



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Renan Luis Evangelista Vieira

**Propriedades Biogeoquímicas das Massas d'Água no Oceano Atlântico
Tropical Oeste**

Rio de Janeiro

2021

Renan Luis Evangelista Vieira

Propriedades Biogeoquímicas das Massas d'Água no Oceano Atlântico Tropical Oeste

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Biogeoquímica marinha

Orientadora: Prof.^a Dra. Letícia Cotrim da Cunha

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

V658 Vieira, Renan Luis Evangelista.
Propriedades biogeoquímicas das massas d'água no Oceano
Atlântico Tropical Oeste / Renan Luis Evangelista Vieira. – 2021.
94 f.: il.

Orientadora: Letícia Cotrim da Cunha.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Oceanografia.

1. Oceanografia química – Atlântico, Oceano – Teses. 2. Massas de
água – Atlântico, Oceano – Teses. 3. Ciclos biogeoquímicos – Atlântico,
Oceano – Teses. 4. Oxigênio – Teses. I. Cunha, Letícia Cotrim da. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Oceanografia.
III. Título.

CDU 551.464.3(261)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Renan Luis Evangelista Vieira

Propriedades Biogeoquímicas das Massas d'Água no Oceano Atlântico Tropical Oeste

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Biogeoquímica marinha

Aprovado em 26 de agosto de 2021.

Orientadora: Prof.^a Dra. Leticia Cotrim da Cunha

Faculdade de Oceanografia – UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Faculdade de Oceanografia – UERJ

Prof.^a Dra. Mônica Wallner-Kersanach

Universidade Federal do Rio Grande

Prof.^a Dra. Luana Queiroz Pinho

Faculdade de Oceanografia – UERJ

Prof. Dr. Bastiaan Adriaan Knoppers

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeira e especialmente a minha mãe, que sempre me apoiou em toda a minha jornada, me dando forças até hoje para que eu possa estar concluindo mais uma etapa.

Ao meu marido, por toda a experiência que vivenciamos juntos; toda a troca de conhecimento prestada; por contribuir com paciência, compreensão e suporte, estando sempre ao meu lado; e por ser uma das minhas principais âncoras emocionais durante todo esse período.

A cada amigo que tornou mais agradável meu dia-a-dia na universidade, contribuindo com importantes momentos de estudo que me fizeram crescer acadêmica e profissionalmente; bem como aos amigos que não fizeram parte diretamente dessa minha caminhada, mas que sempre me apoiaram de alguma forma e são imprescindíveis em minha vida.

A minha orientadora por todo o conhecimento passado, pelas oportunidades de vivenciar experiências únicas profissionalmente, e por toda a confiança, em mim, depositada, possibilitando a importante realização deste trabalho como fonte de conhecimento.

Ao grupo do laboratório LABOQUI, que me ajudou com as análises laboratoriais e participando de um programa de reuniões semanais onde discutíamos artigos e trabalhos relacionados à oceanografia química; assim como à CAPES, que apoiou financeiramente esse projeto.

A minha banca avaliadora, pelo convite aceito e por todo o tempo e dedicação prestado à avaliação deste trabalho.

Aos meus professores e ao corpo docente da Faculdade de Oceanografia, que contribuíram com todo o conhecimento prestado, dentro e fora de sala de aula, e adquiridos por mim com muito apreço.

E, por fim, agradeço a toda a minha família, por acreditarem em mim acima de qualquer circunstância, me apoiando incondicionalmente e sempre contribuindo com todos os seus ensinamentos já vividos.

RESUMO

VIEIRA, Renan Luis Evangelista: *Propriedades biogeoquímicas das massas d'água no Oceano Atlântico Tropical Oeste*. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

Neste estudo foram caracterizadas as propriedades químicas das massas de água no oceano Atlântico Tropical Oeste, de acordo com sua concentração de oxigênio e nutrientes inorgânicos dissolvidos: nitrato, nitrito, fosfato e silicato. Foram coletadas amostras de água em um total de 18 estações oceanográficas ao longo do transecto 38°W, de 02°S a 15°N, durante os cruzeiros PIRATA-BR XVII e XVIII, em novembro de 2017 e 2018. Nesta região, a circulação superficial e de subsuperfície no oceano Atlântico apresenta padrões sazonais complexos, sob influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). As amostras de água foram coletadas em garrafas *Niskin* fechadas em dez profundidades diferentes, armazenadas, congeladas e posteriormente analisadas por espectrofotometria. Além disso, dados do CTD-O₂ forneceram medidas contínuas de salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido, utilizadas para identificar as massas de água de acordo com seus índices termohalinos. Para auxiliar na caracterização, foram também analisados dados dos mesmos parâmetros biogeoquímicos referentes à base de dados GLODAPv.2, coletados entre 1990 e 2010 ao longo do transecto 35° W, entre as latitudes 03°S e 10°N. Seis massas de água foram identificadas na região com base em seus limites de densidade neutra: Água Tropical Superficial (AT, $\gamma^n < 24,448 \text{ kg m}^{-3}$); Águas Centrais do Atlântico Sul e do Atlântico Norte (ACAS e ACAN, $\gamma^n 24,448 - 26,815 \text{ kg m}^{-3}$); Água Intermediária Antártica (AIA, $\gamma^n 26,815 - 27,7153 \text{ kg m}^{-3}$); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN, $\gamma^n 27,7153 - 28,135 \text{ kg m}^{-3}$); e Água de Fundo Antártica (AFA, $\gamma^n > 28,135 \text{ kg m}^{-3}$). Todas as massas d'água apresentaram baixíssima concentração de nitrito. A AT corresponde a uma água oligotrófica que apresenta baixas concentrações dos outros nutrientes, e alta concentração de oxigênio (~ 200 $\mu\text{mol/kg}$) devido às trocas gasosas com a atmosfera; as Águas Centrais ACAN e ACAS apresentam baixa concentração de nutrientes, atuando como regiões de transição entre a AT e a AIA; a AIA apresentou a maior concentração de fosfato (~ 1,35 $\mu\text{mol/kg}$) e de nitrato (~ 30 $\mu\text{mol/kg}$), e baixa concentração de O₂ (~ 130 $\mu\text{mol/kg}$) dissolvido; a APAN apresentou a maior média de concentração de O₂ (~ 250 $\mu\text{mol/kg}$), e concentrações intermediárias dos outros nutrientes; já a AFA foi a massa de água que apresentou a maior concentração de silicato (~ 80 $\mu\text{mol/kg}$), bem como uma elevada concentração de O₂ (~ 240 $\mu\text{mol/kg}$), nitrato (~ 25 $\mu\text{mol/kg}$) e fosfato (~ 1,80 $\mu\text{mol/kg}$). Por fim, foi possível verificar que algumas massas de água possuem um ou mais nutrientes e parâmetros biogeoquímicos que apresentam concentrações específicas, auxiliando na sua identificação e caracterização. Como a alta concentração de nitrato e fosfato na AIA, e a alta concentração de silicato na AFA, comparado com as massas de água centrais e superficial.

Palavras-chave: Nutriente inorgânico. Oxigênio dissolvido. Concentração. PIRATA.

ABSTRACT

VIEIRA, Renan Luis Evangelista: *Water masses biogeochemical properties in the Western Tropical Atlantic Ocean*. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

This study characterized the chemical properties of the water masses in the Western Tropical Atlantic Ocean according to their dissolved oxygen and inorganic nutrient concentration: nitrate, nitrite, phosphate and silicate. We collected full-depth water samples from 18 oceanographic stations along the 38°W transect, from 02°S to 15°N during the PIRATA-BR XVII and XVIII cruises, in November 2017 and 2018. In this region, the surface and subsurface circulation in the Atlantic Ocean displays complex seasonal patterns, under influence of the Intertropical Convergence Zone. The water samples were collected from Niskin bottles closed in ten different depths, stored frozen, and later analyzed through spectrophotometry. Besides that, the CTD-O₂ data provided continuous salinity, temperature, and dissolved oxygen measurements, used to identify the water masses according to their thermohaline indexes. The same biogeochemical parameters from GLODAPv.2 database, sampled between 1990 and 2010 along the 35°W, from 03°S and 10°N, were also used to characterize the water masses. Six water masses were identified in the region based on their neutral density limits: Tropical Surface Water (TSW, $\gamma_n < 24.448$ kg m⁻³); South and North Atlantic Central Water (SACW and NACW, $\gamma_n 24.448 - 26.815$ kg m⁻³); Antarctic Intermediate Water (AAIW, $\gamma_n 26.815 - 27.7153$ kg m⁻³); North Atlantic Deep Water (NADW, $\gamma_n 27.7153 - 28.135$ kg m⁻³); and Antarctic Bottom Water (AABW, $\gamma_n > 28.135$ kg m⁻³). All water masses had very low nitrite concentration. TSW corresponds to an oligotrophic water that has low concentrations of other nutrients, and high oxygen concentration (~ 200 $\mu\text{mol/kg}$) due to gas exchange with the atmosphere; NACW and SACW have low nutrient concentration, acting as transition regions between TSW and AAIW; AAIW showed the highest concentration of phosphate (~ 1.35 $\mu\text{mol/kg}$) and nitrate (~ 30 $\mu\text{mol/kg}$), and low dissolved O₂ concentration (~ 130 $\mu\text{mol/kg}$); NADW had the highest O₂ concentration mean (~ 250 $\mu\text{mol/kg}$), and intermediate concentrations of other nutrients; AABW, on the other hand, was the water mass with the highest silicate concentration (~ 80 $\mu\text{mol/kg}$), as well as a high O₂ (~ 240 $\mu\text{mol/kg}$), nitrate (~ 25 $\mu\text{mol/kg}$) and phosphate (~ 1.80 $\mu\text{mol/kg}$) concentrations. Finally, it was possible to verify that some water bodies have one or more nutrients and biogeochemical parameters that have specific concentrations, helping in their identification and characterization, such as the high nitrate and phosphate in AAIW, and high silicate in AABW, compared to central and surface water masses.

Keywords: Inorganic nutrient. Dissolved oxygen. Concentration. PIRATA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa do oceano Atlântico, com suas porções Norte e Sul indicadas, de acordo com dados de batimetria Etopo2 da NOAA NGDC (2008).....	16
Figura 2 –	Modelo esquemático simplificado da Circulação de Revolvimento Meridional.....	18
Figura 3 –	Distribuição das principais massas d'água ao longo do oceano Atlântico de acordo com dados de salinidade, com a delimitação das parcelas de água superficiais, centrais, intermediárias, profundas e de fundo, juntamente com as massas de água que as representam.....	19
Figura 4 –	Exemplo de um diagrama T-S para dados de temperatura e salinidade ao longo do oceano Atlântico.....	22
Figura 5 –	Localização da área de estudo no Oceano Atlântico Tropical Oeste com a plotagem do transecto realizado para as coletas.....	27
Figura 6 –	Posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao longo da região equatorial.....	28
Figura 7 –	Principais sistemas de correntes superficiais presentes no oceano Atlântico Tropical Oeste.....	29
Figura 8 –	Distribuição das principais massas d'água ao longo do oceano Atlântico e da porção do Atlântico Tropical de acordo com dados de salinidade.....	31
Figura 9 –	Representação da região de fronteira entre as massas d'água centrais do Atlântico Norte e do Atlântico Sul; o padrão de circulação superficial do oceano Atlântico Tropical; e a concentração de oxigênio entre 200 e 500 metros, juntamente com a zona de mínimo oxigênio na costa oeste Africana.....	33
Figura 10 –	Mapa de localização das estações de coleta na área de estudo ao longo do meridiano 38° W, estando em azul as estações onde houve coletas em 2017 e 2018; e em vermelho apenas em 2017.....	35
Figura 11 –	Representação das profundidades de amostragem ao longo das estações localizadas no meridiano 38° W nos anos de 2017 (A) e 2018 (B). O relevo marinho na figura corresponde aos dados de elevação global GBECO_2014 (versão 2014-11-12, http://www.gebco.net/).....	36

Figura 12 – Diagrama T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade, com eixo Z em profundidade, no transecto 38° W para (A) 2017 e (B) 2018.....	47
Figura 13 – Diagrama T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade, com eixo Z em O ₂ dissolvido no transecto 38° W para (A) 2017 e (B) 2018.....	48
Figura 14 – Perfis de densidade neutra ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	50
Figura 15 – Perfis de nitrato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	54
Figura 16 – Perfis de nitrito ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	55
Figura 17 – Perfis de fosfato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	56
Figura 18 – Perfis de silicato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	57
Figura 19 – Perfis de oxigênio dissolvido ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	58
Figura 20 – Diagramas T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade para o produto de dados GLODAPv.2, no transecto 35° W, para (A) o eixo Z em profundidade e (B) o eixo Z em O ₂	60
Figura 21 – Perfis de densidade neutra para a base de dados do GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, entre 03° S e 15° N, sendo a seção (A) da porção superficial até 1500 m; e a seção (B) de toda a coluna d'água.....	61
Figura 22 – Perfis de nitrato [(A) e (B)] e nitrito [(C) e (D)] para a base de dados GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	65
Figura 23 – Perfis de fosfato [(A) e (B)] e silicato [(C) e (D)] para a base de dados	

	GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.....	66
Figura 24 –	Perfis de densidade neutra para a base de dados do GLODAPv.2 ao longo do transecto 35°W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo a seção (A) da porção superficial até 1500 m; e a seção (B) de toda a coluna d'água.....	67
Figura 25 –	Gráficos de comparação da média de concentração e erro padrão de (A) nitrato, (B) nitrito, (C) fosfato e (D) silicato entre as três bases de dados utilizadas nesse trabalho: PIRATA 2017, PIRATA 2018 e GLODAPv.2..	69
Figura 26 –	Gráfico de comparação da média de concentração e erro padrão de oxigênio dissolvido entre as três bases de dados utilizadas nesse trabalho: PIRATA 2017, PIRATA 2018 e GLODAPv.2.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores de concentração de O ₂ para cada duplicata e a profundidade em que foram coletadas, juntamente com seus dados de diferença entre as duplicatas, média e desvio padrão, utilizados para verificar a precisão metodológica e a qualidade da amostragem.....	39
Tabela 2 –	Caracterização das massas de água a partir de seus dados de profundidade, temperatura potencial, salinidade, densidade potencial (σ_θ) e densidade neutra (γ^n) (HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; LIU; TANHUA, 2019a; POOLE; TOMCZAK, 1999).....	41
Tabela 3 –	Valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão das concentrações de cada nutriente e oxigênio dissolvido para cada uma das massas de água em 2017 e 2018, para a base de dados PIRATA.....	53
Tabela 4 –	Valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão das concentrações de cada nutriente e oxigênio dissolvido para cada uma das massas de água do produto de dados GLODAPv.2 ao longo do meridiano 35° W, coletadas entre 1990 e 2010.....	64
Tabela 5 –	Média de concentração de nitrogênio em $\mu\text{mol/kg}$ em cada massa d'água para cada 1 $\mu\text{mol/kg}$ de fósforo, nas bases de dados GLODAPv.2, PIRATA XVII (2017) e PIRATA XVIII (2018).....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AABW	Água de Fundo Antártica
AAIW	Água Intermediária Antártica
ACAN	Água Central do Atlântico Norte
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AFA	Água de Fundo Antártica
AIA	Água Intermediária Antártica
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
AT	Água Tropical
BC	Corrente do Brasil
CDW	Água Profunda Circumpolar
CO ₂	Dióxido de carbono
CTD-O ₂	Conductivity, Temperature, Depth, Oxygen
DIVA	Data-Interpolating Variational Analysis
DSOW	Água do Estreito da Dinamarca
ENACW	Água Central do Atlântico Norte do Leste
ESACW	Água Central do Atlântico Sul do Leste
EUC	Subcorrente Equatorial
FIA	Análise por Injeção em Fluxo
GD	Domo da Guiné
GLODAP	Global Ocean Data Analysis Project for Carbon
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISOW	Água da Islândia e da Escócia
LABOQUI	Laboratório de Oceanografia Química Marinha
L-ADCP	Lowered Acoustic Doppler Current Profiler
LaGOM	Laboratório de Geoquímica Orgânica Marinha
LSW	Água do Mar do Labrador
MC	Corrente da Maurîtânia
MnCl ₂	Cloreto de manganês
MOC	Circulação de Revolvimento Meridional
MOW	Água do Mediterrâneo
MW	Água do Mediterrâneo

Na ₂ S ₂ O ₃	Tiosulfato de sódio
NADW	Água Profunda do Atlântico Norte
NBC	Corrente Norte do Brasil
NEABW	Água de Fundo Antártica do Nordeste
NEADW	Água Profunda do Atlântico Nordeste
NEC	Corrente Norte Equatorial
NECC	Contracorrente Norte Equatorial
NEUC	Subcorrente Norte Equatorial
NGDC	National Geophysical Data Center
NH ₄ ⁺	Amônio
NICC	Contracorrente Norte Intermediária
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Observation
O ₂	Oxigênio
ODV	Ocean Data View
PIRATA	Prediction Research Moored Array in the Tropical Atlantic
PO ₄ ³⁻	Fosfato
PUC	Subcorrente em direção aos Polos
R1	Reagente um
R2	Reagente dois
SAIW	Água Intermediária Subártica
SEC	Corrente Sul Equatorial
SiO ₂	Silicato
SPMW	Água Modal Subpolar
STUW	Água Superficial
UNADW	Água Profunda Superior do Atlântico Norte
WNACW	Água Central do Atlântico Norte do Oeste
WOCE	World Ocean Circulation Experiment
WSACW	Água Central do Atlântico Sul do Oeste
WSBW	Água de Fundo do Mar de Weddell
WSDW	Água de Fundo do Mar de Weddell
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZMO	Zona de Mínimo Oxigênio

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{N}$	Graus norte
$^{\circ}\text{S}$	Graus sul
$^{\circ}\text{W}$	Graus oeste
m	Metro
m^3	Metro cúbico
km^2	Kilômetro quadrado
cm	Centímetro
σ_{θ}	Densidade potencial
γ^n	Densidade neutra
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Metro cúbico por segundo
kg m^{-3}	Kilograma por metro cúbico
mL	Mililitro
M	Concentração
V	Volume
mL L^{-1}	Mililitro por litro
$\mu\text{mol kg}^{-1}$	Micromol por kilo
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
n	tamanho amostral
R^2	Coefficiente de determinação
μM	Micromolar

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	OBJETIVOS	26
1.1	Objetivo principal	26
1.2	Objetivos específicos	26
2	METODOLOGIA	27
2.1	Área de Estudo	27
2.1.1	<u>Zona de Convergência Intertropical</u>	27
2.1.2	<u>Circulação e sistema de correntes superficiais</u>	28
2.1.3	<u>Pluma do rio Amazonas</u>	30
2.1.4	<u>Massas d'água</u>	31
2.2	Aquisição de dados e amostragem	34
2.2.1	<u>Oxigênio Dissolvido</u>	36
2.2.2	<u>Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos</u>	37
2.3	Análises laboratoriais	37
2.3.1	<u>Oxigênio Dissolvido</u>	38
2.3.2	<u>Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos</u>	40
2.4	Identificação das massas d'água	40
2.5	Tratamento dos dados	42
2.6	Análises estatísticas	44
3	RESULTADOS	46
3.1	Base de dados PIRATA	46
3.1.1	<u>Identificação das massas d'água</u>	46
3.1.2	<u>Distribuição das massas d'água</u>	49
3.1.3	<u>Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos</u>	51
3.1.4	<u>Oxigênio Dissolvido</u>	52
3.2	Produto de dados GLODAPv.2	59
3.2.1	<u>Identificação das massas d'água</u>	59
3.2.2	<u>Distribuição das massas d'água</u>	61
3.2.3	<u>Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos</u>	62
3.2.4	<u>Oxigênio Dissolvido</u>	63

3.3	Distribuição das concentrações entre os conjuntos de dados.....	67
4	DISCUSSÃO.....	72
4.1	Água Tropical (AT).....	72
4.2	Água Central do Atlântico Sul (ACAS).....	73
4.3	Água Central do Atlântico Norte (ACAN).....	74
4.4	Água Intermediária Antártica (AIA).....	75
4.5	Água Profunda do Atlântico Norte (APAN).....	77
4.6	Água de Fundo Antártica (AFA).....	78
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
	REFERÊNCIAS.....	82
	APÊNDICE A – Resultado dos p-valores do teste de normalidade Shapiro-Wilk para os dados PIRATA.....	91
	APÊNDICE B – Resultado dos p-valores para o teste estatístico comparativo de Dunn’s (par-a-par), após a análise estatística de Kruskal-Wallis, para a AT, ACAS, AIA, APAN e AFA. Bem como o resultado dos p-valores para o teste estatístico Wilcoxon-Mann-Whitney (*) para a ACAN e para o parâmetro nitrato apenas na ACAS.....	92
	APÊNDICE C – Tabela geral com os valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão dos principais parâmetros físico-químicos utilizados neste trabalho.....	93

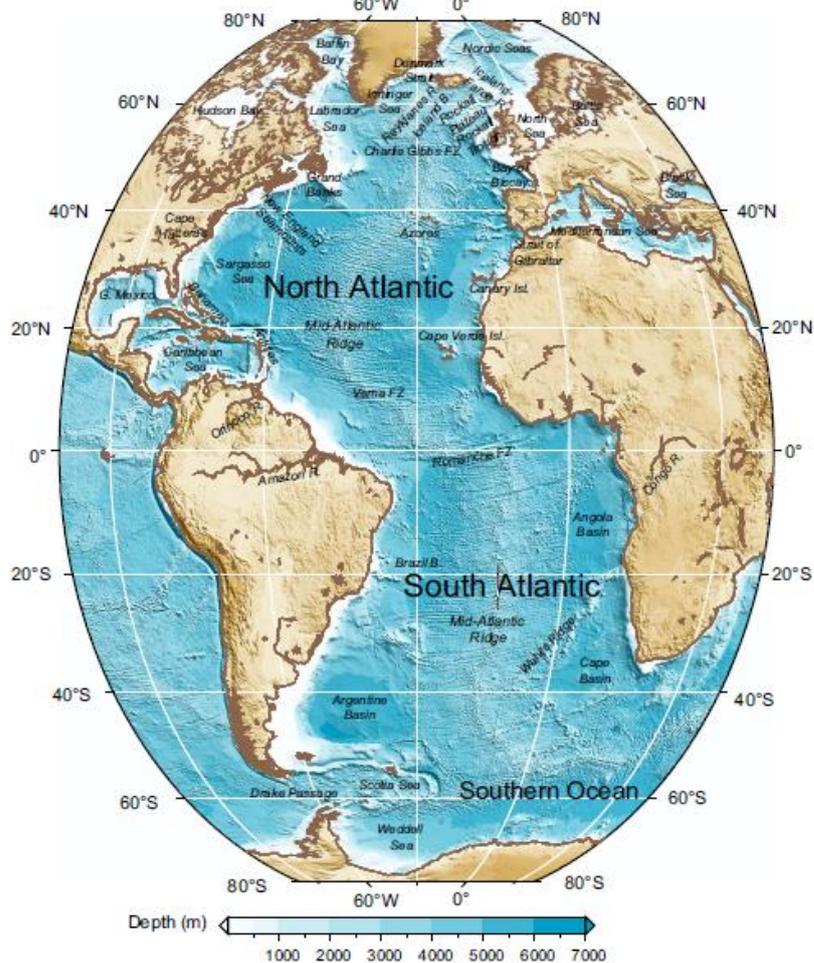
INTRODUÇÃO

No oceano, os processos físicos, químicos e biológicos interagem entre si, influenciando toda a comunidade marinha. Todos esses processos são responsáveis por fatores abióticos e bióticos que, por sua vez, controlam os aspectos físico-químicos do oceano. Entre os fatores abióticos mais importantes estão: a temperatura, a salinidade, a luz, as correntes e os nutrientes; enquanto os fatores bióticos dizem respeito aos diferentes processos biológicos realizados pelos organismos que influenciam diretamente o ambiente, como a produção primária e as relações ecológicas (LIBES, 2009; MONTES, 2003).

Na oceanografia, compreender cada um desses processos isoladamente é extremamente importante. Porém, como todos esses processos estão interligados e interagem entre si, também é bastante importante entender como eles se comportam em conjunto e como influenciam uns aos outros (LIBES, 2009). Logo, compreender toda essa atuação conjunta entre diferentes processos abre um leque de possibilidades para entender o sistema como um todo, possibilitando que uma determinada região seja melhor caracterizada e compreendida, auxiliando a utilização de modelos com fins de realizar previsões e determinar padrões de comportamento futuros.

O Oceano Atlântico apresenta uma vasta complexidade de interações entre processos químicos, físicos e biológicos. Ele é o segundo maior oceano do planeta, possuindo uma área total de aproximadamente $106,6 \times 10^6 \text{ km}^2$ (TOMCZAK; GOFFREY, 2004), um volume de aproximadamente $310,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ e uma média de profundidade de aproximadamente 3646 m (AMANTE; EAKINS, 2009); e é subdividido em três principais regiões, sendo elas o Atlântico Sul, o Atlântico Norte e o Atlântico Tropical (Fig.1). Além disso, o oceano Atlântico possui uma grande importância global, uma vez que é responsável por grande parte do equilíbrio de temperatura entre ambos os hemisférios devido à distribuição de calor (LIU; TANHUA, 2019b; SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007).

Figura 1 - Mapa do oceano Atlântico, com suas porções Norte e Sul indicadas, de acordo com dados de batimetria Etopo2 da NOAA NGDC (2008).



Fonte: TALLEY *et al.* (2011b)

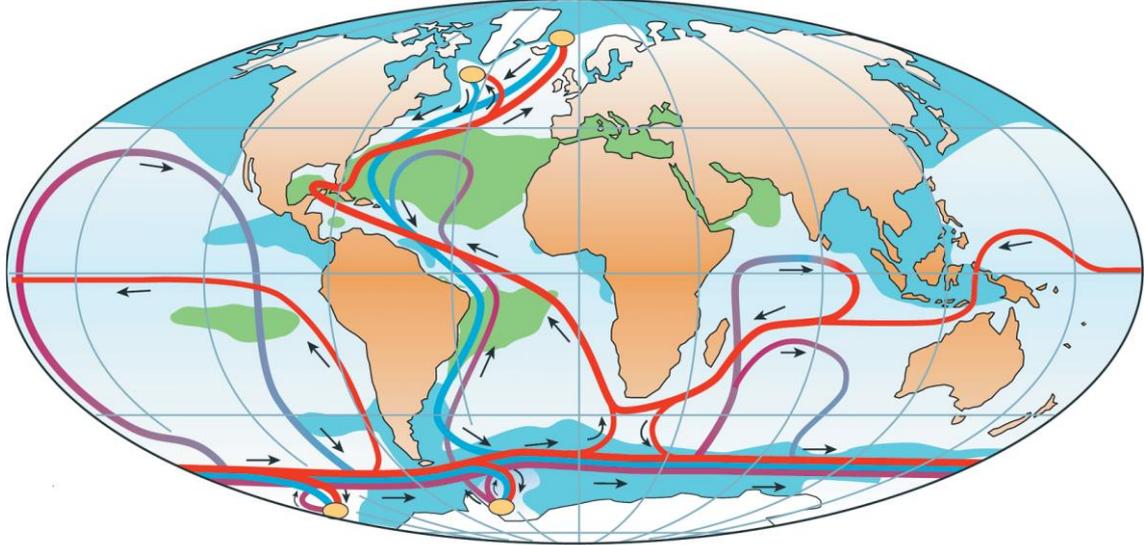
Tanto o oceano Atlântico Norte, como o Atlântico Sul, possuem uma estrutura de circulação anticiclônica das parcelas de água superficiais, denominadas giro subtropical do Atlântico Norte e do Sul, respectivamente. O oceano Atlântico Tropical, por sua vez, possui uma estrutura de circulação superficial na direção leste – oeste. O grande motor que impulsiona essa circulação em superfície no Atlântico são os ventos (STRAMMA *et al.*, 2003; STRAMMA; ENGLAND, 1999; TALLEY, LYNNE D. *et al.*, 2011b). As correntes superficiais que estabelecem esse tipo de circulação possuem fluxos com altas velocidades, capazes de transportar cerca de 10 sverdrups de água (SIGNORINI, 1976). Na margem oeste dos oceanos essa velocidade se torna ainda mais elevada, sendo a corrente do Golfo, localizada no Atlântico Norte, a que apresenta a maior velocidade e que transporta aproximadamente 100 sverdrups de água (HOGG; JOHNS, 1995).

Em grandes profundidades, o principal motor do transporte das parcelas de água é a diferença de densidade entre elas. Além disso, em grandes profundidades as parcelas de água

são transportadas bem mais lentamente que na superfície, com velocidades de aproximadamente 1 a 2 centímetros por segundo, com exceção da borda oeste das bacias oceânicas, onde o fluxo das águas profundas pode chegar a uma velocidade de 10 cm por segundo (EMERY, W.J., 2001; HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; POND; PICKARD, 2013; SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007; SILVA, A. C. *et al.*, 2010). Dessa forma, grandes volumes de água são transportados nas regiões profundas dos oceanos globais, onde as parcelas de água com menor densidade tendem a fluir sobre as mais densas (EMERY, W.J., 2001; HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007).

Os padrões de circulação que ocorrem tanto em superfície como no fundo não compreendem sistemas isolados, por outro lado, representam um sistema global. Esse sistema de circulação é denominado Circulação de Revolvimento Meridional (do inglês *Meridional Overturning Circulation*, MOC) (Fig.2) (FERREIRA; KERR, 2017; KOSTOV; ARMOUR; MARSHALL, 2014; SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007), controlado pelos processos de evaporação, precipitação, aquecimento, resfriamento, escoamento e formação de gelo marinho, que alteram a densidade das parcelas de água (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011b). A MOC é a grande responsável pela distribuição de calor do planeta, garantindo um maior equilíbrio da temperatura atmosférica. O equilíbrio global que promove é tão importante que regiões continentais a oeste do Atlântico Norte (norte e oeste Europeus) experimentam um inverno menos rigoroso em consequência do calor trazido por correntes mais quentes originadas na região equatorial (SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007).

Figura 2 - Modelo esquemático simplificado da Circulação de Revolvimento Meridional.

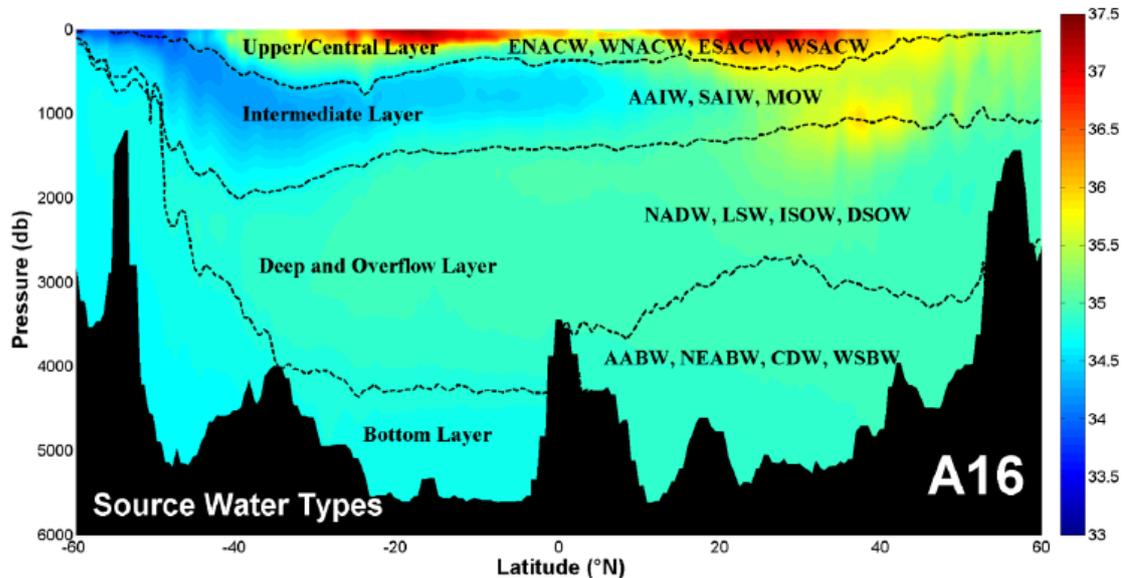


Legenda: Linha vermelha - circulação superficial; Linha azul – circulação de águas profundas; Linha roxa – circulação de águas de fundo; Elipse amarela – regiões de formação de águas de fundo; região esverdeada – salinidade > 36; região azulada – salinidade < 34.

Fonte: SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING (2007)

O oceano Atlântico é composto por diferentes parcelas de água que experimentam diferentes processos de transporte diretamente acoplados que formam a MOC e estão distribuídas ao longo da coluna d'água (AZAR *et al.*, 2020; PICKARD; EMERY, 1990). Essas parcelas de água são denominadas massas de água que têm características físicas próprias e ocupam um volume finito (TOMCZAK; LARGE, 1989). As massas de água no oceano são formadas em determinadas regiões dos oceanos onde adquirem as propriedades físico-químicas que as caracterizam (Fig.3) (AZANEU *et al.*, 2013; EMERY, W.J., 2001; FERREIRA; KERR, 2017; KERR *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2016; SOUZA; KERR; AZEVEDO, 2018; TOMCZAK, 1999). Entre essas características encontram-se as propriedades conservativas, que não são alteradas no interior dos oceanos; e as não conservativas, que participam de processos biogeoquímicos e são modificadas com mais facilidade (EMERY, W.J., 2001).

Figura 3 - Distribuição das principais massas d'água ao longo do oceano Atlântico de acordo com dados de salinidade, com a delimitação das parcelas de água superficiais, centrais, intermediárias, profundas e de fundo, juntamente com as massas de água que as representam.



Legenda: ENACW / WNACW – porções leste e oeste da Água Central do Atlântico Norte, respectivamente; ESACW / WSACW – porções leste e oeste da Água Central do Atlântico Sul, respectivamente; AAIW – Água Intermediária Antártica; SAIW – Água Intermediária Subártica; MOW – Água do Mediterrâneo; NADW – Água Profunda do Atlântico Norte; LSW – Água do Mar do Labrador; ISOW – Água da Islândia e da Escócia; DSOW – Água do Estreito da Dinamarca; AABW – Água de Fundo Antártica; NEABW – Água de Fundo Antártica do Nordeste; CDW – Água Profunda Circumpolar; WSBW – Água de Fundo do Mar de Weddell.

Fonte: LIU; TANHUA (2019a)

Os três principais processos de formação de massas de água são a convecção, a subducção e a mistura subsuperficial (TOMCZAK, 1999). A convecção é o processo físico que consiste no movimento vertical das partículas devido à diferença de densidade, que nos oceanos é iniciada pelo resfriamento das águas ou pela intensa evaporação. As águas afundam até que a estabilidade estática seja novamente estabelecida e tendem a fluir na própria camada em que isso ocorre. A subducção envolve a ação dos ventos atuando juntamente com o resfriamento e é o resultado do afundamento da água devido ao processo de convergência das águas, que por sua vez é resposta ao bombeamento de Ekman que estabelece um desvio de 90° no fluxo de água em relação ao vento incidente. A convergência horizontal gera um acúmulo de água em determinada região que tende a afundar na coluna d'água (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011d). Já a mistura subsuperficial é um processo menos comum e que não é resultado da interação entre o oceano e a atmosfera. A mistura subsuperficial ocorre quando duas ou mais massas de água se misturam de maneira tão intensa que a água na região de mistura acaba tendo propriedades bem definidas e distintas das águas precursoras (FERREIRA; KERR, 2017; SANTOS *et al.*, 2016; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011d).

As massas de água localizadas nos primeiros 500 metros da coluna d'água são as massas d'água superficiais e centrais. As massas de água superficiais estão em contato direto com a atmosfera, e, desse modo, seus principais parâmetros físico-químicos como a temperatura e a salinidade possuem uma alta variabilidade (EMERY, W.J., 2001; POOLE; TOMCZAK, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011d). As massas de água centrais possuem uma formação associada ao processo de subducção da água proveniente da camada de mistura nas zonas de convergência subtropical; e também ao processo de advecção ao longo das superfícies isopícnais (SPRINTALL; TOMCZAK, 1993).

As massas de água profundas e de fundo são formadas por processos de afundamento de porções de água que ocorrem em superfície em regiões específicas (Fig.3). Esses processos são definidos de acordo com a densidade da parcela de água, que por sua vez, é função da temperatura e da salinidade. A temperatura é o parâmetro do qual a densidade é mais dependente, embora a salinidade também seja bastante relevante para a mesma. No oceano Atlântico ocorrem importantes processos de formação de águas profundas. No Atlântico Norte subpolar, bem como nos mares do Labrador e de Irminger, a superfície da água é densa o suficiente para que ocorra o afundamento por convecção devido à baixa temperatura e a alta salinidade da água, que por sua vez são resultado do clima frio e da alta taxa de congelamento da água naquela região (EMERY, W.J., 2001; EMERY, William J., 2019; SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007).

Além disso, o oceano Atlântico também possui um elevado volume de águas profunda e intermediária provenientes do continente Antártico. No oceano Austral, incluindo as margens do mar de Weddell e do mar de Ross, ocorre a formação de uma importante parcela de água profunda e relativamente densa em função das baixas temperaturas (Fig.3). Porém, diferentemente da parcela de água profunda formada no Atlântico Norte, esta é levemente menos salina e mais fria (SCHMITTNER; CHIANG; HEMMING, 2007).

Após a sua formação, as massas de água passam por um processo de evolução que consiste em três diferentes fases, sendo elas: a consolidação; o envelhecimento; e a mistura. A consolidação de uma massa d'água ocorre a partir da homogeneização e da mistura das suas propriedades. Após serem consolidadas, se inicia o envelhecimento da mesma, ou sua modificação, em que as propriedades não conservativas são alteradas independentemente do contato com outras massas de água. Além disso, pode ocorrer também o processo de mistura, resultado do contato entre diferentes massas de água. Por fim, ocorre o decaimento das massas de água, onde sua identificação não é mais possível. O decaimento pode ocorrer devido à absorção de uma massa por outra, ou pelo processo de transformação, resultado da

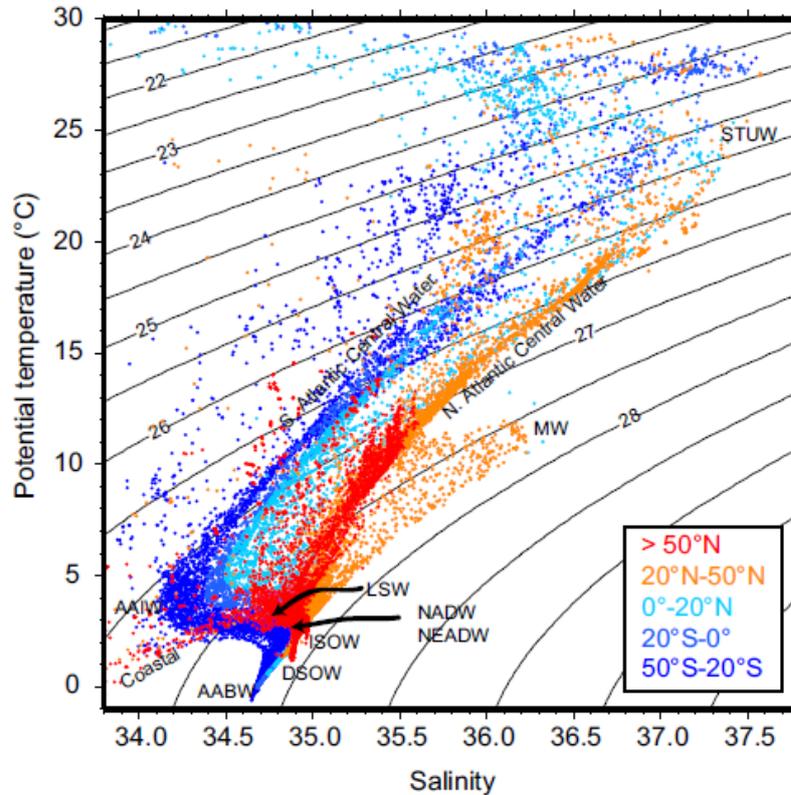
mistura subsuperficial, onde o estado final de uma ou mais massas de água acaba determinando a formação de outra (TOMCZAK, 1999).

O transporte das massas de água ocorre ao longo do oceano em diferentes profundidades de acordo com sua posição na coluna d'água, mantendo as características físicas que possuíam na região de formação (EMERY, W.J., 2001; EMERY, William J., 2019; TSUCHIYA; TALLEY; MCCARTNEY, 1994). As massas d'água superficiais são conduzidas pelo sistema de correntes superficiais e subsuperficiais, que por sua vez são influenciadas pelo vento. Já as massas d'água intermediárias, profundas e de fundo são transportadas através do oceano de acordo com a diferença de densidade entre elas (EMERY, William J., 2019; HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; POND; PICKARD, 2013; SILVA, A. C. *et al.*, 2010).

As massas d'água são comumente identificadas e caracterizadas de acordo com parâmetros físico-químicos conservativos, uma vez que não se modificam no interior dos oceanos, como a salinidade, a temperatura e a densidade, sendo esta última podendo ser expressa como densidade potencial (σ_θ) ou densidade neutra (γ^n) (EMERY, W.J., 2001; POND; PICKARD, 2013; SILVA, A. C. *et al.*, 2010; STRAMMA; ENGLAND, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011d). Entre os dois diferentes parâmetros de densidade citados, a densidade neutra é preferível para se utilizar em relação aos estudos de massas d'água, já que se trata de uma adaptação análoga e localmente referenciada da densidade potencial, uma vez que é função tanto da hidrografia como da posição geográfica, o que a torna mais sofisticada e simples de ser utilizada quanto à estratificação na coluna d'água, possibilitando observar uma maior variabilidade dentro de uma massa de água (JACKETT; MCDOUGALL, 1997).

Uma das principais ferramentas de identificação das massas de água é o diagrama T-S, que correlaciona os parâmetros salinidade e temperatura potencial, em conjunto com isolinhas de densidade, possibilitando identificar visualmente quais massas de água se encontram presentes em uma dada distribuição de dados (Fig.4) (EMERY, W.J., 2001; EMERY, William J., 2019; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011d).

Figura 4 - Exemplo de um diagrama T-S para dados de temperatura e salinidade ao longo do oceano Atlântico.



Legenda: As linhas que cruzam o gráfico na diagonal representam as isopícnas, linhas de mesma densidade.

Fonte: TALLEY, Lynne D. *et al.*, (2011a)

Além dos parâmetros conservativos como a temperatura e a salinidade, comumente utilizados para a identificação das massas de água, é possível utilizar também alguns parâmetros biogeoquímicos que se comportam de maneira não conservativa na camada eufótica e quase conservativa abaixo da mesma camada, uma vez que são influenciados pela atividade biológica e pela dissolução química de material orgânico morto que precipita ou decanta ao longo da coluna d'água (KRESS; HERUT, 2001). Entre eles, o que é mais utilizado é o oxigênio dissolvido (O_2); porém, certos nutrientes inorgânicos (nitrato, nitrito, fosfato, silicato) também têm sido bastante utilizados para diversos oceanos ao redor do mundo com o objetivo de refinar ainda mais a identificação de cada massa d'água, sendo então aplicados como traçadores complementares (BRAGA; NIENCHESKI, 2006; KRESS; HERUT, 2001; OUDOT *et al.*, 1999; SARDESSAI *et al.*, 2010).

Entre os trabalhos que utilizaram parâmetros biogeoquímicos voltados para análise e caracterização das massas d'água, vale destacar o de PÉREZ *et al.* (1998), que realizaram um estudo voltado para a análise de nutrientes em conjunto com dados de oxigênio e carbono orgânico dissolvido nas massas d'água das porções superior e média do oceano Atlântico a

leste dos Açores. No estudo foi verificado, através de um máximo de nutrientes, que a Água Intermediária Antártica possui uma forte influência ao sul da zona frontal dos Açores, indicando uma forte remineralização. Em um outro trabalho, SARDESSAI *et al.* (2010) realizaram um estudo de massas d'água na porção leste do oceano Índico equatorial, identificando quatro massas d'água de acordo com as concentrações de nutrientes em conjunto com parâmetros físicos. O trabalho verificou que as águas superficiais da região apresentam alta concentração de silicato, enquanto uma das massas d'água localizada abaixo das águas superficiais, identificada como Água Central do Índico, apresentou altas concentrações de nutrientes em suas profundidades mais rasas.

Mais recentemente, AZAR *et al.*, (2020) estudaram a contribuição das águas fontes na camada central do Atlântico Tropical, utilizando concentrações de nutrientes em conjunto com os parâmetros físicos. O estudo verificou que a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sofre influência de frações de mistura das águas do oceano Índico através de atividades de meso-escala; enquanto as Águas de Dezoito Graus (do inglês *Eigtheen Degrees Water*, EDW) contribuem com as porções superiores da Água Central do Atlântico Norte (ACAN) e a Água Modal da Madeira (do inglês *Madeira Mode Water*, MMW) contribui com suas porções inferiores, verificando que o limite entre ambas as águas centrais ocorre na latitude 10° N no Atlântico Tropical Leste. Apesar disso, vale ressaltar que ainda não há muitos estudos voltados para caracterização biogeoquímica no Atlântico Tropical Oeste, tornando este trabalho importante para ampliar esse conhecimento na região.

Os nutrientes inorgânicos dissolvidos utilizados para auxiliar nos estudos de massas d'água são fundamentais para a manutenção das cadeias tróficas marinhas e são classificados como elementos biolimitantes, ou seja, são essenciais para o crescimento dos produtores primários. Possuem um caráter não-conservativo em sua distribuição nos oceanos, ou seja, sua concentração não é apenas função de processos físicos de mistura e difusão na coluna d'água, mas é também afetada por processos biológicos e químicos (LIBES, 2009; WILLIAMS; FOLLOWS, 2003).

A relação entre o fitoplâncton marinho e os nutrientes inorgânicos dissolvidos é muito importante, uma vez que esses organismos dependem desses elementos para crescer. Durante o processo de fotossíntese, os nutrientes são incorporados pelo fitoplâncton, compondo, assim, sua biomassa (LIBES, 2009; MILLERO, 1996). Entre os principais nutrientes incorporados, encontram-se: o nitrato (NO_3^-), o nitrito (NO_2^-), e o amônio (NH_4^+), denominados nitrogênio inorgânico dissolvido, compondo proteínas e aminoácidos; o silicato (SiO_4^{4-}), que é assimilado para formar carapaças e frústulas em organismos como

diatomáceas e radiolários; e o fosfato (PO_4^{3-}), que fornece o fósforo necessário para compor a molécula de ATP (EMERSON; HEDGES, 2008; MILLERO, 1996).

Além dos parâmetros anteriormente citados, há também o caso do nitrito (NO_2^-), um íon do grupo do nitrogênio inorgânico dissolvido, que é um pouco diferente pois ele não é diretamente assimilado pela maioria dos organismos fotossintetizantes. Isso ocorre pelo fato do nitrito ser um produto intermediário do processo de nitrificação ou desnitrificação (LIBES, 2009; ZAKEM *et al.*, 2018). Nesse caso, o íon nitrogenado priorizado pelos organismos para serem assimilados nos oceanos é o nitrato, já que no oceano aberto o íon amônio é praticamente indetectável (ZAKEM *et al.*, 2018).

O nitrogênio e o fósforo possuem uma relação de proporção das suas distribuições nos oceanos do mundo, estabelecida através da razão molar 16:1, em que para uma determinada quantidade de fósforo nos oceanos, existem 16 vezes mais de nitrogênio. Essa proporção é conhecida como razão de Redfield e sua distribuição é aproximadamente constante nos oceanos. Em águas costeiras, sujeitas a interação direta com os aportes continentais, a razão de Redfield dificilmente é observada (FERNÁNDEZ-CASTRO; MOURIÑO-CARBALLIDO; ÁLVAREZ-SALGADO, 2019).

Além disso, a atividade biológica influencia também na regeneração de nutrientes através, principalmente, da respiração bacteriana, que não está limitada apenas à zona fótica da coluna d'água. Durante este processo, o oxigênio dissolvido (O_2) na coluna d'água é consumido, e a matéria orgânica é remineralizada, produzindo água e gás carbônico (CO_2), e liberando também nutrientes dissolvidos ao ambiente externo (LIBES, 2009). Outra importante fonte interna dos nutrientes no meio marinho ocorre devido ao processo biológico de excreção (LIBES, 2009).

Considerando esses diferentes processos biogeoquímicos que ocorrem nos oceanos, em regiões e profundidades distintas, onde há produção e consumo de determinados nutrientes inorgânicos, sugere-se que tanto a distribuição, como a concentração desses nutrientes ao longo da coluna d'água podem ser capazes de auxiliar na identificação das massas de água através da atribuição de assinaturas específicas para cada uma delas, favorecendo seu monitoramento e acompanhamento ao agregar padrões de comportamento dos identificadores agregados aos mais comumente utilizados (DUNCAN *et al.*, 2019; GOTTSCHALK *et al.*, 2020; MOORE *et al.*, 2008).

Nesse contexto, o presente estudo busca investigar como a utilização de parâmetros não conservativos, como os nutrientes e o oxigênio dissolvido, pode auxiliar na identificação e na caracterização das massas de água presentes no Oceano Atlântico Tropical Oeste,

visando constatar se cada massa de água tem suas características biogeoquímicas próprias, relativas à concentração dos principais nutrientes inorgânicos dissolvidos. O trabalho está inserido no projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA), iniciado há cerca de 20 anos, com o objetivo de formar uma rede de observação *in situ* composta por boias fundeadas, planejadas para monitorar uma série de variáveis dos processos de interação oceano-atmosfera no oceano Atlântico Tropical (BOURLÈS *et al.*, 2019). O projeto foi baseado nos dados obtidos durante as campanhas científicas integradas no Oceano Atlântico Tropical para a manutenção das boias PIRATA em 2017 e 2018, coordenadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no Brasil, com o apoio da Marinha do Brasil e de oito instituições públicas de ensino superior brasileiras, entre elas a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo principal

O presente trabalho tem como principal objetivo caracterizar as massas d'água presentes no Oceano Atlântico Tropical Oeste em toda a coluna d'água, de acordo com as concentrações de nutrientes dissolvidos (nitrato, nitrito, fosfato e silicato) e oxigênio dissolvido.

1.2 Objetivos específicos

A fim de atender o objetivo principal, o trabalho conta com os seguintes objetivos específicos:

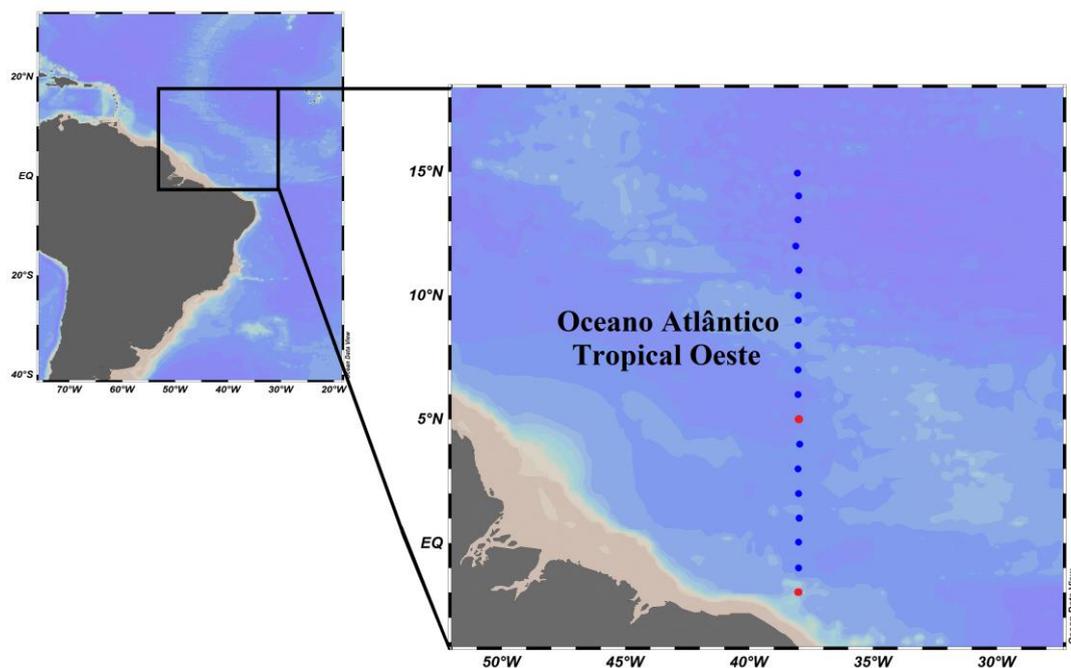
- a) Identificar as principais massas de água presentes na região com base nos parâmetros termohalinos (temperatura, salinidade, densidade potencial e densidade neutra), de modo a formar a base para a caracterização biogeoquímica;
- b) Correlacionar os dados de concentração de nutrientes dissolvidos analisados isoladamente com cada uma das principais massas d'água presentes na região estudada;
- c) Mapear a distribuição vertical dos nutrientes estudados ao longo da coluna d'água, associado às principais massas d'água presentes na região;
- d) Comparar a distribuição dos nutrientes nas massas d'água entre os anos de 2017 e 2018, juntamente com os dados pretéritos de mesma temática na região, disponíveis no produto de dados oceanográficos GLODAPv.2 (*Global Ocean Data Analysis Project for Carbon*).

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no oceano Atlântico Tropical Oeste, ao longo da longitude 38°W, entre as latitudes 02° S e 15° N. A região está localizada a norte do Brasil, mais precisamente do estado do Ceará em um transecto que se estende do litoral do Ceará até a cordilheira Meso-Atlântica (Fig.5).

Figura 5 - Localização da área de estudo no Oceano Atlântico Tropical Oeste com a plotagem do transecto realizado para as coletas.



Fonte: O Autor, 2021.

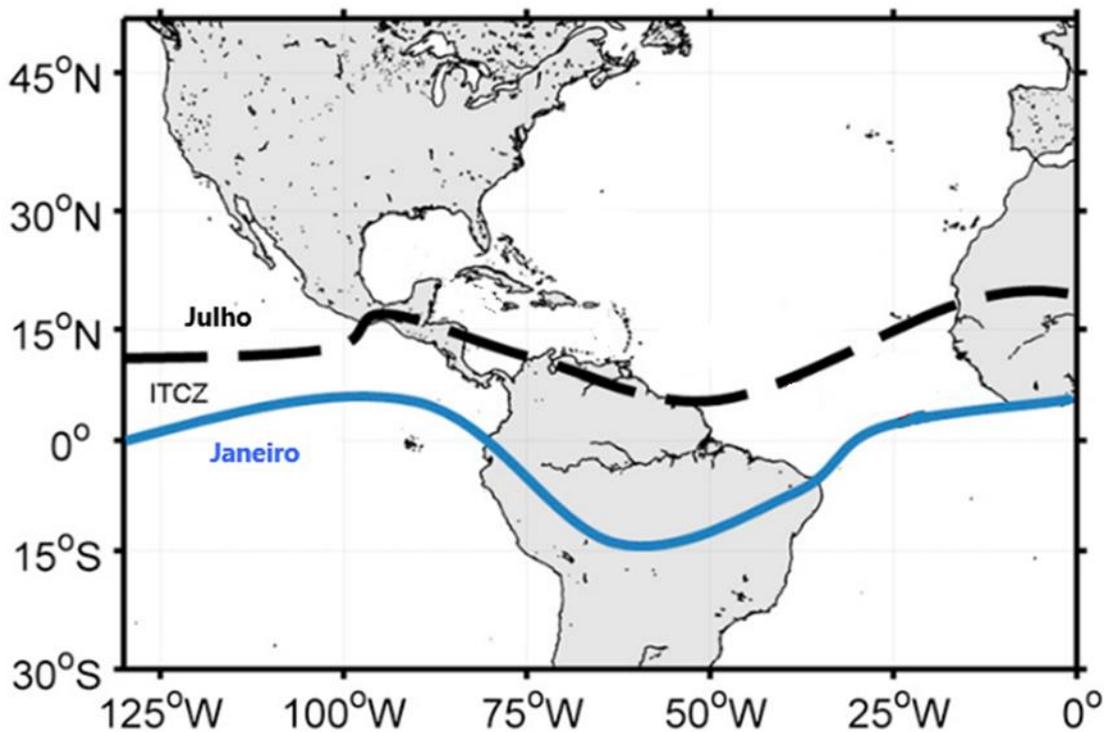
2.1.1 Zona de Convergência Intertropical

A região está sujeita a um padrão de circulação de ventos complexo, regido pelo sistema de ventos Alísios que experimenta diferentes padrões de direção e sentido de acordo com a sazonalidade (MITCHELL; WALLACE, 1992). A convergência dos ventos alísios é responsável pela formação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que está associada

às condições de baixa pressão atmosférica, altas taxas de precipitação no local e a anulação da componente meridional do vento, uma vez que os ventos que são responsáveis por sua formação possuem componentes meridionais opostas (LEFÈVRE *et al.*, 2014; SERVAIN; PICAUT; BUSALACCHI, 1985).

A posição da ZCIT varia de acordo com a época do ano, se posicionando mais ao norte durante o verão boreal (julho – dezembro) e com ventos predominantes de sudeste na área de estudo; e se posicionando mais ao sul durante o inverno boreal (janeiro – junho), quando o sentido predominante dos ventos passa a ser de nordeste (Fig.6) (MITCHELL; WALLACE, 1992). Entender a variação na posição da ZCIT de acordo com a sazonalidade nessa região é de suma importância, uma vez que ela influencia diretamente no sistema de correntes superficiais (BRUTO *et al.*, 2017).

Figura 6 - Posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao longo da região equatorial.



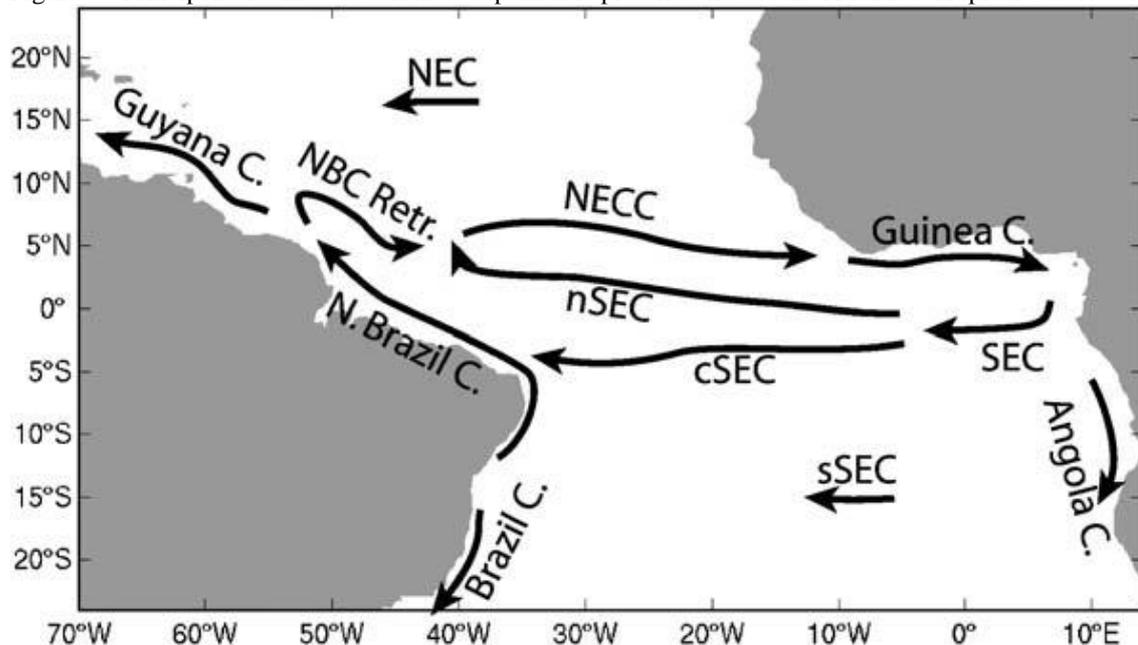
Legenda: A linha azul representa a ZCIT no mês de janeiro e a linha tracejada preta no mês de julho.
Fonte: TAYLOR *et al.* (2012)

2.1.2 Circulação e sistema de correntes superficiais

Entre os principais sistemas de correntes que caracterizam a circulação superficial e subsuperficial no Atlântico Tropical, encontram-se: a Corrente Norte Equatorial (CNE); a

Subcorrente Norte Equatorial (SCNE); a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE), que é resultado da retroflexão da Corrente Norte do Brasil (CNB); e a corrente Sul Equatorial (CSE), dividida em norte, central e sul (Fig.7) (LUMPKIN; GARZOLI, 2005; STRAMMA *et al.*, 2003; STRAMMA; ENGLAND, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

Figura 7 - Principais sistemas de correntes superficiais presentes no oceano Atlântico Tropical Oeste.



Legenda: NEC – Corrente Norte Equatorial; NECC – Contracorrente Norte Equatorial; N. Brazil C. – Corrente Norte do Brasil; Guyana C. – Corrente da Guiana; NBC Retr. – Retroflexão da Corrente norte do Brasil; Brazil C. – Corrente do Brasil; SEC Corrente Sul Equatorial; nSEC, cSEC e sSEC – porções norte, central e sul da Corrente Sul Equatorial; e Angola C. – Corrente da Angola.

Fonte: LUMPKIN; GARZOLI (2005)

Sistemas de correntes provenientes dos oceanos Atlântico Norte e Sul também influenciam no Atlântico Tropical. As principais correntes superficiais do Atlântico Norte são a corrente do Golfo (CG), situada na costa leste dos Estados Unidos; a corrente das Canárias (CC), localizada na costa oeste africana; a corrente Norte Equatorial (CSN), localizada na porção norte Equatorial; e a corrente Norte Atlântica (CNA) (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). Já no oceano Atlântico Sul, as principais correntes superficiais são: a corrente do Atlântico Sul (CSA), na porção sul do oceano Atlântico; a corrente de Benguela (CBg), situada na costa oeste da África; e a corrente Sul Equatorial (CSE), localizada na porção sul da região do Equador e que se bifurca em outras duas correntes ao alcançar a costa do Brasil, sendo elas a corrente do Brasil (CB), localizada ao longo da costa leste do Brasil e a corrente Norte do Brasil (CNB) (STRAMMA; ENGLAND, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

Já em subsuperfície ocorre um processo chamado ressurgência equatorial, que é observado em toda a extensão da ZCIT, em que águas ricas em nutrientes e CO₂ provenientes de maiores profundidades ascendem até uma determinada profundidade. A ocorrência desse processo está diretamente associada à divergência das águas superficiais da região devido ao transporte de Ekman, que por sua vez é resultado da influência da força de Coriolis no Equador (BRUTO *et al.*, 2017).

2.1.3 Pluma do rio Amazonas

O Rio Amazonas faz parte da maior bacia hidrográfica do mundo, com aproximadamente 7×10^6 km² de extensão, possuindo uma descarga média de 120×10^3 m³.s⁻¹ em dezembro, e de 300×10^3 m³.s⁻¹ em maio. A descarga do rio Amazonas influencia diretamente na região equatorial, representando cerca de 18% de toda a água doce fluvial que chega aos oceanos. O grande volume de água despejado acaba formando uma pluma rica em nutrientes e matéria orgânica dissolvida que flui no oceano tropical sob influência dos padrões de circulação da região, alcançando até $1,3 \times 10^6$ km² (MOURA *et al.*, 2016; RICHEY; NOBRE; DESER, 1989; SILVA, A. C. Da *et al.*, 2009; SILVA; ARAÚJO; BOURLÈS, 2010).

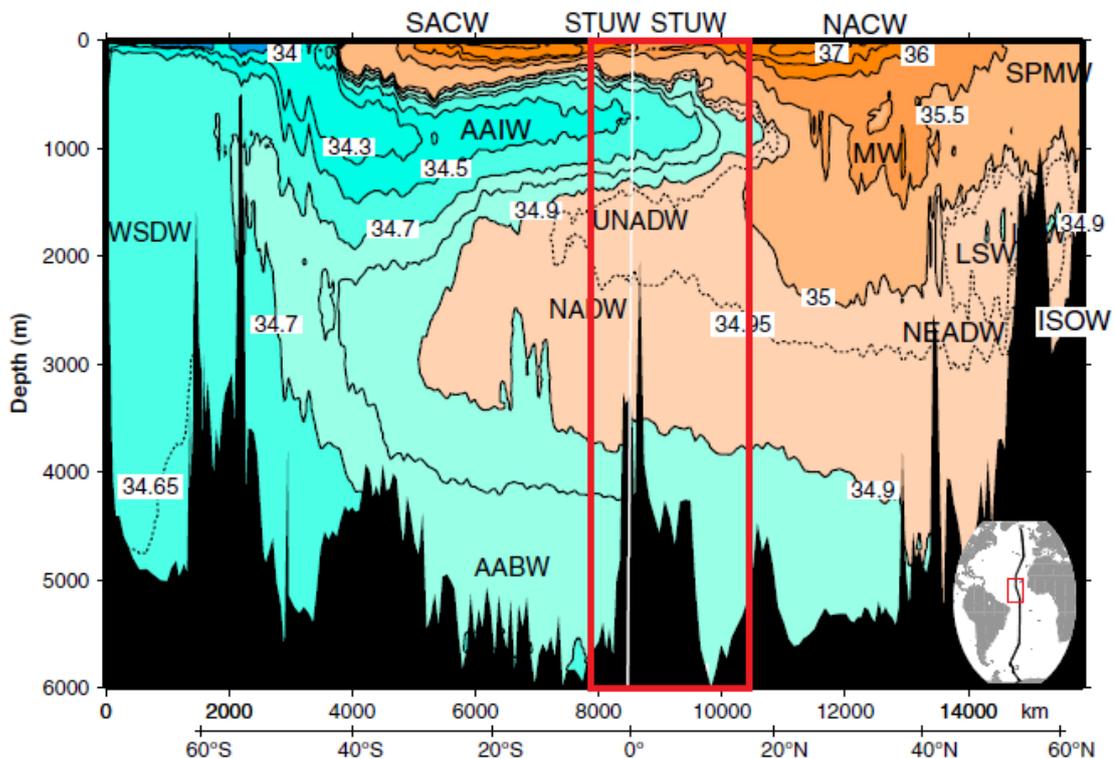
A pluma do rio Amazonas influencia diretamente as interações biogeoquímicas que ocorrem na região em que se encontra, uma vez que apresenta uma maior concentração de nutrientes e matéria orgânica disponíveis (LEFÈVRE *et al.*, 2017; MAYORGA *et al.*, 2005). Além disso, a pluma apresenta também valores menores de salinidade e densidade em relação às águas oceânicas adjacentes, se estabelecendo na superfície de determinadas regiões do Atlântico Tropical (GRODSKY *et al.*, 2014).

A maior influência da pluma do rio Amazonas na região da área de estudo ocorre durante os meses de julho a dezembro, quando a direção predominante de vento na região passa a ser de sudeste. Sob influência dessa configuração, a CNB sofre um processo de retroflexão próximo à linha do Equador, levando suas águas menos salinas e ricas em nutrientes e matéria orgânica a CCNE, que cruza o meridiano 38° W de oeste para leste, aumentando a produtividade primária e as interações biogeoquímicas nessa região (BRUTO *et al.*, 2017; KÖRTZINGER, 2003; LEFÈVRE *et al.*, 2017; MAYORGA *et al.*, 2005).

2.1.4 Massas d'água

As principais massas de água presentes na área de estudo são a Água Tropical Superficial (AT); a Água Central do Atlântico Norte (ACAN); a Água Central do Atlântico Sul (ACAS); a Água Intermediária Antártica (AIA); a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN); e a Água de Fundo Antártica (AFA) (Fig.8) (HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; SILVA, A. C. *et al.*, 2010).

Figura 8 - Distribuição das principais massas d'água ao longo do oceano Atlântico e da porção do Atlântico Tropical de acordo com dados de salinidade.



Nota: O quadrado vermelho representa a área de estudo.

Legenda: STUW – Água Superficial; SACW – Água Central do Atlântico Sul; NACW – Água Central do Atlântico Norte; AAIW - Água Intermediária Antártica; WSDW – Água de Fundo do Mar de Weddell; MW – Água do Mediterrâneo; SPMW – Água Modal Subpolar; LSW – Água do Mar do Labrador; NADW – Água Profunda do Atlântico Norte; UNADW - Água Profunda Superior do Atlântico Norte; NEADW – Água Profunda do Atlântico Nordeste; AABW – Água de Fundo Antártica.

Fonte: Adaptado de TALLEY *et al.* (2011a)

A Água Tropical Superficial (AT) está distribuída nos primeiros metros da coluna d'água e são fortemente influenciadas por flutuações de processos que ocorrem na superfície do oceano, podendo acarretar na mudança de suas propriedades (EMERY, W.J., 2001; EMERY, William J., 2019). Ela é a mais quente das massas de água presente na região de

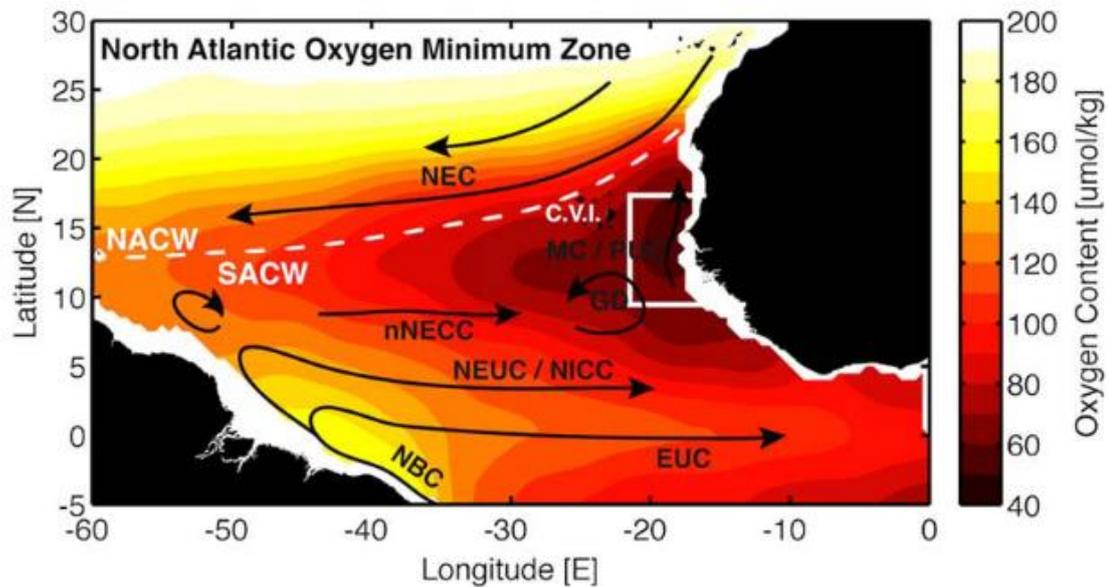
estudo, com temperaturas que giram em torno de 27°C, formando a camada de mistura no Atlântico tropical (STRAMMA; SCHOTT, 1999); mas que também podem atingir aproximadamente 30°C em sua porção norte do Equador, onde está situada a ZCIT (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). A salinidade na AT é dominada pelo equilíbrio entre precipitação, evaporação e descarga de água doce. Na região tropical, a AT apresenta baixos valores de salinidade, principalmente abaixo da ZCIT, devido a precipitação líquida predominante; e as descargas dos rios Amazonas, na América do Sul, e Congo, na África (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

As águas centrais do Atlântico Norte (ACAN) e Sul (ACAS) são consideradas como as águas presentes na picnoclina em cada giro subtropical. Na região equatorial, as águas centrais podem atingir cerca de 300 a 500 m de profundidade, e são consideradas mais rasas no lado do giro que flui em direção ao polo (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). Ambas as Águas Centrais do Atlântico ocupam a mesma faixa de densidade (STRAMMA; SCHOTT, 1999), que é definida pela densidade da superfície de inverno dentro da região do bombeamento de Ekman do giro subtropical (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

As faixas de densidade ocupadas pela ACAN e pela ACAS apresentam propriedades termohalinas levemente distintas que se compensam e possibilitam que ocupem uma faixa de densidade similar. Enquanto a ACAN é levemente mais salina e quente, a ACAS é mais fria e menos salgada. Além disso, a ACAN apresenta também menores concentrações de oxigênio dissolvido (STRAMMA; SCHOTT, 1999). Uma região de mínimo oxigênio relativo existe entre a ACAS e a ACAN e a Água Intermediária Antártica, compreendendo a parte inferior das águas centrais e superior da AIA nos trópicos, indicando a fraca renovação que ocorre nessa região (STRAMMA; HÜTTL; SCHAFSTALL, 2005; STRAMMA; SCHOTT, 1999).

As águas centrais na porção norte estão diretamente ligadas à região tropical, e a Zona Frontal de Cabo Verde corresponde à fronteira entre as duas (STRAMMA; SCHOTT, 1999). Essa fronteira possui uma compensação de densidade com a presença de intrusões e filamentos (TOMCZAK; GOFFREY, 2004), e está situada ao longo da latitude 15°N, onde está localizado o arquipélago de Cabo Verde. Essa zona frontal se estende ao longo de todo o oceano Atlântico Tropical em torno dessa faixa de latitude, em uma leve orientação Sudoeste – Nordeste (Fig.9) (PEÑA-IZQUIERDO *et al.*, 2015; TOMCZAK; GOFFREY, 2004).

Figura 9 - Representação da região de fronteira entre as massas d'água centrais do Atlântico Norte e do Atlântico Sul; o padrão de circulação superficial do oceano Atlântico Tropical; e a concentração de oxigênio entre 200 e 500 metros, juntamente com a zona de mínimo oxigênio na costa oeste Africana.



Legenda: NACW – Água Central do Atlântico Norte; SACW – Água Central do Atlântico Sul. Correntes superficiais: NEC – Corrente Norte Equatorial; MC – Corrente da Mauritània; PUC – Subcorrente em direção aos Polos; GD – Domo da Guiné; nNECC – porção norte da Contracorrente Norte Equatorial; NEUC – Subcorrente Norte Equatorial; NICC – Contracorrente Norte Intermediária; NBC – Corrente Norte do Brasil; EUC – Subcorrente Equatorial; C.V.I – Arquipélago de Cabo Verde.

Fonte: PEÑA-IZQUIERDO *et al.* (2015)

A região da fronteira entre a ACAS e a ACAN ao longo de quase todo o Atlântico tropical casa diretamente com a área de influência da Zona de Mínimo Oxigênio (ZMO) localizada na borda oeste do continente africano, o que caracteriza a área de estudo como uma região de baixas concentrações de oxigênio dissolvido na profundidade em que essa influência ainda é observada (entre 200 e 800 m) (Fig.9) (PEÑA-IZQUIERDO *et al.*, 2015; STRAMMA *et al.*, 2008). As ZMO's correspondem a uma região no oceano onde as concentrações de oxigênio são mínimas; e são consequência da combinação entre a lenta ventilação oceânica, que fornece o oxigênio, juntamente com a acentuada respiração, que consome oxigênio (BRANDT *et al.*, 2015; KARSTENSEN; STRAMMA; VISBECK, 2008; STRAMMA *et al.*, 2008).

A Água Intermediária Antártica (AIA) ocupa uma região no oceano Atlântico referente à das massas de água intermediárias ($\gamma^n = 26,815 - 27,7153 \text{ kg m}^{-3}$). A AIA é formada na região superficial da corrente circumpolar na Antártica, sendo mais precisamente originada através da água superficial ao norte da passagem de Drake e do ciclo da corrente de Falkland (STRAMMA; SCHOTT, 1999; TALLEY, L. D., 1996; TALLEY, Lynne D. *et al.*,

2011a; TSUCHIYA; TALLEY; MCCARTNEY, 1994). Ela pode ser reconhecida por apresentar picos de dois parâmetros importantes: a salinidade e o oxigênio dissolvido. Nesse contexto, a AIA apresenta um máximo de oxigênio dissolvido no Atlântico Sul; e um mínimo de salinidade tanto no Atlântico Sul, como no Atlântico Tropical (STRAMMA; SCHOTT, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

A Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) faz limite com a AIA em sua porção superior, e com a Água de Fundo Antártica em sua porção inferior, em algumas regiões do oceano, como o Atlântico Tropical e o Atlântico Sul (STRAMMA; SCHOTT, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). Ela apresenta valores elevados de salinidade e oxigênio, e baixa temperatura ocupando uma camada de aproximadamente 2000 m no oceano profundo (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). A APAN é originada no oceano Atlântico Norte, tendo como fonte as águas de três regiões: mares Nórdicos, mar do Labrador e mar Mediterrâneo. No Atlântico Norte subpolar e subtropical, as águas provenientes de cada um desses mares ainda podem ser distinguidas; porém, no Atlântico tropical as águas fonte sofrem processo de mistura e se tornam cada vez menos distinguíveis, passando a formar a APAN (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

Por fim, a Água de Fundo Antártica (AFA) é a água mais profunda encontrada na região do Atlântico Tropical e do Atlântico Sul, que está diretamente em contato com o leito marinho. Ela é a massa de água mais densa do Atlântico, e se origina no Oceano Austral em regiões ao sul da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). Sua formação é decorrente do processo de convecção intensificado pela rejeição salina durante a formação de gelo (HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017) e ocorre na região do mar de Weddell, na península Antártica (FERREIRA; KERR, 2017; HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; ORSI; JOHNSON; BULLISTER, 1999; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

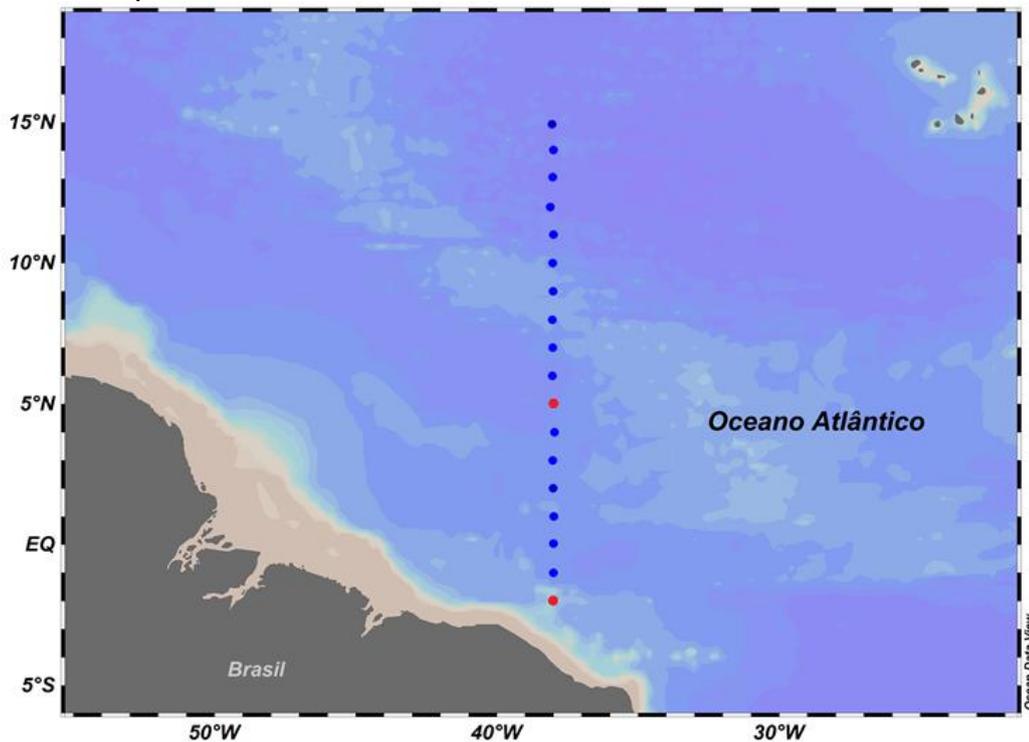
2.2 Aquisição de dados e amostragem

A amostragem discreta dos dados foi realizada através da coleta de água por um CTD-Rosette Sea Bird Electronics® Inc. (SBE) set model SBE 911, em conjunto com um sistema CTD-O₂ e garrafas de *Niskin*. Tal amostragem foi feita com objetivo de determinar as concentrações de nutrientes inorgânicos dissolvidos, oxigênio dissolvido, pH e salinidade, através dos métodos que serão descritos na seção Análises Laboratoriais; sendo utilizados

para este trabalho apenas os parâmetros nutrientes inorgânicos dissolvidos e oxigênio dissolvido. Os dados contínuos dos parâmetros pressão, temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido foram medidos com o CTD-O₂.

As coletas foram realizadas durante as comissões PIRATA-BR XVII e PIRATA-BR XVIII em novembro de 2017 e em novembro de 2018, respectivamente, em um transecto realizado a bordo do navio de pesquisa hidroceanográfico Vital de Oliveira ao longo da longitude 38°W, entre as latitudes 02° S e 15° N e 01° S e 15° N, respectivamente, com intervalo de 1° a cada estação de amostragem. Em 2018, a estação localizada em 5° N não foi amostrada devido às condições oceanográficas não favoráveis ao lançamento da *rosette* (Fig. 10). Em cada estação de coleta de amostras de água e dados de CTD, o conjunto da *rosette* (CTD-O₂, 20 garrafas de Niskin e L-ADCP) desceu até aproximadamente 10 m acima do fundo.

Figura 10 – Mapa de localização das estações de coleta na área de estudo ao longo do meridiano 38° W, estando em azul as estações onde houve coletas em 2017 e 2018; e em vermelho apenas em 2017.

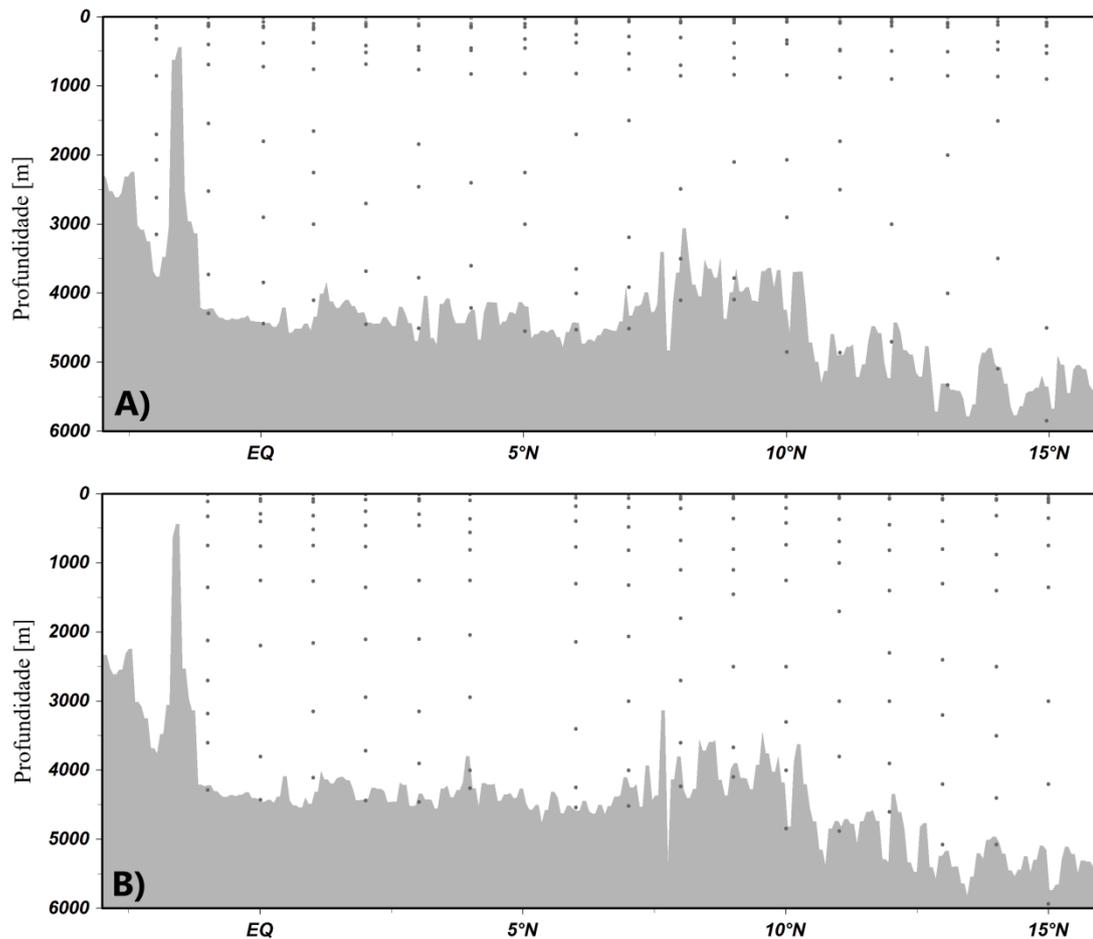


Fonte: O Autor, 2021.

Em cada estação, foram estabelecidas entre 9 a 11 profundidades de coleta para as amostras discretas, de acordo com perfis de salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido gerados pelo CTD durante a descida da *rosette*. Cada profundidade era escolhida de acordo com os núcleos das diferentes massas de água e das regiões de alteração de interesse. No total,

foram realizadas coletas de água em 173 profundidades variando entre 5 e 5845 m em 2017; enquanto em 2018 as coletas foram feitas em 160 profundidades variando entre 5 e 5933 m (Fig.11).

Figura 11 – Representação das profundidades de amostragem ao longo das estações localizadas no meridiano 38° W nos anos de 2017 (A) e 2018 (B). O relevo marinho na figura corresponde aos dados de elevação global GBECO_2014 (versão 2014-11-12, <http://www.gebco.net/>).



Fonte: O Autor, 2021.

2.2.1 Oxigênio Dissolvido

Além da determinação de O₂ dissolvido através do CTD-O₂, as concentrações foram também definidas através da amostragem de água. As amostras para determinação de O₂ foram as primeiras a serem retiradas da garrafa de *Niskin*, com o objetivo de evitar trocas de O₂ entre a amostra e o ar. Para as amostras de O₂ foram escolhidas cerca de sete profundidades diferentes, sendo sempre escolhida uma profundidade aleatória para a

realização de uma duplicata, com o objetivo de determinar a precisão da amostragem (LANGDON, 2010). A concentração de oxigênio das profundidades em que eram coletadas as duplicatas foi determinada de acordo com a média entre as duas amostras coletadas.

As coletas de água foram realizadas em frascos de vidro com tampa esmerilhada com volume aferido, tomando o devido cuidado para que não fossem feitas bolhas de ar no interior das garrafas. No ano de 2017 foram coletadas 92 amostras para análise de oxigênio dissolvido, sendo 18 destas duplicatas; enquanto em 2018 foram coletadas 131 amostras, sendo 16 destas duplicatas.

As duas bases de dados de oxigênio dissolvido tem sua relevância nesse trabalho e foram utilizadas com objetivos distintos. Os dados de O₂ determinados através do sistema CTD-O₂ foram utilizados na etapa de identificação das massas de água, uma vez que os dados de temperatura e salinidade que foram utilizados nessa etapa também são provenientes dessa mesma base de dados. Já as concentrações provenientes da amostragem foram principalmente utilizadas na caracterização biogeoquímica em conjunto com as concentrações de nutrientes; bem como para realizar a correção dos dados de O₂ do CTD, uma vez que seu oxímetro não estava devidamente calibrado.

2.2.2 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos

As amostras para a determinação das concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos foram coletadas em frascos de polietileno com aproximadamente 100 mL, entre seis a dez profundidades diferentes por estação de amostragem. Em seguida, as amostras foram congeladas até o procedimento de determinação das concentrações. O total de amostras de nutrientes inorgânicos dissolvidos para o ano de 2017 foi de 163. Para o ano de 2018, foram coletadas um total de 102 amostras, sendo que dessas, apenas 82 tiveram suas concentrações determinadas para o nitrato, visto que o laboratório precisou permanecer fechado após o início da pandemia de Covid-19.

2.3 **Análises laboratoriais**

2.3.1 Oxigênio Dissolvido

A análise de O₂ foi realizada *in situ* de acordo com o método de Winkler, descrito em HANSEN (2007), utilizando um titulador digital. Após a coleta de água, adicionou-se 0,5 mL de cloreto de manganês (MnCl₂) (R1) e 0,5 mL de solução de iodeto alcalino (R2) para fixar o oxigênio dissolvido na água. Em seguida, as amostras foram guardadas por 30 minutos em local escuro e abrigado de mudanças bruscas de temperatura. Posteriormente, adicionou-se 1 mL de ácido sulfúrico 50% para dissolver o precipitado. Depois da dissolução, titulou-se a amostra total com tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) padronizado. O volume de tiosulfato usado na titulação foi utilizado para calcular e determinar a concentração de O₂ dissolvido, em mL L⁻¹, juntamente com outras variáveis, de acordo com a seguinte equação:

$$[OD] = \frac{5603,5 \times M_{S_2O_3^{2-}} \times (V - V_{branco})}{V_0 - V_R} - DO_R \quad (1)$$

Onde [OD] é a concentração de oxigênio dissolvido (mL L⁻¹); a constante 5603,5 é o volume ocupado por ¼ de mol de oxigênio dissolvido (mL); M(S₂O₃²⁻) é a concentração da solução de tiosulfato de sódio; V é o volume de tiosulfato gasto na titulação da amostra (mL); V_{branco} é o volume gasto na determinação do branco (mL); V₀ é o volume total da amostra (volume do frasco); V_R é o volume de reagentes adicionados antes da liberação do iodo (1 mL); e DO_R é o termo de correção para traços de oxigênio contidos nos reagentes de fixação.

O método apresenta precisão de ± 0,01 mL L⁻¹ para teores até 2 mL L⁻¹ e ± 0,02 mL L⁻¹ para teores superiores. Posteriormente, os teores de OD foram convertidos de mL L⁻¹ para μmol kg⁻¹, que é a unidade mais comumente utilizada em trabalhos de caracterização de massas d'água. A conversão foi realizada através do software *Ocean Data View*, através da ferramenta variável derivada.

Em todas as estações, foram coletadas duplicatas em uma profundidade aleatória com objetivo de verificar a precisão metodológica e a qualidade da amostragem, de acordo com o valor médio calculado entre as duplicatas. Os valores determinados de acordo com a análise das réplicas apresentaram resultados significativos de desvio padrão e podem ser observados na tabela I.

Tabela 1 – Valores de concentração de O₂ para cada duplicata e a profundidade em que foram coletadas, juntamente com seus dados de diferença entre as duplicatas, média e desvio padrão, utilizados para verificar a precisão metodológica e a qualidade da amostragem.

LAT	2017						2018					
	Profundidade [m]	O ₂ [mL L ⁻¹]	O ₂ Dup. [mL L ⁻¹]	ΔO ₂ [mL L ⁻¹]	Média	Desvio Padrão	Profundidade [m]	O ₂ [mL L ⁻¹]	O ₂ Dup. [mL L ⁻¹]	ΔO ₂ [mL L ⁻¹]	Média	Desvio Padrão
15	5	4,17	4,34	0,17	4,25	0,1210	350	2,18	2,09	0,09	2,13	0,0620
14	67	3,90	3,92	0,02	3,91	0,0153	5076	5,96	5,71	0,25	5,84	0,1785
13	67	4,17	4,10	0,08	4,13	0,0546	3200	5,96	5,71	0,25	5,84	0,1785
12	491	1,08	0,97	0,12	1,02	0,0832	1400	5,05	5,13	0,08	5,09	0,0540
11	2500	5,50	5,47	0,04	5,49	0,0278	688	2,26	2,25	0,01	2,26	0,0104
10	2900	5,32	5,52	0,20	5,42	0,1403	201	1,87	2,00	0,13	1,93	0,0885
09	48	4,06	4,09	0,03	4,07	0,0244	64	3,41	3,31	0,10	3,36	0,0709
08	2490	5,40	5,59	0,19	5,50	0,1344	5	4,52	4,58	0,06	4,55	0,0438
07	527	1,72	1,82	0,10	1,77	0,0689	1320	4,60	4,91	0,31	4,76	0,2190
06	88	1,99	2,15	0,16	2,07	0,1155	393	2,25	2,19	0,06	2,22	0,0397
05	2250	5,48	5,59	0,11	5,53	0,0744	—	—	—	—	—	—
04	2400	5,35	6,04	0,69	5,70	0,4891	1250	4,27	4,53	0,26	4,40	0,1818
03	1840	5,16	5,36	0,20	5,26	0,1408	711	3,35	3,26	0,09	3,30	0,0623
02	4451	5,02	4,89	0,13	0,15	0,0922	2105	5,99	6,08	0,09	6,04	0,0631
01	5	4,12	3,97	0,15	0,15	0,1067	315	3,02	3,05	0,03	3,03	0,0178
0	69	4,12	3,95	0,17	0,15	0,1171	289	3,26	3,25	0,02	3,25	0,0129
-01	400	2,38	2,33	0,05	0,15	0,0347	289	5,31	5,30	0,01	5,31	0,0085
-02	850	3,15	3,10	0,06	3,13	0,0395	—	—	—	—	—	—

Fonte: O autor, 2021.

2.3.2 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos

As concentrações dos quatro nutrientes das amostras de água para a campanha de 2017 foram determinadas no laboratório da Unidade Multi-Usuário de Análises Ambientais da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sob supervisão do Dr. Ricardo Pollery, de acordo com o método de colorimetria descrito em HANSEN; KOROLEFF (2007), num analisador automático através de uma análise por injeção em fluxo (FIA), fabricado pela FOSS modelo FiaStar 5000.

Já as concentrações de nutrientes das amostras do ano de 2018 foram determinadas no Laboratório de Oceanografia Química (LABOQUI) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), através do método de colorimetria, com o uso de espectrofotometria na faixa de luz visível descrito em HANSEN; KOROLEFF (2007). As leituras das absorvâncias foram realizadas no espectrofotômetro Hitachi, utilizando como comprimento de onda 880, 810 e 540 nm, para o fosfato (PO_4^{3-}), o silicato (SiO_4^{4-}) e o nitrito (NO_2^-), respectivamente. A precisão do método é de 0,01 μM para o fosfato, de 0,1 μM para o silicato e de 0,02 μM para o nitrito. A determinação do nitrato (NO_3^-) foi realizada através da redução do nitrato em nitrito utilizando uma coluna de cádmio cuperizado. O valor de nitrito total na amostra (nitrito + nitrato reduzido) menos o valor do nitrito fornece a concentração de nitrato presente na amostra, sendo então necessário determinar o nitrito para, então, obter o resultado da análise de nitrato.

2.4 **Identificação das massas d'água**

As massas de água foram inicialmente identificadas através de suas características físicas de acordo com os dados contínuos de Up-Cast de salinidade e temperatura potencial coletados pelo CTD-O₂ durante o processo de amostragem, bem como por dados de densidade potencial determinados de acordo com os dados de temperatura potencial, salinidade e pressão no software Ocean Data View (ODV), seguindo a fórmula proposta por JACKETT; MCDOUGALL (1997). Para realizar a identificação, foram elaborados diagramas T-S no ODV, através de gráficos de dispersão, estabelecendo a variável salinidade no eixo X, a

temperatura potencial no eixo Y, e a profundidade no eixo Z. Ao fundo do gráfico, foram também inseridas isolinhas de mesma densidade potencial.

A identificação das principais massas d'água presentes na região foi realizada de acordo com os limites e valores termohalinos de temperatura potencial, salinidade, densidade potencial e densidade neutra, propostos por HERRFORD; BRANDT; ZENK, (2017); LIU; TANHUA, (2019a); POOLE; TOMCZAK, (1999) (Tabela II), sendo os três primeiros utilizados no diagrama T-S, e o último para os gráficos de seção. Ambas as massas de água centrais, ACAS e ACAN, compartilham uma faixa de densidade bastante similares, segundo STRAMMA; SCHOTT, (1999). Assim, com o objetivo de diferenciá-las, foram utilizados diagramas T-S com o eixo Z estabelecido nas concentrações de O₂ provenientes da base de dados do sistema CTD-O₂, uma vez que a ACAN possui uma menor concentração de oxigênio (STRAMMA; SCHOTT, 1999), limitando a fronteira espacial entre as duas.

Os limites de densidade neutra propostos por HERRFORD; BRANDT; ZENK, (2017) foram utilizados para os gráficos de seção pois este é o parâmetro mais indicado para identificar as massas de água, uma vez que possibilita observar uma maior variabilidade dentro de uma massa d'água (JACKETT; MCDUGALL, 1997); e também porque esses limites são propostos pra mesma região da área de estudo do trabalho em questão, o que torna sua utilização adequada para a realização deste estudo. Na tabela II é possível observar os limites propostos pelos autores para as variáveis temperatura potencial, salinidade e densidade potencial que foram utilizadas para identificar as massas d'água no presente trabalho.

Tabela 2 – Caracterização das massas de água a partir de seus dados de profundidade, temperatura potencial, salinidade, densidade potencial (σ_θ) e densidade neutra (γ^n) (HERRFORD; BRANDT; ZENK, 2017; LIU; TANHUA, 2019a; POOLE; TOMCZAK, 1999).

Parâmetro	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	Referência
Temperatura Potencial (°C)	---	6,55 – 16,27	6,99 – 13,90	---	2,1 – 4,3	0,5 – 1,8	POOLE; TOMCZAK (1999)
Salinidade	---	34,40 – 35,69	34,94 – 35,89	---	---	---	POOLE; TOMCZAK (1999)
Densidade Potencial (σ_θ) (kg m ⁻³)	< 24,5	26,00 – 27,00	---	26,95 – 27,50	27,72 – 27,88	> 27,88	HERRFORD; BRANDT; ZENK (2017)
Densidade Neutra (γ^n) (kg m ⁻³)	< 24,448	24,448 – 26,815	---	26,815 – 27,7153	27,7153 – 28,135	> 28,135	LIU; TANHUA (2019)

Fonte: O autor, 2021.

Gráficos de seção vertical com a variável densidade neutra estabelecida no eixo Z também foram realizados no ODV com o objetivo de observar a distribuição das massas d'água ao longo de toda a seção estudada para ambos os anos. Através desses gráficos, foram estabelecidas isolinhas de mesma densidade de acordo com os limites propostos por HERRFORD; BRANDT; ZENK, (2017) que separam cada uma das massas d'água na região. As isolinhas foram salvas como “*graphic objects*” no software para serem posteriormente utilizadas em gráficos de seção que mostravam a distribuição dos nutrientes.

2.5 Tratamento dos dados

Os dados contínuos de pressão, temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido, adquiridos através do sistema CTD-O₂, foram tratados de acordo com a metodologia GO-SHIP na Universidade Federal Fluminense (UFF).

Com o objetivo de determinar a qualidade dos dados contínuos de oxigênio dissolvido determinados pelo CTD-O₂, foram realizadas duas equações da reta, uma para 2017 (Eq. I) e uma para 2018 (Eq. II), correlacionando os dados de O₂ da garrafa com os dados de O₂ obtidos através do método de Winkler para ambos os anos para verificar o R². O R² da equação para o ano de 2017 foi 0,9867 (98,67%), indicando que os dados obtidos pelo sensor do CTD O₂ neste ano foram coerentes. Para o ano de 2018 o R² foi 0,8106 (81,06%). O R² mais baixo para o ano de 2018 já era esperado uma vez que o sensor apresentou problemas durante a pernada. Posteriormente, as equações da reta foram utilizadas para corrigir os dados de ambos os anos, apesar de ter apresentado um resultado significativo em 2017.

$$O_2 \text{ CTD} = (0,8836 * O_2 \text{ Winkler}) + 0,7083 \quad [n = 74] \quad [R^2 = 0,9867] \quad (2)$$

$$O_2 \text{ CTD} = (0,7517 * O_2 \text{ Winkler}) + 0,4118 \quad [n = 115] \quad [R^2 = 0,8106] \quad (3)$$

Onde n é a quantidade de amostras cuja concentração de oxigênio dissolvido foi determinada através do método de Winkler; e R² é o coeficiente de determinação da equação da reta.

Os cálculos de densidade neutra (γ_n) foram realizados com software Ocean Data View (SCHLITZER, 2021), seguindo a fórmula proposta por JACKETT; MCDUGALL (1997),

que utiliza, além de dados de temperatura potencial, salinidade e pressão, dados geográficos de latitude e longitude para calcular a densidade.

Com objetivo de correlacionar as massas de água previamente identificadas a cada uma das variáveis biogeoquímicas, foram elaborados, através do software ODV, gráficos de seções verticais entre diferentes variáveis biogeoquímicas utilizando a interpolação “Data-Interpolating Variational Analysis” (DIVA) (TROUPIN *et al.*, 2012), que utiliza um 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, a batimetria e a advecção.

A base de dados de O₂ dissolvido analisada através do método de Winkler foi escolhida para essa etapa do trabalho, pois, apesar da menor quantidade de dados, ela representava melhor a área de estudo quando comparada com outras bases de dados e fontes bibliográficas. Além disso, as concentrações foram determinadas com análises laboratoriais assim como os outros nutrientes, e as amostras foram coletadas na mesma profundidade e em uma mesma garrafa de *Niskin* se comparadas com as amostras dos outros nutrientes.

Outro fator determinante para a escolha dos dados amostrados e sua utilização na análise biogeoquímica de O₂ foi o fato do oxímetro do CTD carecer de calibração, especialmente para a campanha PIRATA-BR XVIII. Porém, os dados de O₂ do CTD possibilitaram diferenciar as massas de água centrais, uma vez que foi realizada uma correção desses dados; e a comparação foi feita diretamente entre as duas massas de água centrais.

Os dados coletados durante o projeto PIRATA foram também comparados com dados disponíveis no produto de dados do GLODAPv.2 (do inglês *The Global Ocean Data Analysis Project*), que compreende um projeto de esforço cooperativo internacional com o objetivo de sintetizar os dados oceanográficos globais, principalmente aqueles referentes ao carbono inorgânico (OLSEN *et al.*, 2016, 2020b, 2020a). Os dados do GLODAPv.2 que foram utilizados estão compreendidos em um transecto ao longo da longitude 35°W, monitorada desde a década de 90 como parte do WOCE (do inglês *World Ocean Circulation Experiment*), entre as latitudes 03° S e 10° N, correspondem ao transecto vertical que apresenta a maior base de dados da região (CHAPMAN, 1998). Essa seção foi escolhida para ser comparada com os dados PIRATA por ser a mais próxima da seção de 38° W com uma quantidade suficiente de estações de coleta e por apresentar dados de nutrientes inorgânicos dissolvidos ao longo de 20 anos, entre 1990 e 2010.

Uma vez que ambas as bases de dados estão dispostas em dois transectos longitudinais, também foram realizadas para os dados do GLODAPv.2 seções verticais

destacando os parâmetros termohalinos e identificando as massas de água de acordo com os mesmos limites estabelecidos. Dessa forma, foram feitos gráficos de seções para cada nutriente com as isolinhas dos parâmetros termohalinos ao fundo, possibilitando uma interpretação comparativa ao associar com o que foi observado através dos dados coletados durante a campanha.

2.6 Análises estatísticas

Para verificar quão significativos eram os resultados observados para cada parâmetro biogeoquímico para os dois conjuntos de dados PIRATA-BR (XVII e XVIII), foram utilizadas diferentes tipos de análises estatísticas de comparação, realizadas no software Paleontological Statistics – PAST (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001). Primeiramente, através do teste Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), foi testada a normalidade de cada um dos diferentes parâmetros biogeoquímicos para as três bases de dados com o objetivo de verificar suas distribuições. O teste Shapiro-Wilk é, aparentemente, o melhor teste de aderência à normalidade, com um nível de confiança de 95% (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001) Através dos p-valores obtidos para cada uma delas, foi possível observar parte dos parâmetros possuem distribuição não normal ($p < 0,05$), levando a uma adoção de estatísticas de comparação não paramétricas (Anexo A).

Para comparar estatisticamente os quatro nutrientes, juntamente com o oxigênio dissolvido nas massas de água, foi utilizado o teste Kruskal-Wallis, com nível de confiança de 95%, que avalia se existe pelo menos um entre três ou mais grupos de dados quantitativos que difere significativamente dos outros quando o p-valor é menor que 0,05 (KRUSKAL; WALLIS, 1952). As massas de água também foram analisadas, par a par, para determinar qual delas apresenta resultado que difere significativamente em relação à outra de acordo com o teste de Dunn (SHERMAN, 1965), que também apresenta um nível de confiança de 95%, quando o p-valor da análise comparativa também é menor que 0,05 (Anexo B).

No caso da ACAN, que só foi observada em duas das bases de dados; juntamente com o nitrato na ACAS, que em 2018 não apresentou resultado suficiente para aplicar os testes anteriormente descritos, a estatística de comparação aplicada foi a Wilcoxon-Mann-Whitney, usada para comparar apenas dois grupos de dados com distribuição não paramétrica. Esse teste possui um nível de confiança de 95% e determina que grupos comparados com p-valor

menor que 0,05 não são significativos (FAY; PROSCHAN, 2010) (Anexo B). Vale ressaltar que o teste Wilcoxon-Mann-Whitney foi aplicado em todos os parâmetros na ACAN, mesmo apresentando distribuição normal, para que houvesse uma padronização da metodologia geral aplicada voltada para as análises estatísticas.

3 RESULTADOS

3.1 Base de dados PIRATA

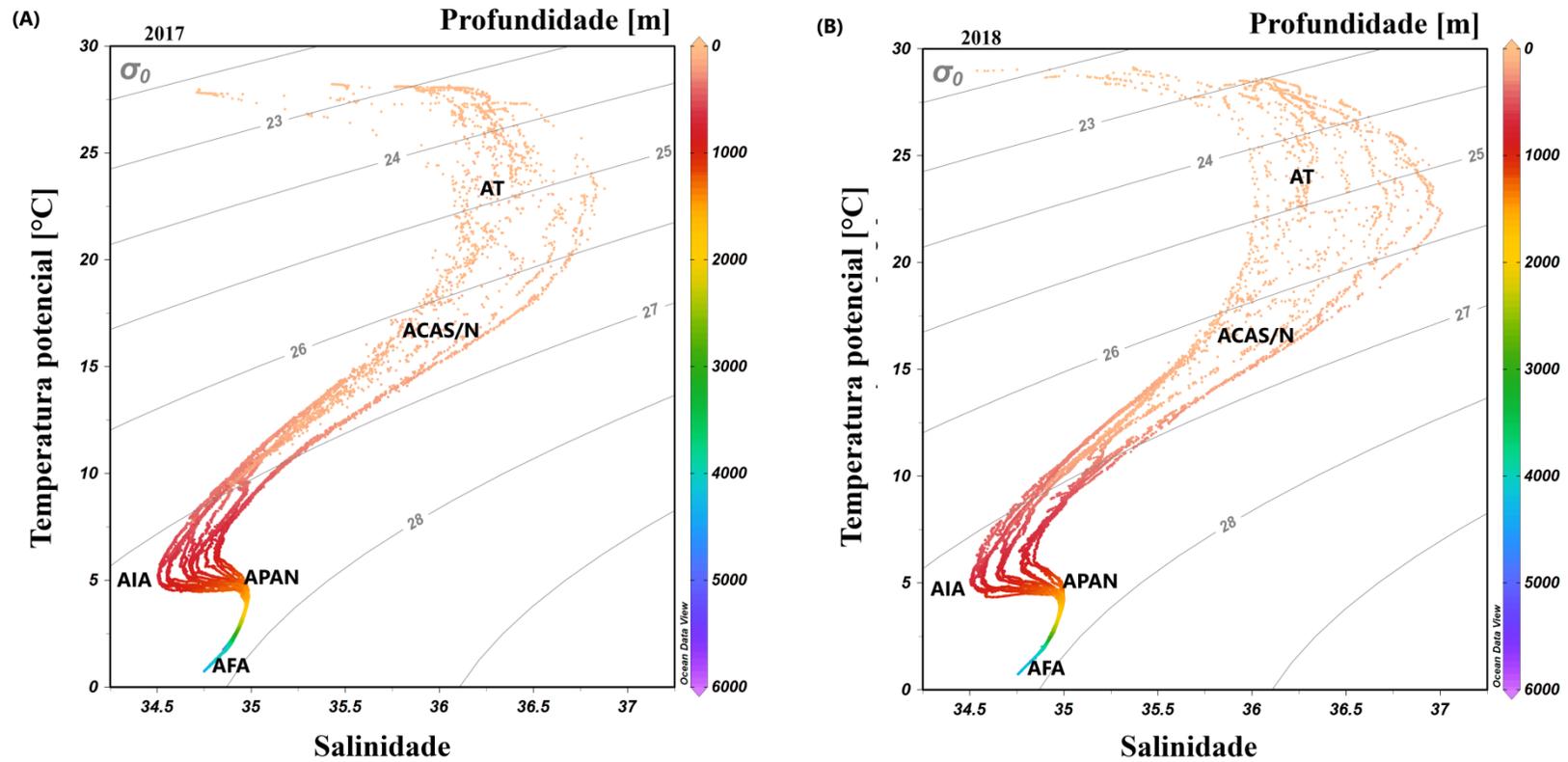
3.1.1 Identificação das massas d'água

De acordo com a base de dados coletada através do sistema CTD-O₂, presente no navio durante a amostragem realizada para os meses de novembro dos anos 2017 e 2018, foi possível identificar cada uma das principais massas d'água presentes na região, a partir dos seus valores de temperatura potencial, salinidade e densidade potencial.

Foram realizados dois diagramas T-S, um para cada ano, que apresentam o parâmetro salinidade do eixo X, temperatura potencial no eixo Y e profundidade no eixo Z. Os gráficos também apresentam isolinhas de densidade potencial, associadas diretamente aos outros parâmetros. De acordo os diagramas, foi possível observar uma rica estrutura vertical na região, representada pelas seguintes massas d'água: Água Tropical Superficial (AT); água Central do Atlântico Norte (ACAN); água Central Atlântico Sul (ACAS); água Intermediária Antártica (AIA); água Profunda do Atlântico Norte (APAN); e água de Fundo Antártica (AFA). Porém, por apresentarem valores termohalinos similares, a ACAN e a ACAS não apresentaram uma diferenciação, ocupando, inicialmente, a mesma região do gráfico (Fig. 12).

Com o objetivo de diferenciar as Águas Centrais no oceano Atlântico foi realizado um diagrama T-S com eixo Z estabelecido no parâmetro O₂ dissolvido. No gráfico, é possível observar que a região representada pelas Águas Centrais pode ser diferenciada conforme suas concentrações de oxigênio, sendo possível detectar duas regiões distintas que estão diretamente correlacionadas com a latitude, estando a ACAS localizada entre a região ao sul de 11° N; e a ACAN em uma região ao norte de 11° N (Fig.13).

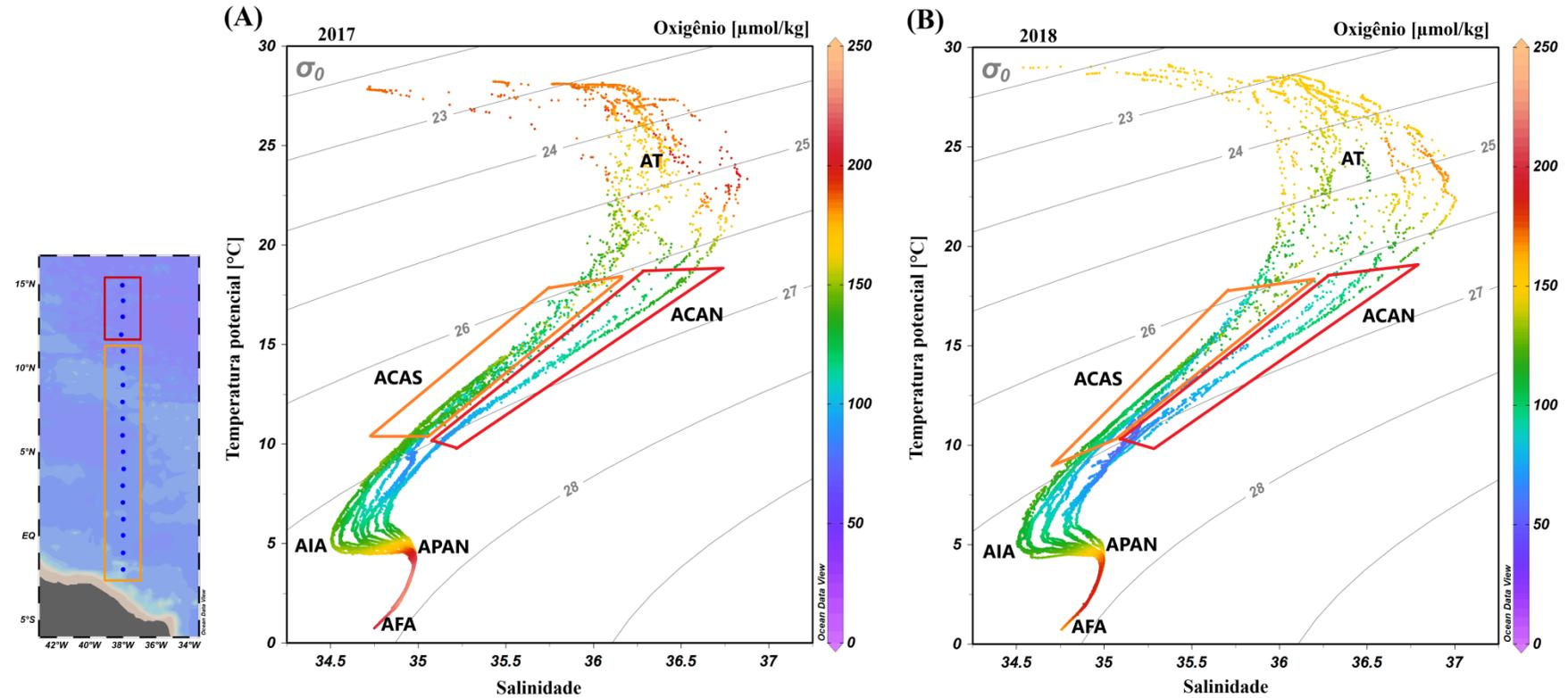
Figura 12 - Diagrama T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade, com eixo Z em profundidade, no transecto 38° W para (A) 2017 e (B) 2018.



Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

Figura 13 - Diagrama T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade, com eixo Z em O₂ dissolvido no transecto 38° W para (A) 2017 e (B) 2018.



Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

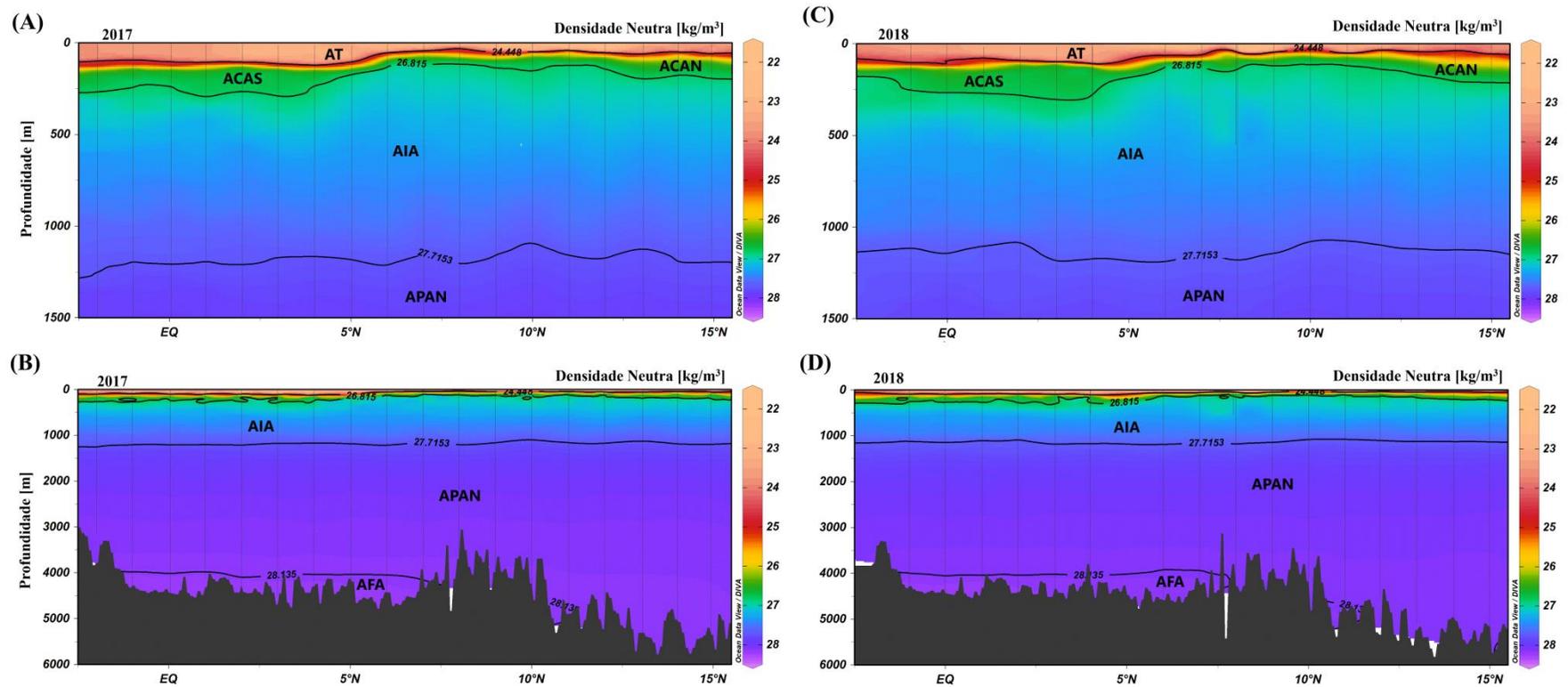
Fonte: O Autor, 2021

3.1.2 Distribuição das massas d'água

Perfis verticais de densidade neutra, temperatura potencial e salinidade também foram realizados com o objetivo de observar a distribuição desses parâmetros ao longo de toda a coluna d'água. Os perfis para ambos os anos e para as três variáveis apresentam bastantes similaridades. A identificação das massas de água nas seções foi feita de acordo com os limites de densidade neutra, que correspondem a limites propostos para a área de estudo estabelecidos de acordo com outras fontes bibliográficas. Posteriormente, as isolinhas de densidade neutra estabelecidas na seção foram inseridas em todos os outros gráficos de seção para cada um dos nutrientes estudados, com objetivo de estabelecer uma correlação com as massas d'água.

Através dos limites de densidade neutra, foram identificadas as seguintes massas de água: Água Tropical Superficial (AT); água Central Atlântico Sul (ACAS); água Central do Atlântico Norte (ACAN); água Intermediária Antártica (AIA); água Profunda do Atlântico Norte (APAN); e água de Fundo Antártica (AFA). A ACAN foi destacada na seção de acordo com a análise dos diagramas T-S, onde foi observado que ela e a ACAS compreendem valores de densidade potencial similares e que ambas estão situadas aproximadamente na mesma profundidade, só que em regiões diferentes, estando a ACAN situada ao norte da cordilheira meso-oceânica, e a ACAS localizada ao sul da mesma (Fig.14).

Figura 14 - Perfis de densidade neutra ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.



Nota: As linhas tracejadas verticais representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

3.1.3 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos

Os dados de concentração de nutrientes dissolvidos foram previamente representados em gráficos de seção, associados às principais massas de água presentes na região, a fim de estabelecer uma caracterização das mesmas de acordo com cada nutriente ao longo da coluna d'água. Além disso, os principais dados relativos a cada um dos nutrientes foram também representados de acordo com a tabela III, que informa o n amostral e a média, o desvio padrão, o valor máximo e o valor mínimo de concentração de cada massa de água para ambos os anos. Assim, uma descrição prévia da concentração de cada nutriente foi feita analisando os gráficos de seção, juntamente com os dados presentes na tabela III.

O nitrato apresentou concentrações distintas ao longo da coluna d'água para ambos os anos, embora siga uma mesma tendência. Essa tendência é caracterizada pelos menores valores de concentração na AT ($\sim < 5 \mu\text{mol/kg}$), seguida por ambas as águas centrais, que em 2017 apresentou valores numa faixa aproximada de $5 - 30 \mu\text{mol/kg}$, com uma média de aproximadamente $12 \mu\text{mol/kg}$ para a ACAS e $16 \mu\text{mol/kg}$ para a ACAN; enquanto em 2018 apresentou uma média aproximada de $1 \mu\text{mol/kg}$ para a ACAS e de $2 \mu\text{mol/kg}$ para a ACAN. A AIA é a massa de água que apresenta a maior concentração de nitrato, com cerca de $15 - 40 \mu\text{mol/kg}$ em 2017 e $20 - 30 \mu\text{mol/kg}$ em 2018. A APAN apresentou valores intermediários, geralmente menores em 2018 ($20 - 25 \mu\text{mol/kg}$ em 2017 e $15 - 25 \mu\text{mol/kg}$ em 2018), enquanto a AFA apresentou valores elevados de concentração de nitrato ($15 - 30 \mu\text{mol/kg}$ em 2017 e $15 - 25 \mu\text{mol/kg}$ em 2018), enquanto (Fig.15).

O nitrito é o nutriente que apresenta a menor diferenciação ao longo da coluna d'água para ambos os anos, embora no ano de 2018 seja possível notar que a região superficial do oceano compreendida pela AT apresentou valores um pouco mais elevados (cerca de $0,4 \mu\text{mol/kg}$). Ao longo do restante da coluna d'água, o nitrito apresenta concentrações médias abaixo de $0,2 \mu\text{mol/kg}$ (Fig. 16).

O fosfato apresentou uma tendência bem similar nos dois anos analisados, embora as concentrações sejam um pouco mais baixas em 2017 no geral, e limites de concentração bem característicos para cada massa d'água. A camada da AT apresentou as menores concentrações ($< 0,5 \mu\text{mol/kg}$); as águas centrais apresentaram concentrações um pouco maiores em relação a anterior ($0,5 - 1,0 \mu\text{mol/kg}$); a AIA aparenta ser a massa de água com as maiores concentrações de fosfato, juntamente com a AFA ($1,5 - 2,5 \mu\text{mol/kg}$); já a APAN apresenta valores intermediários ($1,0 - 1,5 \mu\text{mol/kg}$) (Fig.17).

De acordo com a os perfis de concentração e os resultados dispostos na tabela III; e fazendo também uma comparação prévia com os valores de profundidades de cada massa d'água, foi possível identificar que o silicato apresentou concentrações mais altas (40 – 80 $\mu\text{mol/kg}$) em águas de fundo (> 4000 m, AFA), valores intermediários (20 – 40 $\mu\text{mol/kg}$) em águas intermediárias e profundas (500 – 4000 m, AIA e APAN) e concentrações mais baixas (0 – 20 $\mu\text{mol/kg}$) na superfície e abaixo da camada de mistura (0 – 500 m, AT, ACAS e ACAN) (Fig.18).

3.1.4 Oxigênio Dissolvido

As concentrações de oxigênio dissolvido foram também analisadas para as duas campanhas de amostragem de acordo com o gráfico de seção, com destaque para a porção superior dos oceanos entre 0 e 1500 metros (Fig. 19), bem como de acordo com os valores de média, desvio padrão, valores máximo e mínimo dessas concentrações, e também a quantidade de amostras representada pelo n amostral (Tabela III).

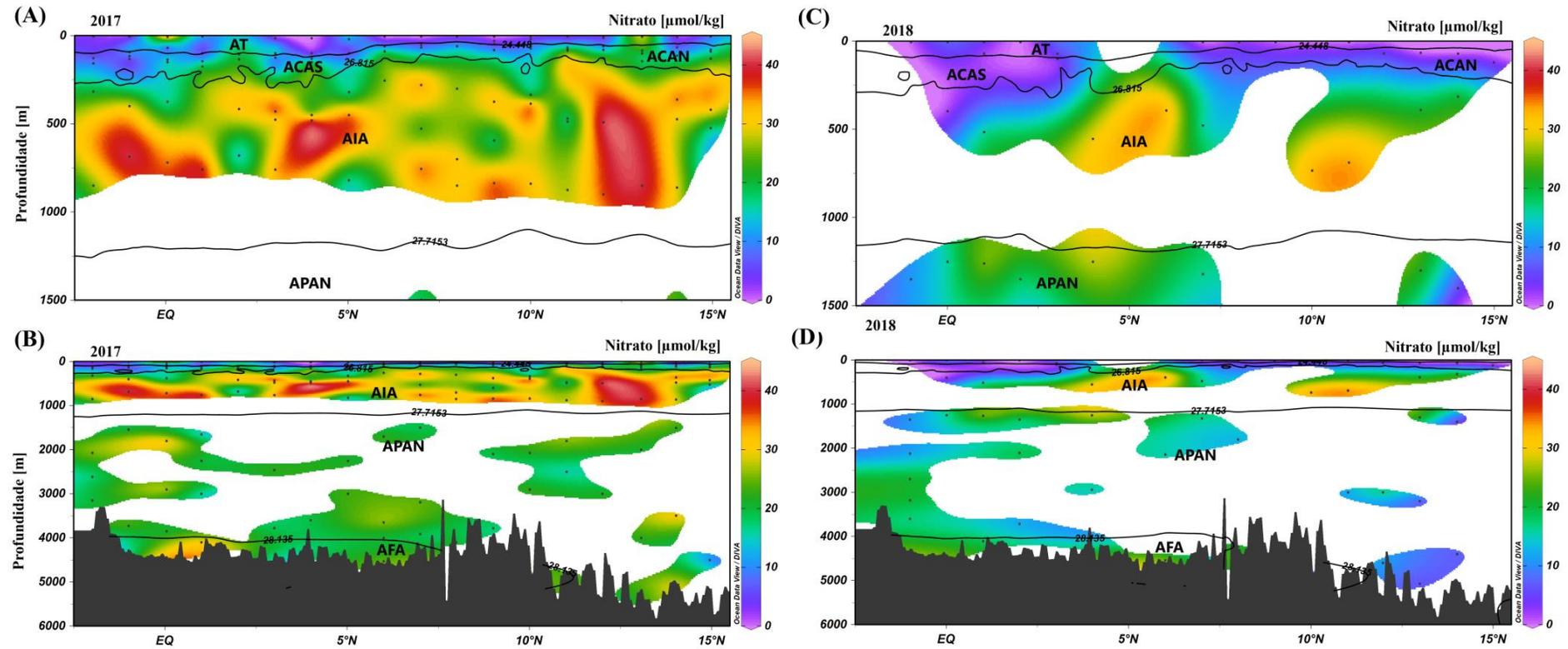
Os dados de ambos os anos apresentaram um padrão de disposição similar ao longo dos dois conjuntos de dados. As massas de água que apresentaram maior diferença de concentração entre ambos os anos foram a AT, que variou entre 150 e 200 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017, e apresentou valores mais próximos de 200 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018; e a AIA que apresentou as menores concentrações totais, variando em 2017 principalmente entre 25 e 100 $\mu\text{mol/kg}$, enquanto em 2018 ficou entre 50 e 150 $\mu\text{mol/kg}$. Outra massa d'água que variou bastante entre ambos os anos foi a ACAN, com concentração média de 190 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018 e de 120 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017. Já as outras três massas d'água não apresentaram grande variação entre os anos, apresentando as seguintes faixas de concentração: ACAS: ~ 100 – 200 $\mu\text{mol/kg}$; APAN e AFA: ~ 200 – 250 $\mu\text{mol/kg}$.

Tabela 3 – Valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão das concentrações de cada nutriente e oxigênio dissolvido para cada uma das massas de água em 2017 e 2018, para a base de dados PIRATA.

		2017						2018					
		AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA
Nitrato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	27	29	11	41	33	8	9	1	4	9	21	6
	Média	7,15	12,24	16,01	28,83	21,58	23,56	2,55	0,70	2,11	22,53	15,98	19,33
	Desvio	9,55	9,41	7,52	8,08	3,51	6,05	2,22	-	2,07	10,72	5,26	5,04
	Mín	0,10	0,37	3,94	14,52	15,29	16,11	0,02	0,70	0,31	1,42	5,93	12,16
	Máx	27,93	29,90	28,11	42,00	29,81	33,07	7,46	0,70	4,61	33,77	27,65	25,26
Nitrito ($\mu\text{mol/kg}$)	n	27	28	11	39	36	9	20	9	5	16	23	10
	Média	0,19	0,25	0,25	0,13	0,14	0,23	0,37	0,34	0,21	0,13	0,12	0,13
	Desvio	0,12	0,15	0,15	0,08	0,07	0,14	0,20	0,27	0,10	0,09	0,08	0,14
	Mín	0,02	0,07	0,09	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,08	0,01	0,00	0,01
	Máx	0,46	0,86	0,62	0,35	0,29	0,50	0,70	0,65	0,34	0,28	0,26	0,50
Fosfato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	26	29	11	36	29	6	20	9	5	25	31	10
	Média	0,27	0,67	0,42	1,57	1,38	1,76	0,36	0,82	0,34	2,04	1,44	1,60
	Desvio	0,27	0,57	0,26	0,63	0,22	0,56	0,53	0,69	0,19	0,38	0,34	0,40
	Mín	0,05	0,03	0,07	0,28	1,01	1,14	0,02	0,14	0,10	1,10	0,86	1,03
	Máx	1,03	2,37	0,89	2,54	1,76	2,75	1,10	1,93	0,52	2,67	2,07	2,36
Silicato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	27	28	11	38	40	7	19	9	5	23	32	10
	Média	11,91	13,74	8,99	20,07	25,98	53,22	3,42	4,32	1,14	15,82	18,67	62,40
	Desvio	9,04	7,22	6,02	6,66	10,50	21,46	3,73	3,56	0,77	6,13	7,64	18,99
	Mín	1,65	4,57	0,87	6,94	14,22	9,43	0,40	0,01	0,54	5,39	3,65	21,85
	Máx	33,67	33,44	21,03	32,66	61,24	76,56	12,55	12,27	0,54	26,89	32,69	84,80
O ₂ ($\mu\text{mol/kg}$)	n	16	8	3	22	18	10	21	10	5	30	36	14
	Média	178,67	129,74	120,26	86,53	233,15	223,22	194,61	142,46	190,29	116,41	245,52	245,00
	Desvio	3,96	34,80	49,89	29,40	15,84	17,93	16,06	32,87	32,04	26,99	15,20	7,07
	Mín	171,67	90,19	70,59	37,91	203,92	181,26	143,79	84,21	139,31	55,70	186,88	231,23
	Máx	185,18	184,74	170,37	147,27	248,36	247,92	214,78	198,24	212,07	161,09	267,06	255,01

Fonte: O autor, 2021.

Figura 15 – Perfis de nitrato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

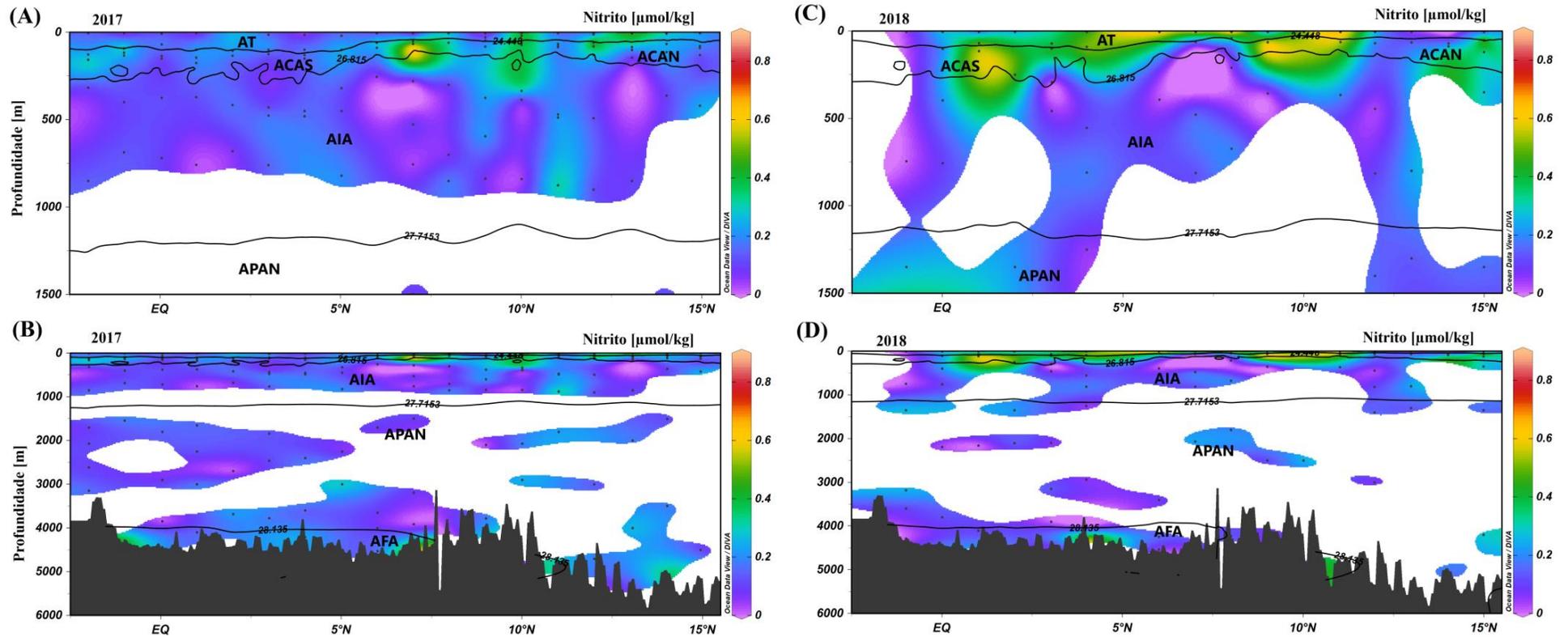


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

Figura 16 - Perfis de nitrito ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

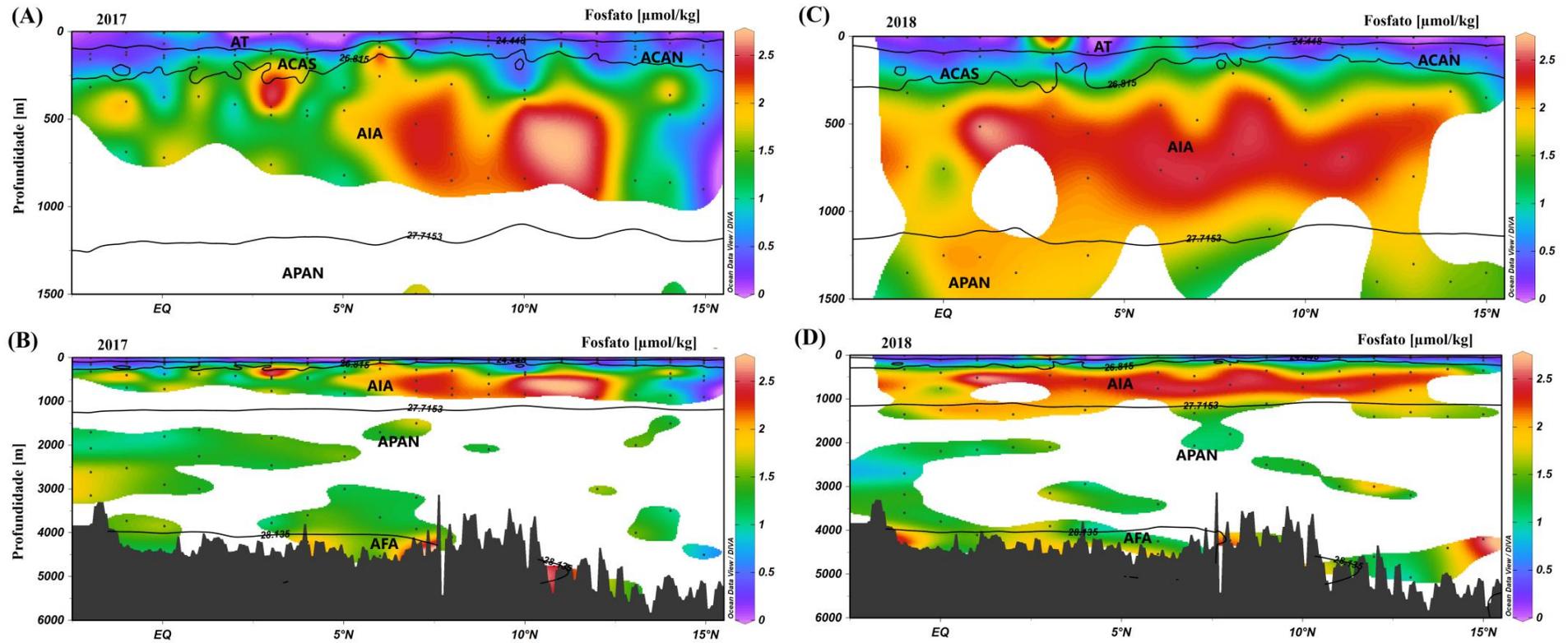


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA – Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

Figura 17 - Perfis de fosfato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

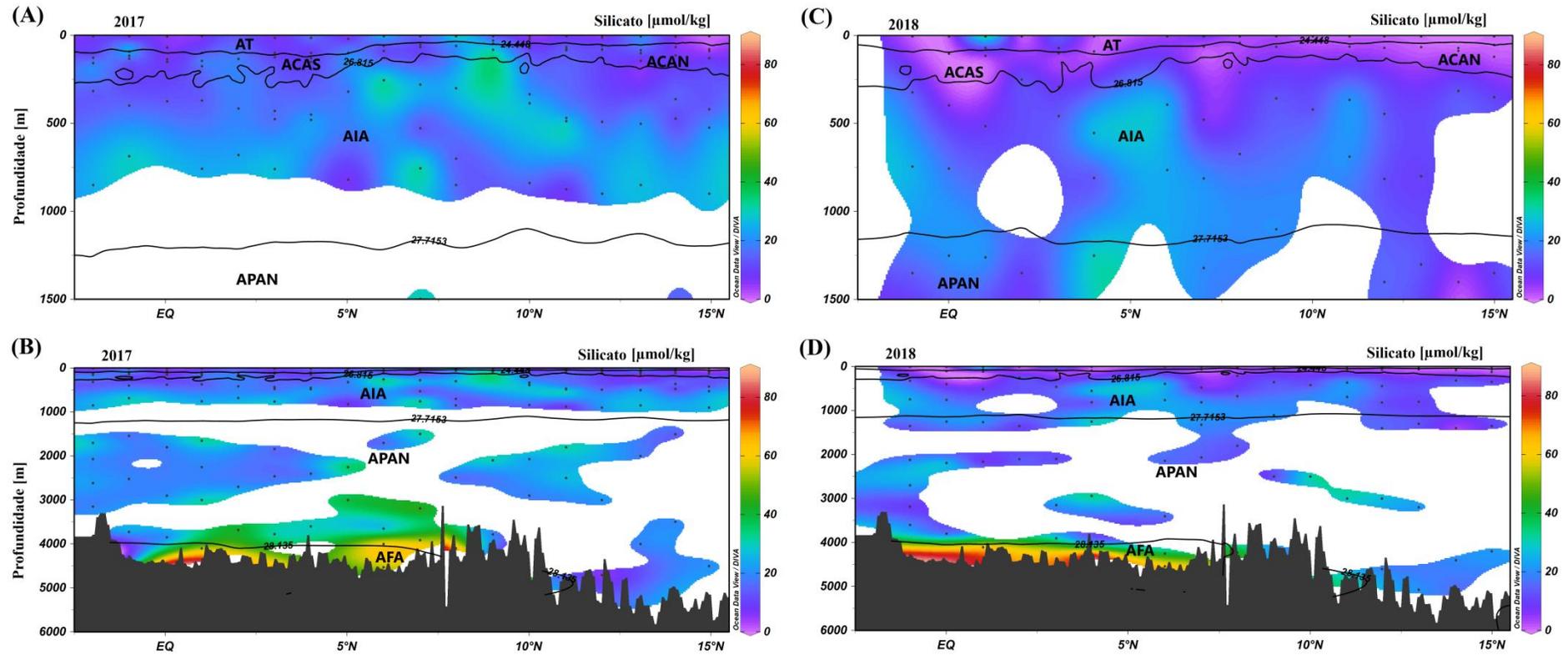


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

Figura 18 - Perfis de silicato ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

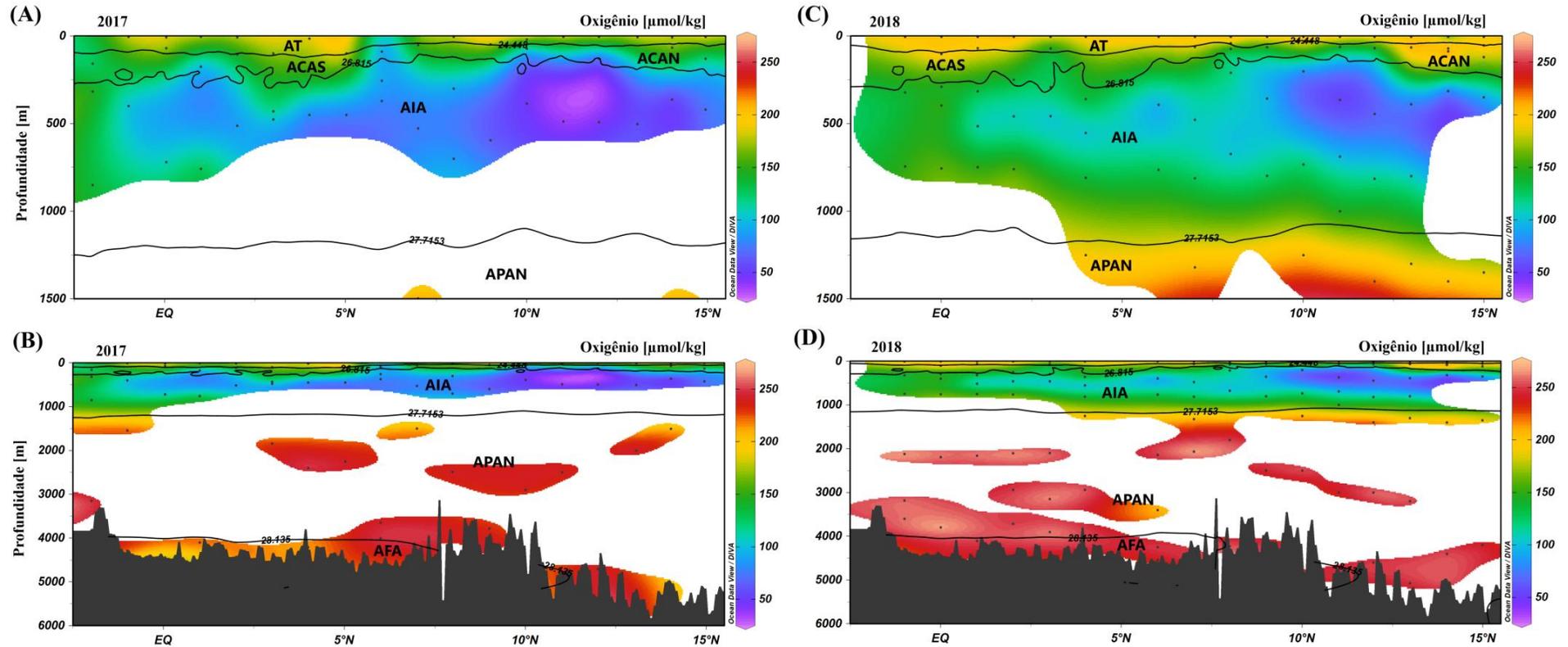


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

Figura 19 - Perfis de oxigênio dissolvido ao longo do transecto 38° W para (A) e (B) 2017; e (C) e (D) 2018, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.



Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

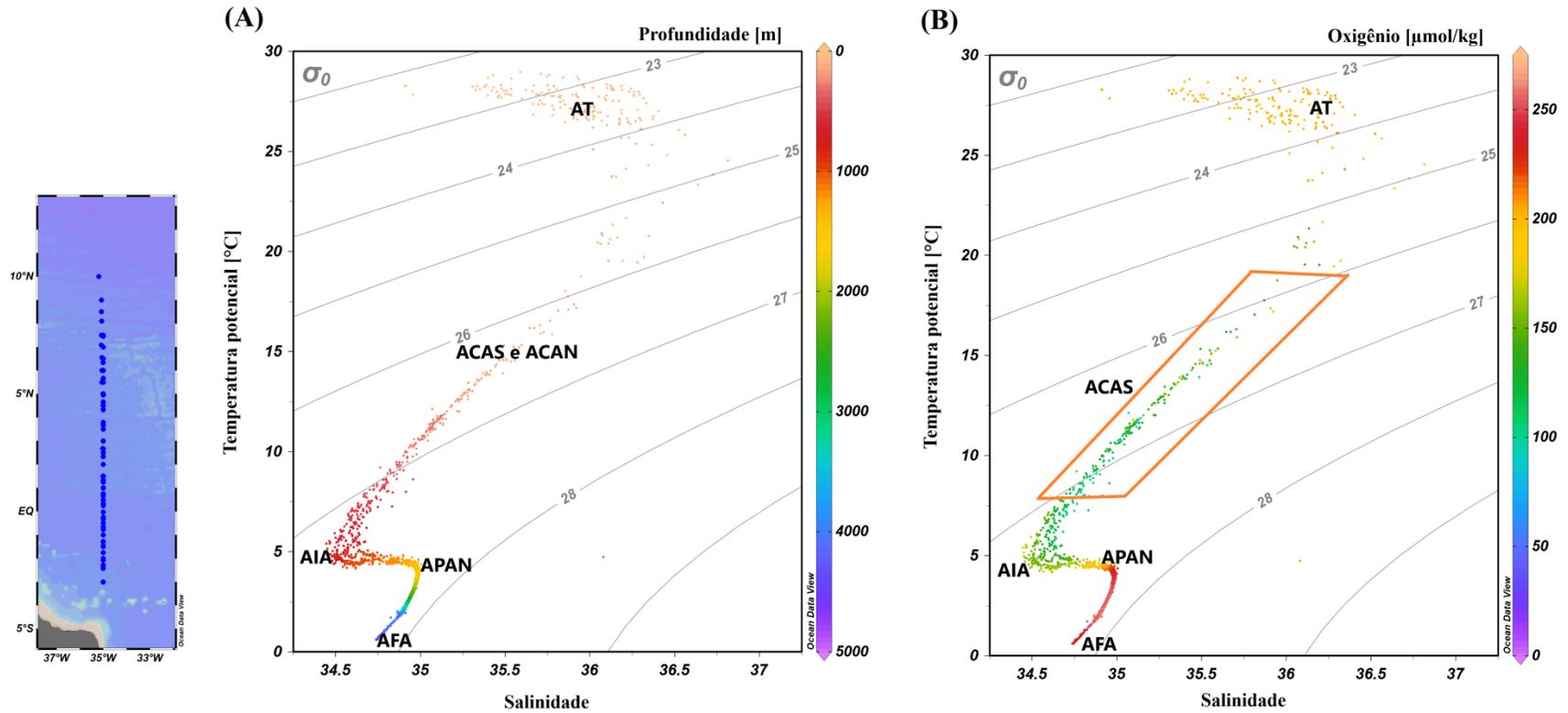
3.2 Produto de dados GLODAPv.2

3.2.1 Identificação das massas d'água

As massas de água também foram identificadas para o produto de dados GLODAPv.2 de acordo com seus limites termohalinos, distribuídos em um diagrama TS. Novamente, foram utilizados os parâmetros salinidade, temperatura potencial e densidade potencial para realizar essa identificação na região, onde foram identificadas as mesmas seis massas de água identificadas nas seções PIRATA de 2017 e 2018. As massas de água presentes na região são a Água Tropical Superficial (AT); a água Central do Atlântico Sul (ACAS); a água Intermediária Antártica (AIA); a água Profunda do Atlântico Norte (APAN); e a água de Fundo Antártica (AFA) (Fig. 20a).

No contexto do produto de dados do GLODAPv.2 (OLSEN *et al.*, 2020b), que neste trabalho compreende uma seção entre as latitudes 03° S e 10° N ao longo da longitude 35° W, não foi possível identificar a presença da ACAN na região, como pode ser observado na figura 20b que utiliza dados de oxigênio no eixo Z do diagrama T-S, uma vez que ela geralmente é observada na região a partir de 12° N. Sendo assim, o produto de dados GLODAPv.2 não contará nesse estudo com a presença da ACAN, o que limita a massa de água a uma caracterização que leva em conta somente a base de dados do PIRATA e os dados da literatura.

Figura 20 - Diagramas T-S dos dados de temperatura potencial e salinidade para o produto de dados GLODAPv.2, no transecto 35° W, para (A) o eixo Z em profundidade e (B) o eixo Z em O₂.



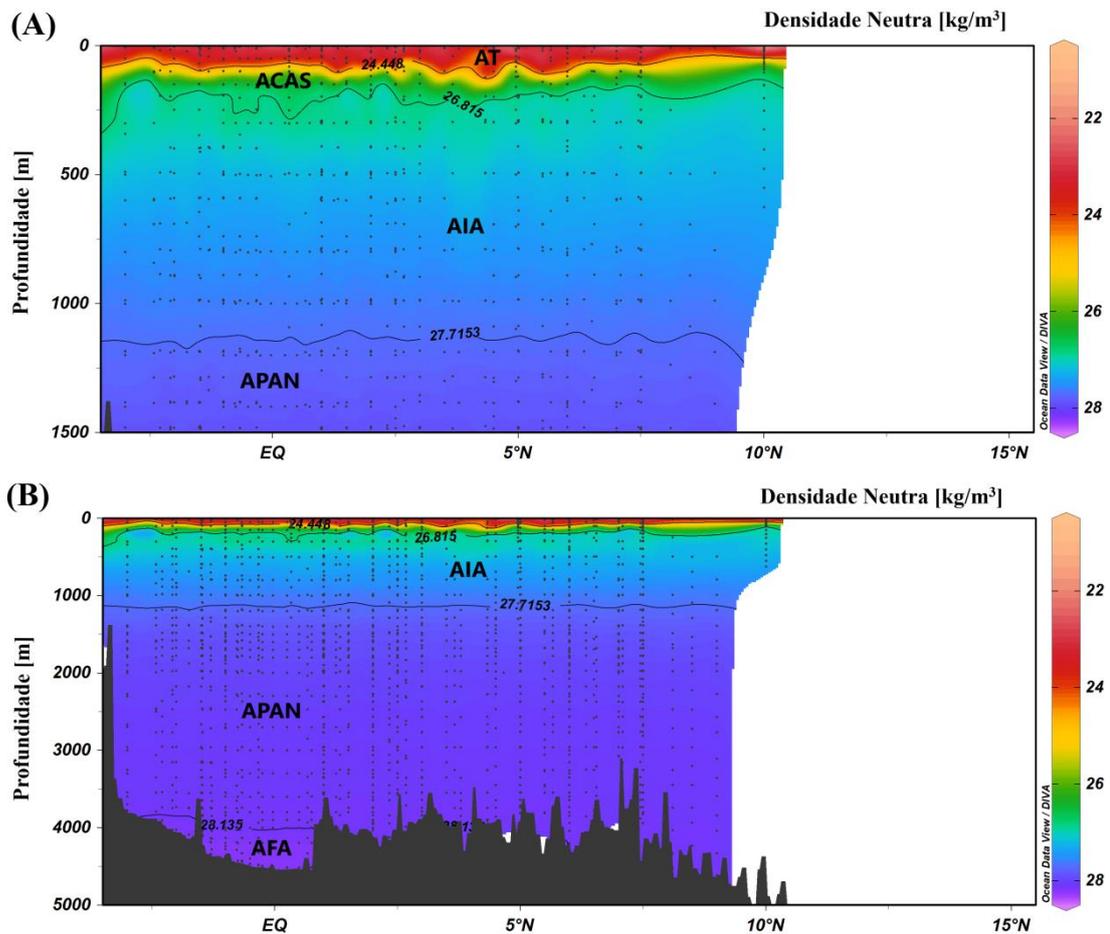
Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; AIA – Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

3.2.2 Distribuição das massas d'água

As seis massas de água presentes no produto de dados do GLODAPv.2 e previamente identificadas, foram observadas em um gráfico de seção ao longo da longitude 35° W, entre as latitudes 03° S e 10° N. O gráfico de seção conta com os valores de densidade neutra dispostos no eixo Z, possibilitando observar toda a variação ao longo da coluna d'água. Os limites entre as massas de água foram estabelecidos nos gráficos de seção, mostrando cada uma das seis massas de água ao longo do perfil de profundidade (Fig.21).

Figura 21 - Perfis de densidade neutra para a base de dados do GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, entre 03° S e 15° N, sendo a seção (A) da porção superficial até 1500 m; e a seção (B) de toda a coluna d'água.



Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

3.2.3 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos

As concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos foram observadas ao longo de toda a coluna d'água através de gráficos de seção na região dos dados do GLODAPv.2 (Figs. 22 e 23), e de acordo com a tabela IV, com o objetivo de caracterizar cada uma das massas de água identificadas. Assim, de acordo com os gráficos e com os valores de concentração dispostos na tabela IV, foi realizada uma descrição prévia da concentração de cada nutriente nas diferentes massas de água presentes na área de estudo.

As concentrações de nitrato na seção GLODAPv.2 são bem variadas ao longo da coluna d'água. Na AT é possível observar uma faixa de variação de nitrato que apresenta as menores concentrações e corresponde aproximadamente a valores inferiores a 5 $\mu\text{mol/kg}$. Na ACAS, as concentrações de nitrato variam entre 5 e 20 $\mu\text{mol/kg}$, sendo principalmente demarcada por uma faixa de aproximadamente 15 $\mu\text{mol/kg}$. A AIA é a massa de água que apresenta os maiores valores de concentração de nitrato na região, com uma faixa que varia entre 20 e 40 $\mu\text{mol/kg}$, com suas porções centrais apresentando valores mais próximos do limite superior. A APAN, apesar de apresentar quase 3000 m de espessura, possui valores de nitrato constantes que não variam significativamente, girando em torno de 20 a 25 $\mu\text{mol/kg}$. Já A AFA é a massa de água que apresenta a segunda maior concentração de nitrato na região, com concentrações de aproximadamente 30 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 22a,b).

O nitrito não possui variações significativas ao longo da coluna d'água, apresentando quase sempre baixa concentração (0 – 0,1 $\mu\text{mol/kg}$). A ACAS é a massa de água que apresenta concentrações um pouco maiores, apesar de ainda bastante baixos (0 – 0,2 $\mu\text{mol/kg}$). O mais interessante de se notar quanto ao nitrito, é que os dados de concentração do GLODAPv.2 foram menores em toda a coluna d'água se comparados com os dados das campanhas PIRATA (Fig. 22c,d).

De modo geral, a distribuição do fosfato apresenta um padrão bastante similar à do nitrato na região do produto de dados GLODAPv.2. A AT apresenta os menores valores de concentração ($\sim < 0,5 \mu\text{mol/kg}$). A ACAS apresenta concentrações que variam entre 0,5 e 1,5, apresentando uma extensa faixa com concentração de aproximadamente 1 $\mu\text{mol/kg}$. A AIA apresenta os maiores valores de concentração na região, sendo marcada principalmente por valores que variam entre 2,0 e 2,5 $\mu\text{mol/kg}$. A APAN possui concentrações de fosfato em uma pequena faixa entre 1,0 e 1,5 $\mu\text{mol/kg}$, e é a massa de água que apresenta a menor variação. A concentração de fosfato na AFA é a segunda maior, com cerca de 2,0 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 23a,b).

Já a distribuição do silicato ao longo da coluna d'água é relativamente uniforme, com exceção da AFA que é a massa de água que apresenta os valores mais elevados (50 – 100 $\mu\text{mol/kg}$). A AT apresenta os menores valores de silicato na região (< 5 $\mu\text{mol/kg}$), enquanto a ACAS também apresenta uma faixa de valores baixos (5 – 20 $\mu\text{mol/kg}$). A AIA possui um pouco mais de silicato em relação à massa d'água situada acima, com valores que variam entre 20 e 30 $\mu\text{mol/kg}$. Por fim, a APAN possui uma distribuição bastante interessante, onde podem ser observadas três diferentes camadas: a superior, que apresenta uma faixa de variação entre 5 e 20 $\mu\text{mol/kg}$; a do meio, com faixa de variação entre aproximadamente 20 e 30 $\mu\text{mol/kg}$; e a inferior, que é a que possui maior concentração, com uma faixa que varia de 30 a 50 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 23c,d).

3.2.4 Oxigênio Dissolvido

Os dados de concentração do oxigênio dissolvido da base de dados GLODAPv.2 também foram determinados e sintetizados na tabela IV e representados em dois gráficos de seção (Fig.24), auxiliando nas análises de caracterização biogeoquímica das massas de água.

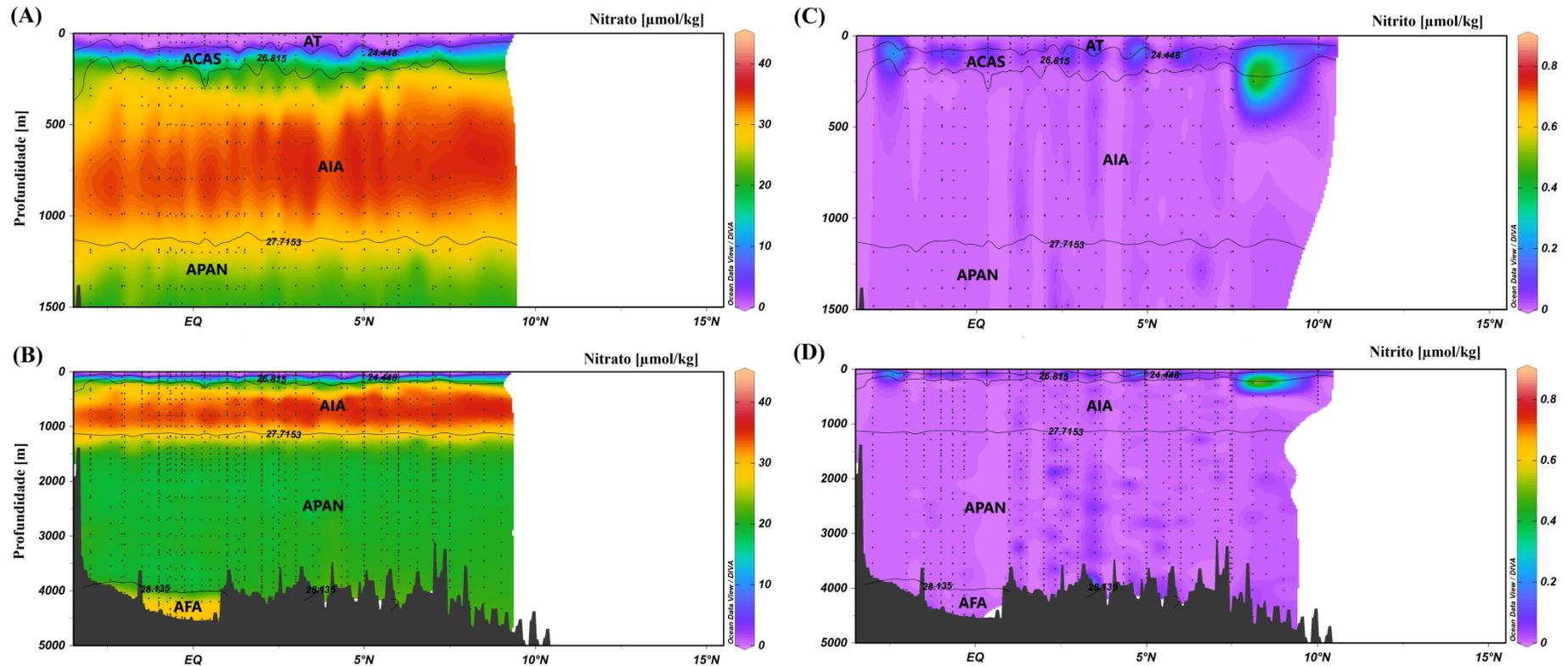
De acordo com a tabela IV e a figura 24, é possível observar que as menores concentrações de O_2 dissolvido encontram-se na AIA, principalmente à norte de 04°N , variando principalmente entre 50 e 150 $\mu\text{mol/kg}$. A APAN e a AFA apresentaram concentrações de O_2 bastante similares, com uma média de aproximadamente 250 $\mu\text{mol/kg}$ e 240 $\mu\text{mol/kg}$, respectivamente. A AT também apresentou uma média de concentração elevada, de aproximadamente 200 $\mu\text{mol/kg}$, enquanto a ACAS foi a que apresentou a maior variação de concentração, entre aproximadamente 100 e 200 $\mu\text{mol/kg}$, provavelmente por se tratar de uma massa d'água de transição entre duas massas de água com características bem marcadas e distintas.

Tabela 4 – Valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão das concentrações de cada nutriente e oxigênio dissolvido para cada uma das massas de água do produto de dados GLODAPv.2 ao longo do meridiano 35° W, coletadas entre 1990 e 2010.

		AT	ACAS	AIA	APAN	AFA
Nitrato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	128	73	331	1032	50
	Média	0,23	14,50	31,65	20,55	26,71
	Desvio	0,55	6,95	3,50	1,98	2,63
	Mín	0,00	0,00	20,91	17,90	21,00
	Máx	3,65	27,40	36,35	29,46	30,40
Nitrito ($\mu\text{mol/kg}$)	n	96	54	255	748	30
	Média	0,02	0,06	0,01	0,01	0,00
	Desvio	0,05	0,08	0,04	0,02	0,01
	Mín	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máx	0,27	0,28	0,55	0,28	0,03
Fosfato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	113	61	280	840	32
	Média	0,04	0,87	2,08	1,35	1,79
	Desvio	0,06	0,44	0,27	0,14	0,20
	Mín	0,00	0,03	1,39	1,19	1,43
	Máx	0,42	1,66	2,52	1,94	2,10
Silicato ($\mu\text{mol/kg}$)	n	107	59	258	787	41
	Média	1,35	6,54	22,82	26,30	82,88
	Desvio	1,11	2,62	7,41	8,38	18,11
	Mín	0,23	1,56	9,44	15,57	45,26
	Máx	7,47	11,80	33,83	50,80	104,79
O ₂ ($\mu\text{mol/kg}$)	n	168	94	406	1.278	69
	Média	200,70	147,30	136,40	247,50	238,40
	Desvio	5,30	25,60	22,50	19,00	8,60
	Mín	172,50	87,40	61,80	168,10	227,20
	Máx	210,80	210,80	189,10	266,20	258,60

Fonte: O autor, 2021.

Figura 22 - Perfis de nitrato [(A) e (B)] e nitrito [(C) e (D)] para a base de dados GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

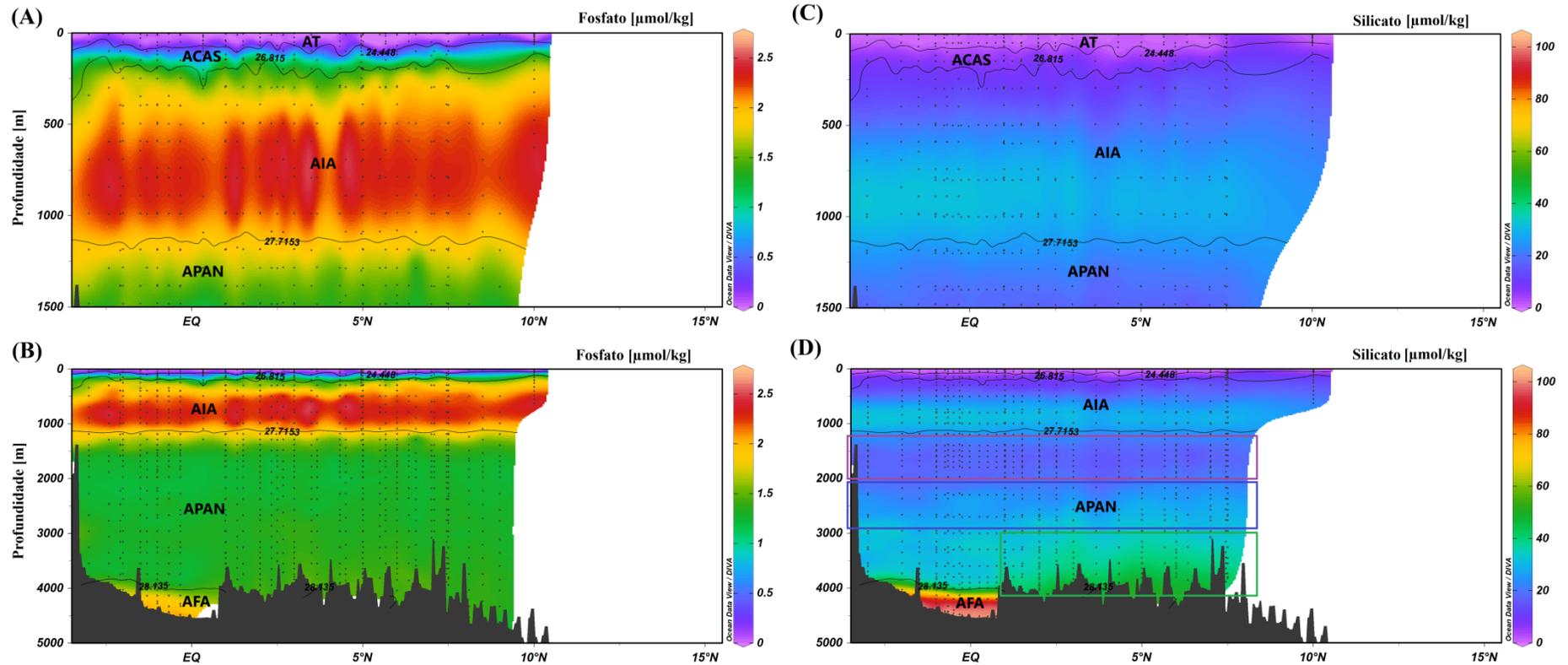


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

Figura 23 - Perfis de fosfato [(A) e (B)] e silicato [(C) e (D)] para a base de dados GLODAPv.2 ao longo do transecto 35° W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo as seções (A) e (C) da porção superficial até 1500 m; e as seções (B) e (D) de toda a coluna d'água.

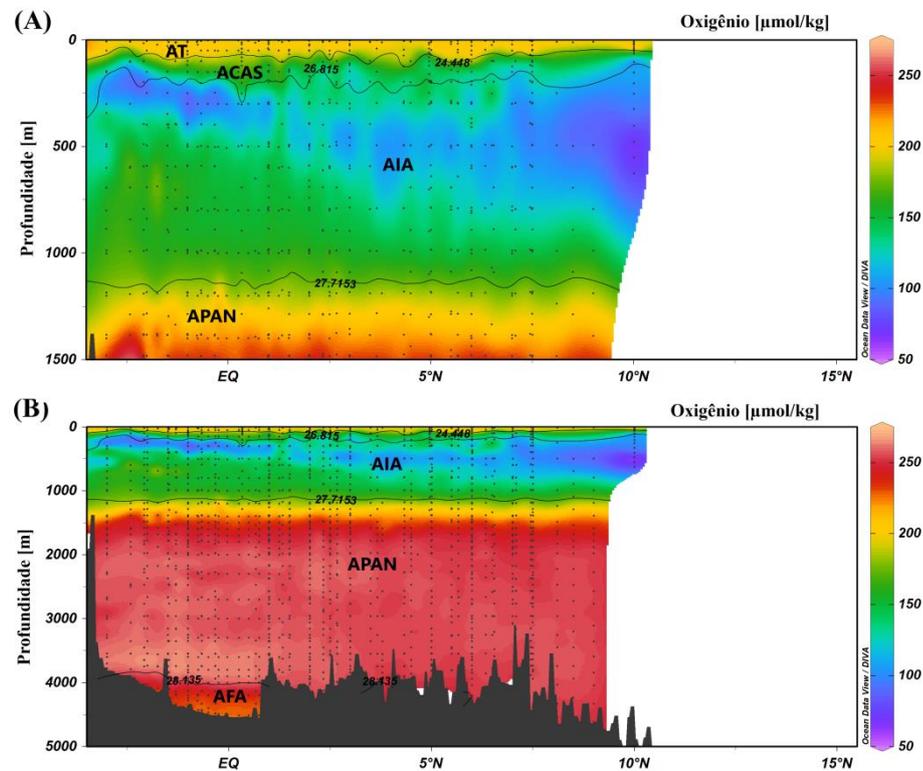


Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021.

Figura 24 - Perfis de densidade neutra para a base de dados do GLODAPv.2 ao longo do transecto 35°W, com dados coletados entre 1990 e 2010, sendo a seção (A) da porção superficial até 1500 m; e a seção (B) de toda a coluna d'água.



Nota: Os pontos cinza representam os pontos de coleta, enquanto as siglas representam cada uma das massas d'água identificadas.

Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

3.3 Distribuição das concentrações entre os conjuntos de dados

As bases de dados PIRATA e GLODAPv.2, apresentaram algumas diferenças relativas à concentração dos quatro nutrientes, bem como do oxigênio dissolvido. Essas diferenças podem ser observadas nas figuras 25 e 26, que apresentam gráficos onde os valores médios e os erros padrões dos dados de concentração para as propriedades analisadas se distribuem entre os três conjuntos de dados, possibilitando compreender melhor essas variações auxiliadas pelas análises estatísticas.

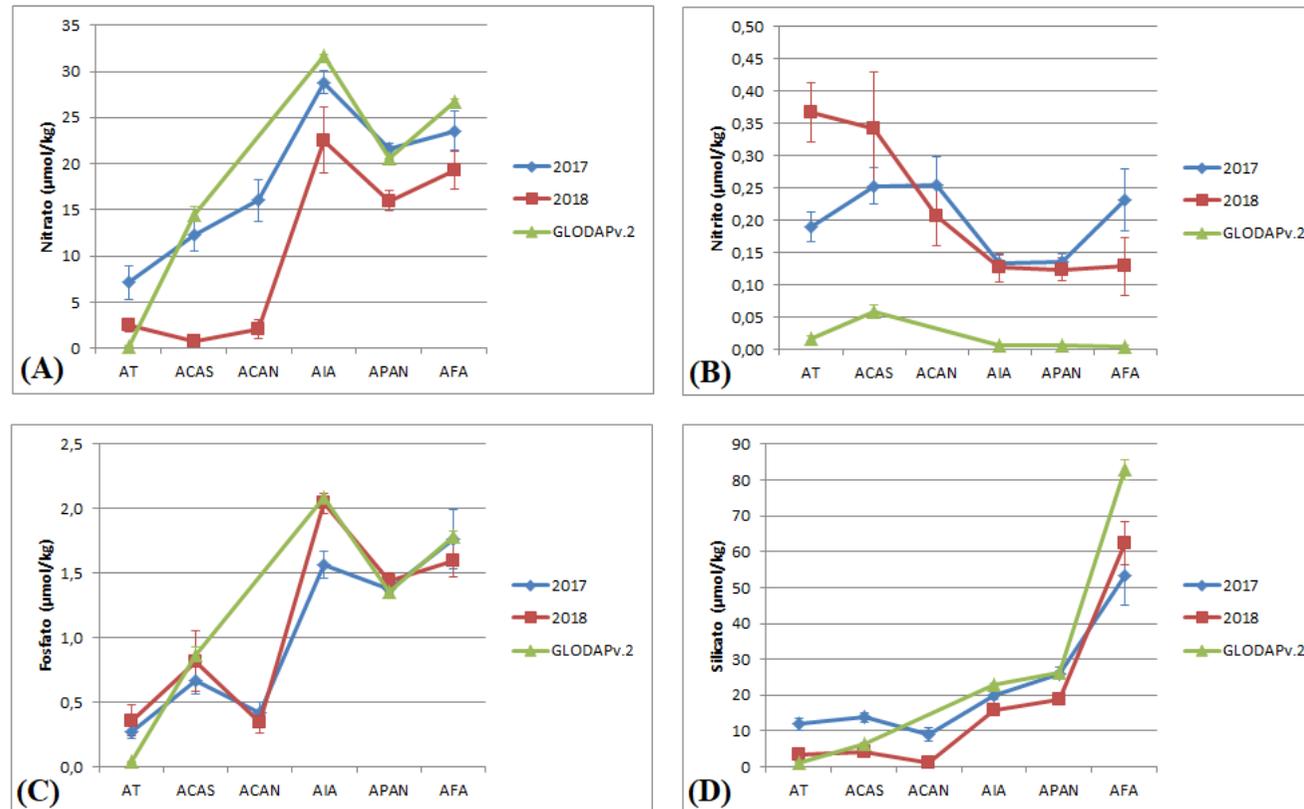
De acordo com a figura 25a, é possível observar que os dados de nitrato de 2017, 2018 e do GLODAPv.2 variam bastante entre os três conjuntos de dados nas seis massas de água identificadas na área de estudo. Contudo, as análises estatísticas sugerem que, com exceção da

APAN, as concentrações de nitrato dos dois conjuntos de dados PIRATA são significativamente similares; enquanto no caso da APAN os três conjuntos de dados diferem significativamente um do outro ($p < 0,05$) (Anexo B).

Os dados de concentração média de nitrito também apresentaram uma grande diferença entre as bases de dados, dessa vez entre os dois anos dos dados PIRATA e o GLODAPv.2 (Fig. 25b, anexo B). Os dados do GLODAP apresentaram concentrações extremamente baixas ($< 0,5 \mu\text{mol/kg}$) para todas as massas d'água, principalmente a AIA, a APAN e a AFA. Já em 2017 e 2018 a média variou entre 0,1 e $0,35 \mu\text{mol/kg}$. Apesar da diferença entre as concentrações, todas as bases de dados apresentaram variação entre as diferentes massas d'água na mesma proporção, com mais nitrito na AT e nas águas centrais, e menos nitrito nas massas de água restantes, com exceção da AFA em 2017 que apresentou média alta que em 2018. Além disso, ao contrário dos conjuntos de dados PIRATA, o nitrito no conjunto GLODAPv.2 apresentou erros menores (Fig. 25b).

As concentrações médias de fosfato e silicato ficaram bem parecidas comparando as três bases de dados (Figs. 25c,d). Das poucas diferenças que podem ser observadas nos gráficos desses dois parâmetros, vale destacar que a AIA, em 2017, apresentou valores de fosfato $0,5 \mu\text{mol/kg}$ abaixo em relação a 2018 e ao GLODAPv.2 (Anexo B); e a AFA, que na base de dados do GLODAPv.2 apresentou uma média de $80 \mu\text{mol/kg}$ de silicato, enquanto em 2017 e em 2018 os valores de concentração média para a AFA foram de aproximadamente 55 e $60 \mu\text{mol/kg}$, respectivamente (Anexo B).

Figura 25 - Gráficos de comparação da média de concentração e erro padrão de (A) nitrato, (B) nitrito, (C) fosfato e (D) silicato entre as três bases de dados utilizadas nesse trabalho: PIRATA 2017, PIRATA 2018 e GLODAPv.2.

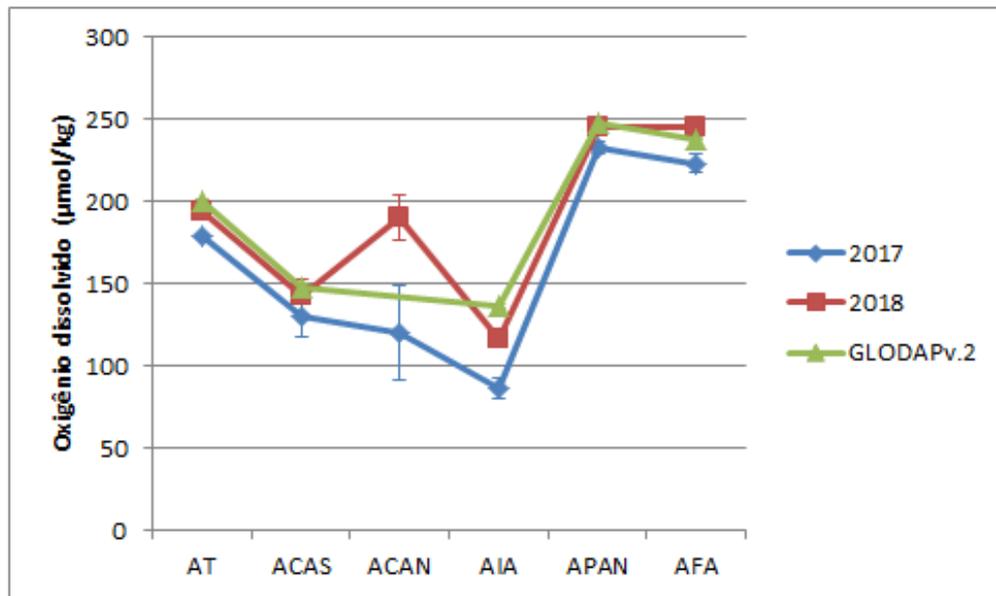


Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

A comparação entre as três bases de dados feitas para as concentrações de oxigênio dissolvido mostrou que o mesmo foi o segundo parâmetro que menos variou entre elas, atrás apenas do fosfato (Fig. 26, anexo B). Ainda assim, foi possível notar que em 2017 as médias tiveram um valor um pouco inferior em relação ao GLODAP e ao ano de 2018 para todas as massas d'água.

Figura 26 - Gráfico de comparação da média de concentração e erro padrão de oxigênio dissolvido entre as três bases de dados utilizadas nesse trabalho: PIRATA 2017, PIRATA 2018 e GLODAPv.2.



Legenda: AT – Água Tropical; ACAS – Água Central do Atlântico Sul; ACAN – Água Central do Atlântico Norte; AIA - Água Intermediária Antártica; APAN – Água Profunda do Atlântico Norte; AFA – Água de Fundo Antártica.

Fonte: O Autor, 2021

Os dados biogeoquímicos foram comparados também com os dados termohalinos de temperatura, salinidade e densidade potencial do CTD-O₂ em uma tabela que sintetiza as principais informações relativas a cada um desses parâmetros (n amostral, média, desvio padrão e valores máximo e mínimo), atuando como um importante material para a caracterização geral das massas d'água no Atlântico Equatorial Oeste (Anexo C).

Outro dado interessante que pode ser observado nos gráficos de comparação, é que para o nitrato e o fosfato, a proporção da concentração varia de forma bastante semelhante entre as diferentes massas de água, principalmente nas bases de dados de 2017 do GLODAPv.2. Na tabela V é possível observar que, com exceção da AT e das águas centrais, os dados do GLODAPv.2 e de 2017 apresentam uma razão N:P bastante próxima da razão N:P estabelecida por Redfield, que é de 16:1. Já em 2018 essa razão não apresentou um

resultado conforme o esperado, que pode ter como causa o baixo n amostral para os dados de concentração de nitrato nesse ano.

Tabela 5 – Média de concentração de nitrogênio em $\mu\text{mol/kg}$ em cada massa d'água para cada 1 $\mu\text{mol/kg}$ de fósforo, nas bases de dados GLODAPv.2, PIRATA XVII (2017) e PIRATA XVIII (2018).

	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA
GLODAPv.2	5,75	16,69	-	15,20	15,18	14,96
2017	26,43	18,37	38,11	18,39	15,65	13,37
2018	7,13	0,86	6,15	11,04	11,07	12,07

Fonte: O autor, 2021.

4 DISCUSSÃO

Através dos resultados obtidos neste estudo e no produto de dados GLODAP, as massas de água foram analisadas com o objetivo de estabelecer suas características biogeoquímicas próprias, como as concentrações médias de nutrientes e oxigênio dissolvido. Para isso foram avaliadas, individualmente, cada uma das massas de água presentes na região de estudo, buscando constatar se um ou mais nutrientes poderiam auxiliar na identificação e no reconhecimento das mesmas.

4.1 Água Tropical (AT)

De acordo com todos os resultados observados, tanto na base de dados do PIRATA, como no produto de dados GLODAPv.2, a AT é a massa de água que apresenta a menor concentração média de nitrato, fosfato e silicato, quando comparada às outras massas de água (Figs. 15, 17, 18, 22, 23). Por se tratar de uma região superficial e de alta insolação, na AT são encontrados diversos tipos de organismo fotossintetizantes que são de extrema importância para o ciclo dos nutrientes inorgânicos, uma vez que são responsáveis por assimila-los para realizar suas funções metabólicas. Assim, a baixa média de concentração de nitrato, fosfato e silicato observada na AT, de acordo com as tabelas II e IV, já é esperada, uma vez que organismos fotossintetizantes estão sempre os assimilando nutrientes nessa profundidade, caracterizando-a como oligotrófica (BRISTOW *et al.*, 2017; EMERSON; HEDGES, 2008; MILLERO, 1996).

Já a quantidade de nitrito, apesar de baixa em toda a coluna d'água, apresentou pontos isolados com concentração um pouco mais elevada, principalmente nos dados de 2017 e 2018 (Fig. 17). Porém, apesar de apresentar essas concentrações um pouco mais elevadas quando comparada a massas de água profundas e de fundo, ela ainda apresenta concentrações inferiores as águas centrais, que apresentaram valores mais elevados em 2017 e na base de dados GLODAPv.2. Concentrações mais elevadas de nitrito em uma determinada região podem ser resposta a processos como elevada taxa de produção primária, bem como fixação de nitrogênio atmosférico por plâncton diazotrófico (ZAKEM *et al.*, 2018).

A AT apresenta a mais alta concentração de oxigênio em comparação com as outras três massas d'água da porção superior dos oceanos (ACAS, ACAN e AIA). A concentração

média de oxigênio dissolvido na AT é de 200 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018 e na base de dados GLODAPv.2 (Figs. 19 e 24), e de 180 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017 (Fig. 19). A elevada concentração de oxigênio nessa massa d'água está diretamente ligada a troca gasosa que ocorre entre o oceano e a atmosfera, bem como por ser um produto gerado pelo processo de fotossíntese (CARPENTER; ARCHER; BEALE, 2012).

4.2 Água Central do Atlântico Sul (ACAS)

De acordo com os resultados, a ACAS possui baixa concentração de nutrientes, se comparada às massas de água inferiores. A concentração de silicato não varia quando comparada com a AT (acima) e com a ACAN (ao norte). Essa baixa variação de silicato ao longo das três massas d'água dificulta um pouco sua identificação através do silicato, uma vez que as três massas de água apresentam concentrações semelhantes. Já em relação à AIA, pode-se notar que a ACAS apresenta concentração média cerca de 10 vezes mais baixa (Tabela IV), que talvez possa auxiliar na identificação com uma escala direcionada apenas a essas massas d'água, juntamente com a AT.

Os dados de concentração de nitrito na ACAS são diferentes nas três bases de dados utilizadas nesse estudo, mas, de modo geral, apresentam as maiores concentrações entre todas as massas de água, com exceção de 2018 (Fig. 25b). Em 2017, a concentração predominante foi de aproximadamente 0,25 $\mu\text{mol/kg}$, com pontos isolados de aproximadamente 0,3 $\mu\text{mol/kg}$. Em 2018, a ACAS apresentou uma extensa faixa de nitrito com concentrações aproximadas de 0,35 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 16c). Já na base de dados do GLODAPv.2, as concentrações foram as mais baixas, variando entre 0 e 0,1 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 22c). Da mesma forma que na AT, as concentrações mais elevadas de nitrito na ACAS também podem ser consequência de processos de fixação de nitrogênio atmosférico por plâncton diazotrófico (ZAKEM *et al.*, 2018).

Os dados de concentração de nitrato e fosfato foram considerados os melhores marcadores para diferenciar a ACAS das águas subjacentes e sobrejacentes. A seção em 35° W do GLODAPv.2 mostra que a ACAS apresenta concentrações de nitrato e de fosfato que variam entre 10 e 20 $\mu\text{mol/kg}$; e 0,5 e 1,5 $\mu\text{mol/kg}$, respectivamente (Figs. 22a e 23a). Os resultados das duas campanhas PIRATA mostram que as concentrações de fosfato em 2018 (Fig. 17c) e de nitrato em 2017 (Fig. 15a) também apresentam valores de concentração

bastante similar aos observados no GLODAPv.2, que por sua vez são estatisticamente significativos ($p > 0,05$) (Anexo B). Em 2018, o nitrato apresentou apenas um valor de concentração para a camada da ACAS, o que limitou sua análise apenas ao conjunto de dados PIRATA de 2017 e GLODAPv.2.

A ACAS apresentou concentrações médias de oxigênio dissolvido similares entre as três bases de dados (Tabelas III e IV), resultado observado também de acordo com os p-valores que comparam os três conjuntos (Anexo B). Esses três conjuntos de dados apresentaram concentração média de O_2 de 130 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017, 142 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018 e 147 $\mu\text{mol/kg}$ no GLODAPv.2. De maneira geral, foi possível notar que a ACAS apresenta uma concentração de O_2 dissolvido intermediária entre a AT e a ACAN, e bem mais alta do que a AIA.

4.3 Água Central do Atlântico Norte (ACAN)

A ACAN é a massa d'água com menor distribuição pela área de estudo, e localizada entre aproximadamente 100 e 200 metros de profundidade. A ACAN não foi observada no produto de dados GLODAPv.2 já que os dados não se estendem além de 10° N. Isto limita a comparação com os dados PIRATA-BR de 2017 e 2018.

Em relação aos nutrientes presentes nas águas centrais, foi possível observar que, com exceção do nitrato, a ACAN apresenta uma concentração de nutrientes um pouco mais baixa do que a ACAS, com uma média aproximada de 0,25, 0,4 e 10 $\mu\text{mol/kg}$ para nitrito, fosfato e silicato, respectivamente, para o ano de 2017 (Tabela III); enquanto para o ano de 2018 os valores médios para esses três nutrientes foram em média 0,2, 0,35 e 1,15 $\mu\text{mol/kg}$, respectivamente (Tabela III).

A partir dos dados médios anteriormente citados, é possível notar que o silicato apresentou valores significativamente diferentes em relação aos dois anos (Tabela II; Fig. 25d). Outro nutriente que também apresentou diferença significativa entre os dois anos na ACAN foi o nitrato, que em 2017 apresentou concentração média de 16 $\mu\text{mol/kg}$, enquanto em 2018 foi de aproximadamente 2 $\mu\text{mol/kg}$ (Tabela III) Essa diferença entre as duas bases de dados também pode ser observada através do teste estatístico de Dunn's. (Anexo B).

Ao contrário do que foi observado nos dados do CTD- O_2 , em 2018, os dados de oxigênio dissolvido das amostras na ACAN (~ 190 $\mu\text{mol/kg}$) foram maiores do que na ACAS

(~ 140 $\mu\text{mol/kg}$) no mesmo ano. Isso pode ter ocorrido pelas amostras terem sido coletadas em sua maioria próximas ao limite com a AT, que apresentou maiores concentrações de oxigênio de maneira geral. Já em 2017, a concentração média de oxigênio foi de aproximadamente 120 $\mu\text{mol/kg}$, um pouco menor do que a ACAS para o mesmo ano, que foi de aproximadamente 130 $\mu\text{mol/kg}$ (Tabela III). Os valores mais baixos de concentração de O_2 nessa parte da ACAN presente na área de estudo podem estar relacionados à influência da Zona de Mínimo Oxigênio situada entre aproximadamente 200 e 400 metros de profundidade. Apesar de apresentar médias bem diferentes nos dois anos, é possível observar que os erros padrões das médias de O_2 para cada ano são os maiores entre as massas de água para esse parâmetro (Fig. 26); e que os dois conjuntos de dados são estatisticamente similares (Anexo B).

4.4 Água Intermediária Antártica (AIA)

A AIA é a massa de água que apresenta as maiores concentrações de fosfato e nitrato, e isso pode ser observado nas seções PIRATA em ambos os anos, que são estatisticamente similares ($p > 0,05$) (Anexo B), e no GLODAPv.2 (Figs. 15, 17, 22 e 23; tabelas III e IV), tornando-os os melhores marcadores para a AIA. Em 2017, as concentrações de nitrato foram bastante elevadas, variando de 20 a 40 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 15a,b), apresentando um valor médio de aproximadamente 30 $\mu\text{mol/kg}$ (Tabela III). Em 2018, é possível observar na seção a presença de valores distribuídos em torno de 25 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 15c,d), sendo que a massa d'água tem um valor médio de aproximadamente 22 $\mu\text{mol/kg}$ (Tabela III). Já a seção GLODAPv.2 apresenta uma distribuição bastante contínua, com uma grande porção ao centro da massa d'água com concentrações de aproximadamente 40 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 22a,b).

O fosfato apresenta uma distribuição similar à do nitrato na AIA. Os dados do GLODAPv.2 e de 2018 também apresentaram uma distribuição similar (Anexo B), com a concentração da massa de água variando entre 1,5 e 2,5 $\mu\text{mol/kg}$ (Figs. 15c, 17c, 22a e 23a). O núcleo da AIA apresenta as maiores concentrações de fosfato, em torno de 2,5 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 23a). Durante o ano de 2017, é possível notar apenas uma região de maior concentração (~ 2,3 $\mu\text{mol/kg}$) entre as latitudes 06 e 13 °N, enquanto todo o restante da porção ao sul apresenta valores de aproximadamente 1,5 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 17a).

Através da distribuição do fosfato e do nitrato na seção GLODAPv.2, é possível notar que a distribuição de nitrato e fosfato na AIA é parabólica, indicando que as concentrações desses nutrientes são menores nas bordas da massa de água e maiores no centro. Esse padrão de distribuição indica que a massa de água sofre um processo de mistura em suas bordas, alterando a concentração de nutrientes nessa região (MAMAYEV, 1975).

De acordo com os dados do trabalho, é possível notar que tanto o nitrato, como o fosfato, possuem uma faixa de variação bastante característica na AIA, e que pode ser usada para diferencia-la das massas de água adjacentes. Já o nitrito e o silicato não apresentam uma concentração específica nessa massa de água que a diferencia das sobrejacentes e subjacentes, não os tornando bons traçadores, nesse caso.

No caso no nitrito, a AIA apresentou alguma diferenciação se comparada a ACAS, localizada acima dela, apenas no ano de 2018. Já em relação ao silicato, a AIA não apresentou teores de concentração que fosse possível para diferenciá-las das massas de água adjacentes. Através dos dados de seção do GLODAPv.2, foi possível notar que os valores de concentração do silicato na AIA são levemente menores em sua porção superior (Fig. 23c).

A AIA é a massa de água que apresentou a menor concentração de oxigênio dentre todas as presentes na área de estudo, principalmente em sua porção superior (200 – 800 m). Suas concentrações médias foram de aproximadamente 86 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017; 116 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018; e 136 $\mu\text{mol/kg}$ no GLODAPv.2 (Tabela IV). No ano de 2018 e na base de dados GLODAPv.2, é possível observar em seus respectivos gráficos de seção que a região da massa d'água com as menores concentrações de O_2 se encontra entre aproximadamente 03°N e 10°N (Figs. 19c, 24a). Em contrapartida, em 2017 valores ainda menores de oxigênio puderam ser observados ao longo de toda a massa d'água no gráfico de seção (Fig. 19a).

A baixa concentração de oxigênio, principalmente na porção norte da AIA na área de estudo (38°W), pode estar relacionada à região de influência da zona de mínimo oxigênio presente na costa oeste africana, que apresenta concentração média de 50 $\mu\text{mol/kg}$ em seu núcleo, entre 200 e 500 m (Fig. 9) (PEÑA-IZQUIERDO *et al.*, 2015). A AIA é uma massa de água que apresenta alta concentração de O_2 dissolvido (250 $\mu\text{mol/kg}$) (HARTIN *et al.*, 2011), ventilando o Atlântico Tropical e atuando como fonte de oxigênio na região, reduzindo sua própria concentração de oxigênio (SCHMIDTKO; JOHNSON, 2012). Porém, a AIA vem experimentando também outros processos de desoxigenação ao longo dos anos devido ao aquecimento global, levando a uma tendência de queda na concentração de oxigênio nas regiões tropical e subtropicais do Atlântico (SANTOS *et al.*, 2016; SCHMIDTKO; JOHNSON, 2012).

A ZMO influencia diretamente o oceano equatorial com suas baixas concentrações de O_2 em conjunto com os sistemas de correntes superficiais e sub-superficiais que atuam no Atlântico Equatorial (PEÑA-IZQUIERDO *et al.*, 2015; STRAMMA *et al.*, 2008). Nesse contexto, a principal corrente que seria responsável pelo transporte de águas mais pobres em oxigênio seria a Corrente Norte Equatorial, que flui na latitude aproximada de 10° N no Atlântico Equatorial, na direção leste – oeste e no sentido oeste; e entre a superfície e aproximadamente 400 m de profundidade (LUMPKIN; GARZOLI, 2005; STRAMMA *et al.*, 2003).

4.5 Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)

A APAN pode ser facilmente diferenciada das suas águas adjacentes de acordo com as concentrações de nitrato e fosfato, uma vez que a AIA apresenta concentrações muito maiores e a AFA um pouco maiores (Tabelas III e IV). O nitrato apresentou valores de concentração constantes e contínuos em 2017 e nos dados do GLODAPv.2 (Figs. 15b e 22b), de aproximadamente $20 \mu\text{mol/kg}$ (Tabelas III e IV), com pequenas regiões isoladas de aproximadamente $30 \mu\text{mol/kg}$. Em 2018, os dados apresentam uma faixa de menor concentração, com uma média de aproximadamente $16 \mu\text{mol/kg}$ (Tabela III). Contudo, os resultados de concentração de nitrato entre os três conjuntos de dados são estatisticamente não significativos ($p < 0,05$) (Anexo B).

O fosfato também apresenta um padrão de distribuição contínuo e constante ao longo de toda a APAN para as três bases de dados (Figs. 17b,d e 23b). A diferença entre as bases de dados do PIRATA e a do GLODAPv.2 é que as do PIRATA apresentam alguns poucos pontos isolados onde a concentração é um pouco maior. Dessa forma, os resultados observados no trabalho também foram observados por (KAWASE; SARMIENTO, 1985) que constataram que, considerando a faixa de profundidade e densidade na qual ocupa em todo o Atlântico, a APAN é caracterizada pela diminuição dos teores de nutrientes em relação às massas d'água adjacentes. Outro dado interessante é que os mesmos autores citam também que esse padrão de distribuição na APAN coincide com aumento relativo nas concentrações de oxigênio dissolvido. Já o nitrito apresenta baixa concentração ao longo de toda a massa d'água, e a mesma faixa de variação das massas d'água adjacentes.

Em 2018, a APAN apresentou baixas concentrações de silicato, em uma faixa que varia entre 5 e 30 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 18d; tabela III). Por outro lado, os dados de 2017 e do GLODAPv.2 apresentam maior similaridade (Anexo B), e compartilham uma faixa de concentração mais ampla (15 – 60 $\mu\text{mol/kg}$) (Fig. 18b; tabelas III e IV). A base de dados do GLODAPv.2 apresenta diferentes camadas com faixas de concentração distintas (Fig. 23d). Na porção superior, os valores de silicato variam entre 10 e 20 $\mu\text{mol/kg}$; na do meio, os valores variam entre 20 e 30 $\mu\text{mol/kg}$; enquanto na inferior, a variação ocorre entre aproximadamente 30 e 45 $\mu\text{mol/kg}$. As três diferentes camadas da APAN podem ser associadas ao conceito de APAN inferior, média e superior utilizado na literatura e demonstrado por HERRFORD; BRANDT e ZENK (2017) através dessas profundidades. Nesse contexto, as componentes superior, média e inferior na APAN teriam passado por diferentes processos de formação em regiões distintas, sendo elas o mar Mediterrâneo (ARHAN *et al.*, 1998); a parte leste da Islândia; o estreito da Dinamarca (DICKSON; BROWN, 1994), respectivamente.

Na região de estudo, a APAN é a massa de água que mais se destaca em relação a concentração de oxigênio dissolvido, uma vez que, nas três bases de dados, apresentou as maiores médias de concentrações desse parâmetro. Essa média foi de aproximadamente 250 $\mu\text{mol/kg}$ em 2018 e na base de dados GLODAPv.2 (Tabelas III e IV), e de 230 $\mu\text{mol/kg}$ em 2017 (Tabela III). Os elevados valores de O_2 apresentados pela APAN podem ser explicados pelo fato das massas de água que formam a APAN, como a Água do Mar do Labrador, ser formada em contato direto com a atmosfera, indicando processo de ventilação recente (TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a). Além disso, a baixa temperatura que a APAN apresenta durante sua formação auxilia na manutenção da alta concentração de O_2 , visto que aumenta a solubilidade do gás (HARTMANN, 2016; TALLEY, Lynne D. *et al.*, 2011a).

4.6 Água de Fundo Antártica (AFA)

A AFA foi observada apenas ao sul da Cordilheira Meso-oceânica e apresenta valores consideravelmente elevados de nitrato e fosfato, 30 e 2 $\mu\text{mol/kg}$, respectivamente (Figs. 15b,d; 17b,d; 22b e 23b), embora não sejam as maiores concentrações, uma vez que a AIA tem esses dois nutrientes bem mais concentrados. Porém, se comparado à massa de água localizada acima (APAN), esses dois nutrientes já seriam um bom indicador pra diferenciá-

las, já que a concentração desses nutrientes na APAN é menor. O nitrito, assim como em quase toda a coluna d'água, está presente em baixas concentrações e não aparenta ser um bom traçador.

Porém, o melhor nutriente para reconhecer e identificar a AFA de acordo com os resultados nas três bases de dados é o silicato, uma vez que a concentração desse nutriente na massa d'água é bem alta (varia entre 50 e 100 $\mu\text{mol/kg}$, sendo seu núcleo em torno de 100 $\mu\text{mol/kg}$) e com uma grande diferença se comparada a massa d'água adjacente (APAN) (Tabelas III e IV). A alta variação de concentração de sílica observada na AFA é também evidenciada pelo erro padrão, que é o maior entre as massas de água para os três conjuntos de dados (Fig. 25d).

De acordo com BOSWELL *et al.* (2002), a riqueza de silicato dissolvido na AFA é proveniente da dissolução de frústulas de diatomáceas, que por sua vez são estruturas de sustentação compostas principalmente por sílica biogênica de organismos planctônicos abundantes no oceano Austral. Ao morrerem, esses organismos 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 (TREGUER *et al.*, 1995) e o contato direto com o fundo leva a um enriquecimento de silicato na AFA por liberação diagenética (BOSWELL *et al.*, 2002).

A AFA foi a massa de água que apresentou a segunda maior concentração de oxigênio dissolvido na região, ficando abaixo apenas da APAN nas três bases de dados. Apesar da diferença média de concentração de O_2 entre essas duas massas de água não ser muito alta, como pode ser observado nas tabelas III e IV, os gráficos de seção, principalmente de 2017 e da seção GLODAP, mostram que na região Equatorial a AFA possui uma assinatura visual bem característica, que pode auxiliar na sua caracterização. Assim como no caso da APAN, a exposição da AFA à atmosfera durante sua formação aumenta a concentração de oxigênio, que se mantém elevada devido a baixa temperatura da massa d'água que aumenta a solubilidade do gás (GORDON, 2001; HARTMANN, 2016). As concentrações de O_2 um pouco a baixo do que as da APAN na região equatorial podem ser resposta ao processo de oxidação da matéria orgânica que ocorre no oceano profundo (GORDON, 2001).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizar dados biogeoquímicos a fim de caracterizar as massas de água de uma determinada região se mostrou uma proposta interessante para averiguar se mesmo parâmetros não conservativos podem caracterizar uma assinatura em diferentes massas de água, ampliando ainda mais as metodologias voltadas para esse campo de estudo. De acordo com a análise dos resultados, foi possível perceber que os parâmetros biogeoquímicos podem ser usados para auxiliar na caracterização das massas de água, uma vez que foram observadas concentrações específicas de determinados nutrientes e de oxigênio dissolvido, com exceção do nitrito, já que possui baixa concentração ao longo de praticamente toda a coluna d'água.

A AT é uma massa de água que pode ser identificada pela baixa, ou quase nula, concentração dos nutrientes que foram analisados no trabalho. A ACAS apresentou concentrações de nitrato e fosfato mais elevadas que a AT, porém bem mais baixas que a AIA, sendo assim possível de ser identificada por essa faixa intermediária. Esse caráter de atuar como uma massa de água que apresenta concentrações intermediárias entre as massas de água adjacentes também foi o caso da ACAN, que apresentou concentrações de nutrientes e O₂ bem similares a da ACAS só que um pouco mais baixas, com exceção do nitrato. A AIA foi a massa de água que apresentou as maiores concentrações de fosfato e nitrato, e pode ser facilmente identificada e caracterizada a partir desses nutrientes. Além disso, a AIA apresentou também a menor concentração de oxigênio dissolvido, principalmente acima de 05° N. Para essas quatro massas de água, a concentração de silicato não apresentou grande variação, o que dificulta sua utilização para caracteriza-las.

Em contrapartida, comparando com as outras três massas d'água localizadas acima, a APAN possui uma assinatura de silicato diferenciada em três diferentes camadas, o que pode ser útil em estudos que visem a caracterização dessa massa de água de forma mais detalhada. Além disso, a APAN também pode ser diferenciada das massas de água adjacentes de acordo com as concentrações de nitrato, fosfato e oxigênio dissolvido, que são mais baixas.

Na AFA, o nutriente que mais se destacou foi o silicato, sendo a única massa de água na área de estudo que apresentou concentrações bastante elevadas do mesmo, tornando-o bastante útil para a identificação. O fosfato e o nitrato também possuem uma assinatura diferenciada na AFA quando comparada com a APAN, que apresenta concentrações mais baixas desses nutrientes, podendo auxiliar também no processo. O oxigênio, apesar de ser alto

tanto na AFA, como na APAN, apresentou concentrações um pouco mais baixas na AFA, diferenciando também as duas massas de água.

Por fim, vale destacar que trabalhar com dados coletados durante as campanhas PIRATA XVII e XVIII em conjunto com dados de bases de dados oceanográficas, como foi o caso do GLODAPv.2, possibilitou compreender as massas de água na região sob diferentes perspectivas, o que contribuiu ainda mais com o objetivo central do trabalho. Espera-se, então, que este estudo possa contribuir com investigações futuras voltadas para identificação e análise das massas de água na região, ou mesmo servir de base para estudos que tenham como objetivo detalhar ainda mais a caracterização das massas de água.

REFERÊNCIAS

- AMANTE, C; EAKINS, B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. **NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24**, [s. l.], n. March, p. 19, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.769615>
- ARHAN, M. *et al.* Hydrographic sections across the Atlantic at 7°30N and 4°30S. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 45, n. 6, p. 829–872, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00001-6)
- AZANEU, Marina *et al.* Trends in the deep Southern Ocean (1958-2010): Implications for Antarctic Bottom Water properties and volume export. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 118, n. 9, p. 4213–4227, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgrc.20303>
- AZAR, Elias *et al.* Source waters contribution to the tropical Atlantic central layer: New insights on the Indo-Atlantic exchanges. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], p. 103450, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103450>
- BOSWELL, S.M. *et al.* 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: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 575–590, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00067-X)
- BOURLÈS, Bernard *et al.* PIRATA: A Sustained Observing System for Tropical Atlantic Climate Research and Forecasting. **Earth and Space Science**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 577–616, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018EA000428>
- BRAGA, Elisabete de Santis; NIENCHESKI, Luís Felipe H. **Composição das massas de água e seus potenciais produtivos na área entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS)**. [S. l.]: Edusp, 2006.
- BRANDT, P. *et al.* On the role of circulation and mixing in the ventilation of oxygen minimum zones with a focus on the eastern tropical North Atlantic. **Biogeosciences**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 489–512, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-12-489-2015>
- BRISTOW, Laura A. *et al.* Nutrients that limit growth in the ocean. **Current Biology**, [s. l.], v. 27, n. 11, p. R474–R478, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.030>
- BRUTO, Leonardo *et al.* Variability of CO₂ fugacity at the western edge of the tropical Atlantic Ocean from the 8°N to 38°W PIRATA buoy. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, [s. l.], v. 78, n. October, p. 1–13, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2017.01.003>

- CARPENTER, Lucy J.; ARCHER, Stephen D.; BEALE, Rachael. Ocean-atmosphere trace gas exchange. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 41, n. 19, p. 6473, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c2cs35121h>
- CHAPMAN, Piers. The WOCE Data Resource. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 79, n. 6, p. 1037–1042, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<1037:TWDR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<1037:TWDR>2.0.CO;2)
- DICKSON, Robert R.; BROWN, Juan. The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 99, n. C6, p. 12319, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/94JC00530>
- DUNCAN, Benét *et al.* Developing ocean climate change indicators for the north-central California coast and ocean. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 252, n. February, p. 109343, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109343>
- EMERSON, Steven; HEDGES, John. **Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511793202>
- EMERY, W.J. Water Types And Water Masses. *In*: **ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES**. [S. l.]: Elsevier, 2001. p. 3179–3187. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0108>
- EMERY, William J. Water Types and Water Masses. *In*: **ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES**. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 169–179. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.04426-2>
- FAY, Michael P.; PROSCHAN, Michael A. Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. **Statistics Surveys**, [s. l.], v. 4, n. none, p. 1–39, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1214/09-SS051>
- FERNÁNDEZ-CASTRO, Bieito; MOURIÑO-CARBALLIDO, Beatriz; ÁLVAREZ-SALGADO, Xosé Antón. Non-redfieldian mesopelagic nutrient remineralization in the eastern North Atlantic subtropical gyre. **Progress in Oceanography**, [s. l.], v. 171, n. October 2018, p. 136–153, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.12.001>
- FERREIRA, Maria Luiza De Carvalho; KERR, Rodrigo. Source water distribution and quantification of North Atlantic Deep Water and Antarctic Bottom Water in the Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, [s. l.], v. 153, p. 66–83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.003>
- GORDON, A.L. Bottom Water Formation. *In*: **ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES**. [S. l.]: Elsevier, 2001. p. 334–340. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0006>
- GOTTSCHALK, Julia *et al.* Southern Ocean link between changes in atmospheric CO₂ levels and northern-hemisphere climate anomalies during the last two glacial periods. **Quaternary Science Reviews**, [s. l.], v. 230, n. xxxx, p. 106067, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106067>

- GRODSKY, Semyon A. *et al.* Year-to-year salinity changes in the Amazon plume: Contrasting 2011 and 2012 Aquarius/SACD and SMOS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 140, p. 14–22, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.033>
- HAMMER, Øyvind; HARPER, David A.T.; RYAN, Paul D. PAST: PALEONTOLOGICAL STATISTICS SOFTWARE PACKAGE FOR EDUCATION AND DATA ANALYSIS. **Current Science**, [s. l.], 2001.
- HANSEN, H. P. Determination of oxygen. *In*: METHODS OF SEAWATER ANALYSIS. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007. p. 75–89. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527613984.ch4>
- HANSEN, H. P.; KOROLEFF, F. Determination of nutrients. *In*: METHODS OF SEAWATER ANALYSIS. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007. p. 159–228. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527613984.ch10>
- HARTIN, Corinne A. *et al.* Formation rates of Subantarctic mode water and Antarctic intermediate water within the South Pacific. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 58, n. 5, p. 524–534, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.02.010>
- HARTMANN, Dennis. **Global Physical Climatology**. 2nd. ed. [S. l.]: Elsevier Science, 2016.
- HERRFORD, Josefine; BRANDT, Peter; ZENK, Walter. Property changes of deep and bottom waters in the Western Tropical Atlantic. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 124, n. 15, p. 103–125, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.007>
- HOGG, Nelson G.; JOHNS, William E. Western boundary currents. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 33, n. S2, p. 1311–1334, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/95RG00491>
- JACKETT, David R.; MCDUGALL, Trevor J. A Neutral Density Variable for the World's Oceans. **Journal of Physical Oceanography**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 237–263, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<0237:ANDVFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<0237:ANDVFT>2.0.CO;2)
- KARSTENSEN, Johannes; STRAMMA, Lothar; VISBECK, Martin. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. **Progress in Oceanography**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 331–350, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.05.009>
- KAWASE, M.; SARMIENTO, J. L. Nutrients in the Atlantic thermocline. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 90, n. C5, p. 8961, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08961>
- KERR, Rodrigo *et al.* Three decades of deep water mass investigation in the Weddell Sea (1984–2014): Temporal variability and changes. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, [s. l.], v. 149, p. 70–83, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.12.002>

KÖRTZINGER, Arne. A significant CO₂ sink in the tropical Atlantic Ocean associated with the Amazon River plume. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 30, n. 24, p. 2–5, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003GL018841>

KOSTOV, Yavor; ARMOUR, Kyle C.; MARSHALL, John. Impact of the Atlantic meridional overturning circulation on ocean heat storage and transient climate change. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 2108–2116, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013GL058998>

KRESS, Nurit; HERUT, Barak. 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 Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 48, n. 11, p. 2347–2372, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00022-X)

KRUSKAL, William H.; WALLIS, W. Allen. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

LANGDON, C. Determination of Dissolved Oxygen in Seawater By Winkler Titration Using the Amperometric Technique. **GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A collection of Expert Reports and Guidelines**, [s. l.], p. 1–18, 2010.

LEFÈVRE, Nathalie *et al.* Impact of physical processes on the seasonal distribution of the fugacity of CO₂ in the western tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 119, n. 2, p. 646–663, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013JC009248>

LEFÈVRE, Nathalie *et al.* Net Heterotrophy in the Amazon Continental Shelf Changes Rapidly to a Sink of CO₂ in the Outer Amazon Plume. **Frontiers in Marine Science**, [s. l.], v. 4, n. SEP, p. 1–16, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00278>

LIBES, Susan M. **Introduction to Marine Biogeochemistry**. Seconded. [S. l.]: Academic Press, 2009.

LIU, Mian; TANHUA, Toste. Characteristics of Water Masses in the Atlantic Ocean based on GLODAPv2 data. **Ocean Science Discussions**, [s. l.], n. January, p. 1–43, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/os-2018-139>

LIU, Mian; TANHUA, Toste. Distribution of Water Masses in the Atlantic Ocean based on GLODAPv2. **Ocean Science Discussions**, [s. l.], n. January, p. 1–32, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/os-2018-140>

LUMPKIN, Rick; GARZOLI, Silvia L. Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 495–518, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>

MAMAYEV, O. I. **Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters**. [S. l.]: Elsevier Science, 1975.

MAYORGA, Emilio *et al.* Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, [s. l.], v. 436, n. 7050, p. 538–541, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature03880>

MILLERO, F J. **Chemical Oceanography**. Seconded. [S. l.]: Taylor & Francis, 1996. (Marine Science Series).*E-book*.

MITCHELL, Todd P.; WALLACE, John M. The Annual Cycle in Equatorial Convection and Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 1140–1156, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<1140:TACIEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<1140:TACIEC>2.0.CO;2)

MONTES, Manuel de Jesus Flores. **Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos: a importância do fluxo de difusão dos nutrientes para a biomassa do fitoplâncton na região oceânica do nordeste brasileiro**. 179 f. 2003. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2003.

MOORE, Stephanie K. *et al.* Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. **Environmental Health**, [s. l.], v. 7, n. Suppl 2, p. S4, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-S2-S4>

MOURA, Rodrigo L. *et al.* An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science Advances**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. e1501252, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501252>

OLSEN, Are *et al.* An updated version of the global interior ocean biogeochemical data product, GLODAPv2.2020. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 3653–3678, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3653-2020>

OLSEN, Are *et al.* GLODAPv2.2020 – the second update of GLODAPv2. **Earth System Science Data Discussions**, [s. l.], n. July, p. 1–41, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-2020-165>

OLSEN, Are *et al.* The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) – an internally consistent data product for the world ocean. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 297–323, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-8-297-2016>

ORSI, A.H.; JOHNSON, G.C.; BULLISTER, J.L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. **Progress in Oceanography**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 55–109, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00004-X)

OUDOT, C *et al.* On the crossing of the equator by intermediate water masses in the western Atlantic ocean: Identification and pathways of Antarctic Intermediate Water and Upper Circumpolar Water. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 104, n. C9, p. 20911–20926, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1999JC900123>

PEÑA-IZQUIERDO, Jesús *et al.* Water mass pathways to the North Atlantic oxygen minimum zone. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 120, n. 5, p. 3350–3372, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014JC010557>

PÉREZ, Fiz F. *et al.* Mixing analysis of nutrients, oxygen and dissolved inorganic carbon in the upper and middle North Atlantic ocean east of the Azores. **Journal of Marine Systems**, [s. l.], v. 16, n. 3–4, p. 219–233, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(97\)00108-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00108-5)

PICKARD, George L.; EMERY, William. Descriptive physical oceanography: An introduction. *In*: [S. l.: s. n.], 1990. p. 320.

POND, Stephen; PICKARD, George L. **Introductory Dynamical Oceanography**. Seconded. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.

POOLE, Robert; TOMCZAK, Matthias. Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 1895–1921, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00025-4)

RICHEY, J. E.; NOBRE, C.; DESER, C. Amazon River Discharge and Climate Variability: 1903 to 1985. **Science**, [s. l.], v. 246, n. 4926, p. 101–103, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.246.4926.101>

SANTOS, Guilherme Cordova *et al.* Influence of Antarctic Intermediate Water on the deoxygenation of the Atlantic Ocean. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, [s. l.], v. 76, p. 72–82, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.09.002>

SARDESSAI, S. *et al.* Nutrient characteristics of the water masses and their seasonal variability in the eastern equatorial Indian Ocean. **Marine Environmental Research**, [s. l.], v. 70, n. 3–4, p. 272–282, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.05.009>

SCHLITZER, R. **Ocean Data View**. [s. l.], 2021.

SCHMIDTKO, Sunke; JOHNSON, Gregory C. Multidecadal Warming and Shoaling of Antarctic Intermediate Water*. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 207–221, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00021.1>

SCHMITTNER, Andreas; CHIANG, John C.H.; HEMMING, Sidney R. Introduction: The ocean's meridional overturning circulation. *In*: GEOPHYSICAL MONOGRAPH SERIES. [S. l.: s. n.], 2007. v. 173, p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/173GM02>

SERVAIN, Jacques; PICAUT, Joël; BUSALACCHI, Antonio J. Interannual and Seasonal Variability of the Tropical Atlantic ocean depicted by Sixteen years of Sea-Surface Temperature and wind stress. *In*: ELSEVIER OCEANOGRAPHY SERIES. [S. l.: s. n.], 1985. v. 40, p. 211–237. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70712-8](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70712-8)

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [s. l.], v. 52, n. 3/4, p. 591, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2333709>

SHERMAN, Ellen. A Note on Multiple Comparisons Using Rank Sums. **Technometrics**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 255–256, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00401706.1965.10490253>

SIGNORINI, Sérgio R. Contribuição ao estudo da circulação e do transporte de volume da corrente do Brasil entre o Cabo de São Tomé e a Baía de Guanabara. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 157–220, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0373-55241976000200002>

SILVA, a. C. *et al.* Water masses and zonal current in the Western Tropical Atlantic in October 2007 and January 2008 (AMANDES project). **Ocean Science Discussions**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 1953–1976, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/osd-7-1953-2010>

SILVA, Alex Costa da; ARAÚJO, Moacyr; BOURLÈS, Bernard. Seasonal variability of the Amazon river plume during Revizee program. **Tropical Oceanography**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 121–128, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5914/tropocean.v38i1.5162>

SILVA, Alex Costa da *et al.* Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica. **Acta Amazonica**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 361–369, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000200014>

SOUZA, Arthur Gerard Quadros de; KERR, Rodrigo; AZEVEDO, José Luiz Lima de. On the influence of Subtropical Mode Water on the South Atlantic Ocean. **Journal of Marine Systems**, [s. l.], v. 185, n. 2017, p. 13–24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.04.006>

SPRINTALL, Janet; TOMCZAK, Matthias. On the formation of central water and thermocline ventilation in the southern hemisphere. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 827–848, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90074-D](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90074-D)

STRAMMA, Lothar *et al.* Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. *In: ELSEVIER OCEANOGRAPHY SERIES*. [S. l.: s. n.], 2003. v. 68, p. 1–22. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80141-1](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80141-1)

STRAMMA, Lothar *et al.* Oxygen minimum zone in the North Atlantic south and east of the Cape Verde Islands. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 113, n. C4, p. C04014, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007JC004369>

STRAMMA, Lothar; ENGLAND, Matthew. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1999JC900139>

STRAMMA, Lothar; HÜTTL, Sabine; SCHAFSTALL, Jens. Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 110, n. C12, p. C12006, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005JC002939>

STRAMMA, Lothar; SCHOTT, Friedrich. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, [s. l.], v. 46, n. 1–2, p. 279–303, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00109-X)

TALLEY, L. D. Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic. *In*: THE SOUTH ATLANTIC. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 219–238. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-80353-6_11

TALLEY, Lynne D. *et al.* Atlantic Ocean. *In*: DESCRIPTIVE PHYSICAL OCEANOGRAPHY. [S. l.]: Elsevier, 2011a. p. 1–43. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10021-6>

TALLEY, Lynne D. *et al.* Dynamical Processes for Descriptive Ocean Circulation. *In*: DESCRIPTIVE PHYSICAL OCEANOGRAPHY. [S. l.]: Elsevier, 2011b. p. 187–221. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10007-1>

TALLEY, Lynne D. *et al.* Ocean Dimensions, Shapes, and Bottom Materials. *In*: DESCRIPTIVE PHYSICAL OCEANOGRAPHY. [S. l.]: Elsevier, 2011c. p. 7–27. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10002-2>

TALLEY, Lynne D. *et al.* Typical Distributions of Water Characteristics. *In*: DESCRIPTIVE PHYSICAL OCEANOGRAPHY. [S. l.]: Elsevier, 2011d. p. 67–110. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10004-6>

TAYLOR, Gordon T *et al.* Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 109, n. 47, p. 19315–19320, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1207514109>

TOMCZAK, Matthias. Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. **Journal of Marine Research**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 275–303, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1357/002224099321618227>

TOMCZAK, Matthias; GOFFREY, J. Stuart. **Regional Oceanography: An Introduction**. Seconded. [S. l.]: Daya Publishing House, 2004.

TOMCZAK, Matthias; LARGE, Daniel G. B. Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 94, n. C11, p. 16141, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JC094iC11p16141>

TREGUER, P. *et al.* The Silica Balance in the World Ocean: A Reestimate. **Science**, [s. l.], v. 268, n. 5209, p. 375–379, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.268.5209.375>

TROUPIN, C. *et al.* Generation of analysis and consistent error fields using the Data Interpolating Variational Analysis (DIVA). **Ocean Modelling**, [s. l.], v. 52–53, p. 90–101, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.05.002>

TSUCHIYA, Mizuki; TALLEY, Lynne D.; MCCARTNEY, Michael S. Water-mass distributions in the western South Atlantic; A section from South Georgia Island (54S) northward across the equator. **Journal of Marine Research**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 55–81, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1357/0022240943076759>

WILLIAMS, Richard G; FOLLOWS, Michael J. Physical Transport of Nutrients and the Maintenance of Biological Production. *In: OCEAN BIOGEOCHEMISTRY*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 19–51. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-55844-3_3

ZAKEM, Emily J. *et al.* Ecological control of nitrite in the upper ocean. **Nature Communications**, [*s. l.*], v. 9, n. 1, p. 1206, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03553-w>

APÊNDICE A – Resultado dos p-valores do teste de normalidade Shapiro-Wilk para os dados PIRATA.

	2017						2018					
	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA
Nitrato	< 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	-	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Nitrito	> 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05
Fosfato	< 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Silicato	< 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
O ₂	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	< 0,05	> 0,05

Nota: O teste apresenta nível de significância de 95%.

Legenda: Em branco: os conjuntos de dados não diferem significativamente; em cinza: os conjuntos de dados diferem significativamente.

Fonte: O Autor, 2021.

APÊNDICE B – Resultado dos p-valores para o teste estatístico comparativo de Dunn’s (par-a-par), após a análise estatística de Kruskal-Wallis, para a AT, ACAS, AIA, APAN e AFA. Bem como o resultado dos p-valores para o teste estatístico Wilcoxon-Mann-Whitney (*) para a ACAN e para o parâmetro nitrato apenas na ACAS.

		AT			ACAS			ACAN*		AIA			APAN			AFA		
		2017	2018	GLODAP	2017	2018	GLODAP	2017	2018	2017	2018	GLODAP	2017	2018	GLODAP	2017	2018	GLODAP
Nitrato	2017	> 0,05	< 0,05		-	> 0,05*		< 0,05		> 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	
	2018	> 0,05	< 0,05		-	-	< 0,05		> 0,05	< 0,05		< 0,05		< 0,05		> 0,05	< 0,05	
	GLODAP	< 0,05	< 0,05		> 0,05*	-		-	-	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Nitrito	2017	> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	-	> 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	
	2018	> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	> 0,05	-	> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		
	GLODAP	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	-	-	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		
Fosfato	2017	> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05		< 0,05	< 0,05		> 0,05	> 0,05		> 0,05	> 0,05	
	2018	> 0,05	< 0,05		> 0,05	> 0,05	> 0,05		< 0,05		> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	
	GLODAP	< 0,05	< 0,05		< 0,05	> 0,05	-	-	< 0,05	> 0,05		> 0,05	> 0,05		> 0,05	> 0,05		
Silicato	2017		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05		> 0,05	< 0,05		< 0,05	> 0,05		> 0,05	< 0,05
	2018	< 0,05		< 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	> 0,05	< 0,05	
	GLODAP	< 0,05	< 0,05		< 0,05	> 0,05	-	-	< 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05		
O ₂	2017		< 0,05	< 0,05		> 0,05	> 0,05	-	> 0,05		> 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05
	2018	< 0,05		< 0,05	> 0,05		> 0,05	> 0,05	-	> 0,05	< 0,05	< 0,05		> 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05
	GLODAP	< 0,05	< 0,05		> 0,05	> 0,05	-	-	< 0,05	< 0,05		< 0,05	> 0,05		< 0,05	< 0,05		

Nota: Ambos os testes apresentam nível de significância de 95%.

Legenda: Em branco: os conjuntos de dados não diferem significativamente; em cinza: os conjuntos de dados diferem significativamente.

Fonte: O Autor, 2021.

APÊNDICE C– Tabela geral com os valores médios, mínimo, máximo e desvio padrão dos principais parâmetros físico-químicos utilizados neste trabalho.

		2017						2018						GLODAP				
		AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	AIA	APAN	AFA
Temperatura Potencial (°C)	n	1214	1680	497	17752	56989	3399	1056	1805	562	15617	52421	3227	180	105	447	1347	76
	Média	27,26	15,68	17,94	6,99	2,86	1,32	27,58	15,24	19,17	7,15	2,87	1,37	27,50	15,73	6,67	3,12	1,06
	Desvio	0,84	4,07	3,16	2,15	0,87	0,25	1,00	3,81	3,46	2,24	0,89	0,21	0,80	3,79	2,29	0,88	0,35
	Mín	24,01	11,41	12,38	4,42	1,67	0,74	23,91	11,66	12,97	4,34	1,73	0,73	25,10	11,60	4,18	1,71	0,60
	Máx	28,23	25,49	25,70	14,38	5,32	1,69	29,14	25,79	25,61	14,52	5,38	1,77	28,98	24,82	12,03	4,85	1,76
Salinidade	n	1214	1680	497	17752	56989	3399	1056	1795	562	15617	52421	3227	180	105	447	1347	76
	Média	36,05	35,62	36,27	34,77	34,92	34,81	36,09	35,56	36,45	34,81	34,93	34,83	35,84	35,60	34,70	34,94	34,79
	Desvio	0,37	0,47	0,37	0,20	0,04	0,03	0,37	0,43	0,40	0,22	0,04	0,03	0,46	0,43	0,18	0,04	0,04
	Mín	34,71	35,05	35,30	34,48	34,78	34,86	34,54	35,11	35,45	34,50	34,79	34,75	32,97	35,07	34,45	34,79	34,74
	Máx	36,74	36,89	36,88	35,85	34,99	34,75	36,79	36,94	37,01	35,89	35,00	34,87	36,56	36,81	35,23	35,00	34,87
Densidade Potencial (kg/m ³)	n	1214	1680	497	17752	56989	3399	1056	1795	562	15617	52421	3227	180	105	447	1347	76
	Média	23,42	26,23	26,22	27,23	27,83	27,88	23,35	26,30	26,04	27,22	27,84	27,89	23,19	26,21	27,20	27,82	27,88
	Desvio	0,47	0,65	0,58	0,21	0,07	0,00	0,52	0,61	0,64	0,21	0,07	0,00	0,53	0,62	0,22	0,08	0,01
	Mín	22,19	24,45	24,45	26,75	27,57	27,87	21,72	24,45	24,47	26,75	27,57	27,88	20,63	24,50	26,75	27,57	27,87
	Máx	24,45	26,75	26,76	27,59	27,89	27,89	24,45	26,75	26,76	27,59	27,90	27,90	24,27	26,75	27,56	27,91	27,90
Nitrato (µmol/kg)	n	27	29	11	41	33	8	9	1	4	9	21	6	128	73	331	1032	50
	Média	7,15	12,24	16,01	28,83	21,58	23,56	2,55	0,70	2,11	22,53	15,98	19,33	0,23	14,50	31,65	20,55	26,71
	Desvio	9,55	9,41	7,52	8,08	3,51	6,05	2,22	-	2,07	10,72	5,26	5,04	0,55	6,95	3,50	1,98	2,63
	Mín	0,10	0,37	3,94	14,52	15,29	16,11	0,02	0,70	0,31	1,42	5,93	12,16	0,00	0,00	20,91	17,90	21,00
	Máx	27,93	29,90	28,11	42,00	29,81	33,07	7,46	0,70	4,61	33,77	27,65	25,26	3,65	27,40	36,35	29,46	30,40
Nitrito (µmol/kg)	n	27	28	11	39	36	9	20	9	5	16	23	10	96	54	255	748	30
	Média	0,19	0,25	0,25	0,13	0,14	0,23	0,37	0,34	0,21	0,13	0,12	0,13	0,02	0,06	0,01	0,01	0,00
	Desvio	0,12	0,15	0,15	0,08	0,07	0,14	0,20	0,27	0,10	0,09	0,08	0,14	0,05	0,08	0,04	0,02	0,01
	Mín	0,02	0,07	0,09	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,08	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máx	0,46	0,86	0,62	0,35	0,29	0,50	0,70	0,65	0,34	0,28	0,26	0,50	0,27	0,28	0,55	0,28	0,03
Fosfato (µmol/kg)	n	26	29	11	36	29	6	20	9	5	25	31	10	113	61	280	840	32
	Média	0,27	0,67	0,42	1,57	1,38	1,76	0,36	0,82	0,34	2,04	1,44	1,60	0,04	0,87	2,08	1,35	1,79
	Desvio	0,27	0,57	0,26	0,63	0,22	0,56	0,53	0,69	0,19	0,38	0,34	0,40	0,06	0,44	0,27	0,14	0,20
	Mín	0,05	0,03	0,07	0,28	1,01	1,14	0,02	0,14	0,10	1,10	0,86	1,03	0,00	0,03	1,39	1,19	1,43
	Máx	1,03	2,37	0,89	2,54	1,76	2,75	1,10	1,93	0,52	2,67	2,07	2,36	0,42	1,66	2,52	1,94	2,10
Silicato (µmol/kg)	n	27	28	11	38	40	7	19	9	5	23	32	10	107	59	258	787	41
	Média	11,91	13,74	8,99	20,07	25,98	53,22	3,42	4,32	1,14	15,82	18,67	62,40	1,35	6,54	22,82	26,30	82,88
	Desvio	9,04	7,22	6,02	6,66	10,50	21,46	3,73	3,56	0,77	6,13	7,64	18,99	1,11	2,62	7,41	8,38	18,11
	Mín	1,65	4,57	0,87	6,94	14,22	9,43	0,40	0,01	0,54	5,39	3,65	21,85	0,23	1,56	9,44	15,57	45,26
	Máx	33,67	33,44	21,03	32,66	61,24	76,56	12,55	12,27	0,54	26,89	32,69	84,80	7,47	11,80	33,83	50,80	104,79

O ₂	n	16	8	3	22	18	10	21	10	5	30	36	14	168	94	406	1.278	69
----------------	---	----	---	---	----	----	----	----	----	---	----	----	----	-----	----	-----	-------	----

		2017						2018						GLODAP				
		AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	ACAN	AIA	APAN	AFA	AT	ACAS	AIA	APAN	AFA
(μmol/kg)	Média	178,67	129,74	120,26	86,53	233,15	223,22	194,61	142,46	190,29	116,41	245,52	245,00	200,70	147,30	136,40	247,50	238,40
	Desvio	3,96	34,80	49,89	29,40	15,84	17,93	16,06	32,87	32,04	26,99	15,20	7,07	5,30	25,60	22,50	19,00	8,60
	Mín	171,67	90,19	70,59	37,91	203,92	181,26	143,79	84,21	139,31	55,70	186,88	231,23	172,50	87,40	61,80	168,10	227,20
	Máx	185,18	184,74	170,37	147,27	248,36	247,92	214,78	198,24	212,07	161,09	267,06	255,01	210,80	210,80	189,10	266,20	258,60

Nota: Os dados do GLODAP correspondem ao produto de dados GLODAPv.2. Os dados de 2017 e 2018 correspondem a base de dados coletada durante às campanhas PIRATA XVII e XVIII, respectivamente. Na base de dados PIRATA, os dados de temperatura potencial, salinidade e densidade potencial foram adquiridos através de um CTD-O₂, enquanto os dados de nitrato, nitrito, fosfato, silicato e O₂ foram obtidos em laboratório através da análise de amostras discretas coletadas com garrafas do tipo *Niskin*.

Fonte: O Autor, 2021.