOPS se aproximaram daqueles obtidos durante a campanha anterior.

Entretanto, mesmo que os valores mais elevados de MPS e MOPS do inverno de 2019 tenham se restringido à estação mais costeira, essa característica representa mais uma evidência (juntamente com os baixos valores de salinidade e altas concentrações de nutrientes, especialmente de silicato) da maior contribuição continental presente no período de inverno, a qual pode ter sido responsável pelo aumento do aporte de material em suspensão na plataforma continental ou pode ter acarretado em ressuspensão de material particulado nessa área.

Em suma, todo o conjunto de variáveis físicas e biogeoquímicas aqui avaliado influenciou a produtividade primária, cujos reflexos podem ser observados pela distribuição de *chl-a* na plataforma continental (Fig. 22 e-f). Apesar da concentração de *chl-a* na APP durante a campanha de outono de 2018 ($0,32$ a $2,74 \text{ mg m}^{-3}$) ter apresentado limites mínimos e máximos superiores aos observados em 2019 ($0,03$ a $2,42 \text{ mg m}^{-3}$), a média de *chl-a* obtida para esta campanha foi ligeiramente inferior ($0,99 \pm 0,76 \text{ mg m}^{-3}$) à média de *chl-a* verificada durante a amostragem inverno de 2019 ($1,24 \pm 0,73 \text{ mg m}^{-3}$), indicando que valores mais elevados desse parâmetro puderam ser observados em uma maior quantidade de pontos em 2019, conforme observado na figura 22 f.

A maior média de *chl-a* obtida durante o inverno de 2019 pode ter sido resposta à elevação da concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos ocasionada pela intensificação da influência fluvial. Segundo Carreto et al. (1986), a frente estuarina do rio da Prata é caracterizada por fluxos verticais de nutrientes, que fertilizam a água e são responsáveis pelas concentrações de *chl-a* relativamente altas próxima à desembocadura.

O estudo de Piola, Romero e Zajackovski (2008) corrobora as diferenças sazonais nas concentrações de *chl-a* observadas no presente trabalho. Os autores, ao analisarem dados mensais (1998-2005) de clorofila-*a* em superfície, obtidos por sensores em satélites, observaram que as concentrações máximas do pigmento na plataforma interna ao norte do estuário do rio da Prata ocorreram durante mês de julho, justificadas pelo avanço nordeste da pluma neste período, enquanto as concentrações mínimas foram observadas de outubro a março.

Assim, a APP apresentou, associados aos baixos valores de salinidade, altos valores de nutrientes dissolvidos (com assinatura mais distinta de silicato), com os maiores valores sendo observados no inverno de 2019. O consumo de oxigênio dissolvido revelou processo de regeneração de nutrientes, associado a um aumento principalmente dos teores de fosfato, nitrito e nitrato. Os teores de clorofila-*a* indicaram uma importante atividade biológica junto as águas mais rasas na APP, apresentando distribuição mais extensa sobre a plataforma no período de

inverno, o que também colaborou para a maior faixa de variação das concentrações de oxigênio dissolvido encontrada nessas águas.

Assim, coexistiram sobre a área de domínio da APP na plataforma a influência de aportes continentais, processos de regeneração de nutrientes e de produção primária, com alta carga de material particulado total e orgânico influenciada pela descarga do rio. Assim, o espalhamento da pluma para nordeste influenciado pelo regime de ventos foi acompanhado pelos sinais biogeoquímicos.

Água Subtropical de Plataforma (ASTP)

A ASTP foi caracterizada de acordo com Piola et al. (2000) e Möller et al. (2008) pelas seguintes condições termohalinas nos dois períodos sazonais: $T > 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $33,5 < S < 35,3$ e $T > 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35,3 \leq S < 36$, conforme delimitado nas figuras 17 e 18 apresentadas acima. Iniciando a descrição das propriedades biogeoquímicas da ASTP com os teores de OD, foram observadas variações desse parâmetro entre $152,95$ e $220,94\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ durante o outono de 2018 e entre $180,01$ e $224,92\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ na campanha de inverno de 2019.

O valor mínimo de OD obtido para a ASTP na campanha de outono de 2018 (que também foi o mais baixo observado em toda a plataforma nesse ano) foi encontrado na estação 4 a 68 m de profundidade, a uma distância de 75,6 km da costa (Fig. 19 a). Esse valor também correspondeu ao mínimo de porcentagem de saturação de oxigênio (69,4 %) de toda a campanha de outono (Fig. 19 c), associado a altas concentrações relativas de silicato ($15,90\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$), fosfato ($1,02\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato ($5,34\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) (Fig. 20 a, c e g), sendo os teores relativos desses dois últimos nutrientes, os máximos observados para a ASTP e em toda a região da plataforma continental durante a campanha de outono de 2018.

As concentrações de nutrientes dissolvidos observadas nessa profundidade a 75,6 km de distância da costa apresentaram valores semelhantes ou até superiores aos verificados nas estações próximas à costa (ocupadas pela APP e sob maior influência do aporte continental) na campanha de outono de 2018, indicando a ocorrência de processo de regeneração de nutrientes nas águas da ASTP presentes no fundo da estação 4. Assim como observado para a APP, durante a regeneração há uma diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido na água, na porcentagem de saturação e ocorre a remineralização dos nutrientes inorgânicos dissolvidos, processo que eleva localmente a quantidade de nutrientes.

Observando o perfil de fundo na Figura 19, verifica-se que a 75,6 km da costa há um aprofundamento na batimetria em relação às estações adjacentes. De acordo com Rocha, Griep

e Weigert (2014), este desnível é referente a um paleocanal do rio da Prata, conhecido como “Poço de lama” ou “Canal do Albardão”, que está localizado paralelo à costa e possui fundo lamoso. O desnível na batimetria pode ter acarretado em uma redução da circulação local, impossibilitando a mistura das águas de fundo com as parcelas de água sobrejacentes, gerando assim, um ambiente propício para o desenvolvimento de atividades decompositoras, que podem estar exercendo influência também nas amostras de fundo de estações adjacentes, conforme observado anteriormente na amostra de fundo da estação 3 pertencente a APP, a qual apresentou a concentração mínima de OD para essa massa.

O possível aprisionamento de águas com condições que favorecem a regeneração de nutrientes também foi observado no mesmo local por Vieira (2018), onde as concentrações de fosfato ($1,20 \mu\text{mol kg}^{-1}$), silicato ($13,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$), nitrato ($7,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrito ($0,10 \mu\text{mol kg}^{-1}$) se apresentaram relativamente elevadas, acompanhadas por baixo valor de OD ($162,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

Assim como observado na campanha de outono de 2018, valores de fosfato e nitrato na ASTP superiores aos da APP também foram observados por Bordin et al. (2019) na plataforma continental de Santa Catarina, ao norte da região de estudo. Entretanto, estes autores obtiveram esses resultados em campanhas realizadas no inverno, padrão que não foi verificado nas amostras referentes a campanha de inverno de 2019 realizada no presente estudo.

O possível confinamento de águas de fundo na estação 4 (Canal do Albardão) foi observado em grande destaque durante a campanha de outono de 2018, entretanto, no inverno de 2019, esse efeito foi atenuado e as águas situadas nesse ponto adquiriram características similares às parcelas de água circundantes. Durante a amostragem de inverno de 2019, as condições climáticas estavam favoráveis ao processo de mistura (alta intensidade de ventos em relação ao outono de 2018, Fig. 9), justificando assim, a atenuação do efeito de confinamento das águas neste ponto.

Dessa forma, foi observado que a amostra coletada na região do paleocanal durante a campanha de 2018 apresentou características diferenciadas do restante das amostras pertencentes à ASTP obtidas naquela campanha e no ano seguinte. Com exceção dos resultados referentes a essa amostra, em geral foram observadas diferenças sazonais entre os dois períodos estudados para as concentrações de nutrientes inorgânicos dissolvidos da ASTP, que apresentou concentração de silicato mais elevada durante a campanha de inverno de 2019 ($4,70 - 16,21 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação a amostragem realizada no outono ($3,31 - 6,69 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

Desconsiderando a amostra localizada na região de desnível batimétrico, os teores de fosfato observado durante os dois períodos foram semelhantes, variando entre $0,22$ e $0,77 \mu\text{mol}$

kg^{-1} na campanha de outono de 2018 e de 0,31 a $0,72 \mu\text{mol kg}^{-1}$ durante o inverno de 2019. O mesmo padrão de comportamento do silicato foi observado nas concentrações de nitrato, as quais foram inferiores durante o outono de 2018 ($0,02$ a $2,46 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação aos valores de inverno de 2019 ($0,05$ a $3,14 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Entretanto, notaram-se teores de nitrito relativamente menores durante o inverno de 2019 ($0,03$ a $0,08 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação ao outono de 2018 ($0,01$ a $0,25 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

Tratando das concentrações de MPS e MOPS, foram observados maiores níveis desses parâmetros na campanha de outono de 2018 ($29,40$ a $35,22 \text{ mg L}^{-1}$ de MPS e $6,40$ a $8,33 \text{ mg L}^{-1}$ de MOPS) em relação ao período de inverno ($14,29$ a $28,27 \text{ mg L}^{-1}$ de MPS e $3,69$ a $7,22 \text{ mg L}^{-1}$ de MOPS), distribuição contrária a verificada para a APP.

Os teores de *chl-a* da ASTP acompanharam a relativamente menor disponibilidade de nutrientes e aumento da profundidade em relação a APP. Comparando os dois períodos sazonais, a média de concentração de *chl-a* na ASTP obtida durante o outono ($0,32 \pm 0,12 \text{ mg m}^{-3}$) foi superior a verificada durante o inverno ($0,28 \pm 0,41 \text{ mg m}^{-3}$) para essa massa d'água. Entretanto, como pode ser observado pelo alto valor de desvio padrão entre as amostras da ASTP coletadas no inverno, durante este período foi encontrada uma grande amplitude entre os valores, com concentração mínima de *chl-a* de $0,03 \text{ mg m}^{-3}$ (inferior à observada em 2018 $\sim 0,21 \text{ mg m}^{-3}$) e máxima de $1,05 \text{ mg m}^{-3}$, valor superior ao máximo obtido no ano anterior ($0,52 \text{ mg m}^{-3}$).

As amostras que apresentaram os maiores teores de *chl-a* durante a campanha de inverno de 2019 podem ser observadas em destaque na Figura 22f, sendo estas os dois exemplares de ASTP que foram observados mais superficialmente na campanha (ambas na estação 7, a $20,0$ e $31,7 \text{ m}$ de profundidade, respectivamente). Os dois maiores valores de *chl-a* obtidos durante a campanha de inverno de 2019 foram seguidos das maiores concentrações de OD ($224,92$ e $221,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$) obtidos para a ASTP.

Sumarizando, a principal característica biogeoquímica que diferenciou a ASTP da APP foi a sua menor concentração de nutrientes inorgânicos dissolvidos (silicato, fosfato, nitrito e nitrato). Uma exceção a esta particularidade foi observada durante a campanha de 2018, na fração da ASTP presente no Canal do Albardão, um paleocanal do rio da Prata localizado a cerca de $75,6 \text{ km}$ da costa sul-americana, a qual apresentou teores de fosfato e nitrato superiores aos encontrados para a APP durante essa campanha.

Água Tropical (AT)

Abaixo da ASTP foi identificada a presença da AT, que em ambos os períodos sazonais obteve valores baixos de oxigênio dissolvido, nutrientes inorgânicos dissolvidos, MPS, MOPS e clorofila-*a* em relação às demais massas d'água encontradas na plataforma continental (Fig. 17 e 18).

Ao contrário do que foi observado para a APP, porção da AT encontrada na plataforma continental apresentou teores de OD mais elevados durante a campanha de outono de 2018 (203,30 a 219,56 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação a campanha de inverno de 2019 (199,03 a 202,57 $\mu\text{mol kg}^{-1}$), com médias de $210,81 \pm 5,22 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e $200,80 \pm 2,50 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para o outono e inverno, respectivamente.

A concentração de OD ligeiramente maior no outono de 2018 também foi acompanhada por uma relativa maior porcentagem de saturação de oxigênio nesse período, que obteve uma mínima de 91,5% (estação 8 a 158,0 m) e máxima de 105,5% (estação 8 a 62,7 m), contrastando com os valores observados durante a campanha de inverno (mín. 92,0 % em 80,3 m e máx. de 97,0% em 58,2 m).

Apenas dois pontos da plataforma continental foram caracterizadas como pertencentes à AT durante a amostragem de inverno de 2019, enquanto oito pontos referentes a essa massa d'água foram observadas na campanha anterior. Isso pode justificar a maior amplitude de variação entre os valores dos parâmetros biogeoquímicos obtidos na primeira campanha, quando mais amostras foram adquiridas e a AT ocupou camadas mais superficiais (mais oxigenadas).

A presença mais destacada da AT sobre a plataforma observada na campanha de outono de 2018 também representa mais uma evidência de que a influência fluvial nesse período foi menor que a verificada na campanha de inverno, quando maior parte das amostras coletadas na plataforma foram identificadas como pertencentes a APP e a presença da AT sobre a região esteve reduzida (visualizada pelo tamanho amostral na Tabela 8).

Assim como observado para o OD, as concentrações de silicato na AT foram levemente superiores durante a campanha de outono de 2018 (0,97 a 7,97 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação a campanha de inverno de 2019 (1,53 a 2,63 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). Porém, em ambos os anos, os valores de silicato encontrados nessa massa d'água foram inferiores aos observados para o restante das massas d'água circundantes (APP e ASTP).

Os teores dos demais nutrientes inorgânicos dissolvidos na AT foram similares nas duas campanhas, com concentrações de fosfato, nitrito e nitrato inferiores a 0,24 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, 0,28

$\mu\text{mol kg}^{-1}$ e $1,22 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente, em ambos os períodos. Dessa forma, assim como observado para o silicato, as concentrações de fosfato, nitrito e nitrato da AT também foram consideradas baixas quando comparadas às concentrações desses parâmetros na APP e ASTP, constatando que a principal característica biogeoquímica da AT foi a sua baixa concentração relativa de nutrientes.

Em relação aos valores de MPS, MOPS e *chl-a*, em geral, esses parâmetros apresentaram concentrações superiores na campanha de outono de 2018 em relação ao inverno de 2019. Na Figura 22 (a e c), é possível observar que há um segundo pico de máximo de concentração de MPS (máx. $39,22 \text{ mg L}^{-1}$) e MOPS (máx. $9,56 \text{ mg L}^{-1}$) a aproximadamente 148,1 km de distância da costa durante a campanha realizada no outono de 2018.

Já as concentrações de *chl-a*, que dependem principalmente dos teores de nutrientes inorgânicos dissolvidos e disponibilidade de luz, variaram de $0,10 \text{ mg m}^{-3}$ (estação 8 a 158 m, profundidade máxima na qual a AT foi encontrada na plataforma continental) a $0,52 \text{ mg m}^{-3}$ (estação 7 a 47,5 m) durante a campanha de 2018 e foi observado $0,03 \text{ mg m}^{-3}$ de concentração de *chl-a* nas duas amostras referentes a AT coletadas durante o inverno de 2019 (estação 7 em 58,2 e 80,3 m). Assim, os baixos valores de nutrientes e de clorofila-*a* em relação às águas adjacentes foram as características mais marcantes dessa massa d'água.

Água Central do Atlântico Sul (ACAS)

Em ambos os períodos sazonais, a intrusão da ACAS foi observada nas últimas estações da plataforma continental (estação 7 em 2018 e 2019) e foi marcada principalmente por suas altas concentrações de nitrato (Fig. 17f e 18f) em relação as demais massas d'água encontradas na plataforma continental (APP, ASTP e AT). Durante a coleta de outono de 2018 foi observada apenas uma amostra pertencente a ACAS, que apresentou uma concentração de nitrato de $3,83 \mu\text{mol kg}^{-1}$, enquanto na campanha de inverno de 2019 duas amostras foram identificadas como referente a ACAS, com concentrações de nitrato de 3,64 e $3,83 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

O aumento expressivo nos teores de nitrato relativo à presença da ACAS na plataforma nordeste da Argentina pode ser observado na Figura 20 (g e h), onde nota-se um aumento desse nutriente em profundidade a aproximadamente 130 km de distância da costa. Dessa maneira, o aumento das concentrações de nitrato em subsuperfície revelou ser um bom indicador da presença da ACAS sobre a plataforma continental, conforme também observado por outros autores em diferentes pontos da costa brasileira. Na região próxima à Laje de Santos ($\sim 24^\circ\text{S}$), Braga et al. (2017) verificaram a ocorrência de uma intrusão da ACAS a aproximadamente 40

m de profundidade acompanhada por altos teores de nitrato ($> 7,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$) durante o verão de 2014.

Com relação aos teores de OD e dos demais nutrientes na ACAS, foram observados valores ligeiramente inferiores e superiores, respectivamente, comparado aos valores encontrados na camada superior (AT). Considerando a porção da ACAS presente sobre a plataforma continental, menores concentrações de OD, assim como uma menor porcentagem de saturação desse gás, seriam esperadas em relação ao seu ramo presente no talude e oceano aberto, devido a processos de regeneração que ocorrem quando essa massa d'água se desloca sobre a plataforma (BRAGA; MÜLLER, 1998).

A porção da ACAS encontrada sobre a plataforma apresentou pouca variação sazonal em seu teor de oxigênio dissolvido ($198,90 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $195,42 - 195,86 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019) e de porcentagem de saturação de oxigênio ($85,1\%$ em 2018 e média de $83,9 \pm 0,5\%$ em 2019).

Conforme abordado acima, entre os nutrientes analisados o nitrato foi o melhor traçador biogeoquímico da ACAS, porém, também foram observados maiores valores de fosfato em relação à AT tanto na campanha de outono de 2018 ($0,36 \mu\text{mol kg}^{-1}$) como na de inverno de 2019 ($0,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$), porém este aumento não foi tão expressivo como foi para o nitrato. O mesmo padrão foi observado para o silicato na campanha de 2019, que apresentou uma concentração média de $4,11 \pm 0,62 \mu\text{mol kg}^{-1}$ na ACAS, teor levemente superior ao encontrado nas águas adjacentes, situação que não ocorreu em 2018, quando as concentrações de silicato na ACAS ($3,13 \mu\text{mol kg}^{-1}$) se assemelharam às da AT.

Mais ao norte da região de estudo ($\sim 27^\circ\text{S}$), Bordin et al. (2019) também observaram intrusões da ACAS na região de fundo da plataforma continental de Santa Catarina. Em seu estudo, foram observadas concentrações relativamente altas de silicato ($9,29 \pm 4,24 \mu\text{mol kg}^{-1}$), fosfato ($0,60 \pm 0,28 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato ($4,11 \pm 2,76 \mu\text{mol kg}^{-1}$), superiores as encontradas neste trabalho, indicando que em latitudes mais ao norte as intrusões de ACAS sobre a plataforma continental possivelmente sejam mais intensas.

No outono de 2018, as concentrações de MPS e MOPS da ACAS foram relativamente maiores ($31,34$ e $7,11 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente) que durante a campanha de inverno de 2019, que obteve média de MPS e MOPS de $16,38 \pm 0,92 \text{ mg L}^{-1}$ e $4,44 \pm 0,32 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Esta conjuntura também foi observada na distribuição desses parâmetros na AT e os valores de MPS e MOPS apresentados na ACAS foram similares aos da AT nos seus respectivos períodos, representando assim, uma distribuição vertical levemente homogênea ao fim da plataforma continental.

Apesar da disponibilidade de nutrientes inorgânicos dissolvidos, observou-se uma menor atividade fotossintética na camada ocupada pela ACAS, indicada pelo valor nulo e muito baixo ($0,03 \text{ mg m}^{-3}$) de *chl-a* no outono de 2018 e inverno de 2019, respectivamente. Estes baixos valores de *chl-a* podem ser justificados pela localização da ACAS na plataforma continental, que ocupou profundidades entre 99,5 e 126,2 m, local onde é provável que ocorra uma limitação por luz, impedindo o processo de fotossíntese pelos produtores primários.

4.3.2 Talude e oceano aberto

Para atribuir limites biogeoquímicos às massas d'água encontradas na região de talude e oceano aberto utilizaram-se todos os dados referentes às campanhas de abril de 2018 (outono) e junho de 2019 (inverno). Em contrapartida, para avaliar a variação interanual nas propriedades biogeoquímicas das massas d'água foram utilizados dados relativos às estações com localização similar nas duas amostragens (estações correspondentes), o que será abordado no tópico 4.3.3.

Nessa região mais distante da costa, os dados de material em suspensão e clorofila-*a* não foram apreciados, sendo utilizados somente dados de oxigênio dissolvido (OD), silicato, fosfato e nitrato para a caracterização das massas d'água, os quais são mais comuns em trabalhos de identificação de massas d'água oceânicas (OUDOT et al., 1999; POOLE; TOMCZAK, 1999; JENKINS et al., 2015).

Na região do talude e oceano aberto observou-se uma rica estrutura vertical caracterizada pela presença da ASTP, AT e ACAS, que também foram encontradas na plataforma continental, e da AIA, ACS, APAN, ACI e AAF. Cada uma das massas d'água apresentaram assinaturas biogeoquímicas únicas, que podem ser observadas nas figuras 23 (dados de abril de 2018) e 24 (dados de junho de 2019).

Logo nas primeiras estações, no início do talude, resquílios da ASTP foram observados em superfície, ocupando os primeiros 17,0 m de profundidade em 2018 e os primeiros 54,3 m em 2019. A porção da ASTP encontrada no talude foi caracterizada por concentrações de OD ligeiramente superiores as observadas na mesma massa sobre a plataforma, variando de 213,63 a 221,38 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ na amostragem de outono de 2018 (Fig. 23 a) e de 212,22 a 225,79 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ no inverno de 2019 (Fig. 24 a).

Figura 23 - Diagramas TS referentes aos dados obtidos na campanha do Projeto SAMBAR de abril de 2018 (outono) ao longo da borda oeste do paralelo 34,5 °S. Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração de a) oxigênio dissolvido, b) silicato, c) fosfato e d) nitrato.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

Figura 24 - Diagramas TS referentes aos dados obtidos na campanha do projeto SAMBAR de junho de 2019 (inverno). Cada ponto no diagrama representa uma amostra e a escala de cor é equivalente a concentração dos respectivos parâmetros químicos.

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

Uma faixa mais elevada de concentração de OD (comparada aos valores encontrados na plataforma continental) foi observada no ramo da ASTP presente no talude. Isso pode estar associado à distância da costa e a maior profundidade da coluna d'água, estendendo a zona eufótica, camada onde há a produção de oxigênio. Por estar mais distante do fundo, a fração da

ASTP presente no talude esteve em uma área mais favorável a processos de produção de oxigênio que a processos de regeneração, que são intensificados abaixo da camada eufótica e próximo ao sedimento, e dessa forma, são intensificados na plataforma continental (BRAGA; MULLER, 1998; BORDIN et al., 2019).

Além dos elevados valores de OD, a ASTP também foi marcada por uma baixa concentração de silicato, fosfato e nitrato em relação ao restante das massas d'água observadas no talude e oceano aberto (com exceção da AT, conforme será mencionado adiante). No outono de 2018 (Fig. 23 b,c e d), as concentrações de silicato variaram entre 1,62 e 8,04 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, as de fosfato entre 0,07 e 0,13 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ e as de nitrato obtiveram um mínimo de 0,00 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ e máximo de 0,03 $\mu\text{mol kg}^{-1}$.

No caso do inverno de 2019 (Fig. 24 b, c e d), o intervalo de variação da concentração de silicato (3,09 – 7,96 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) foi semelhante à campanha anterior. Entretanto, as amplitudes de concentração de fosfato (0,17 – 1,03 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato (0,01 – 0,22 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) foram um pouco maiores em 2019 que as verificadas em 2018, apesar de ainda serem consideradas baixas perante o restante das massas d'água encontradas na região sudoeste do Atlântico Sul.

O mesmo padrão observado na ASTP foi notado na AT, que também apresentou altos valores relativos de OD e baixas concentrações de nutrientes. Os teores de OD observados na porção da AT sobre o talude e oceano aberto foram semelhantes em ambas as campanhas, com uma concentração média de $213,72 \pm 5,28 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $219,48 \pm 12,58 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019. A concentração mínima de OD (181,14 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) foi observada em 2019, a 99,3 m de profundidade, na estação 9 (localizada próxima à quebra do talude), enquanto a máxima (232,46 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) também foi encontrada durante a campanha de 2019, porém na estação 14 a 24,1 m de profundidade.

Uma melhor visualização da distribuição dos parâmetros biogeoquímicos analisados sobre a região do talude e oceano aberto ao longo do transecto em 34,5 °S, é apresentada na Figura 25, com seções verticais de oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato relativas à campanha de 2018. Para a construção das seções verticais dessa região adotaram-se somente os dados referentes à campanha de 2018 do Projeto SAMBAR, a qual foi realizada sob melhores condições de tempo, o que permitiu a amostragem em mais estações hidrográficas em relação à campanha de 2019.

Figura 25 – Distribuições verticais de a) oxigênio dissolvido, b) silicato, c) fosfato e d) nitrato no talude e oceano aberto durante a campanha de outono de 2018 do Projeto SAMBAR. As isolinhas tracejadas em cinza representam os limites de densidade neutra (γ , kg m^{-3}) propostos por Valla et al. (2018) para a identificação das massas d'água presentes na região. Dados batimétricos derivados do modelo global GEBCO (2014) foram utilizados para compor o perfil de fundo das seções.

ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

A concentração de nutrientes na AT também foi similar a da ASTP, com faixas de variação de silicato de 0,39 a 8,93 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e de 0,94 a 6,23 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019 e teores de fosfato inferiores a 0,55 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e menores que 0,78 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019. Os intervalos de concentração de nitrato na AT foram distintamente mais elevados em relação à ASTP, com o valor mínimo ($0,00 \mu\text{mol kg}^{-1} < \text{LD}$) encontrado em superfície e o máximo (5,28 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) observado a 300,6 m (estação 16) durante a campanha de 2018.

O aumento dos teores de nitrato na AT com a profundidade marca a aproximação dessa massa d'água com as águas frias e ricas em nitrato da ACAS, massa d'água situada logo abaixo da AT. A interface entre essas duas massas, local onde suas águas estão em constante processo de mistura, promovendo assim, a troca de propriedades físicas e biogeoquímicas, foi onde foram observados os maiores teores de nutrientes da AT.

Dessa forma, no talude e oceano aberto, os teores de nutrientes da AT apresentaram uma tendência de serem exauridos em superfície (principalmente fosfato e nitrato, que são constantemente utilizados pela produtividade primária) e irem aumentando sua concentração com o distanciamento da zona fótica e aproximação da zona de influência da ACAS.

A ASTP e a AT, por terem sido as primeiras massas d'água encontradas nos primeiros metros da coluna d'água da região, dispuseram de valores bastante variáveis de oxigênio e nutrientes inorgânicos dissolvidos. Entretanto, ambas as massas seguiram o mesmo comportamento, com altos teores de OD e baixas concentrações de nutrientes em relação ao restante das massas d'água observadas ao longo da porção oeste de 34,5 °S.

Por estarem situadas na zona onde ainda há atividade fotossintética, as propriedades biogeoquímicas da ASTP e AT estão sob constante alteração em suas concentrações. Dessa forma, o empobrecimento de nutrientes e a alta concentração de OD, associados aos parâmetros termohalinos, são os melhores indicadores dessas águas. Porém, em termos absolutos, esses são fatores com caráter não-conservativo devido a localização majoritária da ASTP e AT na zona eufótica.

Abaixo da zona eufótica, notou-se que os parâmetros biogeoquímicos apresentaram caráter mais conservativo e puderam ser melhor utilizados para caracterizar as massas d'água centrais, intermediárias, profundas e de fundo da região de estudo. Um aspecto interessante na distinção entre as massas d'água presentes na seção estudada é a relação entre a distribuição vertical de oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato. Por isso, foram elaborados gráficos contendo o comportamento do parâmetro pela profundidade (Fig. 26) a partir de dados referentes a estação 24 da campanha de 2018. Esta estação foi escolhida por ser a estação mais

externa em toda campanha e portanto, conter informações referentes à todas as massas d'água presentes no setor oeste do paralelo 34,5 °S.

Figura 26 - Distribuição vertical de oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato obtida na estação 24 da campanha de outono de 2018 do Projeto SAMBAR. A linha tracejada representa os limites de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018) para identificação das massas d'água presentes na porção oeste do paralelo 34,5 °S.

AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

Abaixo das águas mais superficiais dominadas pela a AT, a ACAS foi observada em todas as estações do talude e oceano aberto em ambas as campanhas, em profundidades que variaram de 196,7 a 698,1 m em 2018 e de 177,8 a 640,9 m em 2019. Com base nesses dados de profundidade, percebeu-se que a distribuição da ACAS foi desde a base da camada eufótica (em estações realizadas próximas ao talude) até quase 700 metros de profundidade em regiões de oceano aberto.

Considerando a variação das propriedades biogeoquímicas da ACAS, foi notado um aumento expressivo nas concentrações de OD com a profundidade, durante os dois anos (Fig. 23 e 24 a), assim como houve aumento nos valores de concentração de todos os três nutrientes,

em especial o nitrato e o fosfato, que apresentaram um aumento relativo mais acentuado que o silicato.

Os intervalos de variação nas concentrações de OD na ACAS foram semelhantes nas duas amostragens, com valores mínimos de $200,96 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e $201,90 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e 2019, respectivamente, e valores máximos de $233,51 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e de $227,87 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019.

Os dois valores mínimos de OD foram observados na primeira estação do talude nos dois períodos de amostragem, coincidindo com as primeiras amostras de ACAS coletadas abaixo da AT, e portanto, situadas na zona limite entre essas duas massas, onde houve compartilhamento de valores de OD semelhantes. A ACAS apresentou uma tendência de aumento dos valores de OD com o aumento da profundidade e aproximação do limite com a AIA (Fig. 26), massa d'água distinta pelos seus altos teores de OD observados em diferentes latitudes da borda oeste do Atlântico Sul (GORDON; PIOLA, 1989; OUDOT et al., 1999). Dessa forma, o ponto em comum entre os valores máximos de OD obtidos para a ACAS em ambas as campanhas foi a sua localização na proximidade do limite entre a ACAS e a AIA (diferenciadas pela isopical de $27,10 \text{ kg m}^{-3}$), o que justificou os máximos valores de OD da ACAS nesses pontos.

Da mesma forma que foi observado na distribuição de OD da ACAS houve também um aumento na concentração dos nutrientes com a profundidade, onde os valores mínimos foram encontrados em amostras no limite com a AT e os máximos nas imediações do limite com a AIA, conforme pode ser verificado nas Figuras 23 e 24. Os intervalos de concentração obtidos para cada nutriente variaram entre $1,57$ e $13,03 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de silicato, $0,36$ a $2,05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato e $5,76$ a $23,17 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de nitrato durante a campanha de 2018. Faixas de variação semelhantes às da campanha de 2018 foram observadas na campanha de 2019, com $1,98$ a $11,31 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de silicato, $0,40$ a $1,55 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato e $4,29$ a $21,27 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de nitrato.

Observou-se que a ACAS obteve um perfil de aumento contínuo em suas propriedades biogeoquímicas com o aumento da profundidade, especialmente de nitrato ($> 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$), podendo ser considerado o parâmetro biogeoquímico que melhor retratou a ACAS dentro da faixa de densidade neutra na qual ela está enquadrada, portanto, atuou como o melhor traçador dessa massa d'água em ambas as campanhas.

A AIA foi observada abaixo da ACAS, sendo caracterizada principalmente pelo máximo relativo de OD em seu núcleo, com teores máximos de $256,53 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 16 a $794,8 \text{ m}$) em 2018 e $253,47 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (estação 13 a $793,0 \text{ m}$) em 2019. A AIA, por ser uma

massa formada na superfície Antártica, é rica em OD, e devido a suas baixas temperaturas e facilidade de manter gases dissolvidos, carrega estes altos teores de OD consigo pela porção sudoeste do oceano Atlântico Sul.

Na Figura 26, é possível observar que os limites inferiores da AIA possuem menores valores de OD que no seu núcleo. Dessa forma, os teores mínimos de OD de ambas as campanhas foram observadas nessa região ($200,37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a $1189,2 \text{ m}$ em 2018 e $197,76 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a $1090,4 \text{ m}$ em 2019), local próximo ao limite entre a porção inferior da AIA e a superior da ACS, marcada principalmente por seus baixos valores de OD em relação as massas d'água adjacentes. O mesmo padrão foi observado por Vieira (2018), que verificou um valor mínimo de OD na AIA de $196,40 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 1365 dbar , no limite com a ACS, enquanto o valor máximo ($258,18 \mu\text{mol kg}^{-1}$) foi observado a aproximadamente 900 dbar , acompanhado do valor mínimo de salinidade para essa massa.

Devido a ocorrência de um decréscimo nas concentrações de OD da AIA após a zona com os valores máximos de OD, a curva de distribuição de OD nessa massa d'água adquiriu uma forma parabólica, ao contrário do que foi observado na ACAS, onde as concentrações de OD possuíram uma tendência positiva de acréscimo com o aumento da profundidade.

O contínuo aumento das concentrações de silicato, fosfato e nitrato na AIA podem ser observados em maior detalhe no exemplo da estação 24 presente na Figura 26, enquanto os intervalos de variação destes nutrientes durante as campanhas de 2018 e 2019 podem ser visualizados nas Figuras 23 e 24. O intervalo de concentração de silicato observados em 2018 para a AIA foram de $9,34$ a $41,70 \mu\text{mol kg}^{-1}$, semelhante ao verificado em 2019, quando foram obtidos valores de $9,02$ a $46,73 \mu\text{mol kg}^{-1}$ desse parâmetro. As faixas de variação de fosfato ($0,83 - 2,28 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $1,27 - 2,31 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019) e nitrato ($18,67 - 31,84 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $22,24 - 32,44 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019) mostraram um aumento substancial em seus valores em relação às massas d'água superiores (AT e ACAS).

O aumento nas concentrações de nutrientes e a diminuição nos teores de OD na porção inferior da AIA seguem até atingirem uma região caracterizada pela máxima concentração de nutrientes e mínimo teor de OD, indicando a presença da ACS, observada a uma profundidade média de $1561,3 \pm 200,8 \text{ m}$ em 2018 e $1543,0 \pm 192,2 \text{ m}$ em 2019.

O núcleo da ACS foi caracterizado pelos valores mínimos de OD obtidos em toda a região de talude e oceano aberto amostrada durante as duas campanhas do Projeto SAMBAR em questão. Apesar da ACS apresentar um estreito intervalo de temperatura e salinidade (tópico 4.2), os baixos teores de OD encontrados nessa massa foram bastante característicos de sua

identidade, pois, olhando o perfil da coluna d'água, ela apresenta valores de OD consideravelmente distintos das massas d'água adjacentes.

Os valores mínimos de concentração de OD foram de $183,37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ na campanha de 2018 e de $182,94 \mu\text{mol kg}^{-1}$ na campanha de 2019. A ACS, assim como a AIA, também é originária da Antártica, entretanto, assim como seu ramo inferior e mais denso (ACI) é formada a partir de águas recirculadas, que fluem ao redor do continente antártico ao longo da Corrente Circumpolar Antártica, e, dessa forma, vão perdendo o oxigênio dissolvido adquirido em superfície durante seu percurso, resultando em um empobrecimento de suas concentrações (REID, 1989; VALLA et al. 2019).

A região de mínimo de OD da ACS em 2018 foi acompanhada pelo máximo de silicato ($60,34 \mu\text{mol kg}^{-1}$), fosfato ($2,42 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato ($32,58 \mu\text{mol kg}^{-1}$), que também foram observados na mesma região durante a campanha de 2019, quando atingiram concentrações máximas de $58,71 \mu\text{mol kg}^{-1}$, $2,35 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e $32,68 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para silicato, fosfato e nitrato, respectivamente.

Assim como verificado na distribuição de oxigênio dissolvido da AIA, também foi notado uma tendência parabólica na distribuição de OD e nutrientes da ACS, na qual os valores encontrados na região superior desta massa possuíram maiores valores de OD e menores concentrações de nutrientes em relação ao seu núcleo. Após cerca de 1700 metros de profundidade, essas concentrações de OD voltam a aumentar e a de nutrientes, a diminuir, com o aumento da profundidade e aproximação da próxima massa d'água (APAN) observada.

O formato de distribuição parabólica dos parâmetros biogeoquímicos indica que as massas d'água apresentam processos de mistura em seus limites superiores e inferiores. Métodos que tratam sobre a detecção de zonas de mistura entre massas d'água, assim como porcentagens de mistura entre uma massa e outra utilizando dados de temperatura e salinidade são amplamente utilizados na literatura (MAMAYEV, 1975). Mais recentemente, estudos como o de Che e Zhang (2018) que empregam concentrações e isótopos de Neodímio (elemento terra rara) para construir um modelo de mistura de massas d'água vêm ganhando destaque, ampliando a gama de ferramentas disponíveis para o refinamento do conhecimento sobre massas d'água.

Contudo, os dados biogeoquímicos aqui apresentados representam mais um instrumento para o auxílio da definição do início de zonas de mistura entre massas na região sudoeste do Atlântico Sul, assim como também fornecem dados de base para o monitoramento a longo prazo de alterações no núcleo e nos limites superiores e inferiores das massas diante de alterações na circulação e no clima.

Como mencionado acima, os níveis de OD no ramo inferior da ACS começaram a aumentar e as concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos a diminuir, indicando a aproximação com a APAN (VAN AKEN, 2007), que ocupa a camada entre as isopícnais 27,9 e 28,10 kg m⁻³. A APAN foi observada em profundidades superiores a 1855,4 m e inferiores a 2959,2 m (2018) e superiores a 1975,4 m e inferiores a 2959,8 m (2019), sendo sua assinatura biogeoquímica feita por teores de OD entre 198,12 e 250,66 µmol kg⁻¹ em 2018 e 208,12 e 247,18 µmol kg⁻¹ em 2019, relativamente superiores aos observados na ACS.

Em relação às concentrações de nutrientes, foi observado uma redução nos níveis em relação a ACS, porém as faixas de variação de silicato (20,62 – 53,20 µmol kg⁻¹ em 2018 e 23,30 – 56,49 µmol kg⁻¹ em 2019), fosfato (1,14 – 2,01 µmol kg⁻¹ em 2018 e 1,38 – 1,82 µmol kg⁻¹ em 2019) e nitrato (15,08 – 26,23 µmol kg⁻¹ em 2018 e 20,35 – 26,68 µmol kg⁻¹ em 2019) foram estreitas em relação a ACS.

A APAN é formada no extremo Atlântico Norte e em seu deslocamento para sul vai sofrendo modificações em suas propriedades termohalinas e biogeoquímicas devido ao consequente “envelhecimento” da massa d’água e a processos de mistura com águas adjacentes (VAN AKEN, 2007). Dessa maneira, é esperado que essa massa d’água, ao atingir 34,5 °S, possua características diferentes das quais foi originalmente formada. Porém, considerando a faixa de profundidade e densidade na qual ocupa, em todo o Atlântico a APAN é caracterizada pelo aumento relativo nas concentrações de OD e diminuição dos teores de nutrientes em relação às massas d’água adjacentes (KAWASE; SARMIENTO, 1986).

Com o aumento da profundidade, as concentrações de OD voltaram a diminuir novamente (mín. 208,93 µmol kg⁻¹ e máx. 241,96 µmol kg⁻¹ em 2018 e mín. 210,23 µmol kg⁻¹ e máx. 232,84 µmol kg⁻¹ em 2019) e os valores de silicato, fosfato e nitrato aumentaram, evidenciando as características da ACI.

A ACI foi observada abaixo da APAN, e, assim como seu ramo superior, foi caracterizada pela redução no OD e aumento de nutrientes, apesar de apresentar uma amplitude de variação menos expressiva que a ACS (TSUCHIYA et al., 1994). Os valores mínimos e máximos de concentração de OD e nutrientes na ACI foram mais altos que os observados na ACS, o que pode ser devido a camada da coluna d’água na qual a ACI ocupa (~ 3356,7 ± 325,2 m em 2018 e 3335,5 ± 251,3 m em 2019), mais profunda e estável.

Por fim, os valores de oxigênio dissolvido e nutrientes se estabilizam (Fig. 23, 24 e 26) marcando a presença da AAF. Na AAF, observou-se teores de oxigênio dissolvido semelhantes entre as duas campanhas, variando entre 217,16 e 224,54 µmol kg⁻¹ em 2018 e 216,30 e 223,67 µmol kg⁻¹ em 2019, evidenciando, portanto, que esta massa é muito pouco modificada pela

interação com a massa sobrejacente (ACI). Os teores de OD observados na AAF neste estudo corroboram aos apresentados por Piola e Matano (2017), que verificaram teores médios de $225 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de OD para as águas abissais do Atlântico Sudoeste.

Além do teor médio de OD relativamente alto da AAF, ela também apresentou altos teores de nutrientes inorgânicos dissolvidos, especialmente de silicato, cujas concentrações máximas foram verificada na AAF ($113,55 - 144,92 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $119,18 - 138,56 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019). De acordo com Liu e Tanhua (2019), a AAF é a única massa d'água de fundo cuja assinatura de silicato se estende da Antártica ao Atlântico Norte. Van Aken (2007), ao analisar dados abaixo de 35°S obtidos durante a ocupação da seção meridional A16 do programa WOCE, observou valores máximos de silicato ($> 120 \mu\text{mol kg}^{-1}$) na AAF, corroborando aos resultados deste estudo.

De acordo com Boswell et al. (2002), a riqueza de silicato dissolvido na AAF é proveniente da dissolução de frústulas (estruturas de sustentação compostas principalmente por sílica biogênica) de diatomáceas (organismos planctônicos abundantes no oceano Austral), que ao morrerem, precipitam e recebem ação bacteriana sobre a matéria orgânica, convertendo a sílica biogênica em silício inorgânico dissolvido (silicato), elevando assim, as concentrações desse nutriente nas águas profundas do oceano Austral. Além disso, os sedimentos oceânicos são ricos em silício (TRÉGUER et al., 1995) e o contato direto com o fundo leva a um enriquecimento de silicato na AAF por liberação diagenética (BOSWELL et al., 2002).

O mesmo padrão constatado para o silicato foi observado para o fosfato e nitrato, cujas concentrações máximas também foram observadas na AAF. Os teores de fosfato variaram entre $2,19$ e $2,43 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e de $2,25$ e $2,39 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019, enquanto os de nitrato variaram em uma faixa mais ampla em 2018 ($21,27 - 32,81 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação a 2019 ($29,94 - 32,80 \mu\text{mol kg}^{-1}$) para a AAF.

Resumindo todos os dados discutidos até o momento e como forma de dispor uma base de informações robustas acerca das características biogeoquímicas das massas d'água presentes no talude e oceano aberto da região sudoeste do Atlântico Sul (mais precisamente, ao longo da porção oeste de $34,5^\circ\text{S}$), elaborou-se a Tabela 9 com os limites biogeoquímicos associados às variáveis termohalinas encontradas no presente estudo.

Tabela 9 - Faixas de variação dos parâmetros termohalinos e biogeoquímicos observados para as massas d'água presentes no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do Projeto SAMBAR. Nessa região, as massas d'água foram identificadas de acordo com os limites de densidade neutra propostos por Valla et al. (2018).

2018							
	Prof. (m)	T (°C)	Salinidade	OD ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
ASTP (n=3)	4,5 – 17,0	21,98 – 23,92	35,80 – 35,94	213,63 – 221,38	1,62 – 8,04	0,07 – 0,13	0,00 – 0,03
AT (n=59)	2,4 – 300,7	15,63 – 24,79	35,57 – 37,04	204,21 – 225,56	0,39 – 8,93	0,00 – 0,55	0,00 – 5,28
ACAS (n=36)	196,7 – 698,1	7,16 – 15,83	34,42 – 35,91	200,96 – 233,51	1,57 – 13,03	0,38 – 2,05	5,76 – 23,17
AIA (n=43)	554,8 – 1236,5	3,13 – 6,32	34,18 – 34,39	200,37 – 256,53	9,34 – 41,70	0,83 – 2,28	18,67 – 31,84
ACS (n=37)	1185,3 – 1974,0	2,74 – 3,58	34,39 – 34,81	183,37 – 212,90	30,51 – 60,34	1,49 – 2,42	19,10 – 32,58
APAN (n=65)	1855,4 – 2959,2	2,29 – 3,55	34,75 – 34,94	198,12 – 250,66	20,62 – 53,20	1,14 – 2,01	15,08 – 26,23
ACI (n=34)	2516,7 – 3931,1	0,26 – 2,25	34,69 – 34,88	208,93 – 241,96	36,95 – 127,33	1,42 – 2,29	19,99 – 31,43
AAF (n=34)	3736,2 – 4758,3	-0,12 – 0,26	34,67 – 34,69	217,16 – 224,54	113,55 – 144,92	2,19 – 2,43	21,27 – 32,81
2019							
	Prof. (m)	T (°C)	Salinidade	OD ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
ASTP (n=7)	2,3 – 54,3	20,62 – 21,80	35,01 – 35,94	212,22 – 225,79	3,09 – 7,96	0,17 – 1,03	0,01 – 0,22
AT (n=41)	3,2 – 199,8	16,12 – 22,97	35,71 – 36,74	181,14 – 232,46	0,94 – 6,23	0,06 – 0,78	0,00 – 4,53
ACAS (n=30)	177,8 – 640,9	7,85 – 16,15	34,49 – 35,80	201,90 – 227,87	1,57 – 13,03	0,40 – 1,55	4,29 – 21,27
AIA (n=31)	401,6 – 1290,0	3,05 – 7,24	34,20 – 34,50	197,76 – 253,47	9,02 – 46,73	1,27 – 2,31	22,24 – 32,44
ACS (n=15)	1234,6 – 1857,9	2,78 – 3,52	34,39 – 34,82	182,94 – 213,77	28,53 – 58,71	1,77 – 2,35	25,21 – 32,68
APAN (n=24)	1975,4 – 2959,8	2,27 – 3,60	34,79 – 34,93	208,12 – 247,18	23,30 – 56,49	1,38 – 1,82	20,35 – 26,68
ACI (n=12)	2947,9 – 3846,9	0,22 – 2,03	34,68 – 34,84	210,23 – 232,84	55,41 – 133,18	1,67 – 2,29	23,52 – 31,83
AAF (n=9)	3806,2 – 4761,1	-0,12 – 0,26	34,66 – 34,68	216,30 – 223,67	119,18 – 138,56	2,25 – 2,39	29,94 – 32,80

APP – Água da Pluma do Prata; ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

4.3.3 Variações interanuais – campanhas 2018 e 2019

De modo a avaliar algumas das principais diferenças interanuais observadas no talude e oceano aberto nos anos consecutivos de amostragem, foram utilizados dados de 8 estações com posições coincidentes (localizações geográficas semelhantes) em ambas as campanhas (2018 e 2019). Na Figura 27 estão apresentadas as localizações das estações que foram usadas para realizar as comparações, iniciando em 34,3 °S/51,7 °O (estação 9 de 2018 e estação 8 de 2019) e seguindo até 34,5 °S/44,5 °O, nas estações 24 de 2018 e 17 de 2019.

Figura 27 - Estações oceanográficas cujos dados foram utilizados para realizar a comparação interanual das propriedades biogeoquímicas das massas d'água encontradas no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do Projeto SAMBAR. Os números em preto acima do símbolo das estações (estrela) se referem à nomeação das estações em 2018 e os números em cinza abaixo da estrela são relativos à nomenclatura adotada em 2019.

Fonte: Autor

Neste tópico, todos os valores de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato obtidos nas 8 estações coincidentes das duas campanhas foram plotados juntamente com a profundidade, conforme observado na Figura 28. Para realizar a comparação entre os resultados dos parâmetros biogeoquímicos em cada uma das massas d'água identificadas na porção oeste de 34,5 °S, calcularam-se as médias e os desvios padrões dos valores dos parâmetros em cada massa d'água para cada ano, para assim se melhor analisar as possíveis diferenças entre as duas campanhas. Considerando que existem diferenças sazonais e forçantes climáticas agindo sobre as propriedades termohalinas e biogeoquímicas de distinção das massas d'água, assim pode-se ter uma ideia geral das diferenças mais evidentes entre as amostragens.

Figura 28 – Distribuições de a) temperatura, b) salinidade, c) oxigênio dissolvido, d) silicato, e) fosfato e f) nitrato ao longo da profundidade obtidas em estações semelhantes no talude e oceano aberto durante as campanhas de 2018 e 2019 do projeto SAMBAR. Os pontos plotados em forma de “círculo” representam amostras da campanha de 2018 e os triângulos coloridos são referentes as amostras de 2019.

ASTP – Água Subtropical de Plataforma; AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico do Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; ACS – Água Circumpolar Superior; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; ACI – Água Circumpolar Inferior; AAF – Água Antártica de Fundo

Fonte: Autor

Ao observar a distribuição dos parâmetros físicos e biogeoquímicos na camada ocupada predominantemente por amostras da AT (e poucas de ASTP), percebe-se que houve bastante variação nas concentrações dos parâmetros entre os anos, especialmente nos teores de salinidade (Fig. 28 b), oxigênio dissolvido (OD) (Fig. 28c) e fosfato (Fig. 28e).

Analisando as concentrações de OD obtidas na ASTP, observou-se médias semelhantes entre as campanhas de 2018 ($218,65 \pm 4,35 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e 2019 ($218,78 \pm 4,72 \mu\text{mol kg}^{-1}$), indicando assim, que a dispersão entre os valores superficiais de OD verificada na Figura 28 foi causada por variações nas amostras pertencentes à AT.

A média de concentração de OD na AT obtida durante a campanha realizada no outono de 2018 foi de $212,88 \pm 5,65 \mu\text{mol kg}^{-1}$, inferior à observada para a mesma massa durante a campanha de inverno de 2019 ($219,51 \pm 11,35 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Além da maior concentração média de OD nas amostras da AT coletadas em 2019, também foi observado um maior desvio padrão nesse ano, indicando alta variabilidade entre amostras da mesma coleta, nas quais os maiores valores mostrados no gráfico ($> 225 \mu\text{mol kg}^{-1}$) foram observados nas estações localizadas mais distantes do talude continental (mais ao largo).

Em relação aos nutrientes inorgânicos dissolvidos, como dito anteriormente o fosfato foi o que apresentou a maior variação em seus valores entre os anos. Ao contrário do observado para o OD, a principal massa d'água contribuinte para os maiores valores de fosfato obtidos em profundidades rasas na campanha de 2019 foi a ASTP (sinalizada pelos valores mais baixos de salinidade em superfície na Fig. 28b), que apresentou uma média de $0,44 \pm 0,34 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato (com máximo de $1,03 \mu\text{mol kg}^{-1}$, o que resultou no alto desvio padrão) nesse ano. Em 2018, a média obtida de concentração de fosfato na ASTP foi de $0,10 \pm 0,03 \mu\text{mol kg}^{-1}$, valor bastante inferior ao observado no ano seguinte.

A distribuição das concentrações de silicato (Fig. 28d) e nitrato (Fig. 28f) não apresentaram grandes diferenças interanuais para a ASTP e AT. Os desvios padrões dos resultados desses dois parâmetros foram menores aos obtidos nas concentrações de OD e fosfato, indicando que o silicato e nitrato permaneceram mais estáveis na ASTP e AT ao longo das estações realizadas.

Assim como observado na AT, concentrações ligeiramente mais elevadas de OD foram observadas para a ACAS durante a campanha de 2019 ($212,92 \pm 6,93 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação à campanha de 2018 ($207,97 \pm 5,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Esse aumento nos teores de OD em 2019 foi acompanhado por maiores valores aparentes de fosfato e nitrato, a aproximadamente 300 m de profundidade (ramo superior da ACAS).

Contudo, ao se considerar as médias das concentrações de fosfato e nitrato obtidos na ACAS em 2018 ($1,05 \pm 0,43 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato e $13,49 \pm 4,85 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de nitrato) e em 2019 ($0,91 \pm 0,37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de fosfato e $11,49 \pm 5,55 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de nitrato), observou-se uma similaridade nos valores em ambos os anos, sendo levemente superiores em 2018, o que contradiz com o padrão observado na Figura 28. Porém, ao avaliar a profundidade média na qual a ACAS foi identificada durante as campanhas, notou-se que em 2019 essa massa d'água ocupou profundidades menores ($368,2 \pm 128,5 \text{ m}$) que em 2018 ($497,5 \pm 127,7 \text{ m}$), o que poderia ter colaborado aos maiores valores de fosfato e nitrato observados em torno de 300 metros de profundidade na campanha de inverno de 2019, período de maior regeneração de nutrientes (LIBES, 2009).

A distribuição das concentrações de silicato na ACAS na Figura 28 d foi similar entre as duas campanhas ($6,86 \pm 5,44 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $5,46 \pm 2,85 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019), apesar do maior desvio padrão obtido durante a amostragem de 2018.

Localizada abaixo da ACAS, a AIA foi caracterizada principalmente pelo seu máximo vertical de OD nas duas campanhas, apresentando pouca variação interanual nas concentrações desse parâmetro, com médias similares em ambos os anos ($229,90 \pm 14,12 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $225,00 \pm 17,37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019). O mesmo padrão foi observado para o silicato ($20,64 \pm 9,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $23,36 \pm 11,46 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019) e fosfato ($1,93 \pm 0,23 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $1,98 \pm 0,24 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019), que também apresentaram distribuições similares entre as campanhas.

Entretanto, a distribuição das concentrações de nitrato na AIA presente na Figura 28f mostra que houve um pequeno aumento nos teores desse parâmetro na campanha de 2019 ($28,02 \pm 2,95 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação ao ano anterior ($26,00 \pm 3,41 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Assim como observado para a ACAS, a profundidade média na qual a AIA se fez presente foi ligeiramente inferior em 2019 ($914,9 \pm 211,1 \text{ m}$) que em 2018 ($944,0 \pm 164,3 \text{ m}$), o que pode justificar assim os maiores valores de nitrato em torno dessa profundidade em 2019.

Abaixo da AIA, a ACS também apresentou distribuições de OD similares em ambas as campanhas (média de $194,12 \pm 7,15 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $193,34 \pm 10,06 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019), assim como de silicato ($47,74 \pm 4,98 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $47,64 \pm 9,32 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019) e fosfato ($2,11 \pm 0,18 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018 e $2,16 \pm 0,18 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2019).

Ao contrário dos outros nutrientes, o nitrato apresentou um aumento em suas concentrações em 2019 em relação ao ano anterior, conforme pode ser visualizado na Figura 28f e pelos teores médios obtidos em 2018 ($28,62 \pm 3,16 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e em 2019 ($30,51 \pm 2,57 \mu\text{mol kg}^{-1}$), repetindo o observado para a ACAS e AIA e indicando assim, que entre todos os

nutrientes aqui analisados, o nitrato é o menos estável e passível à alterações em suas concentrações.

A APAN, caracterizada pelas maiores concentrações de OD e menores teores de nutrientes em relação às massas sobrejacente (ACS) e subjacente (ACI) (LIU; TANHUA, 2019), apresentou uma concentração média de OD de $235,65 \pm 13,12 \mu\text{mol kg}^{-1}$ em 2018, ligeiramente superior à observada em 2019 ($232,88 \pm 11,68 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Esses maiores teores relativos de OD observados em 2018 foram acompanhados de valores médios de silicato ($34,28 \pm 8,93 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e nitrato mais baixos ($20,99 \pm 2,61 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação aos verificados em 2019 (silicato $\sim 38,19 \pm 9,43 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e nitrato $\sim 22,53 \pm 1,78 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Não foram observadas variações interanuais nos valores médios de fosfato.

A ACI e AAF, massas d'água mais densas e profundas que foram encontradas na porção sudoeste do Atlântico Sul, deveriam ser as menos sujeitas à variações interanuais, pois se deslocam lentamente em seu percurso e estão longe do contato com atmosfera, onde poderiam sofrer mudanças rápidas em suas propriedades (VALLA et al., 2019). Conforme observado na Figura 28 acima, a distribuição de OD e fosfato nessas duas massas foi uniforme nos dois anos, quando foram observadas, por exemplo, médias de OD de $219,79 \pm 9,67 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (ACI) e $221,30 \pm 2,05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (AAF) em 2018 e de $219,71 \pm 8,05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (ACI) e $220,76 \pm 2,92 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (AAF).

Contudo, as distribuições das concentrações de silicato e nitrato na ACI e AAF apresentaram um “espalhamento” em relação aos outros parâmetros analisados. Essa maior dispersão entre amostras foi observada principalmente em 2018, como demonstrado pelo valor de desvio padrão mais elevado nas concentrações de nitrato da AAF deste ano ($29,19 \pm 4,04 \mu\text{mol kg}^{-1}$) em relação a 2019 ($31,91 \pm 0,93 \mu\text{mol kg}^{-1}$).

Em um contexto geral, as diferenças observadas principalmente nos teores de nitrato (e também nos de silicato, porém em menor escala) entre as campanhas poderiam ser atribuídos a reflexos de diferentes condições nas quais estas águas foram formadas na região Antártica, como efeitos sazonais (TAKAHASHI et al., 1993). Considerando esse cenário, as frações da ACI e AAF observadas em $34,5^\circ\text{S}$ nas campanhas de 2018 e 2019 podem estar respondendo a diferentes estágios de degradação da matéria orgânica (e.g. resíduos de diatomáceas), acarretando em diferenças nos teores de nitrato e silicato entre os anos. Outra hipótese seria que esta alteração tenha sido efeito de algum fenômeno, como a propagação de vórtices, que esteja alterando o transporte das águas de fundo na latitude de estudo (VALLA et al., 2019), alterando assim a quantidade de nutrientes que chegam em $34,5^\circ\text{S}$.

Apesar de terem sido observadas algumas variações nas propriedades biogeoquímicas das massas d'água entre 2018 e 2019, dois anos de dados compreendem um período muito curto para se inferir indícios sobre possíveis efeitos de mudanças climáticas. Contudo, as diferenças interanuais aqui servem de embasamento para o acompanhamento dessas alterações ao longo do tempo.

Em suma, observou-se que a estrutura vertical de massas d'água ao longo do talude continental e oceano aberto verificada neste trabalho foi a mesma já observada em trabalhos clássicos realizados no oceano Atlântico Sul, como o de Tsuchiya et al. (1994) e de Stramma e England (1999). As faixas de temperatura e salinidade nas quais as massas d'água foram encontradas foram semelhantes entre os trabalhos, sendo aqui propostos limites biogeoquímicos de oxigênio dissolvido e nutrientes inorgânicos dissolvidos para somar às características de identificação de massas d'água ao longo de 34,5 °S.

Observou-se neste estudo que as massas d'água dominantes na camada superior da coluna d'água (ASTP e AT) apresentaram altos teores relativos de OD e estiveram sob efeito do consumo pela produtividade primária, o que diminuiu seus teores de nutrientes inorgânicos dissolvidos em relação às massas d'água centrais, intermediárias, profundas e de fundo encontradas na área de estudo, evidenciando o comportamento não-conservativo desses parâmetros para a ASTP e AT.

A camada central da coluna d'água foi ocupada pela ACAS, como também relatado por Emery (2003) e Piola e Matano (2017), e nela foi observado um aumento nos teores de OD e nutrientes, especialmente de nitrato, em relação a camada superior (ASTP e AT), comportamento também verificado para o ramo dessa mesma massa na plataforma. O aumento nos teores de OD e nutrientes perduraram até a camada intermediária, ocupada pela AIA, que foi caracterizada principalmente por seus valores máximos de OD.

Mais claramente distinta por seus baixos teores de OD e máximo vertical de nutrientes do que pelas faixas de temperatura e salinidade nas quais foi encontrada, a identificação da ACS por meio de suas propriedades biogeoquímicas mostrou-se bastante efetiva, assim como também observados nos estudos de Callahan et al. (1992) e Hoppema, Fahrbach e Schröder (1997). A APAN foi marcada por um aumento das concentrações de OD e diminuição dos valores de nutrientes em relação a ACS, enquanto a ACI apresentou o mesmo comportamento de seu ramo superior (ACS), porém menos acentuado. E por fim, a camada abissal foi ocupada pela AAF, a qual foi marcada principalmente pelos máximos teores verticais de silicato encontrados na porção oeste de 34,5 °S.

As maiores variações interanuais observadas nos valores de temperatura, salinidade, OD e nutrientes se limitaram principalmente aos primeiros 500 metros de profundidade, ocupados pela ASTP, AT e ACAS, sendo essas variações atribuídas principalmente a sazonalidade. Abaixo dessa camada, quase não foram percebidas diferenças nas faixas de temperatura e salinidade entre as massas, e apesar de terem sido observados alguns desvios padrões relativamente altos nos teores de OD e nutrientes nas águas profundas e de fundo, ainda sim, o padrão de comportamento desses parâmetros foi mantido nos dois anos, indicando que estes se relacionam bem com as características termohalinas das massas d'água, podendo ser utilizados como identificadores complementares. Entretanto, uma ressalva é feita para o nitrato em águas de fundo, o qual apresentou uma distribuição dispersa, sinalizando algum possível processo biogeoquímico ocorrendo nessas águas.

É possível afirmar que o conjunto de dados reunidos neste trabalho contribuiu para a ampliação do quadro de informações físicas e biogeoquímicas das águas situadas na borda oeste da seção em 34,5 °S do Atlântico Sul, fornecendo assim, fundamentação para o monitoramento a longo prazo das massas d'água presentes na região. Além disso, a partir dos dados aqui adquiridos é possível expandir a gama de trabalhos realizados no âmbito do Projeto SAMBAR, podendo ser utilizados para alimentar modelos e para análises de *Optimum Multi-parameter* (OMP) (TOMCZAK; LARGE, 1989), por exemplo, técnica frequentemente utilizada para estipular a contribuição relativa de cada massa d'água em uma determinada amostra, obtendo assim, maiores informações acerca da mistura entre massas (SOUZA; KERR; AZEVEDO, 2018; LIU; TANHUA, 2019).

Ademais, as informações obtidas acerca da concentração de nutrientes nas duas campanhas poderão ser úteis, juntamente com outros parâmetros adquiridos ao longo das campanhas (velocidades zonal e meridional da coluna d'água, por exemplo), para o cálculo do fluxo de nutrientes que cruza esta seção em cada ano, dispondo, assim, de mais uma ferramenta para o monitoramento dos efeitos do fortalecimento/enfraquecimento da AMOC nas águas da região e quais consequências essa possível alteração poderá gerar.

5 CONCLUSÕES

Com base nos índices termohalinos utilizados classicamente para identificar as massas d'água presentes na região sudoeste do oceano Atlântico Sul, nove massas d'água foram observadas durante as duas campanhas do projeto SAMBAR: Água da Pluma do Prata (APP), Água Subtropical de Plataforma (ASTP), Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Circumpolar Superior e Inferior (ACS e ACI), Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) e Água Antártica de Fundo (AAF).

Em geral, os parâmetros biogeoquímicos foram bem relacionados às propriedades termohalinas das massas d'água costeiras e oceânicas, mostrando que a associação de teores de oxigênio e nutrientes dissolvidos às informações de temperatura, salinidade e densidade representa uma ferramenta útil para o refinamento da identificação das massas d'água presentes na região, para o fornecimento de mais informações sobre os limites de cada uma e para a detecção dos processos biogeoquímicos atuantes, principalmente, junto à porção costeira.

Na plataforma continental, onde foram observadas as maiores variações entre as campanhas de outono e inverno, o reconhecimento do efeito da sazonalidade sobre o espalhamento da pluma do rio da Prata foi reforçado ao serem verificadas altas concentrações de material em suspensão e de nutrientes dissolvidos, especialmente de silicato durante o inverno, que atuou como o melhor traçador biogeoquímico de aportes continentais.

Ademais, a avaliação conjunta da distribuição dos parâmetros termohalinos e biogeoquímicos sobre a plataforma permitiu a detecção de processos de intensificação de regeneração de nutrientes, como evidenciado no interior de um canal em 33,6°S/52,2°O, local onde foram observados baixos teores de oxigênio dissolvido associados a altos teores de nutrientes, especialmente fosfato e nitrato, sobretudo no outono. O nitrato atuou como o melhor traçador biogeoquímico da ACAS e o aumento das concentrações desse nutriente no limite entre a plataforma e o talude continental sinalizaram intrusões dessa massa d'água durante os dois períodos sazonais.

A distribuição dos parâmetros físicos e biogeoquímicos em massas d'água superficiais, como a ASTP e AT, revelaram ser altamente variáveis. As maiores modificações interanuais observadas para as massas d'água de talude e oceano aberto foram encontradas na camada ocupada por estas duas massas, reforçando o caráter não-conservativo dos parâmetros físicos e biogeoquímicos na camada superficial. Abaixo de 500 metros de profundidade, houve uma diminuição da variação interanual e relações semelhantes de aumento/diminuição de OD e nutrientes dissolvidos permitiram a distinção das principais características das massas d'água,

gerando assinaturas específicas para cada uma delas, o que assim favorecerá o acompanhamento de possíveis alterações ao longo dos anos.

Dessa maneira, os dados obtidos neste estudo representam uma base de informações robusta, de alta precisão, acerca das características das massas d'água costeiras e oceânicas presentes na região sudoeste do oceano Atlântico Sul. Ademais, estas informações certamente irão auxiliar trabalhos futuros que tratem dos impactos de um possível fortalecimento/enfraquecimento da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico, colaborando com a avaliação de alterações que sinalizem respostas aos efeitos climáticos.

REFERÊNCIAS

- BARBIER, E. B. Marine ecosystem services. **Current Biology**, v. 27, n. 11, p. 507-510, 2017.
- BARREIRO, M. Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. **Clim Dyn**, v. 35, p. 1493-1508, 2010.
- BELL, R. G. Behaviour of dissolved silica, and estuarine/coastal mixing and exchange processes at Tairua Harbour, New Zealand. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 28, n.1 p. 55-68, 1994.
- BIANCHI, A. A.; GIULIVI, C.F.; PIOLA, A.R. Mixing in the Brazil Malvinas Confluence. **Deep Sea Research I**, v. 40 n. 7, p. 1345-1358, 1993.
- BIANCHI, A. A.; BIANUCCI, L.; PIOLA, A. R.; RUIZ-PINO, D.; SCHLOSS, I.; POISSON, A.; BALESTRINI, C. F. Vertical stratification and air-sea CO₂ fluxes in the Patagonian shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, C07003, 2005.
- BISBAL, G. A. The southeast South American large marine ecosystem. **Marine Policy**, v. 19, p. 21–38, 1995.
- BORDIN, L. H.; MACHADO, E. C.; CARVALHO, M.; FREIRE, A.S.; FONSECA, A. L. D. O. Nutrient and carbon dynamics under the water mass seasonality on the continental shelf at the South Brazil Bight, **Journal of Marine Systems**, v. 189, p. 22-35, 2019.
- BOSWELL S. M.; SMYTHE-WRIGHT D.; HOLLEY S. E.; KIRKWOOD, D. The tracer signature of Antarctic Bottom Water and its spread in the Southwest Indian Ocean: Part II- Dissolution fluxes of dissolved silicate and their impact on its use as a chemical tracer. **Deep-Sea Research: Part I**, v. 49, p. 575-590, 2002.
- BRAGA, E. S. Determinação automática de nitrato. In: WAGENER, A. R. L.; CARREIRA, R. **Métodos analíticos de referência em Oceanografia Química**. Rio de Janeiro, MMA/SMA, Cap. 6, 1997a, p. 27-29.
- BRAGA, E. S. Determinação automática de nitrito. In: WAGENER, A. R. L.; CARREIRA, R. **Métodos analíticos de referência em Oceanografia Química**. Rio de Janeiro, MMA/SMA, Cap. 7, 1997b, 31-35p.
- BRAGA, E. S.; MÜLLER, T. Observation of regeneration of nitrate, phosphate and silicate during upwelling off Ubatuba. **Continental Shelf Research**, v. 18, n. 8, p. 915 – 922, 1998.
- BRAGA, E. S.; ANDRIÉ, C.; BOURLÉS, B.; VANGRIESHEIM, A.; BAURAND, F.; CHUCHLA, R. Congo River signature and deep circulation in the eastern Guinea Basin. **Deep-Sea Research I**, v. 51, p. 1057-1073, 2004.
- BRAGA, E.S.; NIENCHESKI, L.F.H. Composição das massas de água e seu potenciais produtivos na área entre o Cabo de São Tomé e o Chuí. In: ROSSI-WONGTSCHOWSKI C.L.B.; MADUREIRA, L. **O Ambiente Oceanográfico da plataforma continental e do talude da região sudeste-sul do Brasil**. EDUSP, 2006. 472p.
- BRAGA, E.S., CHIOZZINI, V.G., BERBEL, G.B.B., MALUF, J.C.C., AGUIAR, V.M.C., CHARO, M., MOLINA, D., ROMERO, R., EICHLER, B.B. Nutrients distribution over the

southeastern South Atlantic continental shelf from Mar del Plata (Argentina) to Itajai (Brazil): winter–summer aspects. **Continental Shelf Research**, v. 28, p. 1649–1661, 2008.

BUCKLEY, M. W.; MARSHALL, J. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. **Reviews of Geophysics**, v. 54, p. 5–63, 2016.

CALLAHAN, J. E. The structure and circulation of Deep Water in the Antarctic. **Deep-Sea Research**, 1972, v. 19, p. 563-575, 1972.

CALLIARI, D.; GÓMEZ, M.; GÓMEZ, N. Biomass and composition of the phytoplankton in the RÍo de la Plata: large-scale distribution and relationship with environmental variables during a spring cruise. **Continental Shelf Research**, v. 25, p.197-210, 2005.

CALLIARI, D.; BRUGNOLI, E.; FERRARI, G.; VIZZIANO, D. Phytoplankton distribution and production along a wide environmental gradient in the South-West Atlantic off Uruguay. **Hydrobiologia**, v. 620, p. 47 – 61, 2008.

CAMPOS, E.J.D., J.L. MILLER, T.J. MÜLLER, AND R.G. PETERSON. Physical oceanography of the southwest Atlantic, **Oceanography**. v. 8, n. 3, p. 87–91,1995.

CAMPOS, E.J.D.; MULKHERJEE, S.; PIOLA, A. R.; CARVALHO, F.M.S. A note on a mineralogical analysis of the sediments associated with the Plata River and Patos Lagoon outflows. **Continental Shelf Research**, v. 28, p. 1687-1691, 2008.

CAMPOS, E.J.D. Impact of the Southern Atlantic on the Global Overturning Circulation (MOC) and Climate (SAMOC). In: **1ª Reunião de Avaliação do Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais**. 2013.

CARRETO J. I.; NEGRI, R. M.; BENAVIDES, H. R. Algunas caracteríticas del florecimiento del fitoplancton en el frente del Río de La Plata I: los sistemas nutritivos. **Revista de Investigacion y Desarrollo Pesquero**, v. 5, p. 7-29, 1986.

CHE, H.; ZHANG, J. Water Mass Analysis and End-Member Mixing Contribution Using Coupled Radiogenic Nd Isotopes and Nd Concentrations: Interaction Between Marginal Seas and the Northwestern Pacific. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 5, p. 2388-2395, 2018.

CHI, L.; SONG, X.;YUAN Y.; WANG, W.; ZHOU, P.; FAN, X.; CAO, X.; YU, Z. Distribution and key influential factors of dissolved oxygen off the Changjiang River Estuary (CRE) and its adjacent waters in China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 125, n. 1–2, p. 440-450, 2017.

CIOTTI, A. M; ODEBRECHT, C.; FILLMAN, G.; MÖLLER JR., O. O. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 15, n. 14, p. 1737 – 1756, 1995.

COMBES, V.; MATANO, R. P. Trends in the Brazil/Malvinas Confluence region. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 24, p. 8971-8977, 2014.

COPERNICUS EMERGENCY MANAGEMENT SERVICE. **Global Flood Awareness System (GloFAS)**, 2020. Disponível em <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.a4fdd6b9?tab=overview>> Acesso em: 28 de fev. de 2020.

DOGLIOTTI, A.I.; RUDDICK, K.; GUERRERO, R. Seasonal and inter-annual turbidity variability in the Río de la Plata from 15 years of MODIS: El Niño dilution effect. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 182 (part A), p. 27-39, 2016.

DUNCAN, B.; JOHNSON, K.; SUCHANEK, T.H.; BROWN, M.; LARGIER, J. Developing ocean climate change indicators for the north-central California coast and ocean. **Journal of Environmental Management**, v. 252, 2019.

EMERY, W. J. Water Types and Water Masses. In: **Ocean Circulation**. Boulder, University of Colorado, p. 1556-1567, 2003.

EMILSSON, I. The Shelf and Coastal Waters of Southern Brazil. **Bol. Inst. Oceanogr.** São Paulo, v. 11, n. 2, p. 101-112, 1961.

FALCK, E.; THINGSTAD, F.; WASSMANN, P.; BØRSHEIM, Y. 2011. Tracing Pacific water entering the Polar Ocean through the Bering Strait using N:P ratio signatures. Oral presentation at ESSAS Open Science Meeting 2011, Seattle, USA.

FAO. AQUASTAT Transboundary River Basin Overview – La Plata. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy, 2016.

FERREIRA, M. L. C.; KERR, R. Source water distribution and quantification of North Atlantic Deep Water and Antarctic Bottom Water in the Atlantic Ocean. **Prog. Oceanogr.**, v.153, p.66 – 83, 2017.

FOFONOFF, P.; MILLARD, R.C. JR. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. **UNESCO Tech. Pap. in Mar. Sci.**, No. 44, 53 pp. Eqn.(31) p.39, 1983.

FRINGS, P. J.; CLYMANS, W.; FONTORBE, G.; CHRISTINA, L.; CONLEY, D.J. The continental Si cycle and its impact on the ocean Si isotope budget. **Chem. Geol.**, v. 425, p. 12-36, 2016.

GARCÍA-RODRÍGUEZ F.; BRUGNOLI E.; MUNIZ P.; VENTURINI N.; BURONE L.; HUTTON M.; RODRÍGUEZ M.; PITA A.; KANDRATAVICIUS N.; PÉREZ L.; VEROCAL, J. Warm-phase ENSO events modulate the continental freshwater input and the trophic state of sediments in a large South American estuary. **Marine and Freshwater Research**, v. 65, p. 1-11, 2014.

GARZOLI, S.L.; MATANO, R.P. The South Atlantic and the Atlantic meridional overturning circulation. **Deep-Sea Res. II**, v. 50, p. 1837 – 1847, 2011.

GARZOLI, S. L.; BARINGER, M. O.; DONG, S.; PEREZ, R. C.; YAO, Q. South Atlantic meridional fluxes. **Deep Sea Res. I**, v. 71, p. 21–32, 2013.

GARZOLI, S. L.; DONG, S.; FINE, R.; MEINEN, C.; PEREZ, R. C.; SCHMID, C.; VAN SEBILLE, E.; YAO, Q. The fate of the Deep Western Boundary Current in the South Atlantic, **Deep-Sea Research Pt. I**, v. 103, p. 125–136, 2015.

GENT, P. R. A commentary on the Atlantic meridional overturning circulation stability in climate models. **Ocean Modelling**, v. 122, p. 57-66, 2018.

GORDON, A.L.; WEISS, R.F.; SMETHIE JR., W.M.; WARNER, M.J. Thermocline and Intermediate Water communication between the South Atlantic and Indian Oceans. **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 7223-7240, 1992.

GOTTSCHALK, J.; SKINNER, L. C.; JACCARD, S. L.; MENVIEL, L.; NEHRBASS-AHLES, C.; WAELBROECK, C. Southern Ocean link between changes in atmospheric CO₂ levels and northern-hemisphere climate anomalies during the last two glacial periods, **Quaternary Science Reviews**, v. 230, 2020.

GRASSHOFF, K.; KREMLING, K.; EHRHARDT, M. **Methods of Seawater Analysis**. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 600 p., 1999.

GRASSHOFF, K. Determination of oxygen. In: GRASSHOFF, K.; KREMLING, K.; EHRHARDT, M. **Methods of Seawater Analysis**. 2nd ed. Weinheim: Verlag Chemie, 419 p., 1983.

GUERRERO, R. A.; PIOLA, A. R.; FENCO, H.; MATANO, R. P.; COMBES, V.; CHAO Y.; JAMES, C.; PALMA, E. D.; SARACENO, M.; STRUB, P. T. The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Satellite observations, **J. Geophys. Res. Oceans**, v. 119, p. 7794–7810, 2014.

HARRISON, W. G. Nutrient regeneration and primary production in the sea. In: **Primary Productivity**, P. G. Falkowski, editor, Plenum Press, New York, p. 433-460, 1980.

HERNÁNDEZ-GUERRA, A.; TALLEY, L.; PELEGRÍ, J.; VÉLEZ-BELCHÍ, P.; BARINGER, M.; MACDONALD, A.; MCDONAGH, E. The Upper, Deep, Abyssal and Overturning Circulation in the Atlantic Ocean at 30°S in 2003 and 2011. **Progress in Oceanography**, v. 176, p. 2019.

HERRFORD, J.; BRANDT, P.; ZENK, W. Property changes of deep and bottom waters in the Western Tropical Atlantic. **Deep-Sea Res. I**, v. 124, p. 103 – 125, 2017.

HOPPEMA, M; FAHRBACH, E.; SCHRÖDER, M. On the total carbon dioxide and oxygen signature of the Circumpolar Deep Water in the Weddel Gyre. **Oceanologica Acta**, v. 20, n. 6, 1997.

HYDES, D. J.; AOYAMA, M.; AMINOT, A.; BAKKER, K.; BECKER, S.; COVERLY, S.; DANIEL, A.; DICKSON, A. G.; GROSSO, O.; KEROUEL, R.; VAN OOIJEN, J.; SATO, K.; TANHUA, T.; WOODWARD, E. M. S.; ZHANG, J. Z. Determination of Dissolved Nutrients (N, P, SI) in Seawater With High Precision and Inter-Comparability Using Gas-Segmented Continuous Flow Analysers. **The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines**, v. 1, 51 p., 2010

JEFFREY, S. W.; HUMPHREY, G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. **Biochemie und Physiologie der Pflanzen**, v. 167, n. 2, p. 191-194, 1975.

JONES, E. P.; SWIFT, J. H.; ANDERSON, L. G.; LIPIZER, M.; CIVITARESE, G.; FALKNER, K. K.; KATTNER, G.; MCLAUGHLIN, F. Tracing Pacific water in the North Atlantic. **J. Geophys. Res.**, v. 108, n. C4, p. 1-10, 2003.

JOHNSON, G. C.; MCTAGGART, K. E.; WANNINKHOF, R. Antarctic Bottom Water temperature changes in the western South Atlantic from 1989 to 2014. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 12, 2014.

JACKETT, D. R.; MCDOUGALL, T. J. A neutral density variable for the world's oceans. **Journal of Physical Oceanography**, v. 27, n. 2, p. 237–263, 1997.

JAIME, P.; MENÉNDEZ, A.N. Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA-LHA 05-216-02, Comitente: Proyecto Freplata. Julio, 2002.

JENKINS, W. J.; SEMETHIE JR., W. M.; BOYLE, E. A.; CUTTER, G. A. Water mass analysis for the U.S. GEOTRACES (GA03) North Atlantic sections. **Deep-Sea Research II**, v. 116, p. 6-20, 2015.

JOHNS, W. E.; BARINGER, M. O.; BEAL, L. M.; CUNNINGHAM, S. A.; KANZOW, T.; BRYDEN, H. L.; HIRSCHI, J. J. M.; MAROTZKE, J.; MEINEN, C. S.; SHAW, B.; CURRY, R. Continuous, Array-Based Estimates of Atlantic Ocean Heat Transport at 26.5°N. **J Clim.**, v. 24, p. 2429-2449, 2011.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, B.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-470, 1996.

KAWASE, M.; SARMIENTO, J.L. Circulation and nutrients in middepth Atlantic waters. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. C8, p. 9749-9770, 1986.

KIRCHMAN, D. L. The uptake of inorganic nutrients by heterotrophic bacteria. **Microb Ecol**, v. 28, n. 2, p.255-271, 1994.

KLEIN, B., TOMCZAK, M.: Identification of diapycnal mixing through optimum multiparameter analysis: 2. Evidence for unidirectional diapycnal mixing in the front between North and South Atlantic Central Water. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 99, p. 25275-25280, 1994.

KOSTOV, Y.; ARMOUR, K. C.; MARSHALL, J. Impact of the Atlantic meridional overturning circulation on ocean heat storage and transient climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 41, p. 2108–2116, 2014.

KRESS, N.; HERUT, B. Spatial and seasonal evolution of dissolved oxygen and nutrients in the Southern Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea): chemical characterization of the water masses and inferences on the N:P ratios. **Deep-Sea Res. I**, v.48, p. 2347-2372, 2001.

LIU, M.; TANHUA, T. Distribution of Water Masses in the Atlantic Ocean bases on GLODAPv2. **Ocean Sci. Discuss.**, p. 1-32, 2019.

LIU, C.; LIANG, X.; PONTE, R.M.; VINOGRADOVA, N.; WANG, O. Vertical redistribution of salt and layered changes in global ocean salinity. **Nature communications**, v. 10, 2019.

LORENZEN, C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. **Limnology and Oceanography**, v. 12, n. 2, p. 343-346, 1967.

LUCAS, A.; GUERRERO, R.; MIANZÁN, H. .; ACHA, E.; LASTA, A. Coastal oceanographic regimes of the northern Anchovy Continental Shelf (34-43°S). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 65, n. 3, p. 405-420, 2005.

MAMAYEV, O. I. **Temperature-salinity analysis of world ocean waters**. Amsterdam Elsevier Scientific Publishing, 1975.

MEINEN, C. S.; PIOLA, A. R.; PEREZ, R. C.; GARZOLI, S. L. Deep Western Boundary Current transport variability in the South Atlantic: preliminary results from a pilot array at 34.5° S., **Ocean Sciences**, v. 8, p. 175-194, 2017.

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

MOORE, S. K.; TRAINER, V. L.; MANTUA, N. J.; PARKER, M. S.; LAWS, E. A.; BACKER, L. C.; FLEMING, L. E. Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. **Environ Health.**, v. 7 (Suppl 2), 2008.

NAGAI, R. H.; FERREIRA, P.A.L.; MULKHERJEE, S.; MARTINS, M. V.; FIQUEIRA, R.C.L.; SOUSA, S.H.M.; MAHIQUES, M.M. Hydrodynamic controls on the distribution of surface sediments from the southeast South American continental shelf between 23°S and 38°S. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 51-60, 2014.

NIENCHESKI, L. F. H. Propriedades químicas da água de mar. In: CASTELLO, J. P.; KRUG, L. C. (Org.). *Introdução às Ciências do Mar*. Pelotas: Editora Textos, Cap. 6. p. 140-171, 2015.

NOAA's National Centers for Environmental Information. **State of the Climate: Global Climate Report for July 2019**. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201907/supplemental/page-3>> Acesso em: 28 de fev. de 2020.

ONABULE, O. A.; MITCHELL, S. B.; COUCEIRO, F. The effects of freshwater flow and salinity on turbidity and dissolved oxygen in a shallow Macrotidal estuary: A case study of Portsmouth Harbour, **Ocean & Coastal Management**, v. 191, p. 2020.

OUDOT, C.; TERNON, J. F.; ANDRIE, C.; BRAGA, E. S.; MORIN, P. On the crossing of equator by intermediate waters masses in the Atlantic Ocean: Identification and pathways of Antarctic Intermediate Water and Circumpolar Water. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. 9, p. 20911-20926, 1999.

PALASTANGA, V.; VAN DER SCHRIER, G.; WEBER, S.L.; KLEINEN, T.; RIFFA, K.R.; OSBORN, T.J. Atmosphere and ocean dynamics: contributors to the European Little Ice Age? **Climate Dynamics**, v. 36, p. 973-987, 2011.

PAYTAN, A.; MCLAUGHLIN, K. The Oceanic Phosphorus Cycle. **Chem. Rev.**, v. 107, p. 563-576, 2007.

PIMENTA, F. M.; CAMPOS, E. J. D.; MILLER, J. L.; PIOLA, A. R. A numerical study of the Plata river plume along the southeastern South American continental shelf. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 53, p.129 – 146, 2005.

PIOLA, A.R.; GORDON, A. Intermediate waters in the southwest South Atlantic. **Deep-Sea Research**, v. 36, p. 1–16, 1989.

PIOLA, A.R.; CAMPOS, E.J.D.; MÖLLER, O.O., CHARO, M., MARTINEZ, C.M. Subtropical shelf front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 6566–6578, 2000.

PIOLA, A. R.; MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; MÖLLER JR, O. O.; CAMPOS, E. J. D. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, p. 1-4, 2005.

PIOLA, A.R.; MATANO, R.P. Ocean Currents: Atlantic Western Boundary-Brazil Current/Falkland (Malvinas) Current. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2017.

PIOLA, A. R.; ROMERO, S. I.; ZAJACZKOVSKI, U. Space–time variability of the Plata plume inferred from ocean color. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1556–1567, 2008.

POOLE, R.; TOMCZAK, M. Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. **Deep-Sea Research I**, v. 46, p. 1895-1921, 1999.

REID, J. L. On the total geostrophic circulation of the South Atlantic Ocean: Flow patterns, tracers and transports. **Progress in Oceanography**, v. 23, n. 3, p. 149 – 244, 1989.

ROCHA, R.; GRIEP, G.; WEIGERT, S. Mapeamento do paleoleito do canal do Albardão, Bacia de Pelotas - Brasil. **Revista Geonorte**, v. 5, n. 16, p. 203 – 207, 2014.

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, p. 371-394, 2001.

ROPELEWSKI, C.F.; HALPERT, M.S. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Nino/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.

SARAIVA, E. S. B. G. Nitrogênio e fósforo totais dissolvidos e suas frações inorgânicas e orgânicas: Considerações sobre a metodologia aplicada e estudo de caso em dois sistemas estuarinos do estado de São Paulo. 2 vols. Tese (Livre-docência). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SARDESSAI, S.; SHETYE, S.; MAYA, M.V.; MANGALA, K.R.; KUMAR, P. Nutrient characteristics of the water masses and their seasonal variability in the eastern equatorial Indian Ocean. **Marine Environmental. Research**, v.70, p. 272-282, 2010.

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

SOLÓRZANO, L. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. **Limnology and Oceanography**, v. 14, n. 5, p. 799-801, 1969.

SOSPEDRA, J.; NIENCHESKI, F.H.; FALCO, S.; ANDRADE, C. F. F.; ATTISANO, K. K.; RODILLA, M. Identifying the main sources of silicate in coastal waters of the Southern Gulf of Valencia (Western Mediterranean Sea). **Oceanologia**, v. 60, n. 1, p. 52-64, 2018.

SOUZA, A. G. Q.; KERR, R.; AZEVEDO, J. L. L. On the influence of Subtropical Mode Water on the South Atlantic Ocean. **Journal of Marine Systems**, v. 185, p. 13-24, 2018.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **J. Geophys. Res.**, v. 104, n. C9, p. 20863-20883, 1999.

STRICKLAND, J.D.H.; PARSONS, T.R. A Practical Handbook of Seawater Analyses. **B Fish Res Board Can**, n. 167, Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, 1968. 311 p.

SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. **The Oceans**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, p. 1087, 1942.

TAKAHASHI, T.; OLAFSSON, J.; GODDARD, J. G.; CHIPMAN, D. W.; SUTHERLAND, S. C. Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, 843-878, 1993.

TALLEY, L.D.; PICKARD, G.L.; EMERY, W.J.; SWIFT, J.H. **Descriptive Physical Oceanography: An Introduction** (Sixth Edition), Elsevier, Boston, 2011. 560p.

TOMCZAK, M.; GODFREY, J. S. **Regional Oceanography: an Introduction**. 2nd Edition, Daya Publishing House, 2003. 390p.

TOMCZAK, M.; LARGE, D. G. B. Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 94, n. C11, p. 16141-16149, 1989.

TRÉGUER, P.; LE CORRE, P. **Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer**. 2^{ème} éd. Brest: Université de Bretagne Occidentale, 1975. 110 p.

TRÉGUER, P.; NELSON, D. M.; VAN BENNEKOM, A. J.; DEMASTER, D. J.; LEYNAERT, A.; QUEGUINER, B. The Silica Balance in the World Ocean: A Reestimate. **Science**, v. 268, n. 5209, p. 375-379, 1995.

TSUCHIYA, M.; TALLEY, L. D.; MCCARTNEY, M. S. Water-mass distributions in the western South Atlantic: A section from South Georgia Island (54S) northward across the equator. **Journal of Marine Research**, v. 52, n. 1, p. 55-81, 1994.

VALLA, D.; PIOLA, A. R.; MEINEN, C. S.; CAMPOS, E. Strong mixing and recirculation in the northwestern Argentine Basin. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 123, p. 4624-4648, 2018.

VALLA, D.; PIOLA, A. R.; MEINEN, C. S.; CAMPOS, E. Abyssal transport variations in the Southwest South Atlantic: first insights from a long-term observation array at 34.5 °S. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 12, p. 6699-6705, 2019.

VAN AKEN, H. M. The Oceanic Thermohaline Circulation: An Introduction. **Atmospheric and Oceanographic Sciences Library**, v. 39, 2007.

VAZ, A. C.; MÖLLER JR, O. O.; DE ALMEIDA, T. L. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. **Atlântica**, v. 28, p. 13–23, 2006.

VIEIRA, C. M. Nutrientes como traçadores químicos de massas d'água e indicadores de processos biogeoquímicos ao longo de uma seção transversal na costa sul do Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Oceanografia Química) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

WANNINKHOF, R.; DONEY, S. C.; BULLISTER, J. L.; LEVINE, N. M.; WARNER, M.; GRUBER, N. Detecting anthropogenic CO₂ changes in the interior Atlantic Ocean between 1989 and 2005. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. C11, 2010.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **El Niño/La Niña Update, June 2018**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/news/el-ni%C3%B1o-la-ni%C3%B1a-update-june-2018>> Acesso em: 1 de mar. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **El Niño/La Niña Update, August 2019**. Disponível em: <<https://reliefweb.int/report/world/wmo-el-ni-ola-ni-update-august-2019>> Acesso em: 1 de mar. 2020.

APÊNDICE A – Coordenadas geográficas e profundidade total dos pontos de amostragem no oceano Atlântico Sul, coletados durante cruzeiros do projeto SAMBAR em abril de 2018 e junho de 2019.

SAMBAR 2018				SAMBAR 2019			
Estação	Prof. total (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Estação	Prof. total (m)	Latitude (°)	Longitude (°)
1	16,6	-33,2548	-52,6562	1	14,0	-33,2529	-52,6505
2	18,3	-33,3908	-52,5321	2	17,0	-33,3895	-52,5414
3	39,3	-33,5770	-52,3352	3	30,5	-33,5658	-52,3509
4	75,0	-33,6980	-52,2017	4	73,0	-33,7075	-52,2003
5	44,7	-34,2984	-51,7074	5	46,0	-33,8329	-52,0791
6	68,5	-33,9970	-51,9354	6	69,0	-34,0037	-51,9345
7	127,0	-34,1704	-51,8293	7	127,0	-34,1552	-51,8214
8	165,0	-34,2984	-51,7074	8	380,0	-34,3107	-51,6771
9	400,0	-34,3209	-51,6826	9	982,0	-34,4154	-51,5898
10	1346,0	-34,5043	-51,5043	10	1358,0	-34,5092	-51,5050
11	2538,0	-34,4990	-51,0154	11	2465,0	-34,5415	-50,9784
12	2890,0	-34,5009	-50,5302	12	3150,0	-34,4927	-49,9865
13	3141,0	-34,5098	-50,0126	13	3490,0	-34,4957	-49,5110
14	3493,3	-34,4987	-49,5246	14	3816,0	-34,4942	-49,0169
15	3825,0	-34,5060	-49,0142	15	4742,0	-34,5186	-46,0852
16	4162,0	-34,4970	-48,5011	16	4769,0	-34,5199	-45,2657
17	4373,3	-34,5083	-48,0004	17	4753,0	-34,5132	-44,5371
18	4469,6	-34,4903	-47,4998				
19	4600,0	-34,4833	-47,0148				
20	4645,0	-34,5205	-46,4978				
21	4744,0	-34,5005	-45,9896				
22	4758,8	-34,4986	-45,5003				
23	4764,0	-34,4972	-44,9974				
24	4757,0	-34,5235	-44,4938				