

**Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC
RELATÓRIO PARCIAL**

Matrícula: 120056018 C.R.: 9.1

Curso: Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do Projeto: A Resposta das Águas Intermediárias no Oceano Atlântico Sul às mudanças climáticas nos cenários climáticos futuros.

Local de Realização (Unidade/Instituto/Departamento/Laboratório):

Observatório Oceanográfico, Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Escola de Engenharia.

Endereço: Rua Passo da Pátria, 156 Bloco E sala 300 Campus Praia Vermelha

Bairro: São Domingos Cidade: Niterói UF:RJ CEP: 24210-240

DADOS DO ORIENTADOR

Nome: **André Luiz Belém**

Matrícula SIAPE: 2202288 CPF: 111.544.938-90

Endereço: Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Escola de Engenharia, Rua Passo da Pátria, 156 bloco E sala 300 Campus Praia Vermelha

Bairro: São Domingos Cidade: Niterói UF:RJ CEP: 24210-240

E-mail: andrebelem@id.uff.br

DADOS DO BOLSISTA

Nome: **Gabriel Schimidel Ramos de Oliveira**

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8948368662954411>

CPF: 161.659.907-38

E-mail: gabrielschimidel@id.uff.br

Graduando do Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Matrícula: 120056018

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. DEFINIÇÃO DA AIA E FATORES DE FORMAÇÃO	3
2.2. CIRCULAÇÃO GERAL DA AIA	5
3. DADOS E MÉTODOS	7
3.1. REGIÃO DE ESTUDO	10
3.2. MÉTODOS DE ANÁLISE	11
4. RESULTADOS	12
4.1. ANOMALIAS DADOS HISTÓRICOS	15
4.2. ANOMALIAS CENÁRIOS FUTUROS	19
4.3. DIAGRAMAS T-S VOLUMÉTRICOS	25
5. PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA	29
6. CONCLUSÕES	30

A Resposta das Águas Intermediárias no Oceano Atlântico Sul às mudanças climáticas nos cenários climáticos futuros.

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre mudanças climáticas destacam a crescente preocupação com as consequências do aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera. Esses gases estão diretamente relacionados ao aumento da temperatura média global e a intensificação e ocorrência de eventos extremos, como inundações, secas e ondas de calor que podem ocasionar diversos danos sociais, ambientais e econômicos, afetando principalmente as populações mais vulneráveis (CALVIN et al., 2023).

Dentre os componentes do clima, os oceanos apresentam um papel crucial na absorção de gases de efeito estufa e na mitigação do impacto das mudanças climáticas, sendo estimado que estes sejam responsáveis por armazenar cerca de 40% do gás carbônico já emitido para a atmosfera (REID et al., 2009). Além disso, eles também são fundamentais para balanço de energia do sistema terrestre, exercendo grande influência na regulação da temperatura global. Eles interagem de diferentes formas com a atmosfera, o gelo marinho e os outros componentes climáticos, a partir de complexos processos de fluxo de calor e momento (BIGG et al., 2003).

Nesse contexto, entender e estudar as características dos oceanos, por meio de pesquisas que investiguem as alterações na temperatura do mar, na salinidade, nos ecossistemas marinhos e como tais alterações podem afetar os padrões de circulação global é crucial para uma melhor compreensão das possíveis consequências das mudanças climáticas, e o papel desempenhado pelos oceanos

Nas últimas décadas, a temperatura média global dos oceanos, principalmente acima dos 2000m, vem apresentando uma tendência contínua de aquecimento, tendo como principais consequências, de acordo com Garcia-Soto et al. (2021) : “o aumento do nível do mar, o degelo do manto de gelo nas regiões polares, o degelo da permafrost, alterações no ciclo hidrológico e mudanças na circulação atmosférica e oceânica”. Essas mudanças são objeto constante de estudo, pois é de extrema importância compreender como elas podem afetar o clima terrestre e alterar os padrões e regimes já estabelecidos.

Dentre os componentes do oceano, a circulação termohalina destaca-se ao desempenhar um papel crucial na compensação do desequilíbrio radioativo que chega até a superfície terrestre, sendo o principal mecanismo pelo qual o oceano contribui para o transporte de calor em direção aos pólos, especialmente no oceano atlântico.(KNUTTI; STOCKER, 2002). Ela é parte da circulação global em grande escala que é dirigida por diferenças nos gradientes de densidade devido a fluxos de calor e salinidade.

Neste cenário abrangente, direcionamos o foco deste estudo para a investigação da variação da Água Intermediária Antártica (AIA) em cenários climáticos futuros. No oceano Atlântico Sul, essa massa d’água assume um papel crucial, sendo a principal água intermediária fundamental para a circulação termohalina. Sua

região de formação é a principal área de absorção de calor antropogênico e sumidouro de carbono do oceano global (MORRISON et al., 2022a). Dessa forma, compreender as mudanças nesta componente é essencial para entender os impactos das transformações climáticas no oceano.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção deste relatório parcial do PIBIC visa realizar o levantamento da fundamentação teórica sobre a AIA e sua importância dentro do contexto oceânico e climático. A AIA, como principal massa d'água intermediária do Atlântico Sul, assume um papel central dentro da circulação termohalina.

Para iniciar, é necessário compreender a importância do cinturão oceânico global em distribuir calor, água doce e diversas outras substâncias pelas diferentes regiões oceânicas. Esse sistema é responsável por converter fluxos de água quentes e salinas em superfície em fluxos profundos de retorno, compostos por águas frias e menos salinas (CESSI, 2019). Embora a conservação geral do conteúdo de sal nos oceanos seja mantida, as assinaturas locais ou regionais são influenciadas pelos padrões planetários de fluxos de água doce e sal. Mudanças na salinidade regional podem indicar tendências significativas na redistribuição em larga escala de água doce e sal marinho, bem como mudanças nos padrões de circulação, fornecendo informações essenciais para compreender e prever possíveis alterações climáticas (YASHAYAEV; CLARKE, 2008).

No Atlântico uma das principais componentes da circulação termohalina, é a Circulação Meridional de Capotamento do Atlântico (AMOC, na sigla em inglês). Seu funcionamento baseia-se na formação de águas frias no Atlântico no Norte, nas regiões dos mares nórdicos e no mar de Labrador. A AMOC é responsável por converter uma considerável quantidade de água do oceano superior para águas profundas, formando a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) que flui posteriormente para sul, promovendo a ventilação da bacia do Atlântico. Esse fluxo é balanceado pelo fluxo de retorno das águas termoclinas e intermediárias no Atlântico Sul em direção ao norte (MCCARTHY et al., 2019).

Dentre as componentes intermediárias da AMOC a AIA desempenha um papel fundamental, já que no Atlântico Sul, grande parte da bacia intermediária é preenchida por essa massa de água sendo o seu transporte para norte responsável por uma fração substancial do fluxo de retorno da AMOC, além de ser importante fonte de água doce para a formação da APAN.

2.1. DEFINIÇÃO DA AIA E FATORES DE FORMAÇÃO

A Água Intermediária Antártica (AIA) é uma das principais massas de água em profundidades intermediárias na região sul dos oceanos. Caracterizada por um mínimo de salinidade em torno de 34.2 - 34.4 psu e uma temperatura entre 3°C - 5°C, ela possui seu núcleo localizado nas camadas de 500m a 1200m, apresentando uma densidade potencial (referenciada a superfície do mar) dentro do intervalo $\sigma_0 = 27.1$ - de

27.1-27.3 kg m⁻³ (PIOLA; GEORGI, 1982). Essa massa d'água se propaga para norte, podendo alcançar latitudes de até 30°N, com traços identificados em latitudes ainda mais elevadas (TALLEY, 1996). À medida que se desloca para o norte, ela se mistura com outras mais salinas, gradualmente aumentando a sua própria salinidade (Figura 1).

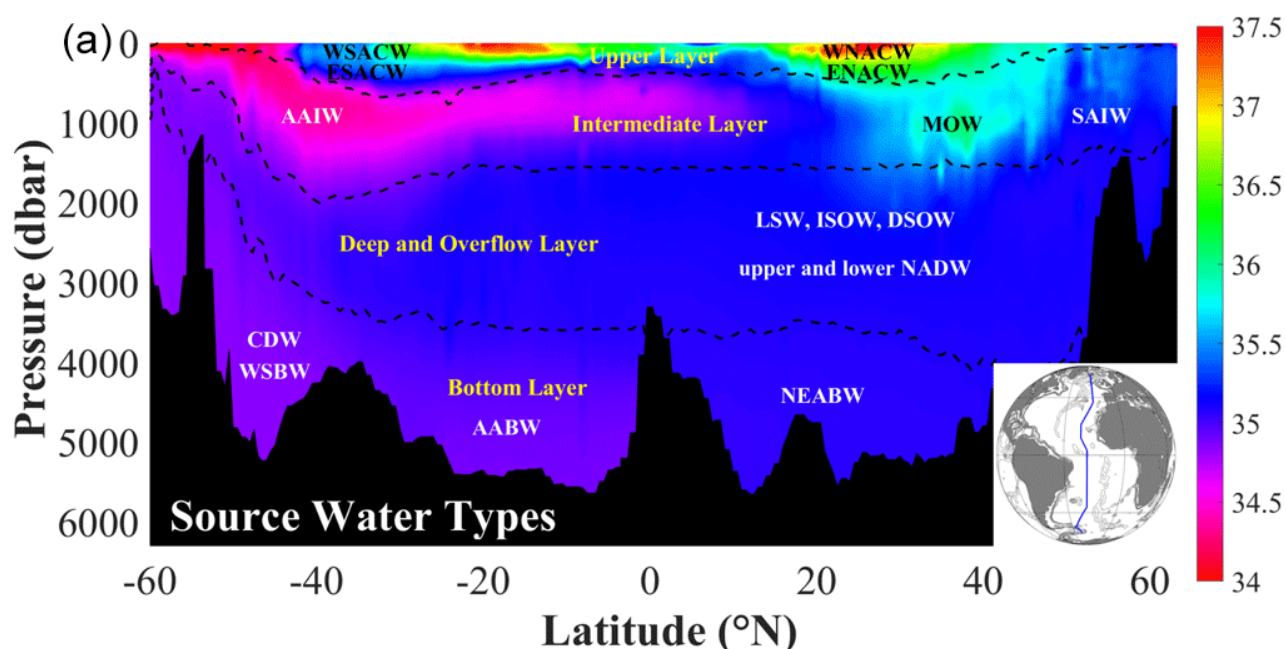


Figura 1- Distribuição das massas de água do Atlântico. A escala de cores representa a salinidade absoluta (g kg^{-1}). Observe a ‘língua’ característica do mínimo de salinidade da AAIW. (Retirado de M. Liu e T. Tanhua, 2021).

Sua origem remonta à superfície do mar ao norte da Corrente Circumpolar Antártica, onde as superfícies de densidade associadas a essa massa d'água afloram, e se propaga para o norte em direção às latitudes médias (PIOLA; GORDON, 1989), carregando sinais climáticos da superfície para as camadas intermediárias do oceano.

Como dito anteriormente, a AIA constitui uma das células de retorno da AMOC, no qual a água quente da camada superior que tem origem na termoclinina e na água intermediária do Atlântico Sul se dirige em direção ao Atlântico Norte. Acredita-se que a água intermediária se aqueça e suba nas proximidades do equador, tornando-se água da termoclinina, que fornece uma fonte para a convecção profunda no Atlântico Norte e para o influxo nos Mares Nórdicos (HUANG; OPPO; CURRY, 2014).

Diversos processos são relacionados à formação da AIA no Atlântico Sul, com diferentes mecanismos sendo propostos. As primeiras teorias sugerem que a AIA é formada por um processo circumpolar de subducção ou transporte isopicnal ao longo da Zona Polar Antártica (ZPA), no qual a Água Antártica de Superfície

(AASW) mistura com águas de superfície da Zona Subantártica para produzir uma mistura que afunda na Zona da Frente Polar (PFZ), formando a AIA. McCartney (1979) sugeriu que a AIA é um subproduto da Água Modal Sub-Antártica (AMSA), formada em uma camada mista convectiva no sudeste do Pacífico, que consiste na inversão convectiva tardia durante o inverno das águas um pouco mais quentes e salinas que se tornam mais frias e doces ao serem transportadas para o oceano Atlântico pela passagem de Drake. Molinelli (1981) sugere que processos isopicnais dominem a formação da AIA ao longo da Zona da Frente Polar Antártica, por mistura e fluxo geostrófico.

Estudos mais recentes indicam que mais de um mecanismo é responsável pela formação e renovação da AIA. De acordo com Xia et al. (2022), mecanismos de mistura no sudeste do Pacífico são responsáveis por modificar a AMSA e transformá-la na AIA do Atlântico após circular pela passagem de Drake. Além disso, existe a formação de uma AIA Circumpolar, formada entre a Frente Subantártica (SAF) e a Frente Polar (PF), sendo a mais fria e densa, devido a processos físicos pela interação da Corrente Circumpolar Antártica (ACC).

Li et al. (2022) encontraram que a AIA é originada de processos de subducção induzidos por redemoinhos e fluxo geostrófico, além de transporte diapiquinal (movimento vertical do oceano causado por variações na densidade da água em relação à densidade ao longo de superfícies isopicnais), a partir das camadas de Água Modal Subantártica e Água Profunda Circumpolar Superior. De acordo com os autores, a advecção lateral e a mistura vertical contribuem principalmente para a formação da AAIW (Água Antártica Intermediária) no sudeste do Pacífico e na Passagem de Drake, e no sul do Pacífico, respectivamente. Em contraste, a subducção induzida por vórtices, o bombeamento de Ekman, a mistura isopycnal e a mistura vertical são mecanismos circumpolares e desempenham um papel na formação da AAIW em diferentes latitudes do Oceano Austral.

Santoso e England (2004) analisando a variabilidade da AIA, por meio de modelo climático, relatam que fluxos de calor e água doce devido a interação gelo-oceano e oceano-ar, são dominantes para a variabilidade da AIA na região do afloramento. Enquanto o transporte de Ekman em direção ao norte desempenha um papel significativo, porém localizado, na variabilidade de temperatura e salinidade da Água Intermediária Antártica.

2.2. CIRCULAÇÃO GERAL DA AIA

A Água Intermediária Antártica (AIA) no Atlântico Sul é caracterizada por uma complexa circulação em camadas intermediárias que estabelece conexões entre as diferentes regiões subtropicais, subpolares e polares, além de facilitar as trocas oceânicas entre as áreas norte e sul do Atlântico, bem como entre as bacias do Pacífico e Índico. Essa circulação desempenha um papel crucial na regulação das trocas de calor, água doce, sal e outras substâncias, contribuindo para a dinâmica e equilíbrio do ecossistema marinho na região.

A circulação da AIA é impulsionada pelos ventos do giro subtropical (REID, 1994). Nas camadas intermediárias, essa circulação difere da superfície, com um ramo norte mais ao sul, alcançando a plataforma do

Brasil em torno de 20°S, e uma orientação sazonal (STRAMMA; ENGLAND, 1999). A localização das frentes do Atlântico Sul, especialmente a Frente Subantártica, é crucial para a AIA. Entre a Frente Subantártica e a Frente Polar, o mínimo de salinidade é observado da superfície até mais de 500m, onde a AIA se mistura com a camada de água superior (SCHMID et al., 2000).

A Zona de Confluência, em 38°S, é essencial para a circulação da AIA, facilitando a mistura entre as águas do Giro Subtropical e a Corrente Circumpolar Antártica (BOEBEL; SCHMID; ZENK, 1997). A Corrente de Falkland transporta a AIA do Pacífico para o norte, introduzindo água ventilada na Zona de Confluência, que se torna turbulenta e injeta água intermediária fresca no giro (BOEBEL et al., 1999).

A AIA segue pela Corrente do Atlântico Sul (SAC) em meandros para oeste, com o transporte geostrófico diminuindo em direção à Dorsal Mesoatlântica, onde a SAC e a ACC se tornam indistinguíveis (BOEBEL et al., 1999; SCHMID et al., 2000; STRAMMA; ENGLAND, 1999). Na bacia do Cabo, a SAC se divide, com parte indo para o Índico e outra formando a Corrente de Benguela, onde ocorre intensa troca de águas entre os oceanos Atlântico e Índico (NÚÑEZ-RIBONI et al., 2005).

No giro subtropical, a AIA é transportada para noroeste pela Corrente de Benguela, onde o fluxo se volta para oeste. A oeste de 36°W, o transporte diminui devido à Bifurcação de Santos (28°S), onde o fluxo da AIA se divide: um ramo norte carrega a AIA para os trópicos, enquanto o outro forma uma extensão profunda da Corrente do Brasil, encerrando o giro subtropical (SCHMID et al., 2000).

O ramo norte da AIA é transportado pela Corrente Intermediária Norte da Fronteira Oeste (IWBC), que injeta a AIA no regime tropical, onde suas propriedades físicas se dispersam gradualmente (BOEBEL et al., 1999). Na região equatorial, a AIA é transportada por correntes intermediárias, como a Corrente Equatorial Intermediária (EIC), que apresenta variabilidade na força e extensão vertical. No Giro Ciclônico Tropical do Atlântico Sul, as correntes são mais fracas, e a alta salinidade sugere mistura vertical e processos biológicos alterando as propriedades da AIA (STRAMMA; ENGLAND, 1999).

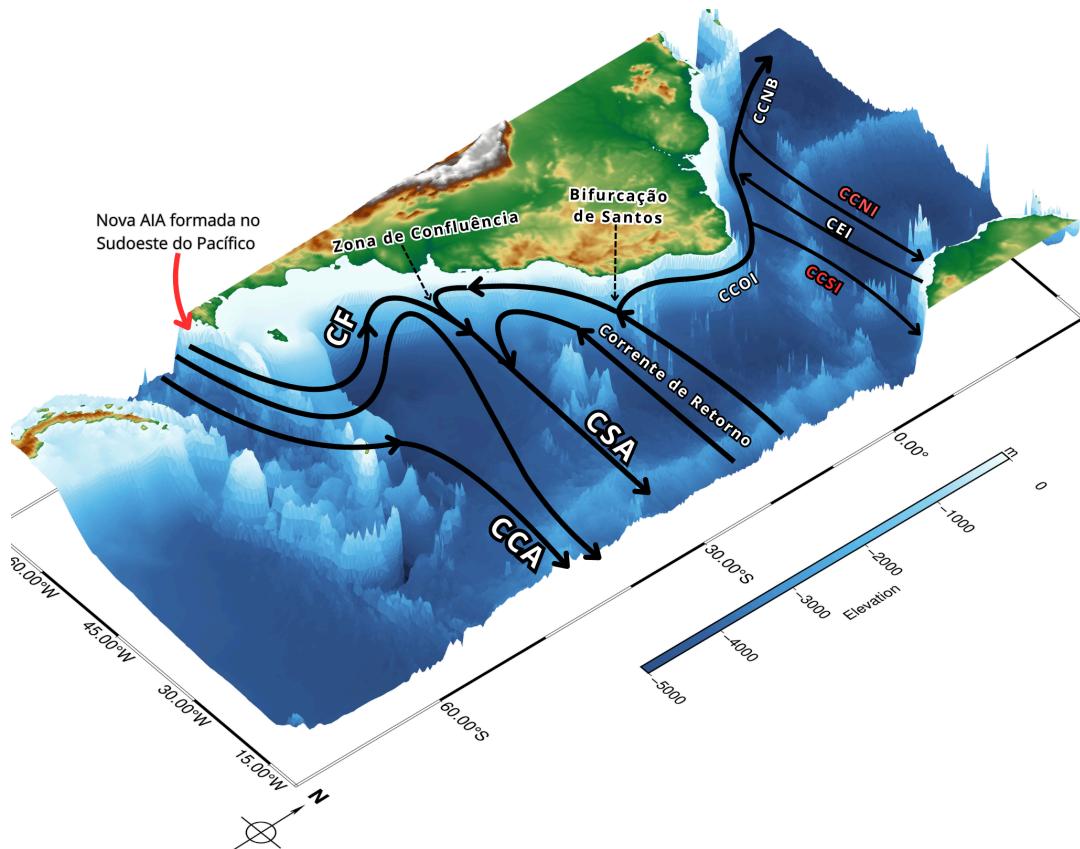


Figura 2- Circulação da AIA no oeste do Atlântico. Corrente Circumpolar Antártica (CCA), Corrente do Atlântico Sul (CSA), Corrente de Falkland (CF), Contracorrente Oeste Intermediária (CCOI), Contracorrente Sul Intemidiária (CCSI), Corrente Equatorial Intermediária (CEI), Contracorrente Norte Intermediária (CCNI), Contracorrente Norte do Brasil (CCNB).

3. DADOS E MÉTODOS

No contexto desta pesquisa, o principal objetivo é observar as variações de temperatura e salinidade da AAIW em cenários futuros. Para isso foram utilizados os modelos do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), organizado pela World Climate Research Programme (WCRP). Tais modelos são amplamente utilizados nas pesquisas que servem de base para a criação dos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) sobre previsões de mudanças no clima.

O propósito central do CMIP é compreender melhor o passado, o presente e o futuro do clima, abrangendo tanto a variabilidade natural quanto a resposta às forçante radiativa causada, principalmente, pelo aumento de gases de efeito estufa de origem antropogênica na atmosfera (EYRING et al., 2016). Para isso, diversos Projetos de Intercomparação de Modelos (MIP) são desenvolvidos, cada um com um propósito específico

Como fonte de dados utilizamos a saída de 6 modelos climáticos (Tabela 1), no qual foram utilizados as variáveis de temperatura e salinidade do oceano, buscamos utilizar sempre a variante r1i1p1f1 dos modelos, sempre que disponível.

Tabela 1 - Detalhes dos modelos utilizados neste estudo.

Modelo Climático	Componente Oceânica	Resolução Horizontal (Lat x Lon)	Coordenada Vertical do Oceano	Níveis
CESM2	POP2	1°	z	60
IPSL-CM6A-LR	NEMO	1°	z*	75
MIROC6	MIROC6	1°	Coordenada híbrida $\sigma-z$	63
CAMS-CSM1-0	MOM4	1°	z	50
CNRM-ESM2-1	NEMO	1°	z*	75
GFDL-ESM4	OM4 MOM6	0.5°	vertical hybrid depth-isopycnal	75

Fonte: O autor.

Para comparar possíveis mudanças na AAIW utilizamos as simulações históricas (historical), que engloba o período de extensas coletas de medições de temperatura, desde 1850 até 2014. As forçantes históricas são baseadas o máximo possível nas observações, o que inclui concentrações e emissões de espécies de gases de efeito estufa de vida curta e vida longa, conjunto de dados de forçamento de uso da terra, forçante solar, conjunto de dados de aerossóis, concentração de gelo, entre outras forçantes (EYRING et al., 2016).

Para avaliar os cenários futuros foram utilizados modelos do Cenário MIP, no qual as forçantes são fornecidas pela comunidade de modelos de avaliação integrada (IAM). O principal objetivo desse projeto MIP é “facilitar a pesquisa integrada sobre o impacto de cenários futuros nos sistemas físicos e humanos, bem como obter opções de mitigação e adaptação. Entender os efeitos de forçantes particulares em colaboração com outros MIPs e Ajudar a quantificar incertezas nas projeções baseadas em análises de conjuntos de multi modelos”. (EYRING et al., 2016).

Mais informações sobre os Projetos de Intercomparação de Modelos podem ser encontrados no documento intitulado: “Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental

design and organization". Esse documento descreve de forma abrangente os diversos projetos de Intercomparação disponíveis no CMIP e seus respectivos objetivos principais..

Os cenários utilizados pelos modelos do CMIP6 se fundamentam no conjunto de Trajetórias Sócio-econômicas, conhecidos pela sigla em inglês SSPs (Shared Socio-economic Pathways). Tais cenários descrevem diferentes possíveis futuros sobre como o mundo pode se desenvolver nos próximos anos. Os cenários SSPs são o conjunto mais elaborado de emissões de gases de efeito estufa que abrangem desde uma diminuição abrupta das emissões de gases, buscando atingir as metas do Acordo de Paris de limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C até o crescimento contínuo das emissões de acordo com diferentes formas de desenvolvimento e utilização dos recursos ambientais.

Neste estudo, adotou-se os cenários futuros SSP 5.8.5 e 3.7.0, no primeiro o desenvolvimento da sociedade é impulsionado principalmente pelo uso de recursos fósseis, os mercados globais estão crescendo de forma integrada, levando a inovações e progressos tecnológicos. No entanto, o desenvolvimento social e econômico é baseado na intensificação do consumo de recursos não renováveis com uma alta participação do carvão nas matrizes energéticas e um intenso estilo de vida baseado no consumo de energia (RIAHI et al., 2017).

Para o cenário SSP3.7.0 observa-se um aumento do nacionalismo, preocupações com segurança e conflitos regionais. Os países priorizam metas de energia e segurança alimentar dentro de suas próprias regiões. Isso resulta em declínio de investimento em educação e tecnologia, desacelerando o desenvolvimento econômico, com baixa prioridade internacional para questões ambientais. O cenário 5.8.5 representa o futuro com o maior forçamento radiativo, 8.5W/m^2 , até o ano de 2100 devido a emissões de gases de efeito estufa, representando o limite superior dos cenários descritos, enquanto o SSP3.7.0 apresenta um forçamento radiativo levemente inferior, cerca de 7W/m^2 (Figura 3).

The diagram illustrates the relationship between climate policy scenarios (SSP1-5) and radiative forcing levels (1.9 to 8.5 W/m²). The vertical axis represents the Nível de forçamento em 2100 (W/m²) from 1.9 to 8.5. The horizontal axis represents the SSP scenarios. The legend indicates the following color coding:

- SSP1 (Sustentável)**: Gray
- SSP2 (Caminho Intermediário)**: Gray
- SSP3 (Concorrência regional)**: Gray
- SSP4 (Inadequado)**: Gray
- SSP5 (Desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis)**: Purple

Nível de forçamento em 2100 (W/m ²)	SSP1 (Sustentável)	SSP2 (Caminho Intermediário)	SSP3 (Concorrência regional)	SSP4 (Inadequado)	SSP5 (Desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis)
8.5					SSP585
7.0			SSP370		
6.0					
4.5		SSP245			
3.4					
2.6	SSP126				
1.9					

Figura 3- Cenários de emissões e forçamento radiativo no ano de 2100.

Adaptado de Böttinger, M., & Kasang, D.

Para algumas análises foram utilizados os notebooks disponibilizados pela Pangeo Galaxy Tools. O projeto Galaxy é uma comunidade mundial dedicada a tornar ferramentas científicas, fluxos de trabalho e infraestruturas abertas e acessíveis a todos (Fouilloux , Brás e Zaini, 2022). Já o Pangeo é uma comunidade que promove a ciência aberta e reproduzível em larga escala, desenvolvendo softwares, fornecendo documentação e infraestrutura para facilitar a pesquisa científica, principalmente para as áreas das ciências oceânicas , atmosféricas e climáticas. (Abernathay *et al.*, 2017; Abernathay *et al.*, 2021)

3.1. REGIÃO DE ESTUDO

O foco principal deste estudo é a região do Atlântico Sul Oriental, especificamente na porção oeste da Dorsal Meso-Oceânica. Essa área foi escolhida porque os mecanismos de mistura que ocorrem ao longo da dorsal tornam difícil analisar o Atlântico Sul como um todo de forma consistente (WEI; GUNN; REECE, 2022). Ao concentrar a pesquisa na porção oeste, onde a topografia acentuada intensifica esses processos, é possível realizar uma análise mais detalhada e precisa das interações que afetam a Água Intermediária Antártica (AIA) nessa região específica.

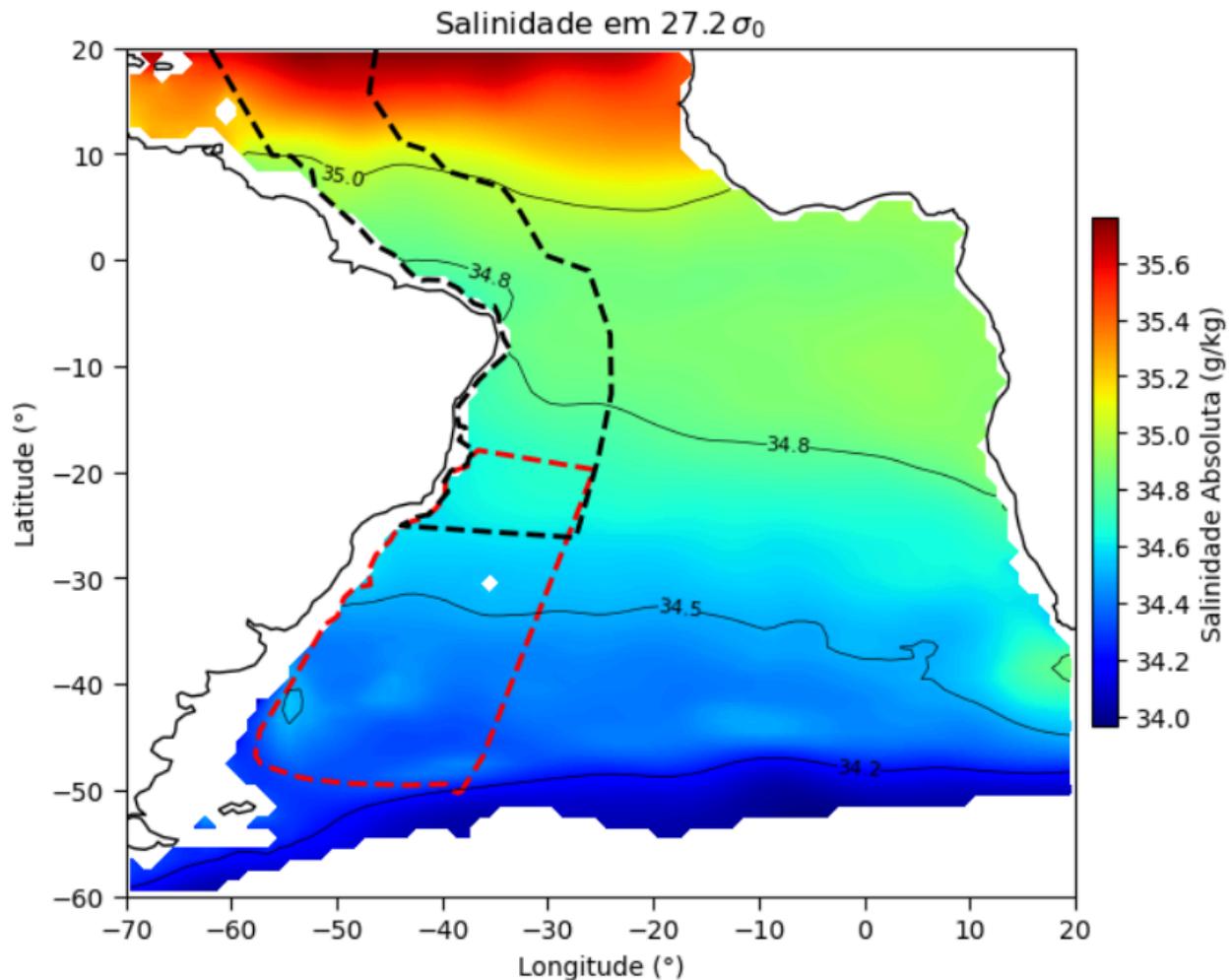


Figura 4- Regiões de estudo - Salinidade referente a superfície de densidade $27.2 \sigma_0$. Observe que para as análises que envolveram médias zonais (médias em relação a longitude) as regiões foram combinadas.

3.2. MÉTODOS DE ANÁLISE

Para esse relatório, o objetivo principal foi a análise da distribuição de temperatura e salinidade da área de estudo, objetivando analisar a variação e a validação da representação da AIA pelos modelos, bem como para avaliar as projeções futuras nas mudanças das assinaturas de temperatura e salinidade dessa massa d'água.

A interpretação das variáveis de temperatura e salinidade seguiram as recomendações de seguindo as recomendações de (MCDOUGALL et al., 2021), no qual, a temperatura foi interpretada como temperatura conservativa e a salinidade foi convertida de salinidade prática para salinidade absoluta. Foram conduzidas médias zonais (em relação a longitude) para avaliar a representação das características médias da AIA. Isso se deve ao fato de que as variações nas propriedades dessa massa d'água, especialmente em relação a salinidade, estão mais relacionadas a variações latitudinais do que meridionais.

Foram conduzidas médias zonais (médias em relação a longitude) para avaliar a representação das características médias da AIA. Isso se deve ao fato de que as variações nas propriedades da AIA, especialmente em relação a salinidade, estão mais relacionadas a variações latitudinais do que meridionais (TALLEY, 1996). Além disso, foi analisada a variação da AIA na profundidade do mínimo de salinidade, a característica mais marcante no perfil vertical dessa massa d'água. Essa metodologia permite uma abordagem mais abrangente entre os diferentes modelos, pois é mais consistente em comparação com o uso superfícies de densidade, que variam entre os modelos (MEURIOT; LIQUE; PLANCHEREL, 2023).

Outro método empregado neste estudo foi o diagrama T-S estatístico-volumétrico (Figura 4), esse método baseia-se na criação de um histograma bivariado, no qual é computado o volume de água associado a cada intervalo $\Delta\theta$ (Temperatura) x ΔS (Salinidade). Para os diagramas foi escolhido um intervalo de temperatura de 0.2°C e 0.02 g/kg. Os intervalos das classes devem ser escolhidos de forma que sejam pequenos o suficiente para manter a integridade de identificação das massas de água, mas grande o suficiente para filtrar a variabilidade espacial (suprimir o ruído) e gerar um diagrama volumétrico conciso (CARMACK; AAGAARD, 1975). Para criar um diagrama T-S volumétrico com esses intervalos de temperatura e salinidade, foi necessário interpolar verticalmente os modelos. Com isso, as médias climatológicas das variáveis de temperatura e salinidade foram interpoladas linearmente a cada 5m de profundidade. Sem interpolar esses dados para o uso do diagrama T-S volumétrico, devido ao grande espaçamento vertical dos modelos nas profundidades entre 300 e 1500 m, apenas resoluções mais grosseiras podem ser utilizadas, o que dificulta a visualização de variações mais sutis na temperatura e salinidade da AIA.

Como os modelos foram interpolados a cada 5m, considerou-se que a espessura correspondente a cada par T-S foi de 5m. Esse valor de espessura foi multiplicado pela área de grade dos modelos (areacellos) associada a cada ponto de grade. Para as médias zonais foram aplicados uma reamostragem bilinear para uma grade 1°x1°, para facilitar a análise e comparação inter-modelos. Para os diagramas T-S, utilizou-se a grade original, já que foi possível mantê-la de forma hábil e eficiente para as análises.

4. RESULTADOS

A Figura 5 ilustra a salinidade absoluta das médias zonais para a média climatológica dos modelos e do WOA18, considerando a área de estudo, enquanto as Figuras (X, a, b, c, d, e) apresentam curvas do diagrama TS para diferentes latitudes. Nos dados observados, é evidente a presença da língua do mínimo de salinidade (34.2 - 34.8 g/kg) estendendo-se a norte, atingindo latitudes de até 10° N, em profundidades entre 500 e 1000 m. Além disso, é notável o afloramento desse mínimo de salinidade e das isopicnais associadas a AIA em latitudes inferiores de 40°S.

De acordo com Santoso e England, 2004, a isopcnal de $27.2 \sigma_0$ é identificada como a que melhor delimita o núcleo da AIA. Nos dados do WOA18 é nitidamente observado que esta isopcnal acompanha de

maneira notável o núcleo dessa massa d'água. Nos modelos a presença desse mínimo de salinidade também é evidente, embora com algumas diferenças em relação aos dados observados. O CESM2 e o GFDL-ESM4 exibem uma boa extensão desse mínimo, com vieses mais doce em relação aos dados observados, o CNRM-ESM2 possui a AIA com os valores de salinidade mais próximos aos dados do WOA, entretanto a língua de salinidade da AIA é menos pronunciada devido ao gradiente de salinidade mais fraco sobre a coluna d'água, que se apresenta mais homogênea em latitudes mais ao norte.

Já os outros modelos revelam vieses mais salinos no núcleo da AIA, sendo que o IPSL-CM6A-LR e o CAMS-CSM1 possuem os vieses mais pronunciados. Adicionalmente, os modelos IPSL e o MIROC6 também demonstram um gradiente de salinidade mais fraco sobre a coluna d'água, tornando difícil identificar a extensão da língua de salinidade da AIA, esse resultado para esses dois modelos também é relatado em Sallée et al. (2013), que analisaram a fase anterior desses modelos (CMIP5).

Zhu; Liu e Gu (2018) analisaram a AIA no Atlântico Sul em modelos do CMIP5 para cerca de 11 modelos, em média, a maioria dos modelos apresentaram um viés salino, conforme indicado pelos autores, a principal causa para esses vieses nos modelos é a pobre representação da dinâmica interior do oceano e dos processos de mistura locais na região da AIA. Neste estudo, no entanto, só foram avaliados 6 modelos, o que limita a generalização para toda a base de dados do CMIP6. No entanto, é notável que existem variações na representação dessa massa d'água

Em relação as isopicnais, é possível notar que nos modelos ocorrem variações nos valores que delimitam a AIA, no CAMS-CSM1, MIROC6 e no GFDL-ESM4 a isolinha de $27.0 \sigma_0$ é a que melhor delimita o núcleo da AIA, enquanto que no IPSL e no CNRM-ESM2 o núcleo é melhor representado pela isolinha de $27.2 \sigma_0$, já o CESM2 é o modelo que apresenta a AIA menos densa, com isolinha de $27.2 \sigma_0$ a que melhor segue o mínimo de salinidade da AIA.

Além dos vieses na salinidade, todos os modelos apresentam temperaturas mais elevadas que a observada para a representação da AIA (Figura 6). Enquanto os dados do WOA apresentam o mínimo de salinidade da AIA em torno de 4°C a 5°C, os dados dos modelos variam de 5°C a 9°C, com uma maior discrepância dos modelos em relação aos dados observados em latitudes mais ao norte. Essa diferença na temperatura pode ser um dos fatores que influenciam a diferença nas profundidades das isopicnais, observe que o CAMS-CSM1 e o MIROC6 ao representar a AIA com as temperaturas mais elevadas, é também os modelos que a retratam com uma das menores densidades. Em contrapartida, para o CESM2 e o GFDL-ESM4, além das temperaturas mais altas, a AIA também apresenta-se menos salina, o que, em conjunto, contribuem para a AIA ser menos densa.

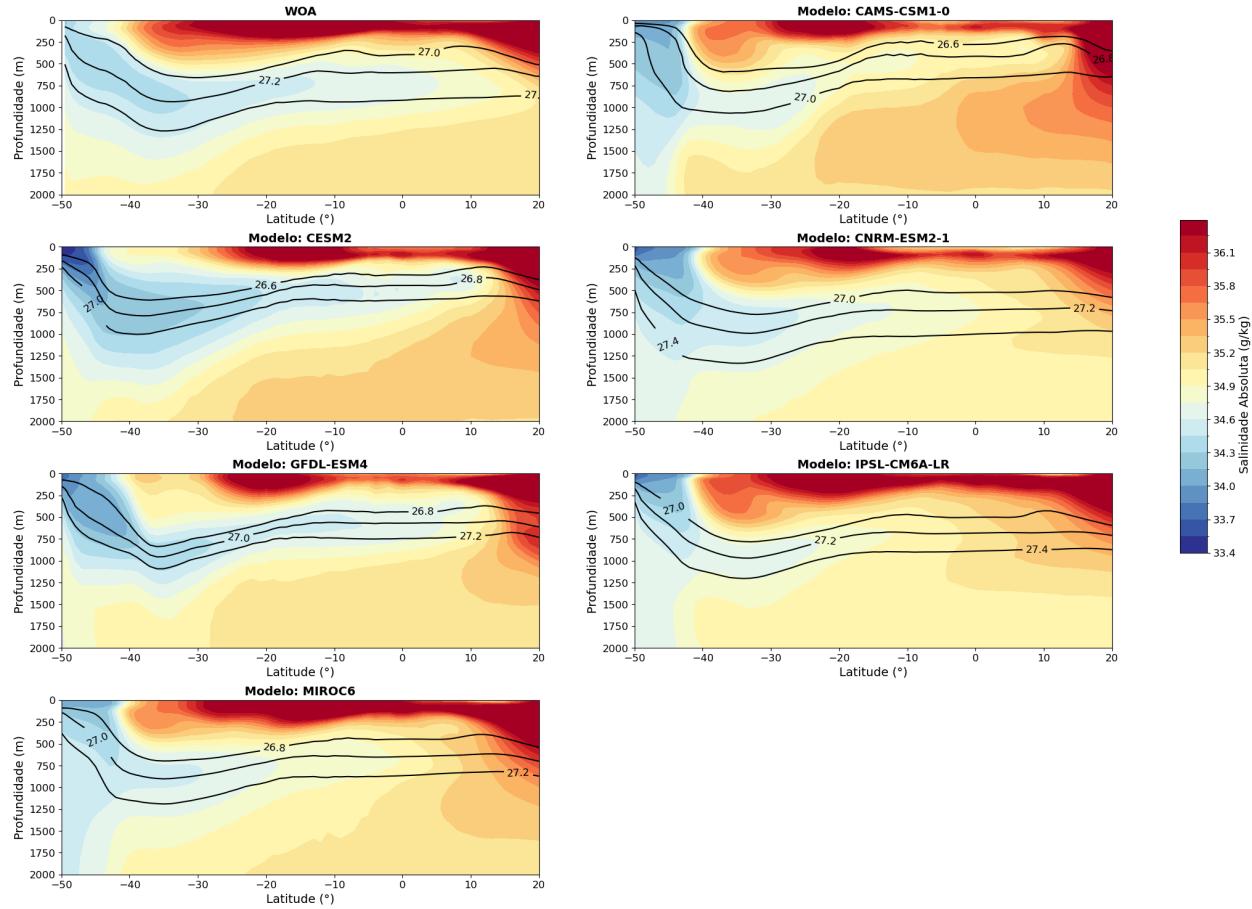


Figura 5 - Médias Zonais Climatológicas da Salinidade. Média climatológica WOA (1955-2017). Modelos (1955-2014). Linhas de contorno pretas indicam isopicnais associadas ao núcleo da AIA.

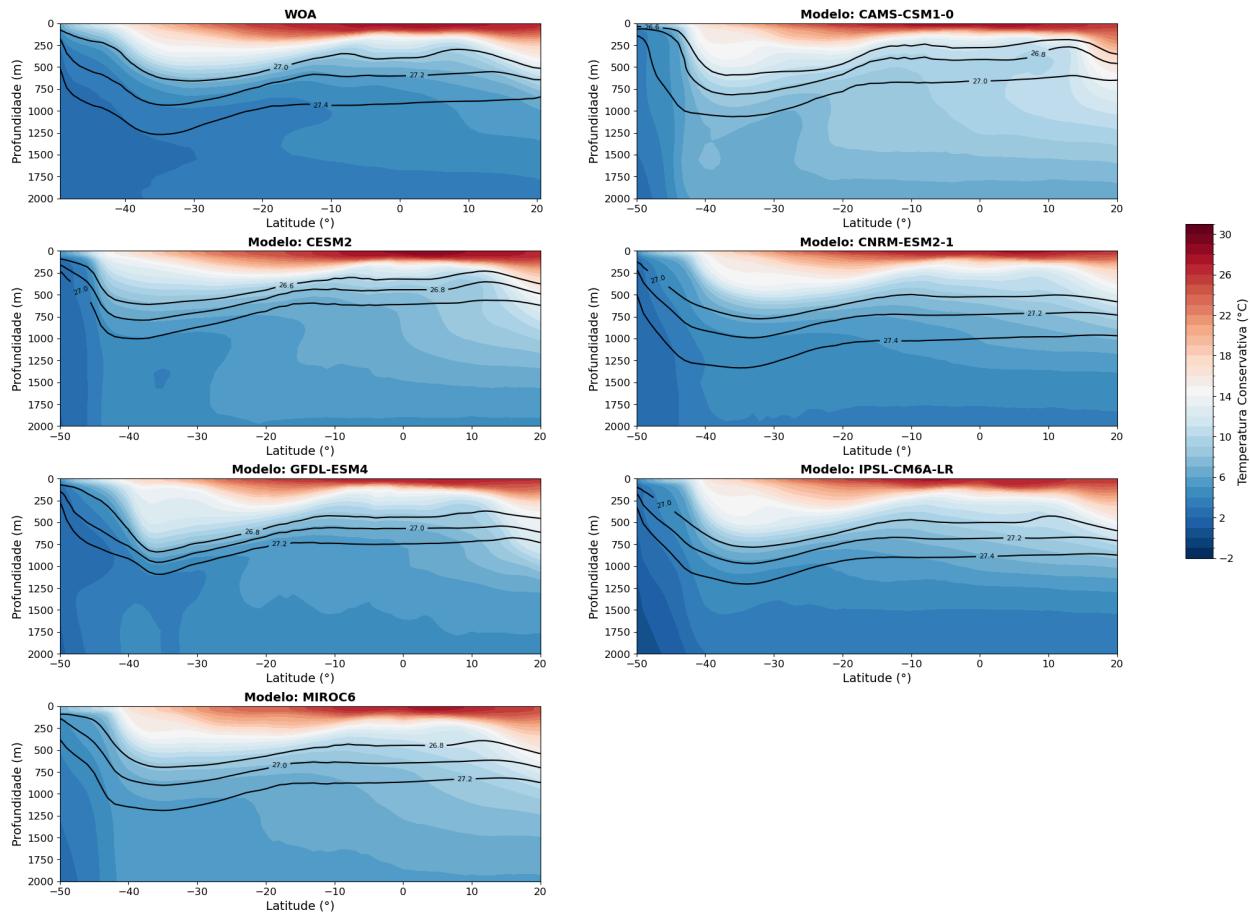


Figura 6- Médias Zonais Climatológicas da Temperatura.

4.1. ANOMALIAS DADOS HISTÓRICOS

As Figuras 7 e 8 buscam visualizar se as anomalias de temperatura e salinidade observadas na climatologia do WOA18 também são evidenciadas nos dados históricos dos modelos do CMIP6. Os dados do WOA18 apresentam para a região de estudo uma tendência de salinificação considerável ($0.1\text{g/kg} - 0.2\text{g/kg}$) em águas superficiais e sub-superficiais ao norte de 30°S , concordando com diversos estudos que indicam salinificação da termoclima devido ao aumento da evaporação nesta região e perda de salinidade em águas superficiais e intermediárias (-0.04g/kg) ao sul de 30°S pelo excesso de precipitação nas regiões subpolares (YAO; SHI; ZHAO, 2017), com o mínimo de salinidade variando em torno de -0.006g/kg . Essa variação de águas mais doces em águas intermediárias nessa região do Atlântico retratam a adocificação da AIA nas últimas décadas (CLOSE et al., 2013; SCHMIDTKO; JOHNSON, 2012)

As anomalias nos modelos apresentam variações na intensidade e localização das áreas de aumento e diminuição de salinidade, em suma, as maiores variações de salinidade concentram-se na termoclima, enquanto a camada intermediária apresenta alterações mais amenas. Em 30°S , 4 dos 6 modelos apresentam variação de -0.002 a -0.01 g/kg no mínimo de salinidade, enquanto o CNRM-ESM2 e o IPSL-CM6A-LR tendem a apresentar sinais de salinização em todas as latitudes.

Em relação às anomalias de temperatura, os dados observados apresentam uma clara tendência de aquecimento em praticamente toda coluna d'água, com maiores aumentos para águas superficiais, em toda a região de estudo. A maioria dos estudos sobre a variabilidade da AIA também retratam esse aquecimento nas últimas décadas, como uma tendência que deve se manter para os próximos anos (ARBIC; BRECHNER OWENS, 2001); SCHMIDTKO; JOHNSON, 2012). Os modelos também exibem esse padrão de aquecimento, principalmente ao sul de 30°S, mas com algumas variações de intensidade, enquanto que ao norte de 30°S regiões de resfriamento são evidenciadas. É interessante notar que nas figuras que apresentam a diferença de salinidade e temperatura para o mínimo de salinidade da AIA, a maioria dos modelos indica aquecimento mesmo nos casos em que as diferenças para as mesmas profundidades indiquem resfriamento. Em outras palavras, mesmo nos modelos em que os dados sugerem resfriamento em determinadas profundidades, a diferença para o mínimo de salinidade ainda reflete um aquecimento (por exemplo, CESM2 e CNRM-ESM2 a -10°S).

Também é possível notar, por volta de 40°S, uma extensão de anomalias extremas positivas de temperatura, em águas com profundidade superior a 500m, acompanhada de anomalias positivas de salinidade. Essas anomalias apresentam valores significativamente elevados, principalmente no modelo IPSL-CM6A-LR e no CNRM-ESM2 ($>1^{\circ}\text{C}$). No entanto, é importante ressaltar que essa anomalia não é tão pronunciada nos dados WOA18.

Tratando das variações das isopicnais, os dados do WOA18 indicam o aprofundamento das isopicnais, especialmente ao sul de 30°S, com variações menos acentuadas para latitudes mais setentrionais. Essa característica de variação é igualmente observada nos modelos, com o valor da diferença de σ_0 variando em cerca de -0.02 kg/m^3 .

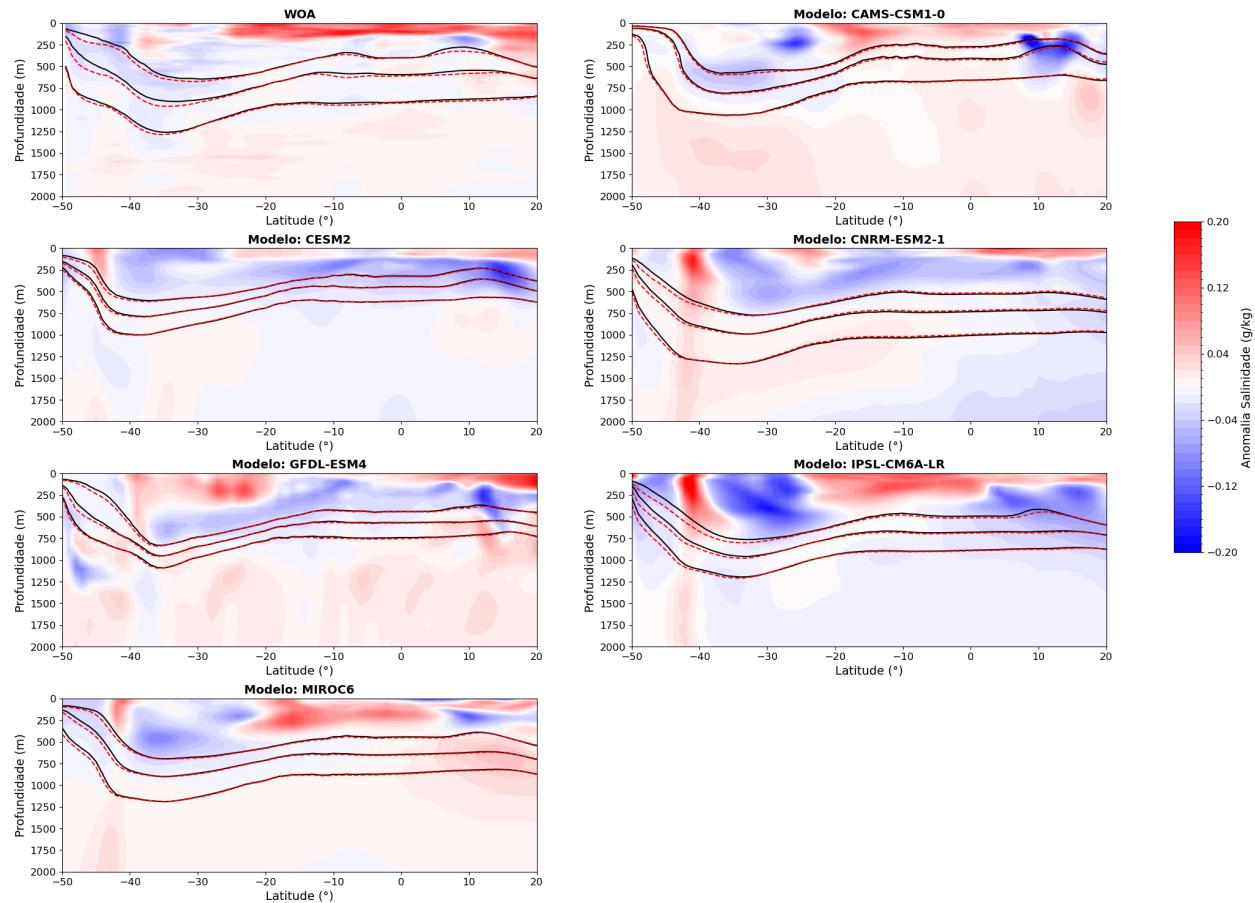


Figura 7 - Anomalias de salinidade (historical). Mudanças Observadas do WOA18: 1995-2017 menos 1955-1974. Mudança histórica nos modelos 1995–2014 menos 1955–1974. As anomalias de salinidade são mostradas em tons de cores, linhas de contorno em preto e sólidas mostram a densidade potencial para as décadas mais antigas, linhas de contorno tracejadas e vermelhas mostram a densidade potencial para as décadas mais recentes.

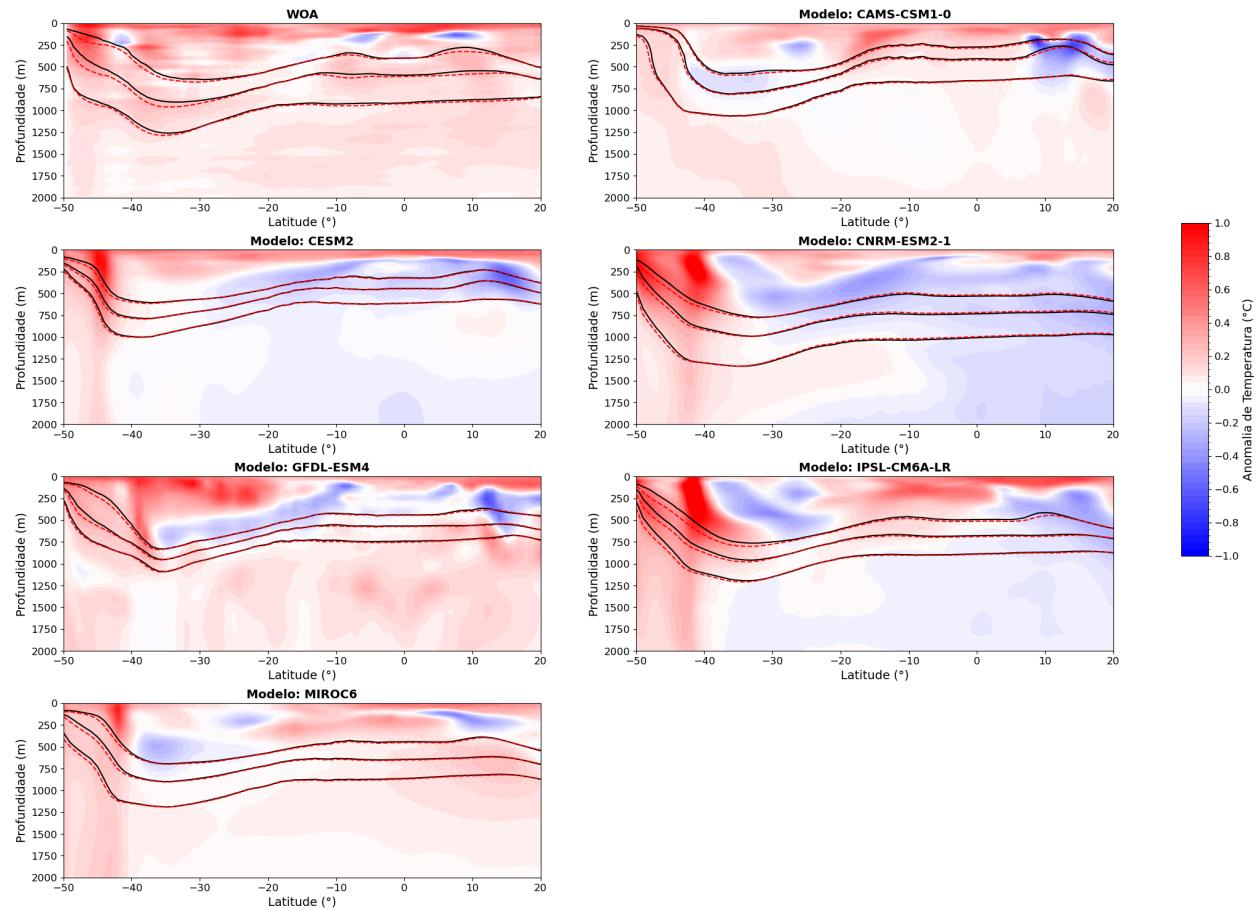


Figura 8 - Anomalias de temperatura (historical). Mudanças Observadas do WOA18: 1995-2017 menos 1955-1974. Mudança histórica nos modelos 1995–2014 menos 1955–1974.

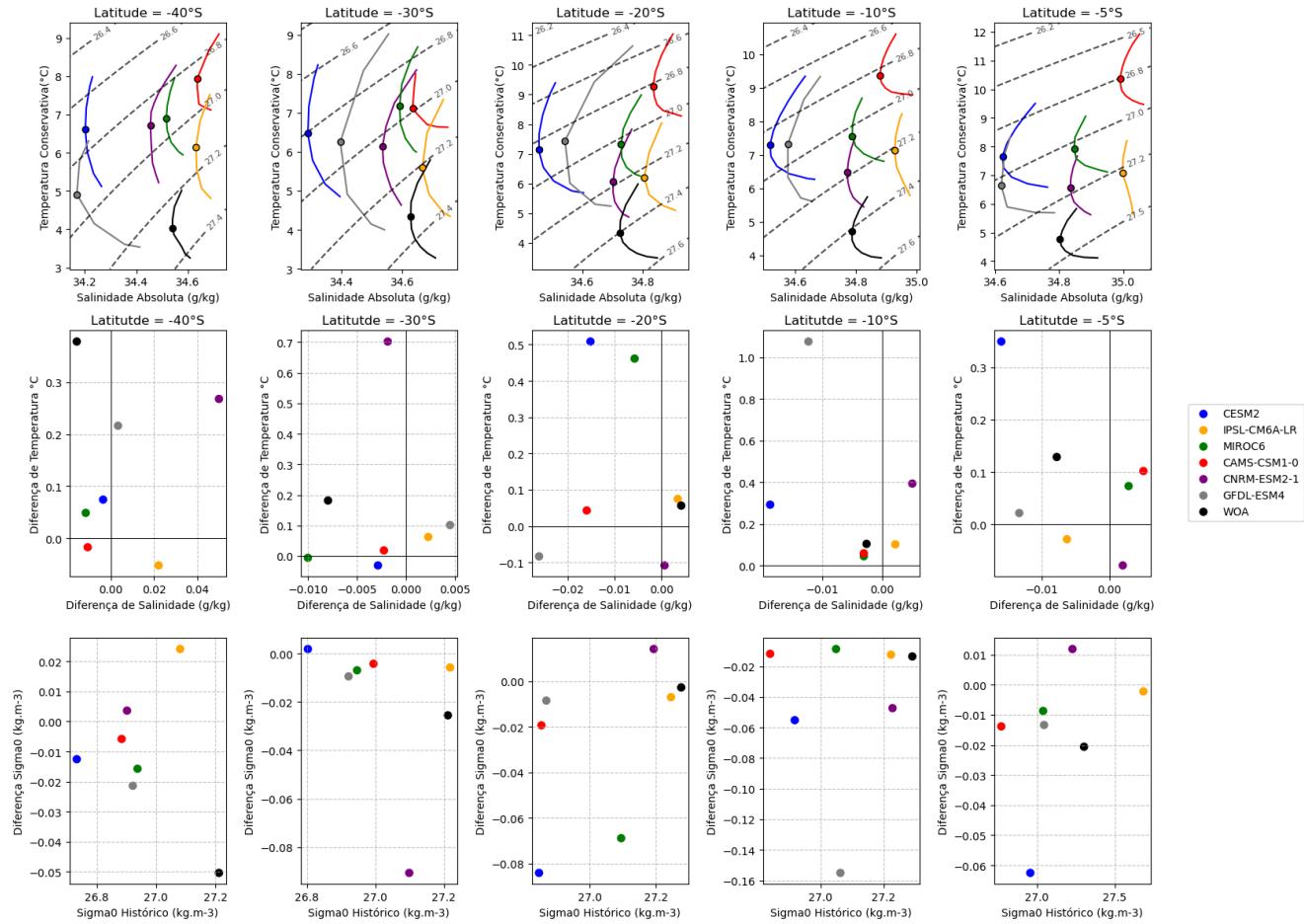


Figura 9 - Anomalias de temperatura, salinidade e densidade durante o cenário histórico. Os painéis (a-e) apresentam diagramas T-S da média zonal para diferentes latitudes. Os painéis (f-j) exibem anomalias de temperatura e salinidade referente ao mínimo de salinidade da AIA. Nos painéis (k-o) a anomalia de densidade, onde o eixo x representa a densidade referente ao período mais antigo (1955-1974); valores negativos indicam perda de densidade.

4.2. ANOMALIAS CENÁRIOS FUTUROS

As análises das anomalias de temperatura e salinidade nos cenários futuros (Figuras 10 a 14) mostram que os valores projetados para SSP585 e SSP370 são significativamente mais extremos, com o SSP585 destacando-se por apresentar as anomalias mais intensas. As anomalias de temperatura no núcleo da AIA indicam aquecimentos variando entre 0,5°C e 1,5°C, sendo que o CESM2 registra as maiores alterações. Na termoclinina, as anomalias são ainda mais pronunciadas, com regiões que registram aumentos de temperatura de até 4°C. Além disso, todos os modelos identificam uma "língua" de anomalias de temperatura extremas em torno de 40°S, destacando a importância dessa região nas trocas de calor com a atmosfera e no seu transporte pela picnoclina (MORRISON et al., 2022b).

Em relação à salinidade, os modelos convergem para a projeção de águas superficiais significativamente mais salinas ($>0,5$ g/kg), indicando um aumento na taxa de evaporação em grande parte da superfície oceânica (SATHYANARAYANAN; KÖHL; STAMMER, 2021). Essa anomalia de salinidade tende a diminuir em intensidade com o aumento da profundidade.

No núcleo da AIA, quatro modelos apontam para uma salinização em todas as latitudes, com valores que variam de 0,02 g/kg a 0,05 g/kg. Por outro lado, o CESM2 e o GFDL-ESM4 mostram uma perda de salinidade superior a 0,02 g/kg em todas as latitudes ao norte de 30°S. É importante ressaltar que as anomalias positivas são muito mais prevalentes no Atlântico Sul do que as negativas, conforme ilustrado pelas escalas gráficas. As análises de salinidade também indicam que o CESM2, em ambos os cenários, apresenta um pico de anomalia positiva de salinidade ($>+1,2$ g/kg) ao norte de 10°N, acompanhado por um grande aumento de temperatura nessa região ($>+4^{\circ}\text{C}$), que atinge profundidades de até 500 m. Na camada intermediária, é possível observar uma região de águas menos salinas acima da isolinha de 27,00, que neste modelo representa a base do núcleo da AIA, estendendo-se até cerca de 5°N. Em profundidades maiores, há uma tendência de aumento na salinidade.

O modelo GFDL-ESM4 apresenta anomalias de salinidade semelhantes às do CESM2, com anomalias negativas no Oceano Austral sendo transportadas para a camada intermediária. Já no modelo MIROC6, anomalias positivas de salinidade são predominantes em todas as latitudes, cobrindo grande parte da coluna d'água, com poucas regiões mostrando anomalias negativas.

Para os modelos IPSL-CM6A-LR, CNRM-ESM2 e CAMS-CSM1, observam-se principalmente regiões de salinização, além de algumas áreas de refrescamento na termoclinina, entre 35°S e 25°S e ao norte de 10°N. No entanto, essas anomalias não são observadas no núcleo da AIA, e esses modelos convergem para anomalias positivas em todas as latitudes. Em termos de densidade, os modelos indicam uma AIA menos densa, com o CESM2 novamente mostrando os valores mais extremos, enquanto diferenças acima de $-0,05\text{ kg/m}^3$ são visíveis na maioria dos outros modelos.

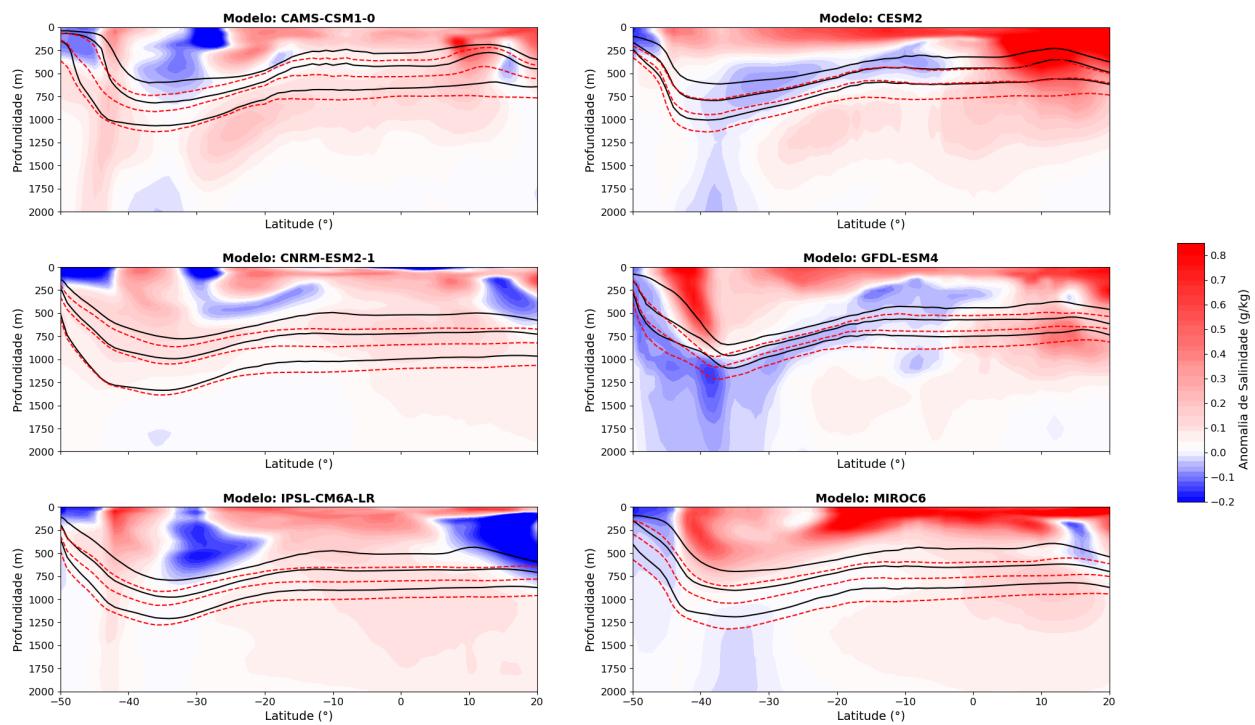


Figura 10 - Anomalias de salinidade (SSP585). Projeções futuras das anomalias de salinidade nos modelos 2080–2100 menos 1980–2014. Linhas de contorno em preto e sólidas mostram a densidade potencial para as décadas mais antigas (1980–2014), linhas de contorno tracejadas e vermelhas mostram a densidade potencial para as décadas futuras (2080–2100).

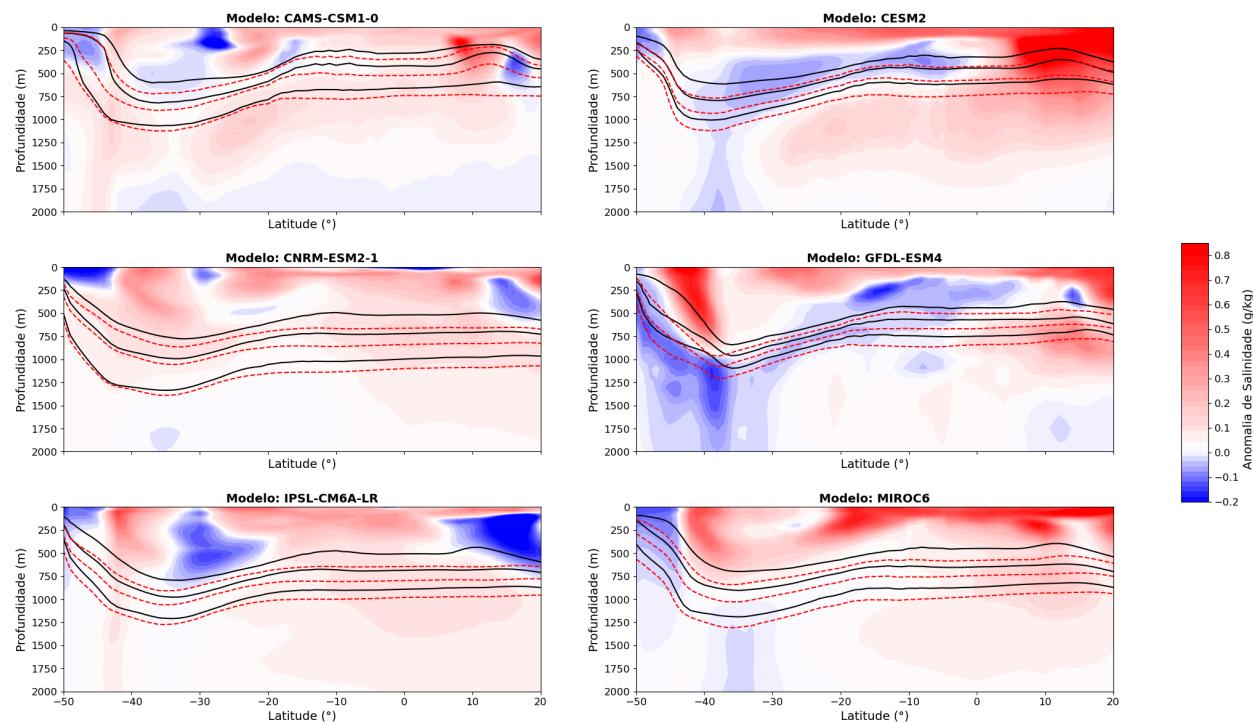


Figura 11 - Anomalias de salinidade (SSP370). Projeções futuras das anomalias de salinidade nos modelos 2080–2100 menos 1980–2014.

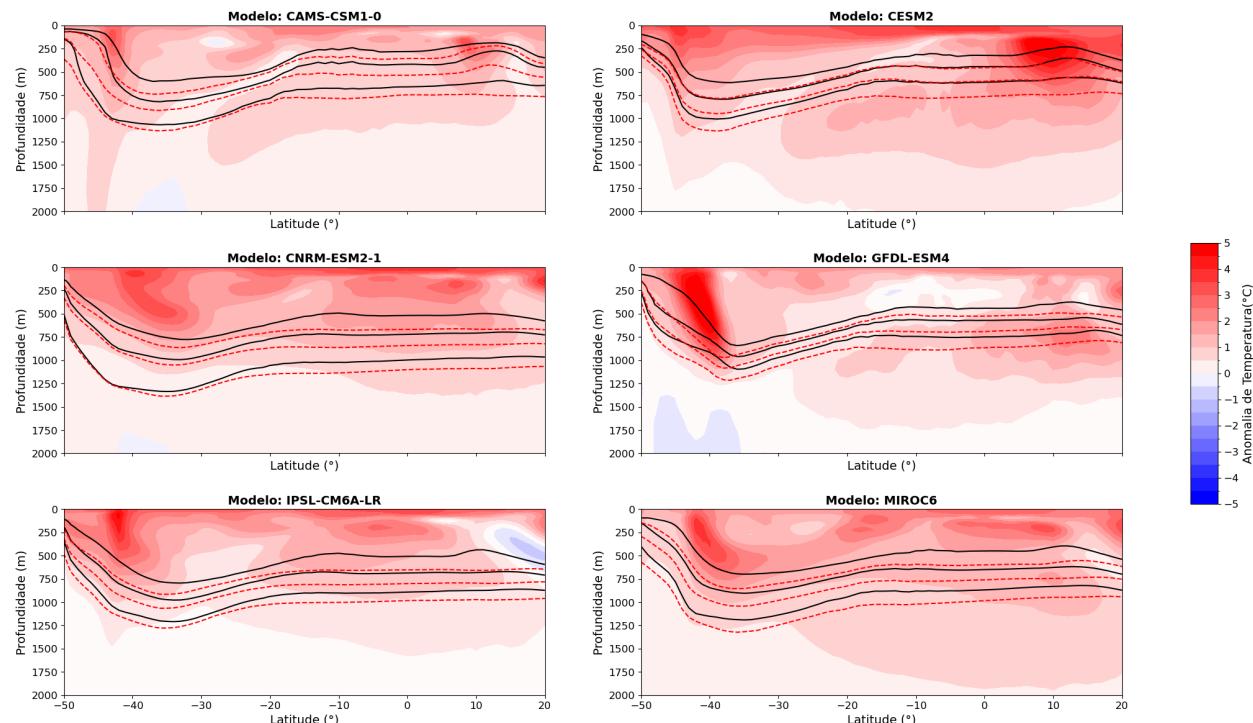


Figura 12 - Anomalias de Temperatura (SSP585). Projeções futuras das anomalias de salinidade nos modelos 2080–2100 menos 1980–2014.

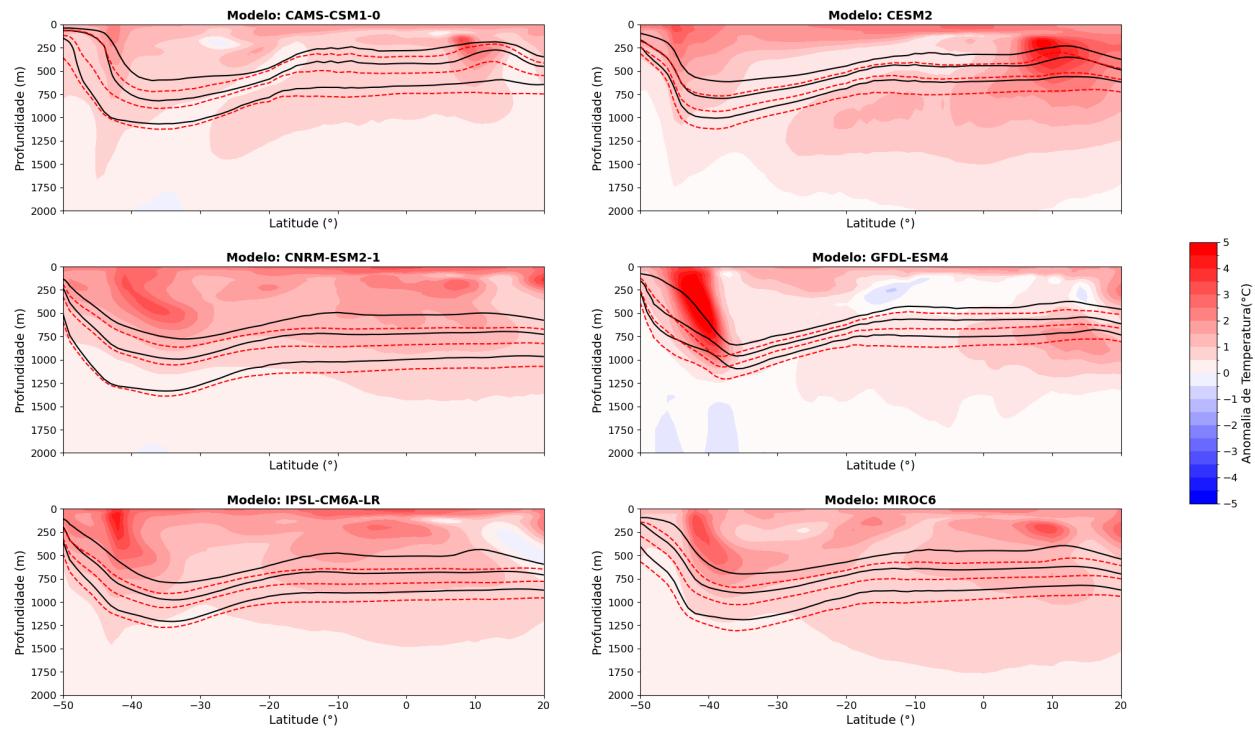


Figura 13 - Anomalias de Temperatura (SSP370). Projeções futuras das anomalias de salinidade nos modelos 2080–2100 menos 1980–2014.

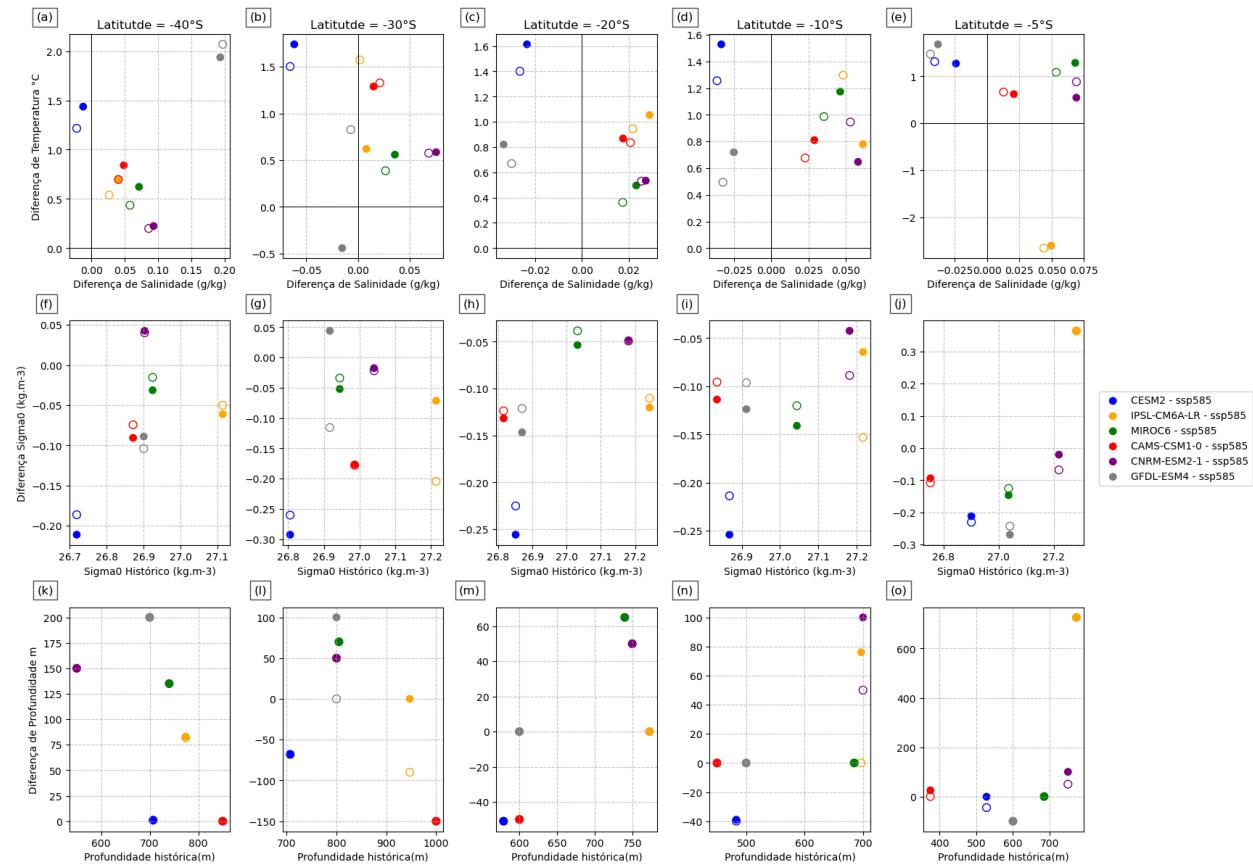


Figura 14 - Anomalias de temperatura, salinidade, densidade e profundidade para os cenários das projeções futuras (2080-2100) em comparação a média climatológica histórica (1981-2010). Os painéis (a-e) exibem anomalias de temperatura e salinidade referente ao mínimo de salinidade da AIA. Os painéis (f-j) apresentam a anomalia de densidade, onde o eixo x representa a densidade referente ao período histórico. Nos painéis (k-o) a diferença de profundidade do mínimo de salinidade, valores negativos indicam afloramento desse mínimo. Círculos preenchidos indicam diferenças em relação ao cenário SSP585, enquanto círculos não preenchidos representam as diferenças em relação ao SSP370."

4.3. DIAGRAMAS T-S VOLUMÉTRICOS

A Figura 15 mostra a diferença entre os diagramas T-S para os diferentes modelos no cenário SSP585 (2080-2100) em comparação com o período histórico (1981-2010) para a região 1. A Figura 16 exibe essa mesma comparação para a região 2. As áreas em vermelho indicam um aumento de volume, enquanto as áreas em azul mostram uma diminuição. Por fim, a Figura 17 apresenta os diagramas T-S volumétricos referentes à média dos modelos (ensemble).

As figuras mostram padrões de ganho e perda de volume nos diagramas T-S volumétricos entre os diferentes modelos. Apesar das variações nos intervalos de salinidade e temperatura que representam a AIA, as anomalias para os cenários futuros são consistentes, indicando um deslocamento de volume para intervalos de maior temperatura. Na região 1, observa-se que os intervalos de temperatura mais elevados, associados a águas mais superficiais, demonstram um deslocamento de volume para áreas de menor salinidade, o que está relacionado ao aumento do ciclo hidrológico na região de formação dessa massa d'água. Já na região do mínimo de salinidade, a variação em salinidade não é tão significativa em todos os modelos. No entanto, o CNRM-ESM2-1, o MIROC6 e o CAMS-CSM1-0 indicam claramente um deslocamento para regiões até 0.1 g/kg mais salinas. Para as águas mais profundas, em intervalos de temperatura mais baixos, todos os modelos mostram uma tendência de variação para regiões mais salinas.

Para a região 2, as projeções indicam alterações significativas, com destaque para o deslocamento e a notável redução dos picos de volume da AIA em temperaturas consideravelmente superiores ($>+1^{\circ}\text{C}$), acompanhadas por uma distribuição mais ampla desse volume. Para as anomalias de salinidade, os modelos que apresentam algum sinal de perda de salinidade na região da AIA (Figura 11), apresentam essa característica no diagrama TS Volumétrico (CESM2 e GFDL-ESM4), enquanto os restantes dos modelos indicam deslocamento do volume para intervalos mais salinos.

Dependendo da representação da extensão do mínimo de salinidade da AIA pelos modelos, há também uma projeção variada do volume nos diagramas. Em alguns casos, nos modelos (CESM2, MIROC6E CNRM-ESM2-1) a AIA se aproxima do equador, mostrando volumes mais uniformemente distribuídos desde o mínimo na região mais ao sul até o mínimo na região equatorial. No entanto, no modelo IPSL, que não captura adequadamente a extensão desse mínimo, exibe um pico associado a um intervalo de salinidade característico de água mais salina, evidenciando a limitação do modelo em refletir com precisão o mínimo da AIA.

A análise das figuras que representam a diferença entre os diagramas T-S revela, claramente, um grande deslocamento volumétrico da AIA em direção a isopicnais menos densas. Observa-se também nos diagramas, picos em regiões de menor temperatura nos diagramas T-S, na faixa de 3°C no modelo do CESM2 e 2°C nos modelos do IPSL-CM6A-LR e do MIROC6. Estes picos estão associados a regiões mais ao sul, perto da Frente Subantártica onde ocorre a predominância de águas nessas faixas de temperaturas. O que verifica-se nos três

modelos também é uma redução do volume associado às águas nesta região e o deslocamento dos picos para temperaturas em cerca de 0.3-0.5°C mais quente.

Pela Figura 17, que apresenta os diagramas T-S volumétricos, observa-se também que, nos cenários futuros, os picos dos diagramas T-S, além de se deslocarem, perdem considerável volume, indicando uma maior distribuição da Água Intermediária. Sallée et al. (2013) aponta para uma redução da formação da AIA nos cenários futuros, devido à redução da camada mista no Oceano Austral e na região de formação da AIA no sudeste do Pacífico durante o inverno, o que deve limitar a subducção de água para profundidades maiores. Enquanto Goes et al. (2008) retrata que a subducção da AAIW não muda muito durante o século 21, mas se desloca para regiões de menor densidade. Como esses estudos utilizam diferentes metodologias para calcular a taxa de formação da AAIW, os resultados podem variar, dificultando uma comparação direta. Contudo, a análise apresentada nesta figura oferece uma nova perspectiva ao evidenciar a diminuição do volume nos picos da AAIW.

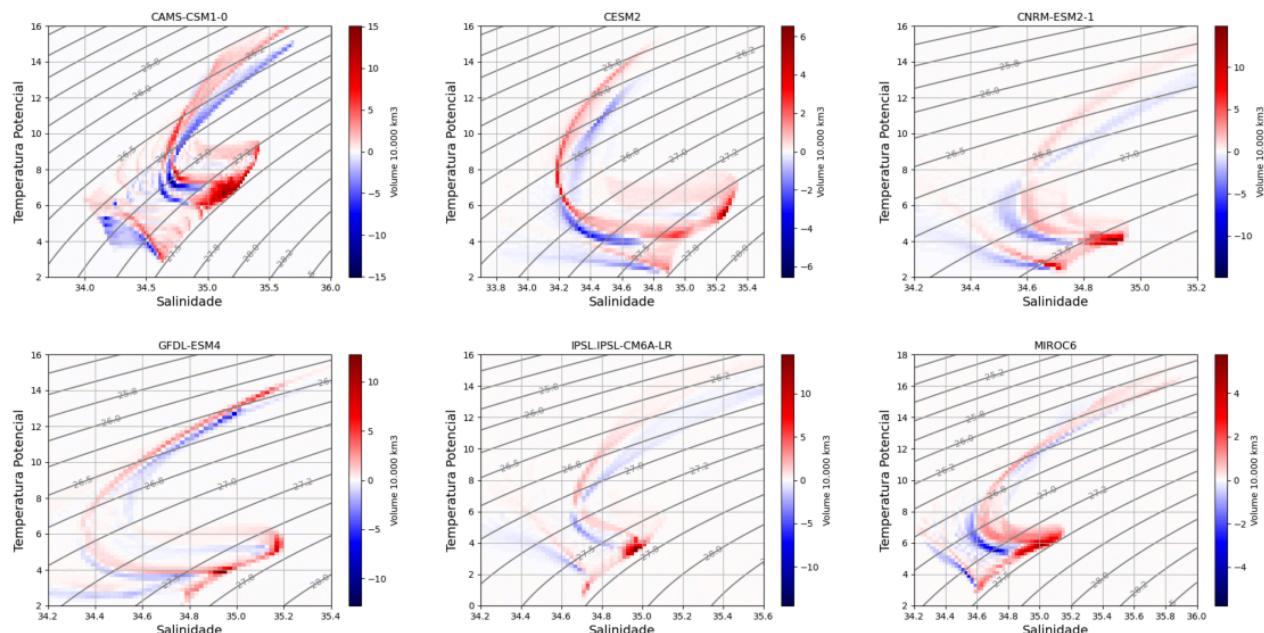


Figura 15. Diferença dos Diagramas T-S Volumétricos de 2080-2100 (SSP585) menos o Histórico (1981-2010) para a região 1. As cores vermelhas representam intervalos de aumento de volume, enquanto as cores azuis indicam intervalos de perda de volume.

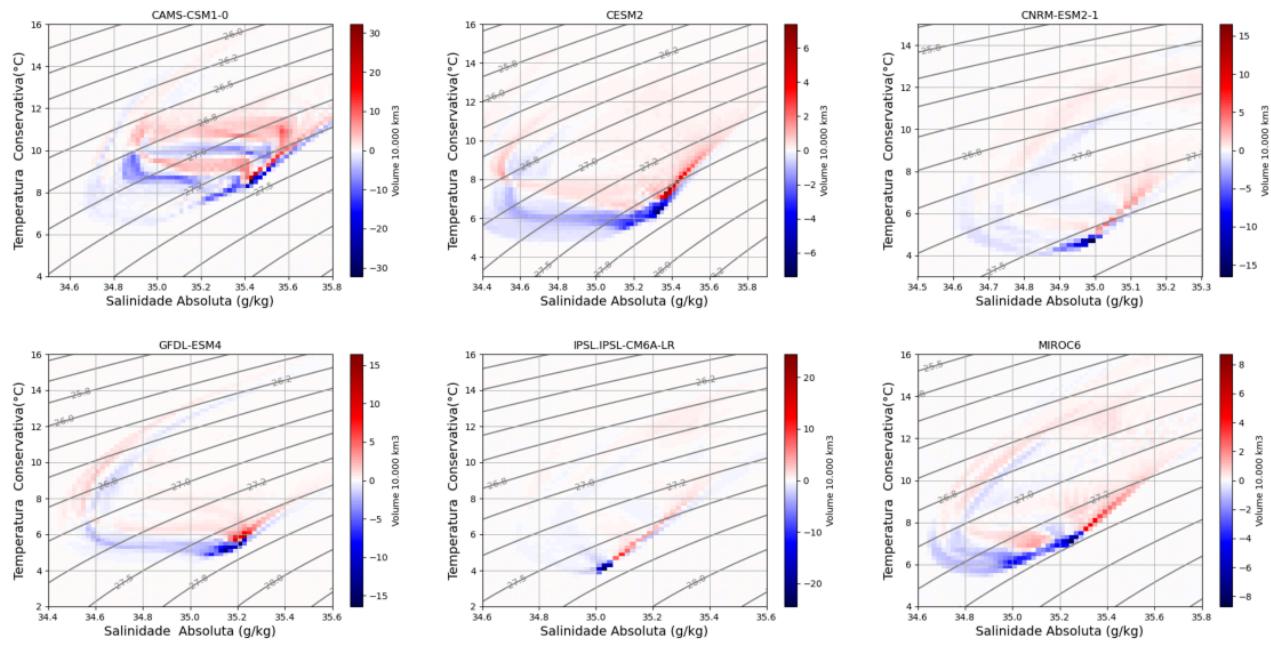


Figura 16. Diferença dos Diagramas T-S Volumétricos de 2080-2100 (SSP585) menos o Histórico (1981-2010) para a região 2. As cores vermelhas representam intervalos de aumento de volume, enquanto as cores azuis indicam intervalos de perda de volume.

Diagrama T-S Volumétrico - Ensemble (1981-2010 e 2080-2100)

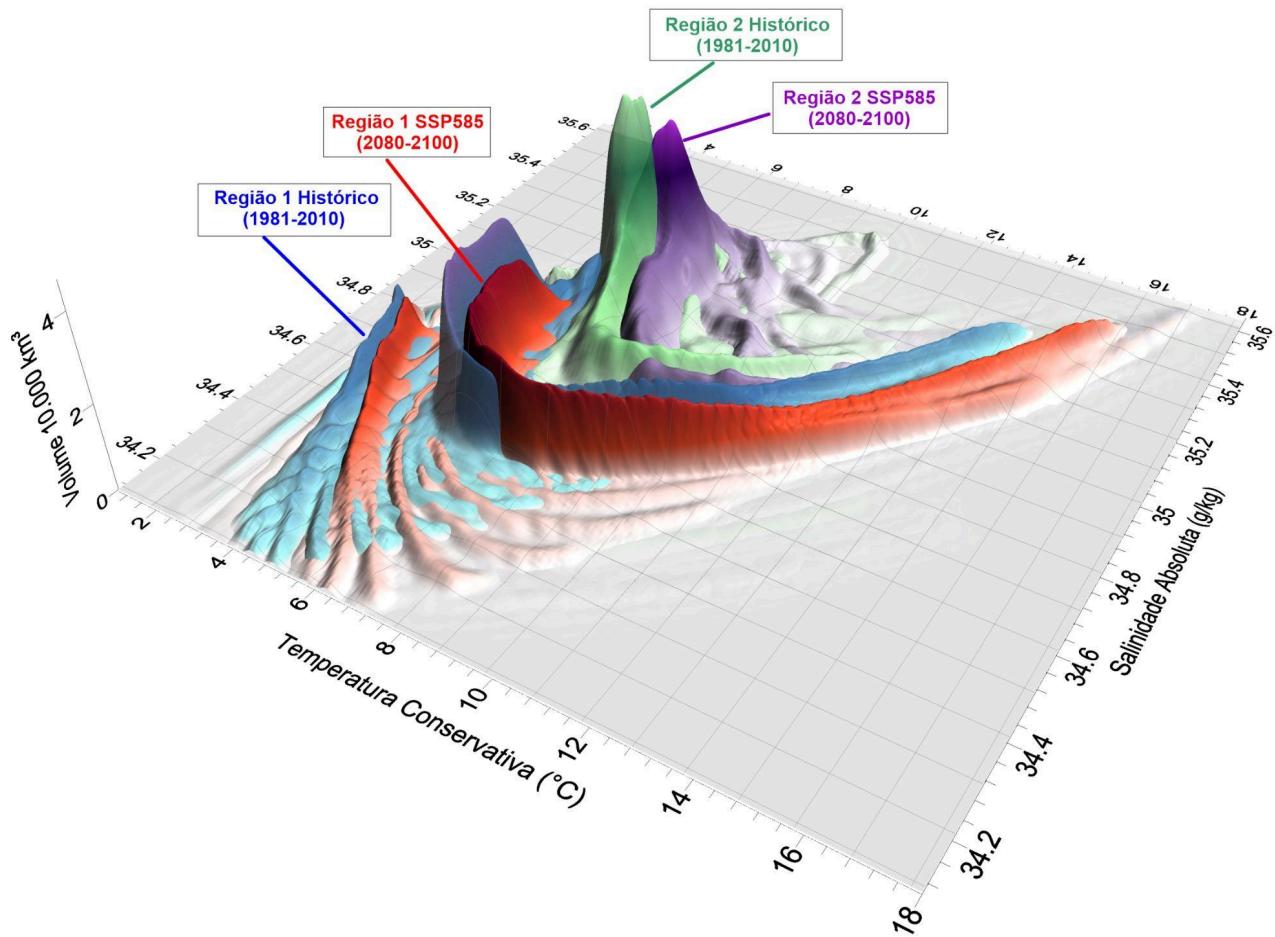


Figura 17. Diagrama T-S volumétrico ilustrando as mudanças projetadas na distribuição de massas de água nas regiões 1 e 2 sob o cenário SSP585. A superfície azul representa os dados volumétricos T-S para o período histórico (1981-2010) na região 1, enquanto a superfície vermelha representa a distribuição T-S projetada para o futuro (2080-2100) sob o cenário SSP585. A superfície verde mostra os dados volumétricos T-S históricos para a região 2, e a superfície roxa indica a distribuição T-S projetada para a região 2 sob o cenário SSP585.

5. PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Durante o período de iniciação científica, os resultados da pesquisa foram inicialmente apresentados no XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, realizado de 28 a 30 de novembro de 2023, por meio de um banner intitulado Volume e Distribuição das Águas Intermediárias do Oceano Atlântico Sul em Cenários Climáticos Futuros, onde foram destacados os resultados preliminares do estudo. Esse evento proporcionou uma excelente oportunidade para divulgar a pesquisa em andamento e trocar ideias com outros pesquisadores da área.

Posteriormente, os resultados finais da pesquisa foram apresentados, também em formato de banner, durante a realização conjunta do 20º Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar – COLACMAR 2024 e do 8º Congresso Brasileiro de Oceanografia – CBO 2024. A participação nesses eventos não só permitiu compartilhar os achados da pesquisa com a comunidade científica, como também possibilitou o contato com outros pesquisadores da área de ciências do mar.

Além disso, um artigo está sendo escrito com os resultados finais da pesquisa. O manuscrito está em fase de ajustes finais e tem por objetivo a publicação em uma revista científica da área de oceanografia ou ciências do mar.

6. CONCLUSÕES

A análise dos seis modelos para as variações da AIA nas regiões 1 e 2 revela tendências consistentes em cenários futuros, tanto em termos de temperatura quanto de salinidade. De modo geral, observa-se um aquecimento dessa massa de água, com um volume significativo deslocando-se para faixas de temperatura entre 0.5°C e 1.0°C mais altas. Em contrapartida, as mudanças de salinidade apresentam maior variabilidade entre os diferentes modelos analisados. Além disso, mudanças substanciais na densidade do oceano é prevista também para os cenários futuros, o que deve impactar na subducção e nas anomalias de temperatura e salinidade.

Compreender os mecanismos responsáveis por essas variações e as implicações do aquecimento da AIA é crucial. Essas mudanças significativas nas médias climatológicas podem ter impactos profundos na circulação oceânica e nos padrões climáticos, além de possivelmente sinalizarem alterações importantes em sua região de formação.

Portanto, é essencial a realização de estudos adicionais com base nesses modelos para aprofundar a compreensão dos fatores que estão impulsionando essas tendências nas características da AIA. Esses modelos também podem ser utilizados para avaliar os impactos dessas variações em outras variáveis climatológicas, permitindo uma investigação mais precisa dos efeitos potenciais dessas mudanças.

7. REFERÊNCIAS

Abernathay, R., Kevin Paul, Joe Hamman, Matthew Rocklin, Chiara Lepore et al., 2017 Pangeo NSF Earthcube Proposal.

10.6084/m9.figshare.5361094.v1

https://figshare.com/articles/Pangeo_NSF_Earthcube_Proposal/5361094.

Abernathay, R. P., T. Augspurger, A. Banihirwe, C. C. Blackmon-Luca, T. J. Crone et al., 2021 Cloud-Native Repositories for Big Scientific Data. *Computing in Science & Engineering* 23: 26–35. 10.1109/mcse.2021.3059437.

ARBIC, B. K.; BRECHNER OWENS, W. Climatic Warming of Atlantic Intermediate Waters*. *Journal of Climate*, v. 14, n. 20, p. 4091–4108, out. 2001.

BIGG, G. R. et al. The role of the oceans in climate. *International Journal of Climatology*, v. 23, n. 10, p. 1127–1159, ago. 2003.

CALVIN, K. et al. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)].** IPCC, Geneva, Switzerland. [s.l.] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 jul. 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

CARMACK, E. C.; AAGAARD, K. {b}{}A Note on Volumetric TS in Benguela Current}. Estuarine and Coastal Marine Science. 1977.

CESSI, P. The Global Overturning Circulation. *Annual Review of Marine Science*, v. 11, n. 1, p. 249–270, 3 jan. 2019.

CLOSE, S. E. et al. Control of mode and intermediate water mass properties in drake passage by the amundsen sea low. *Journal of Climate*, v. 26, n. 14, 2013.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 26 maio 2016.

GARCIA-SOTO, C. et al. An Overview of Ocean Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature, Ocean Heat Content, Ocean pH, Dissolved Oxygen Concentration, Arctic Sea Ice Extent, Thickness and Volume, Sea Level and Strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation). *Frontiers in Marine Science*, v. 8, 21 set. 2021.

HUANG, K. F.; OPPO, D. W.; CURRY, W. B. Decreased influence of Antarctic intermediate water in the tropical Atlantic during North Atlantic cold events. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 389, 2014. KNUTTI, R.; STOCKER, T. F. {b}{}Limited Predictability of the Future Thermohaline Circulation Close to an Instability Threshold}. American Meteorological Society. 15 jan. 2022.

LI, Z. et al. The Origin and Fate of Antarctic Intermediate Water in the Southern Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, v. 52, n. 11, p. 2873–2890, nov. 2022. McCarthy, G. D., Brown, P. J., Flagg, C. N., Goni, G., Houpert, L., Hughes, C. W., et al. (2020). Sustainable observations of the AMOC: methodology and technology. *Reviews of Geophysics*, 58, e2019RG000654. <https://doi.org/10.1029/2019RG000654>

MCCARTNEY, M. S. **Subantarctic mode water**. [s.l.] Woods Hole Oceanographic Institution, 1979.

MCDougall, T. J. et al. The interpretation of temperature and salinity variables in numerical ocean model output and the calculation of heat fluxes and heat content. *Geoscientific Model Development*, v. 14, n. 10, 2021.

MEURIOT, O.; LIQUE, C.; PLANCHEREL, Y. Properties, sensitivity, and stability of the Southern Hemisphere salinity minimum layer in the UKESM1 model. *Climate Dynamics*, v. 60, n. 1–2, p. 87–107, jan. 2023.

MOLINELLI, E. J. The Antarctic influence on Antarctic intermediate water. 1981. MORRISON, A. K. et al. Ventilation of the Southern Ocean Pycnocline. {b}{}Annual Review of Marine Science}, v. 14, n. 1, p. 405\uc0\u8211\{430, 3 jan. 2022.

NÚÑEZ-RIBONI, I. et al. Lagrangian circulation of Antarctic Intermediate Water in the subtropical South Atlantic. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 52, n. 3–4, p. 545–564, 2005.

PIOLA, A. R.; GEORGI, D. T. Circumpolar properties of Antarctic intermediate water and Subantarctic Mode Water. **Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers**, v. 29, n. 6, 1982.

PIOLA, A. R.; GORDON, A. L. Intermediate waters in the southwest South Atlantic. **Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers**, v. 36, n. 1, p. 1–16, jan. 1989.

REID, P. C. et al. Impacts of the oceans on climate change. **Advances in marine biology**, v. 56, p. 1–150, 2009.

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global environmental change**, v. 42, p. 153–168, 2017. SANTOSO, A.; ENGLAND, M. H. Antarctic intermediate water circulation and variability in a coupled climate model. **{\b{Journal of Physical Oceanography}}**, v. 34, n. 10, 2004.

SATHYANARAYANAN, A.; KÖHL, A.; STAMMER, D. Ocean Salinity changes in the global ocean under global warming conditions Part 1: Mechanisms in a strong warming scenario. **Journal of Climate**, p. 1–56, 27 jul. 2021.

SCHMIDTKO, S.; JOHNSON, G. C. Multidecadal warming and shoaling of antarctic intermediate water. **Journal of Climate**, v. 25, n. 1, p. 207–221, jan. 2012.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, 1999. TALLEY, L. D. **{\b{Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic}}**. WEFER G, BERGER WH, SIEDLER G, WEBB DJ (eds), 1996, **The South Atlantic: Present and Past Circulation**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 219-238.

WEI, J.; GUNN, K. L.; REECE, R. Mid-Ocean Ridge and Storm Enhanced Mixing in the Central South Atlantic Thermocline. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 771973, 20 jan. 2022.

XIA, X. et al. Three Types of Antarctic Intermediate Water Revealed by a Machine Learning Approach. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 21, 2022.

YAO, W.; SHI, J.; ZHAO, X. Freshening of Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic Ocean in 2005-2014. **Ocean Science**, v. 13, n. 4, 2017.

YASHAYAEV, I.; CLARKE, A. Evolution of North Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series. **Oceanography**, v. 21, n. 1, p. 30–45, 2008.

ZHU, C.; LIU, Z.; GU, S. Model bias for South Atlantic Antarctic intermediate water in CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 9–10, p. 3613–3624, maio 2018.

AUTO-AVALIAÇÃO DO ALUNO:

Durante o período de iniciação científica, além de adquirir conhecimento na parte de oceanografia física e de ter contato com o estado da arte da modelagem climática, através dos modelos do CMIP6, também tive a oportunidade de aprofundar meu conhecimento em programação, análise de dados e automação de tarefas para conseguir analisar os diferentes modelos de forma hábil e eficiente. Durante o percurso tive contato com diferentes trabalhos que retratam o atual desafio.

Durante o percurso, percebi a importância dessas habilidades interdisciplinares para uma abordagem abrangente e eficiente na análise dos diferentes modelos. Também aprimorei minha capacidade de leitura em inglês, aumentando minha capacidade de interpretação e compreensão de diferentes conceitos presentes em artigos especializados na área de oceanografia física.

Essa experiência não apenas ampliou meu conhecimento técnico, mas também me permitiu desenvolver uma perspectiva mais completa sobre os desafios enfrentados na área. Estou confiante de que essas habilidades e conhecimentos adquiridos serão de extrema importância para minha futura contribuição no área da análise de dados climáticos.