



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA**

**JÉSSICA LOBATO DE LIMA**

**AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA  
PELOS MODELOS DO CMIP5 E CMIP6 DURANTE O  
PERÍODO HISTÓRICO E PROJEÇÕES FUTURAS NA  
REGIÃO DA CORRENTE DO BRASIL AO LONGO DA  
RADIAL DE MONITORAMENTO DE ALTA DENSIDADE DE  
XBT NOAA AX97**

Rio de Janeiro

Setembro de 2025



L732a Lobato de Lima, Jéssica  
AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA PELOS  
MODELOS DO CMIP5 E CMIP6 NA REGIÃO DA CORRENTE DO  
BRASIL AO LONGO DA RADIAL DE MONITORAMENTO DE ALTA  
DENSIDADE DE XBT NOAA AX97 / Jéssica Lobato de  
Lima. -- Rio de Janeiro, 2025.  
56 f.

Orientador: Mauro Cirano.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa  
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2025.

1. Oceanografia Física. 2. Corrente do Brasil. 3.  
Modelos do Sistema Terrestre. I. Cirano, Mauro,  
orient. II. Título.

**AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA PELOS MODELOS  
DO CMIP5 E CMIP6 DURANTE O PERÍODO HISTÓRICO E PROJEÇÕES  
FUTURAS NA REGIÃO DA CORRENTE DO BRASIL AO LONGO DA RADIAL  
DE MONITORAMENTO DE ALTA DENSIDADE DE XBT NOAA AX97**

**JÉSSICA LOBATO DE LIMA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS  
GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

---

Prof. Dr. Mauro Cirano - PPGM/UFRJ - Orientador

---

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad – PPGM/UFRJ

---

Dr. Ronald Buss de Souza – INPE

Rio de Janeiro  
Setembro de 2025

AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA PELOS MODELOS  
DO CMIP5 E CMIP6 DURANTE O PERÍODO HISTÓRICO E PROJEÇÕES  
FUTURAS NA REGIÃO DA CORRENTE DO BRASIL AO LONGO DA RADIAL DE  
MONITORAMENTO DE ALTA DENSIDADE DE XBT NOAA AX97

Jéssica Lobato de Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Cirano

Rio de Janeiro

Setembro de 2025

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação à minha família, que sempre acreditou em mim e me apoiou incondicionalmente, mesmo nos momentos em que eu duvidava de mim mesma. Ao meu marido, que foi minha base, meu porto seguro e minha fonte de inspiração diária, agradeço por caminhar ao meu lado, me encorajando, compreendendo meus desafios e celebrando cada pequena conquista. Aos meus amigos, que me acolheram com palavras, gestos e presença nos momentos mais difíceis, meu sincero reconhecimento: sem vocês, esta jornada teria sido muito mais árdua. A todos vocês, meu profundo e eterno agradecimento, por me darem força, amor e coragem para chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero expressar minha mais profunda gratidão ao meu orientador, Mauro, cuja orientação, paciência e sabedoria foram fundamentais em cada etapa desta dissertação. Sua dedicação, atenção aos detalhes e incentivo constante não apenas direcionaram este trabalho, mas também me inspirando a buscar excelência em tudo o que faço. Sou imensamente grata por todo o conhecimento compartilhado, pelos conselhos valiosos, pela confiança depositada em mim e por todas as oportunidades ao longo desta jornada. Agradeço também à minha amiga Tyanne, que foi minha verdadeira parceira de batalha. Com quem eu pude contar incondicionalmente não apenas no auxílio da programação, como também no projeto, cobrindo minhas falhas quando eu mais precisava, espero ter conseguido sempre fazer o mesmo por você. Além do suporte técnico, sua presença, incentivo e bom humor tornaram os momentos mais difíceis muito mais leves e suportáveis.

## RESUMO

Este trabalho avalia a habilidade dos Modelos do Sistema Terrestre (ESMs) e dos Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (AOGCMs) das fases CMIP5 e CMIP6 em representar a estrutura termohalina e a circulação oceânica na região da Corrente do Brasil (CB), com ênfase na análise das massas d'água ao longo da radial de alta densidade de XBT NOAA-AX97. Utilizaram-se dados observacionais *in situ* do projeto MOVAR, dados da reanálise ORAS5 e simulações dos ESMs e dos AOGCMs. A análise contemplou os períodos histórico (1976–2005) e projetados (2041–2070 e 2071–2100), com foco em diferentes cenários do CMIP6 (SSP1–2.6, SSP2–4.5 e SSP5–8.5). Os resultados mostram que o modelo GFDL-CM4 (CMIP6), com maior resolução espacial, apresenta melhor desempenho na representação da CB e das massas d'água associadas, especialmente nas camadas superficial e intermediária. Observou-se que a qualidade da representação depende mais da resolução do modelo do que da fase do CMIP. Quanto às projeções, não foi identificada uma tendência clara de aumento ou diminuição dos transportes de volume e calor entre os cenários futuros, indicando alta incerteza nos resultados regionais. A pesquisa ressalta a importância de observações contínuas, como as do MOVAR, e da escolha criteriosa dos modelos em estudos regionais, visando uma melhor compreensão das respostas do oceano Atlântico Sul frente às mudanças climáticas.

## **ABSTRACT**

This study evaluates the ability of Earth System Models (ESMs) and Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCM) from the CMIP5 and CMIP6 phases to represent the thermohaline structure and ocean circulation in the Brazil Current (BC) region, with emphasis on the analysis of water masses along the high-density NOAA-AX97 XBT transect. In situ observational data from the MOVAR project, the ORAS5 ocean reanalysis, and ESM/AOGCM simulations were used. The analysis covered both the historical period (1976–2005) and future projections (2041–2070 and 2071–2100), focusing on different CMIP6 scenarios (SSP1–2.6, SSP2–4.5, and SSP5–8.5). The results show that the GFDL-CM4 model (CMIP6), with higher spatial resolution, performs best in representing the BC and its associated water masses, particularly in the surface and intermediate layers. It was observed that the quality of the representation depends more on the model's resolution than on the CMIP phase. Regarding future projections, no clear trend of increase or decrease in volume or heat transport was identified across scenarios, indicating high uncertainty in regional outcomes. The research highlights the importance of continuous observational efforts, such as MOVAR, and the careful selection of models in regional studies, aiming for a better understanding of the South Atlantic Ocean's response to climate change.

## LISTA DE FIGURAS

- 1 Projeção das emissões globais segundo o CMIP5 e CMIP6 de (a) Dióxido de Carbono e (b) Metano e (c) Média global do forçamento radiativo. Os cenários de referência do SSPs (CMIP6) são comparados aos RCPs (CMIP5)..... 3
- 2 Estrutura oceanográfica na região sudeste-sul brasileira. .... 4
- 3 Região da área de estudo sobreposta com a batimetria local em metros fornecida pelo modelo MPI-ESM-MR, onde a linha pontilhada indica a radial de referência AX97 e a radial costeira considerada.. .... 9
- 4 Diagrama T-S dos ESMs do CMIP5 descritos na Tabela 1 durante o período histórico para (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. Em vermelho está representada a AT+ACAS, em rosa a AIA, em verde a APAN e em azul a AAF. A linha tracejada cinza mostra os níveis de densidade identificados para a divisão das massas d'água do respectivo ESM. A linha tracejada mostra o diagrama T-S do WOA23 e nela estão demarcadas as divisões das massas d'água.....13
- 5 Diagrama T-S dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 durante o período histórico para (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho está representada a AT+ACAS, em rosa a AIA, em verde a APAN e em azul a AAF. A linha tracejada cinza mostra os níveis de densidade identificados para a divisão das massas d'água do respectivo ESM. A linha tracejada mostra o diagrama T-S do WOA23 e nela estão demarcadas as divisões das massas d'água. .... 14
- 6 (a) Profundidade da máxima da CB em cada um dos modelos. (b) Transporte máximo para sul da CB em cada um dos modelos. Modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. .... 15
- 7 Viés de (a) salinidade e (b) de temperatura potencial em cada um dos modelos na camada superficial da AT+ACAS. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. .... 19
- 8 Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na camada da AIA. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. .... 19
- 9 Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na camada da APAN. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. .... 20
- 10 Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na primeira camada da AAF. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. .... 21
- 11 Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) dados in situ do MOVAR (b) Reanálise ORAS5. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 22

- 12 Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) CanESM2 (b) GFDL-ESM2G (c) GFDL-ESM2M (d) HadGEM2-ES (e) MIROC-ESM (f) MPI-ESM-MR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 23
- 13 Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 24
- 14 Transporte de volume líquido e acumulado na longitude para cada uma das massas d'água na camada da (a-b) AT+ACAS, (c-d) AIA, (e-f) APAN e (g-h) AAF. Os gráficos à esquerda sendo do CMIP5 e os gráficos à direita do CMIP6. .... 27
- 15 Comparação do Diagrama T-S dos modelos durante o período histórico e os períodos de meio e final do século dos SSPs para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas tracejadas são as densidades de referência para a divisão das massas d'água de cada modelo. .... 29
- 16 Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AT+ACAS dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. .... 31
- 17 Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AIA dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. .... 32
- 18 Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada APAN dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. .... 34
- 19 Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AAF dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR ..... 35
- 20 Média anual do transporte de calor para cada um dos modelos do CMIP6 no (a) período histórico e os períodos do meio (1941-1970) e do final do século (1971-2100) no (b) SSP1-2.6, (c) SSP2-4.5 e (d) SSP5-8.5. .... 37
- 1A Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) CanESM2 (CMIP5) (b) CanESM5 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água ..... 44

- 2A Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) GFDL-ESM2G (CMIP5), (b) GFDL-ESM2M (CMIP5) e (c) GFDL-CM4 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água..... 44
- 3A Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) HadGEM2-ES (CMIP5) (b) UKESM1-0-LL (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água ..... 45
- 4A Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) MIROC-ESM (CMIP5) (b) MIROC6 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 45
- 5A Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) MPI-ESM-MR (CMIP5) (b) MPI-ESM1.2-HR (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água ..... 46
- 6A Campos de desvio padrão da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) dados in situ do MOVAR (b) Reanálise ORAS5. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água..... 46
- 7A Campos de desvio padrão da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) CanESM2 (b) GFDL-ESM2G (c) GFDL-ESM2M (d) HadGEM2-ES (e) MIROC-ESM (f) MPI-ESM-MR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água ..... 47
- 8A Campos de desvio padrão da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 48
- 9A Campos de viés de salinidade durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água ..... 49
- 10A Campos de viés de salinidade durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. .... 50
- 11A Campos de viés da temperatura potencial durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As linhas

	horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água .....	51
12A	Campos de viés da temperatura potencial durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. ....	52
13A	Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando o período histórico (1976-2005) do (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR.....	53
14A	Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP1-2.6 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência.....	54
15A	Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP2-4.5 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência.....	55
16A	Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP5-8.5 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência.....	56

## LISTA DE TABELAS

1	Especificações dos Modelos do CMIP5 utilizados .....	7
2	Especificações dos Modelos do CMIP6 e Reanálise utilizados .....	7
3	Tabela da densidade nas interfaces entre as massas d'água. Em negrito os modelos dos CMIP6. Em vermelho densidades inferiores a literatura e em azul as superiores.. .....	17
4	Tabela com os extremos de salinidade e temperatura potencial das camadas de massa d'água. Em negrito os modelos dos CMIP6.....	18

## LISTA DE SIGLAS

AAF	Água Antártica de Fundo
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AIA	Água Intermediária Antártica
AOGCM	Modelo de Circulação Geral Atmosfera-Oceano
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
AR5	IPCC Fifth Assessment Report
AT	Água Tropical
CB	Corrente do Brasil
CCO	Correntes de Contorno Oeste
CG	Corrente do Golfo
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CNB	Corrente do Norte do Brasil
CSE	Corrente Sul Equatorial
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESM	Earth System Models
FRE	Taxa de queda
FURG	Fundação Universidade Federal do Rio Grande
GCM	Global Climate Models
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
LOF	Laboratório de Oceanografia Física
MIP	Model Intercomparison Projects
MOVAR	Monitoramento da Variabilidade Regional do transporte de calor e volume na camada superficial do oceano Atlântico Sul entre o Rio de Janeiro e a Ilha Trindade
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ORAS5	Ocean Reanalysis System 5
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
WOA	World Ocean Atlas
XBT	eXpendable BathyThermograph

# SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivo	4
2. Metodologia	5
2.1. Modelos do Sistema Terrestre e Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano	5
2.2. Área de Estudo	9
2.3. Projeto MOVAR	10
2.4. Divisão de períodos	12
2.5. Divisão das massas de água	13
3. Resultados e Discussão	14
3.1. Diagrama T-S	14
3.2. Características da Corrente do Brasil	16
3.2.1. Salinidade e Temperatura Potencial das massas d'água	17
3.2.2. O campo de velocidades e a representação das massas de água no período histórico	23
3.2.3. Transporte de volume	27
3.3. Projeções dos Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)	30
3.3.1. Transporte de Volume	31
3.3.2. Transporte de Calor	38
4. Conclusões	40
5. Referências	42

## 1. Introdução

O planeta Terra possui um sistema climático complexo e altamente interligado, onde todos os componentes que o compõem como a atmosfera, o oceano, a superfície terrestre, a neve e o gelo, pequenos corpos de água e organismos vivos, desempenham um papel fundamental na manutenção deste sistema (Le Treut *et al.*, 2006).

À medida que o clima muda, em resposta ao aumento do CO<sub>2</sub> e de outros gases que geram o efeito estufa, temos a combinação do aquecimento e da estiagem em muitas regiões, o que reduz a produtividade das plantas (reduzindo a absorção de CO<sub>2</sub>) ao mesmo tempo que aumenta a taxa à qual o carbono é liberado do solos por decomposição. No oceano, a solubilidade do CO<sub>2</sub> na água do mar diminui à medida que a temperatura aumenta e a mistura vertical também é inibida. O resultado é que, a partir da mudança do clima, uma fração maior de CO<sub>2</sub> antropogênico permanece na atmosfera, contribuindo para um maior aquecimento: um feedback positivo (Flato, 2011). Como descrito por Alley *et al.* 2007, o sistema climático da Terra varia em escalas temporais, de meses a milhões de anos, onde diversos fatores naturais o conduzem, como mudanças orbitais da Terra, variações solares, erupções vulcânicas, terremotos e correntes oceânicas globais. É importante ressaltar que um dos principais reguladores deste sistema é a abundância natural na atmosfera dos gases do efeito estufa (GEEs) produzidos pela natureza, como vapor d'água, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Estes gases naturais desempenham um papel fundamental na manutenção e regulação do sistema climático da Terra (Houghton, 2009).

Como Rhein *et al.* (2013) pontuaram, o principal componente do sistema climático da Terra é o oceano, que contém cerca de 1,35 bilhões de quilômetros cúbicos de água, o que equivale a cerca de 97% de toda a água da Terra. O oceano abrange mais de 71% da superfície do globo, tendo um papel fundamental na capacidade de trocar grandes quantidades de calor, água e carbono com a atmosfera, ao mesmo tempo que proporciona uma grande capacidade de absorção, armazenamento e transporte de calor. Nos últimos 50 anos, o oceano absorveu cerca de 90% do calor atmosférico devido ao aumento das concentrações de gases do efeito estufa, onde os primeiros metros do oceano armazenam tanto calor quanto toda a atmosfera da Terra. Como consequência primária das mudanças climáticas antropogênicas, o oceano aqueceu 0,11°C a cada década nos últimos 50 anos. Estudos recentes estimam que, de 1971 a 2010, o aquecimento da parte superior do oceano foi responsável por cerca de 63% do aumento total na quantidade de calor armazenado no

sistema climático da Terra, enquanto o aquecimento a partir de 700 m até ao fundo do oceano adicionou cerca de outros 30% (Rhein *et al.*, 2013).

As mudanças climáticas são um tema recorrente hoje em dia, uma discussão importante e que levanta diversos estudos na área devido ao seu grande impacto no planeta e nos seres humanos. Segundo Diffenbaugh e Burke (2019), o aquecimento global é responsável também pelo aumento da desigualdade econômica global. Diversos estudos da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) recentes identificaram tendências de aquecimento significativas na maioria das bacias oceânicas durante o último século (e.g. Hansen *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2012; Lian *et al.*, 2018). Lian *et al.* (2018) utilizaram diversas bases de dados de TSM e concluíram que na costa oeste do Atlântico Sul, na região tropical e no extremo sul do Oceano Índico há uma tendência de aquecimento robusta. Sendo os oceanos responsáveis pela maior parte do armazenamento de calor, já que a água possui um calor específico muito maior que o ar, faz-se necessário a sua intensa análise e a tentativa de prever quais serão os impactos do aquecimento global já em curso.

Como forma de estudar essas mudanças climáticas, foi criado o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), que atualmente se encontra em sua sexta fase (CMIP6) e é um esforço colaborativo de diversos centros de pesquisa mundiais para que seja possível projetar alguns cenários que podem ocorrer com o avanço da sociedade. Desde sua fase anterior, o CMIP5, foram incorporados novos paradigmas para o desenvolvimento de cenários de emissões futuras, introduzidas experiências para explorar as interações carbono e modelos de alta resolução apenas para a atmosfera para fornecer informações mais detalhadas sobre as alterações climáticas regionais. Segundo Eyster (2019) uma diferença fundamental entre o CMIP5 e o CMIP6 ocorre devido ao conjunto de cenários futuros utilizados para projetar como será a evolução do clima. O CMIP6, emprega cenários baseados em trajetórias socioeconômicas (Figura 1), nesse sentido, múltiplos cenários serão possíveis no CMIP6, o que implica cenários futuros mais plausíveis.

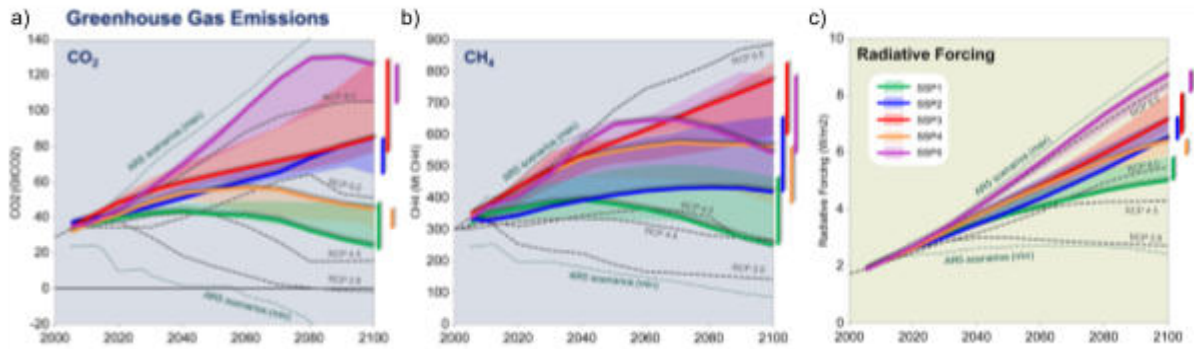


Figura 1: Projeção das emissões globais segundo o CMIP5 e CMIP6 de (a) Dióxido de Carbono e (b) Metano e (c) Média global do forçamento radiativo. Os cenários de referência do SSPs (CMIP6) são comparados aos RCPs (CMIP5). Fonte: Riahi *et al.*, 2017

Além disso, uma grande variedade de experimentos mais idealizados foi incorporada para ajudar a avançar na compreensão de como o sistema terrestre responde a várias perturbações e, assim, ajudar a avaliar a confiança e melhorar a compreensão em diferentes aspectos das previsões climáticas. Dentre os problemas do CMIP5, pode ser citada a fraca quantificação e compreensão do forçamento radiativo, este tem sido um problema de longa data no CMIP e é revisto com novas abordagens no CMIP6, incluindo uma representação mais coordenada dos processos de aerossóis atmosféricos e da superfície terrestre (Stouffer *et al.*, 2017).

Para responder a primeira questão levantada, se faz necessário avaliar tanto os processos terrestres, como também os atmosféricos e os oceânicos. Entre os processos oceânicos é possível citar as correntes oceânicas, que atuam em várias camadas dos oceanos e redistribuem águas das regiões polares e tropicais. Dentre essas correntes, temos as Correntes de Contorno Oeste (CCO), que transportam águas quentes das regiões tropicais para as regiões polares, onde o calor é removido (Hogg e Johns, 1995). A Corrente do Brasil (CB) é a CCO do Giro Subtropical do Atlântico Sul. Ela se origina ao sul de 10°S, na região onde o ramo mais ao sul da Corrente Sul Equatorial (CSE) se bifurca formando também a Corrente do Norte do Brasil (CNB) (Stramma, 1991; da Silveira *et al.*, 1994). A CB então flui para sul, bordejando a margem continental sul-americana até a região da Convergência Subtropical (33-38°S), onde conflui com a Corrente das Malvinas e se separa da costa (Silveira *et al.*, 2000).

A CB é formada pelo empilhamento de duas massas d'águas de características diferentes (Figura 2), a primeira delas, que está em contato com a atmosfera, é a Água Tropical (AT), que foi descrita por Emilson (1961) como uma camada de águas quentes e salinas, tendo uma profundidade entre 100 e 200 m. Água Central do Atlântico Sul (ACAS)

foi descrita por Miranda (1985), também transportada para sul pela CB, podendo atingir temperaturas entre 6°C e 20°C e salinidades entre 34,6 e 36. Fluindo abaixo da ACAS, tem-se a Água Intermediária Antártica (AIA), que foi definida por Sverdrup (1942), fluindo em direção ao Equador ao longo de grande parte da costa brasileira e possuindo limites termohalinos entre 3°C e 6°C e 34,2 e 34,6. Abaixo desta, observa-se a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), que se desloca em direção ao Polo Sul, e é caracterizada por valores de temperatura entre 3°C e 4°C e de salinidade entre 34,6 e 35. A Água Antártica de Fundo (AAF) foi descrita por Stramma e England (1999) que a separou em dois componentes, sendo um deles originado da Corrente Circumpolar Antártica (ACC) e o outro, caracterizado por densidades maiores que  $\sigma_4=46,06$ , é formado no Mar de Weddell. A AAF sofre considerável influência da topografia de fundo e segundo Emery (2001) possui temperaturas entre -0,9°C a 1,7°C e salinidade variando entre 34,64 e 34,72.

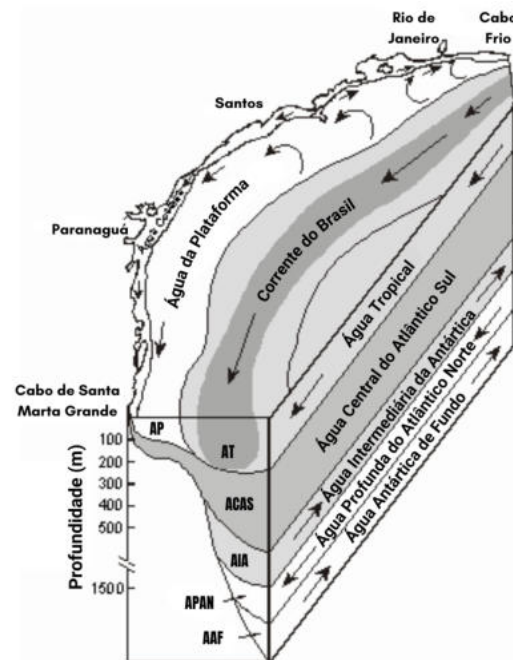


Figura 2: Estrutura oceanográfica na região sudeste-sul brasileira. Fonte: Modificado de Matsuura, 1986.

## 1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a habilidade dos Modelos do Sistema Terrestre (*Earth System Model* - ESM) e dos Modelo de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (*Atmosphere-Ocean General Circulation Model* - AOGCM) nas fases cinco e seis do CMIP em representar a estrutura de massas d'água na região entre o Rio de Janeiro e a Ilha da Trindade, a variabilidade da CB e das massas d'água a ela associadas,

durante o período histórico (1976-2005). Além disso, busca-se analisar as projeções futuras desses sistemas para o meio (2041–2070) e o final (2071–2100) do século XXI, com base em três diferentes cenários de forçamento radiativo propostos no CMIP6: SSP1–2.6, SSP2–4.5 e SSP5–8.5, sendo estes os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). Assim, este trabalho busca contribuir para a identificação dos modelos apresentados que possuem o melhor desempenho, fornecendo uma base para a seleção dos mais adequados à região em estudos futuros de regionalização e avaliação de impactos sob diferentes trajetórias de emissões antropogênicas.

## **2. Metodologia**

O presente trabalho utiliza uma análise de simulações dos ESMs e dos AOGCMs nos projetos CMIP5 e CMIP6, dados de reanálise oceânica e observações *in situ*, com o objetivo de avaliar a capacidade dos modelos em representar as propriedades termohalinas, as massas d'água e a circulação oceânica na região de estudo, que se encontra na borda Oeste do Oceano Atlântico Sul. A validação do período histórico dos modelos é realizada por meio da comparação com dados observacionais do projeto MOVAR ao longo da radial de XBT NOAA-AX97 e com a reanálise ORAS5, considerando ajustes espaciais e interpolações necessárias para compatibilizar as diferentes resoluções. A identificação das massas d'água baseia-se na análise de diagramas de Temperatura e Salinidade (T-S), utilizando critérios de densidade potencial, tendo o Atlas Oceânico Mundial (*World Ocean Atlas - WOA*) como referência observacional. Além disso, são estimados os transportes de volume associados às diferentes massas d'água, permitindo avaliar o desempenho dos modelos no período histórico, bem como analisar as projeções climáticas para períodos futuros de meio e final do século XXI. Por fim, foi estimado o transporte de calor na região de estudo, a fim de quantificar o fluxo de energia com o intuito de entender os possíveis impactos das mudanças climáticas diante dos diferentes SSPs.

### **2.1. Modelos do Sistema Terrestre e Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano**

Os ESM são, atualmente, os modelos mais completos para o estudo do clima no futuro, descrevendo muitos dos aspectos relevantes para o clima global, além da física atmosférica e dos processos oceânicos que seus antecessores representavam. O desenvolvimento de um ESM envolve contribuições de muitos cientistas e de muitas áreas da

ciência, e os resultados de tais modelos fornecem informações sobre como o nosso sistema climático funciona e como irá mudar no futuro. A confiança na capacidade de um modelo para fazer projeções climáticas futuras aumenta se for possível demonstrar que este desempenha um bom trabalho na reprodução do passado. A avaliação dos modelos climáticos possui uma longa história e tornou-se cada vez mais sofisticada, a base de dados observacionais disponíveis continua a crescer e a forma como os modelos são confrontados com estes dados é cada vez mais abrangente (Randall *et al.*, 2007). A maior parte do esforço de avaliação até agora tem como objetivo avaliar modelos climáticos físicos e, claro, um ESM deve basear-se num modelo físico confiável. A avaliação do modelo envolve essencialmente a comparação dos resultados do modelo com observações de uma quantidade específica, uma delas é a comparação que envolve diferenças simples da climatologia (Flato, 2011).

Simulações de mudanças ambientais globais são agora realizadas usando ESMs, que são projetados para capturar as principais interações entre os componentes do Sistema Terrestre, incluindo a atmosfera, o oceano, a superfície terrestre e o gelo marinho (Flato, 2011; Dunne *et al.*, 2012; Hurrell *et al.*, 2013). Os ESMs tem sua base similar aos modelos climáticos globais, mas ampliam substancialmente as suas capacidades, representando um conjunto diversificado de interações físicas, químicas e biológicas em múltiplas escalas de espaço e tempo (Hurrell *et al.*, 2013).

Apesar deste conjunto crescente de observações climáticas, a avaliação de um ESM continua a ser um grande desafio. Em primeiro lugar, as variáveis associadas aos ciclos biogeoquímicos globais são, em geral, de difícil observação direta. Além disso, muitas delas não foram monitoradas de forma sistemática ao longo de períodos prolongados ou em escalas espaciais suficientemente amplas, que seria essencial para a adequada avaliação climática dos modelos. A única exceção são os dados de satélites, no entanto estes se restringem às camadas superficiais do oceano. Outra dificuldade, que não é exclusiva da avaliação de um ESM, é que muitos dos processos importantes ocorrem em pequenas escalas espaciais. Entre esses processos destacam-se, por exemplo, a mistura vertical na camada limite atmosférica, associada à turbulência e à troca de calor/umidade ou como gradientes horizontais acentuados associados a frentes, brisas costeiras e circulações locais.

A avaliação da componente oceânica em ESMs também apresenta desafios consideráveis. As estimativas observacionais dos fluxos de CO<sub>2</sub> entre a atmosfera e o oceano são limitadas e frequentemente incertas, especialmente em regiões como o Oceano Austral, que permanece escassamente amostrado. Da mesma forma, a quantificação da produtividade

oceânica (a absorção de carbono por meio da fotossíntese) é dificultada pela escassez de medições diretas. No Oceano Atlântico Sul, essa limitação observacional também se faz presente, impondo dificuldades adicionais à análise dos modelos, uma vez que restringe o processo de validação de seus resultados. Trata-se de um desafio metodológico relevante, que não ocorre com a mesma intensidade em outras regiões do globo, onde a cobertura observacional é mais abrangente.

Não existe uma definição única de quais processos devem ser representados antes que um modelo climático se torne um ESM, mas normalmente tais modelos têm pelo menos um componente interativo do ciclo do carbono (Flato, 2011). O desenvolvimento desta capacidade foi motivado por sugestões de que a capacidade dos ecossistemas terrestres e do oceano de remover CO<sub>2</sub> da atmosfera será limitada pelas futuras alterações climáticas (Friedlingstein *et al.*, 2006).

Embora o termo Modelos do Sistema Terrestre seja amplamente utilizado para designar modelos climáticos de última geração, nem todos os modelos empregados neste estudo se enquadram estritamente nessa definição. Parte do conjunto corresponde a AOGCMs, que representam de forma detalhada os processos físicos do sistema climático, mas não incluem, necessariamente, ciclos biogeoquímicos interativos, como o ciclo do carbono. Conforme discutido por Flato (2011), a principal distinção entre AOGCMs e ESMs reside na inclusão explícita de componentes biogeoquímicos prognósticos, particularmente aqueles associados ao carbono terrestre e oceânico. Ainda assim, modelos acoplados desempenham papel fundamental na avaliação da circulação oceânica e atmosférica, sendo amplamente utilizados diversos estudos (Randall *et al.*, 2007; Eyring *et al.*, 2016). Dessa forma, neste trabalho, os modelos analisados incluem tanto ESMs propriamente ditos quanto AOGCMs.

Para a definição dos modelos que seriam utilizados nesse trabalho, teve-se como base a disponibilidade de dados no CMIP5, já para o CMIP6 foram utilizados os mesmos centros de pesquisa do anterior, sempre que possível. As Tabelas 1 e 2 mostram todos os modelos utilizados, assim como as suas resoluções espaciais, modelos atmosféricos, esquemas de superfície e seus modelos oceânicos.

Tabela 1: Especificações dos Modelos do CMIP5 utilizados.

Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)						
	ESM CanESM2 (Canadá)	AOGCM GFDL-ESM2G (E.U.A.)	AOGCM GFDL-ESM2M (E.U.A.)	AOGCM HadGEM2-ES (Reino Unido)	ESM MIROC-ESM (Japão)	ESM MPI-ESM-MR (Alemanha)
<b>Modelo Atmosférico</b>	CanAM4	Atmospheric Model 2.0	Atmospheric Model 2.0	HadGEM2	MIROC-AGCM	ECHAM 6
<b>Esquema de Superfície</b>	CLASS 2.7	Land Model 3.0	Land Model 3.0	MOSES II	MATSIRO	JSBACH
<b>Modelo Oceânico</b>	CanOM4	GOLD	MOM4p1	HadGEM2 Ocean Component	COCO 3.4	MPIOM
<b>Resolução Meridional (Oceano)</b>	0.9° a 1.1° (pólo-equador)	1° a 1/3° (pólo-equador)	1° a 1/3° (pólo-equador)	1° a 1/3° (pólo-equador)	1.7° a 0.5° (pólo-equador)	0.4°
<b>Resolução Zonal (Oceano)</b>	1.4°	1°	1°	1°	1.4°	0.4°
<b>Coordenada Vertical</b>	40 níveis	50 níveis	50 níveis	40 níveis	50 níveis	40 níveis
<b>Referências</b>	Arora et al., 2011	Dunne et al., 2012	Dunne et al., 2012	Jones et al., 2011	Watanabe et al., 2011	Giorgetta et al., 2013

Tabela 2: Especificações dos Modelos do CMIP6 e Reanálise utilizados.

Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)						Reanálise
	ESM CanESM5 (Canadá)	AOGCM GFDL-CM4 (E.U.A.)	ESM UKESM1-0-LL (Reino Unido)	AOGCM MIROC6 (Japão)	ESM MPI-ESM1.2-HR (Alemanha)	ORAS5 (Europa)
<b>Modelo Atmosférico</b>	CanAM5	Atmospheric Model 4.0	MetUM HadGEM3 GA7.1	CCSR-NIES AGCM	ECHAM6.3	ERA-Interim
<b>Esquema de Superfície</b>	CLASS-CTEM	Land Model 4.1	JULES-ES-1.0	MATSIRO	JSBACH	-
<b>Modelo Oceânico</b>	NEMO v3.4.1	MOM6	NEMO HadGEM3 GO6.0	COCO 3.4	MPIOM 1.6.3	NEMO v3.4
<b>Resolução Meridional (Oceano)</b>	0.9° a 1.1° (pólo-equador)	0.25°	1° a 1/3° (pólo-equador)	1° a 1/3° (pólo-equador)	0.4°	0.25°
<b>Resolução Zonal (Oceano)</b>	1°	0.25°	1°	1°	0.4°	0.25°
<b>Coordenada Vertical</b>	45 níveis	75 níveis	75 níveis	63 níveis	40 níveis	75 níveis
<b>Referências</b>	Swart et al., 2019	Held et al., 2019	Kuhlbrodt et al., 2018	Shiogama et al., 2023	Müller et al., 2018	Zuo et al., 2017

Devido à diferença entre as grades dos modelos e suas resoluções, foi analisada a batimetria representada em cada modelo, a fim de garantir a coerência espacial das seções consideradas. A partir dessa batimetria, identificou-se a isóbata de 200 m de profundidade ao longo da margem continental, na latitude de referência, e então foi considerado como ponto inicial das radiais analisadas em cada modelo. A partir desse ponto, foi definida a radial principal utilizada nas análises, bem como uma radial costeira adicional, traçada de forma totalmente zonal, com o objetivo de investigar o transporte associado à circulação ao longo da margem continental. Esse procedimento foi aplicado individualmente a cada modelo, considerando as diferenças na representação batimétrica entre eles.

É importante ressaltar que o modelo GFDL-CM4 não possui o cenário SSP1–2.6 em suas projeções. No entanto, sua inclusão neste estudo justifica-se pela relevância científica do modelo e pela possibilidade de comparação com seus predecessores, contribuindo assim para a robustez da análise.

Além dos modelos mencionados, foram utilizados os dados da reanálise oceânica *Ocean ReAnalysis System 5* (ORAS5) (Tabela 2), que é o produto mais recente de reanálise do sistema OCEAN5 operado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). OCEAN5 é desenvolvido a partir da nova geração do sistema operacional ORAP5, que assimila perfis de dados *in situ* de temperatura e salinidade, que passam por um controle de qualidade, e dados de anomalia do nível do mar da AVISO. O novo sistema OCEAN5 inclui um modelo prognóstico termodinâmico-dinâmico de gelo marinho (LIM2) e assimila, pela primeira vez, dados de concentração de gelo marinho nas regiões de altas latitudes. Comparado com o seu antecessor, OCEAN4, o OCEAN5 tem uma resolução de modelo oceânico mais elevada de  $0,25^\circ$  (lat/lot) na direção horizontal e 75 níveis na vertical (Jin *et al.*, 2023). O produto ORAS5, produzido pelo ECMWF, representa um conjunto consolidado de reanálise oceânica global, com assimilação de observações *in situ* e por satélite, o mesmo possui dados desde 1958 e vem sendo amplamente utilizado na avaliação do oceano e de variabilidade climática. No contexto do Oceano Atlântico Sul e da costa brasileira, destaca-se o trabalho de Broggio *et al.* (2021), que utilizou a reanálise ORAS5 em conjunto com dados de XBT do Projeto MOVAR.

## 2.2. Área de Estudo

Como descrito por Ferreira *et al.* (2025) em aproximadamente  $20^\circ\text{S}$ , a CB encontra a Cadeia Vitória-Trindade, uma cadeia de montes submarinos que atua como uma barreira,

forçando a corrente a fluir por canais estreitos. Próximo a  $22^{\circ}$ – $23^{\circ}$ S, a CB exhibe intensa variabilidade em mesoescala associada à formação de vórtices e giros de recirculação.

A fim de validar o período histórico dos modelos e observar a representatividade de cada um na região estudada, bem como apontar qual destes possui o melhor desempenho na caracterização de massas d'água, foram utilizados dados *in situ* do projeto de Monitoramento da Variabilidade Regional do transporte de calor e volume na camada superficial do oceano Atlântico Sul entre o Rio de Janeiro e a Ilha Trindade (MOVAR), ao longo de uma radial que internacionalmente recebe o nome de *NOAA-AX97 High-Density XBT Line*. O MOVAR está inserido em um esforço mundial de monitoramento ao longo destas linhas, ocorrendo entre Cabo Frio e a Ilha da Trindade (Figura 3). Tal esforço teve início em 2004, sendo a sua periodicidade aproximadamente bimestral, que coincide com parte do período histórico das simulações do CMIP. As medidas de temperatura são feitas na camada superior do oceano, com pontos de coleta de dados com dois espaçamentos diferentes: i) entre a isóbata de 200 m e a de 2000 m, a coleta é realizada a cada 10 milhas náuticas ( $\sim 18,5$  km), para uma maior resolução na área onde é esperado que se encontre a CB; ii) a partir da isóbata de 2000 m, a coleta passa a ser realizada a cada 15 mn ( $\sim 27,8$  km).

A escolha dessa região deve-se à disponibilidade de dados *in situ* contínuos e sistemáticos ao longo do transecto, o que possibilita a comparação direta e a validação das simulações dos modelos na área de estudo.

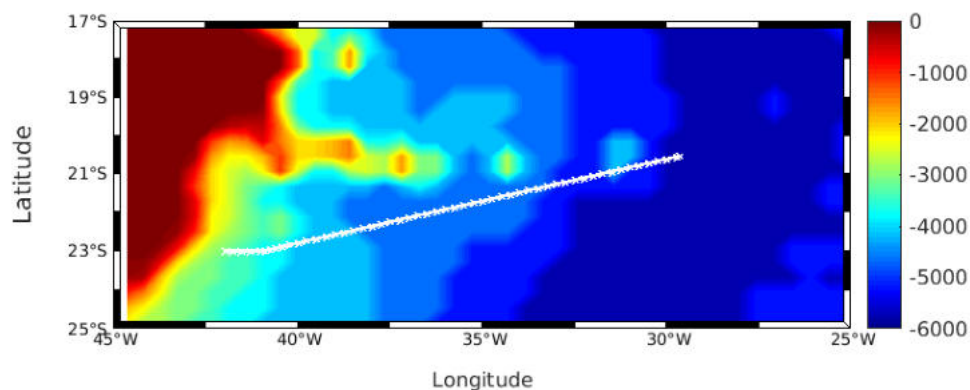


Figura 3: Região da área de estudo sobreposta com a batimetria local em metros fornecida pelo modelo MPI-ESM-MR, onde a linha pontilhada indica a radial de referência AX97 e a radial costeira considerada. Fonte: Autor.

### 2.3. Projeto MOVAR

O projeto coleta dados de batitermógrafos descartáveis (XBTs) utilizando navios de oportunidade da Marinha do Brasil ao longo de um trecho que começa próximo a Cabo Frio (Rio de Janeiro) e termina próximo à Ilha da Trindade, isso só é viável devido à parceria do

Laboratório de Oceanografia Física (LOF) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) com a Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e o apoio logístico da Marinha do Brasil e da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

A amostragem de XBTs é realizada, em sua grande maioria, com sondas Sippican Deep Blue, que medem perfis de temperatura até aproximadamente 760 m de profundidade. As medições de XBTs são realizadas pela temperatura de amostragem e o tempo decorrido de descida das sondas XBTs. O tempo de descida ( $t$  em segundos) é convertido em profundidade ( $z$  em metros) usando a equação de taxa de queda (FRE) do fabricante padrão e seguindo as novas correções propostas por Cheng *et al.*, em 2014 (Lima *et al.*, 2016).

Os perfis de temperatura coletados utilizando XBTs passam por um rigoroso controle de qualidade após o fim do embarque e coleta. Esse procedimento é feito de forma semi-automática. A equipe do LOF/IGEO desenvolveu um algoritmo que compara cada perfil de temperatura com seu anterior e posterior imediato, nesta comparação foram utilizados como critério o erro quadrático médio, para verificar o quão diferente é um perfil dos seus vizinhos. Além disso, também comparou-se cada perfil com o respectivo valor da climatologia do Atlas Oceânico Mundial 2018 (*World Ocean Atlas 2018*) (Boyer *et al.*, 2019). O critério utilizado para aprovar um perfil é que ele esteja dentro do intervalo de três desvios padrões da climatologia na região onde foi coletado. Os perfis considerados ‘bons’ são automaticamente aprovados e, os perfis com quaisquer outras bandeiras, são reservados para avaliação visual. Todos os dados reprovados no controle de qualidade são retirados da série temporal a ser utilizada nas próximas etapas deste estudo (Cruz, 2022). Após o pré-processamento, os dados de cada cruzeiro são interpolados linearmente para um espaçamento regular de 10 m de profundidade e interpolados de forma otimizada ao longo do transecto para um espaçamento longitudinal de  $0,25^\circ$ . O transecto de referência AX97 foi adotado para eliminar, ou pelo menos reduzir, os fenômenos de pequena escala e ondas internas e permitir melhores comparações diretas entre cada amostra de transecto (Lima *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que o projeto MOVAR coleta dados *in situ* de temperatura da água do mar e para que seja inferida a velocidade da corrente, são utilizados diversos cálculos e correções para a sua melhor estimativa. Estes dados podem ser corrigidos de algumas formas, utilizando diferentes abordagens. Foram analisadas três maneiras possíveis, usando como referência para essa correção: o nível de não-movimento sendo considerado em 400m (Mata *et al.*, 2012), o nível de não-movimento sendo considerado na isopical de  $\sigma = 26,8$

(Lima *et al.*, 2016) e o ajuste de acordo com a topografia dinâmica (Goes *et al.*, 2019). No presente trabalho será apresentado apenas o ajuste feito por Goes *et al.* (2019), de modo a simplificar a análise.

O método desenvolvido por Goes *et al.* (2019) foi descrito por Ferreira *et al.* (2025) e consiste em calcular a altura dinâmica relativa a partir dos perfis de temperatura e salinidade, utilizando uma profundidade de referência de 500 m. Em seguida, a altura dinâmica absoluta é obtida pela combinação da altura dinâmica relativa com valores climatológicos mensais da topografia dinâmica absoluta, trazendo assim a referência para o cálculo das velocidades geostróficas. Após a determinação da altura dinâmica ao longo do transecto AX97, esses valores são estendidos para camadas mais rasas do oceano, possibilitando a estimativa contínua da altura dinâmica ao longo de toda a seção analisada. O cálculo da velocidade usando dados XBT está sujeito a incertezas, as duas maiores incertezas estão associadas à inferência de salinidade e à escolha do nível de referência (Goes *et al.*, 2015; Goes *et al.*, 2019).

Ademais, era necessário saber se os modelos eram capazes de representar o transporte de volume realizado por cada uma das massas d'água. Esse transporte é calculado de maneira simples, onde se multiplica a velocidade da corrente em um ponto de grade pela sua área, até o nível de referência. Todos os modelos sofreram uma interpolação simples para uma grade comum, para que assim pudessem ser comparados.

## 2.4. Divisão de períodos

O período histórico dos modelos considerado neste estudo compreende janeiro de 1976 a dezembro de 2005. Essa delimitação temporal foi adotada em função dos modelos do CMIP5, cujo experimento histórico se encerra em 2005, o que permite uma comparação direta entre os resultados do CMIP5 e do CMIP6. Dessa forma, os modelos do CMIP6 também foram limitados a esse mesmo intervalo temporal. Já o projeto MOVAR teve início em 2004, com os dados *in situ* utilizados estendendo-se até dezembro de 2022.. Apesar da diferença temporal, assume-se que esse período dos dados *in situ* é representativo para a validação, já que o oceano possui uma inércia muito maior do que a atmosfera, o que significa que os dados ainda são significativos para o período histórico considerado dos modelos. Essa suposição baseia-se no fato de que o oceano apresenta maior inércia térmica e dinâmica, devido principalmente à sua elevada capacidade térmica e que seus processos ocorrem em uma escala de tempo maior em comparação à atmosfera. Devido à discrepância

de datas, foi inserida também uma comparação com a reanálise ORAS5, com o intuito de apresentar mais uma forma de validação dos modelos.

Para a análise das projeções climáticas, definiu-se o período de meio do século como os anos entre 2041 e 2070, e o final do século como o intervalo de 2071 a 2100.

## 2.5. Divisão das massas de água

Com o intuito de compreender melhor a dinâmica da região, foi realizada uma análise das diferentes massas d'água presentes. Para isso, torna-se necessária a adoção de uma metodologia capaz de identificar e distinguir essas massas, sendo o diagrama de Temperatura e Salinidade (T-S) uma das ferramentas mais eficazes para esse fim, devido à sua capacidade de evidenciar as propriedades termohalinas características de cada massa d'água. Essa ferramenta permite identificar distintas massas d'água com base em suas propriedades termohalinas, que são conservativas em grandes escalas espaciais e temporais (Emery e Thomson, 2001). Ao plotar o par dos perfis de temperatura e salinidade em um diagrama T-S, é possível visualizar padrões característicos que distinguem massas d'água formadas em diferentes regiões, como as águas profundas formadas em altas latitudes ou as águas intermediárias formadas por subducção (Tomczak e Godfrey, 2003). Essa abordagem supera métodos baseados apenas na profundidade ou localização geográfica, pois reflete diretamente os processos físicos que controlam a estrutura e a dinâmica do oceano (Talley *et al.*, 2011).

As massas d'água foram divididas seguindo as características de salinidade e temperatura que são observadas na região de estudo. Assim, foi gerado um diagrama T-S com os dados do WOA23, que é uma base de dados de temperatura e salinidade que possui uma qualidade controlada e foram utilizados os níveis de densidade que Stramma e England (1999) aplicaram para dividir as massas d'água. Para a interseção da ACAS com a AIA foi utilizado o nível  $\sigma_\theta=27,1$ . Para a divisão entre a AIA e a APAN a densidade utilizada foi de  $\sigma_1=32,15$  e, por fim, as massas d'água APAN e AAF foram separadas pelo nível de densidade de  $\sigma_4=45,87$ .

A identificação das massas de água no presente estudo foi realizada com base nas propriedades termohalinas características, observadas através da forma da curva no diagrama de Temperatura e Salinidade (T-S). A referência para essa divisão foi o diagrama T-S do World Ocean Atlas (WOA23), que serviu como base observacional. A metodologia adotada não se limitou apenas aos níveis de densidade de Stramma e England (1999), mas também utilizou os máximos e mínimos de salinidade como marcadores distintivos. Por exemplo, a

AIA foi identificada por seu núcleo de salinidade mínima, enquanto a APAN se distingue por um máximo de salinidade em sua camada superior. Essa abordagem detalhada, que integra os níveis de densidade com as feições específicas de salinidade, permitiu uma análise mais precisa da representatividade de cada massa d'água nos modelos. Assim, foram analisados os diagramas T-S dos modelos, a fim de identificar, com base na forma da curva de cada modelo, os pontos onde ocorrem as mudanças nas diferentes massas d'água com base no observado no diagrama T-S do WOA.

### **3. Resultados e Discussão**

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise das observações, reanálises e simulações dos modelos. Primeiramente, são descritos os resultados observados após a análise dos diagramas T-S e as principais características da CB. Em seguida, o foco se desloca para a avaliação da salinidade e da temperatura potencial das massas d'água, seguida do campo de velocidades das massas d'água no período histórico, com ênfase na representação da CB e das estruturas das massas d'água. Por fim, a discussão se estende para as projeções futuras, considerando os diferentes SSPs, onde são avaliadas os padrões de transporte de volume e de calor.

#### **3.1. Diagrama T-S**

Nas Figuras 4 e 5 é possível observar que o modelo GFDL-CM4, que possui a maior resolução espacial, está com um diagrama T-S muito mais próximo do WOA que os demais, assim como a reanálise ORAS5. Mas, em sua maioria, os modelos são capazes de mostrar as características termohalinas presentes na região, com diferenças em suas temperaturas e salinidades mínimas e máximas, que podem estar ligadas a esta limitação em suas resoluções espaciais. O modelo que possui maior dificuldade para representar a região é o HadGEM2-ES, mas podemos observar também que ambos os modelos do Max-Planck Institute não representam bem essas características próximas à superfície.

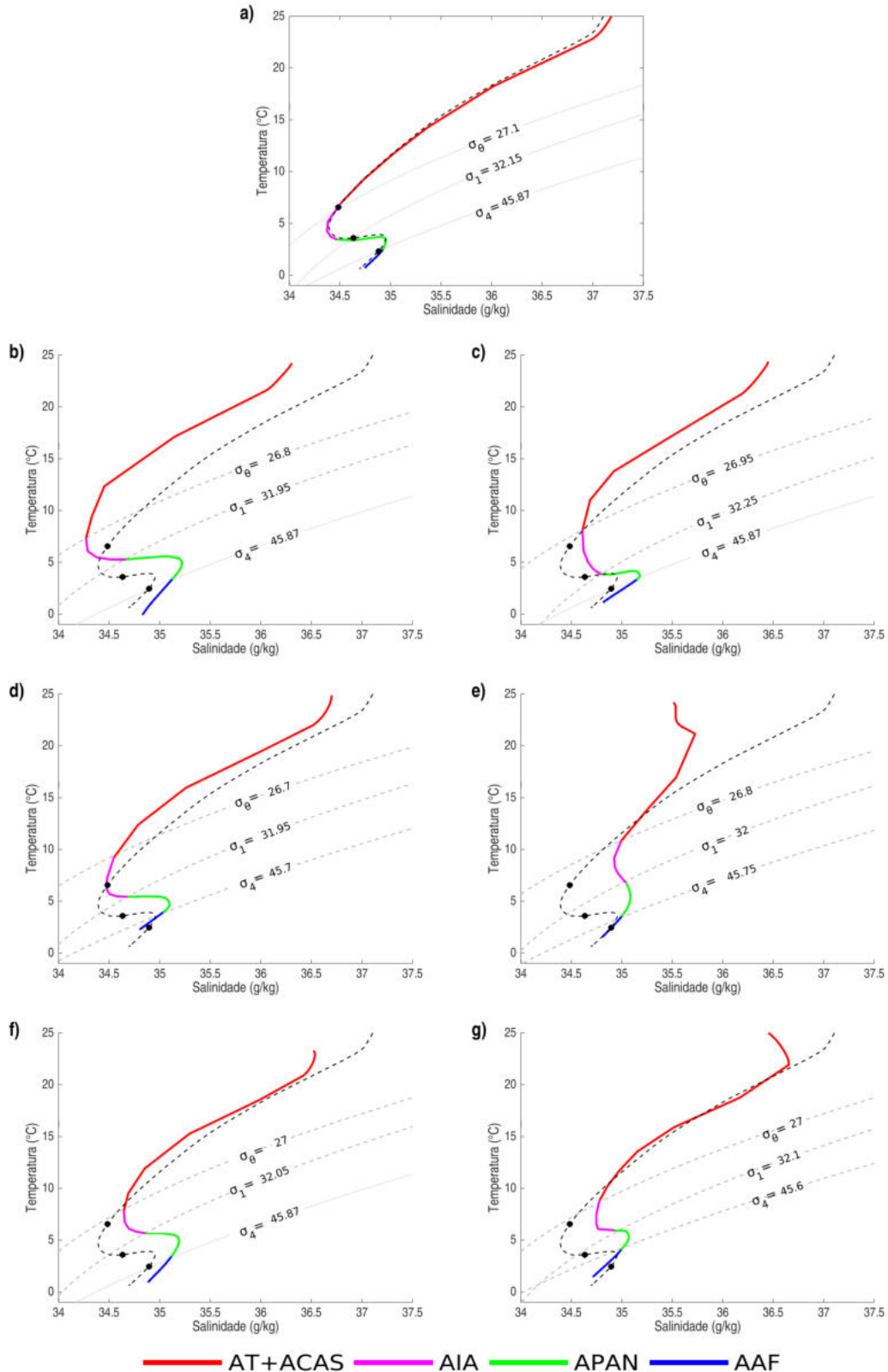


Figura 4: Diagrama T-S dos modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 durante o período histórico para (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. Em vermelho está representada a AT+ACAS, em rosa a AIA, em verde a APAN e em azul a AAF. A linha tracejada cinza mostra os níveis de densidade identificados para a divisão das massas d'água do respectivo ESM. A linha tracejada mostra o diagrama T-S do WOA23 e nela estão demarcadas as divisões das massas d'água. Fonte: Autor.

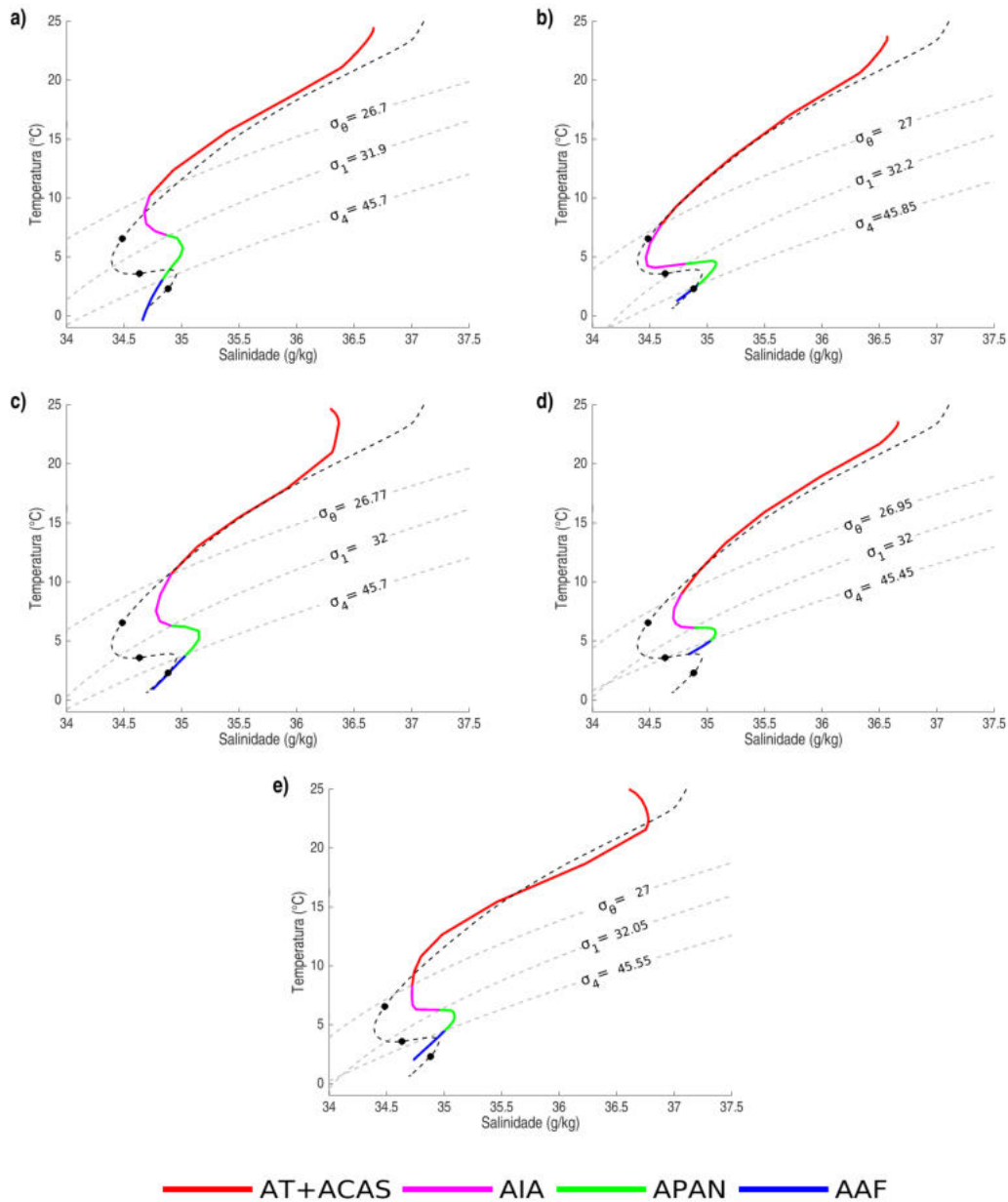


Figura 5: Diagrama T-S dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 durante o período histórico para (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho está representada a AT+ACAS, em rosa a AIA, em verde a APAN e em azul a AAF. A linha tracejada cinza mostra os níveis de densidade identificados para a divisão das massas d'água do respectivo ESM. A linha tracejada mostra o diagrama T-S do WOA23 e nela estão demarcadas as divisões das massas d'água. Fonte: Autor.

### 3.2. Características da Corrente do Brasil

A Figura 6 apresenta características da Corrente do Brasil (CB), destacando tanto sua profundidade quanto seu transporte, obtidas a partir da média simples dos dados do período histórico. A profundidade foi definida com base no limite até o qual o modelo considera a velocidade da corrente com fluxo para o sul e o transporte foi definido o máximo transporte líquido para sul. A análise desses dois parâmetros revela que os modelos GFDL e MIROC

apresentam estimativas consistentes, com valores próximos aos observados na reanálise ORAS5 e nos dados *in situ* provenientes do projeto MOVAR. No entanto, como em análises anteriores, já foi demonstrado que os modelos da *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (JAMSTEC) não conseguem visualizar a CB com precisão, isso evidencia o quanto importantes foram as demais análises empregadas.

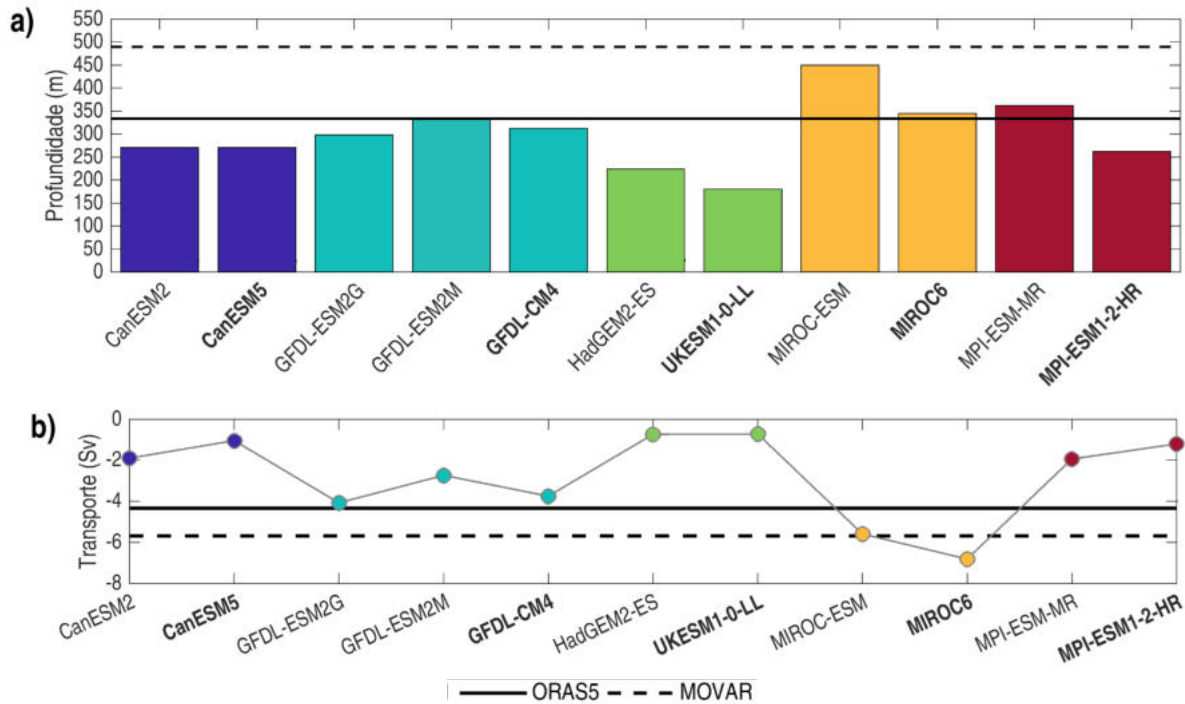


Figura 6: (a) Profundidade da máxima da CB em cada um dos modelos. (b) Transporte máximo para sul da CB em cada um dos modelos. Modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. Fonte: Autor.

### 3.2.1. Salinidade e Temperatura Potencial das massas d'água

A Tabela 3 apresenta os valores de densidade ( $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_t$  e  $\sigma_s$ ) que definem as interfaces entre as principais massas d'água da região de estudo, possibilitando a comparação direta entre modelos (CMIP5 e CMIP6). Estes valores foram comparados às referências propostas por Stramma e England (1999) e à reanálise ORAS5. O objetivo desta análise é avaliar o quanto bem os modelos conseguem reproduzir os limites termohalinos que caracterizam a separação entre as diferentes camadas da coluna d'água na região. Na interface AT+ACAS com AIA, a reanálise ORAS5 reproduz exatamente esse valor. Ao passarmos para os modelos, apenas o GFDL-CM4 (CMIP6) e os modelos MIROC-ESM e MPI-ESM-MR (ambos CMIP5) se aproximam ou igualam essa referência. Os demais modelos, inclusive os do CMIP6, como CanESM5 e UKESM1-0-LL, subestimam levemente este limite, sugerindo uma interface menos densa entre essas massas d'água.

A interface entre a AIA e a APAN, representada por  $\sigma_1$ , possui como valor de referência 32,15. A reanálise ORAS5 novamente coincide com esse valor. Observa-se que alguns modelos do CMIP6 apresentam melhor desempenho nesta camada, como o GFDL-CM4 e o MPI-ESM1-2-HR. Por outro lado, os modelos CanESM5 e MIROC6, também do CMIP6, apresentam valores mais baixos, próximos a suas versões anteriores. Esses resultados indicam que, embora o CMIP6 traga melhorias em alguns modelos, o avanço não é generalizado. A maior divergência entre os modelos aparece justamente nessa interface, o que reforça a dificuldade em representar corretamente a transição entre águas intermediárias e profundas.

Por fim, na interface mais profunda, entre a APAN e a AAF, definida por  $\sigma_4 = 45,87$  segundo Stramma e England (1999), a maioria dos modelos apresenta valores ligeiramente inferiores, com destaque para o modelo MIROC6, que apresenta um valor ainda menor, indicando subestimação da densidade da AAF. Nesta camada, os modelos do CMIP5 demonstraram desempenho superior em relação às suas versões mais recentes, com destaque para os modelos CanESM2, GFDL-ESM2G e MIROC-ESM, que atingiram  $\sigma_4 = 45,86$ , muito próximo do valor de referência. Ao analisar os dados de densidade em conjunto com os diagramas T-S (Figuras 4 e 5), nota-se que, embora esses modelos não reproduzam fielmente os valores absolutos de temperatura e salinidade observados na região, ainda assim conseguem equilibrar essas duas variáveis de forma que as densidades nas interfaces fiquem próximas às esperadas, o que representa um aspecto positivo da simulação termohalina.

Tabela 3: Tabela da densidade nas interfaces entre as massas d'água. Em negrito os modelos dos CMIP6. Em vermelho densidades inferiores a literatura e em azul as superiores.

Interface entre as camadas:	Água Tropical + Água Central do Atlântico Sul x Água Intermediária Antártica	Água Intermediária Antártica x Água Profunda do Atlântico Norte	Água Profunda do Atlântico Norte x Água Antártica de Fundo
Modelos	$\sigma_\theta$	$\sigma_1$	$\sigma_4$
Stramma e England (1999)	27,10	32,15	45,87
CanESM2	26,80	31,95	45,86
<b>CanESM5</b>	<b>26,70</b>	<b>31,90</b>	<b>45,70</b>
GFDL-ESM2G	26,95	32,25	45,86
GFDL-ESM2M	26,70	31,95	45,70
<b>GFDL-CM4</b>	<b>27,00</b>	<b>32,20</b>	<b>45,70</b>
HadGEM2-ES	26,80	32,00	45,75
<b>UKESM-1-0-LL</b>	<b>26,80</b>	<b>32,00</b>	<b>45,70</b>
MIROC-ESM	27,00	32,05	45,86
<b>MIROC6</b>	<b>26,90</b>	<b>32,00</b>	<b>45,45</b>
MPI-ESM-MR	27,00	32,10	45,60
<b>MPI-ESM1-2-HR</b>	<b>27,00</b>	<b>32,05</b>	<b>45,55</b>
ORAS5	27,10	32,15	45,86

A Tabela 4 complementa essa análise ao apresentar os valores extremos de salinidade e temperatura potencial para cada camada das massas d'água. Essa informação é crucial para avaliar o comportamento dos modelos nos limites máximos e mínimos das propriedades físicas, ou seja, sua capacidade de reproduzir os extremos da região. Neste caso a comparação pode ser feita com a reanálise ORAS5, que foi capaz de reproduzir o diagrama T-S muito próxima a climatologia da WOA23. Na camada intermediária podemos observar que há pouca discrepância entre os modelos na salinidade da região, mas a temperatura varia consideravelmente, sem o modelo que melhor representa os mínimos da camada, o GFDL-CM4. A diferença na camada da APAN é que, nesta camada, foi usado o máximo de salinidade para comparação, e esta é a camada que possui a menor variação entre os modelos do par salinidade e temperatura, contudo nenhum dos modelos analisados conseguiu reproduzir valores próximos aos observados na ORAS5, o CanESM5 sendo o que se aproxima da alta salinidade da camada, mas não é capaz de reproduzir as temperaturas da mesma. Por fim, na camada de fundo (AAF), que segundo a literatura é caracterizada por temperaturas potenciais abaixo de 0 °C, apenas os modelos da família CanESM apresentaram tais condições em suas simulações, com a salinidade da camada sendo superestimada na versão 5 e subestimada na versão 6 do CMIP. Esse resultado é particularmente relevante, já que a própria reanálise utilizada não conseguiu reproduzir tais limites de temperatura da camada, isto indica que a representação da Água Antártica de Fundo continua sendo um desafio para a maioria dos modelos, refletindo a escassez de observações nessa profundidade para a região de estudo. A escassez de dados observacionais na região da AAF decorre principalmente das grandes profundidades envolvidas, já que existem limitações tecnológicas até hoje, o que é ainda mais difícil quando olhamos para dados históricos de observação, por fim, existem elevados custos logísticos associados à amostragem nessas regiões.

Tabela 4: Tabela com os extremos de salinidade e temperatura potencial das camadas de massa d'água. Em negrito os modelos dos CMIP6.

Camadas	Água Intermediária Antártica		Água Profunda do Atlântico Norte		Água Antártica de Fundo	
	Salinidade	Temperatura Potencial	Salinidade	Temperatura Potencial	Salinidade	Temperatura Potencial
CanESM2	34,27	7,31	35,22	4,98	34,83	-0,09
<b>CanESM5</b>	<b>34,68</b>	<b>8,81</b>	<b>35,01</b>	<b>5,79</b>	<b>34,66</b>	<b>-0,44</b>
GFDL-ESM2G	34,61	8,06	35,18	3,73	34,81	1,12
GFDL-ESM2M	34,48	6,15	35,10	4,66	34,81	2,30
<b>GFDL-CM4</b>	<b>34,47</b>	<b>4,92</b>	<b>35,08</b>	<b>4,33</b>	<b>34,73</b>	<b>1,21</b>
HadGEM2-ES	34,92	9,17	35,09	5,21	34,81	1,51
<b>UKESM1-0-L-L</b>	<b>34,78</b>	<b>7,52</b>	<b>35,15</b>	<b>5,17</b>	<b>34,75</b>	<b>0,87</b>
MIROC-ESM	34,65	7,85	35,19	4,95	34,89	0,90
<b>MIROC6</b>	<b>34,70</b>	<b>6,93</b>	<b>35,07</b>	<b>5,63</b>	<b>34,84</b>	<b>3,84</b>
MPI-ESM-MR	34,75	6,60	35,07	5,26	34,72	1,49
<b>MPI-ESM1-2-HR</b>	<b>34,72</b>	<b>7,34</b>	<b>35,09</b>	<b>5,68</b>	<b>34,74</b>	<b>2,03</b>
ORAS5	34,37	4,25	34,96	3,36	34,75	0,67

A Figura 7a traz o viés de salinidade em relação a WOA23 para a camada superior (AT+ACAS), onde é possível observar que os modelos do CMIP6 comparados com suas versões anteriores do CMIP5 tiveram um viés de salinidade menor, ou seja, mais próxima da climatologia e a da reanálise ORAS5. Com exceção do modelo GFDL-CM4, quando comparado ao GFDL-ESM2M, o mesmo comportamento pode ser notado no viés de temperatura potencial (Figura 7b). Considerando que a temperatura e a salinidade na camada superior do oceano são fortemente controladas pelos fluxos turbulentos na interface oceano-atmosfera e pelos processos de mistura vertical, a redução dos vieses observada nos modelos do CMIP6 pode ser interpretada como uma indicação de avanços na representação desses processos físicos em relação ao CMIP5. Contudo, essa interpretação deve ser feita com cautela, uma vez que a análise de vieses, por si só, não permite atribuir a estas melhorias a parametrizações específicas.

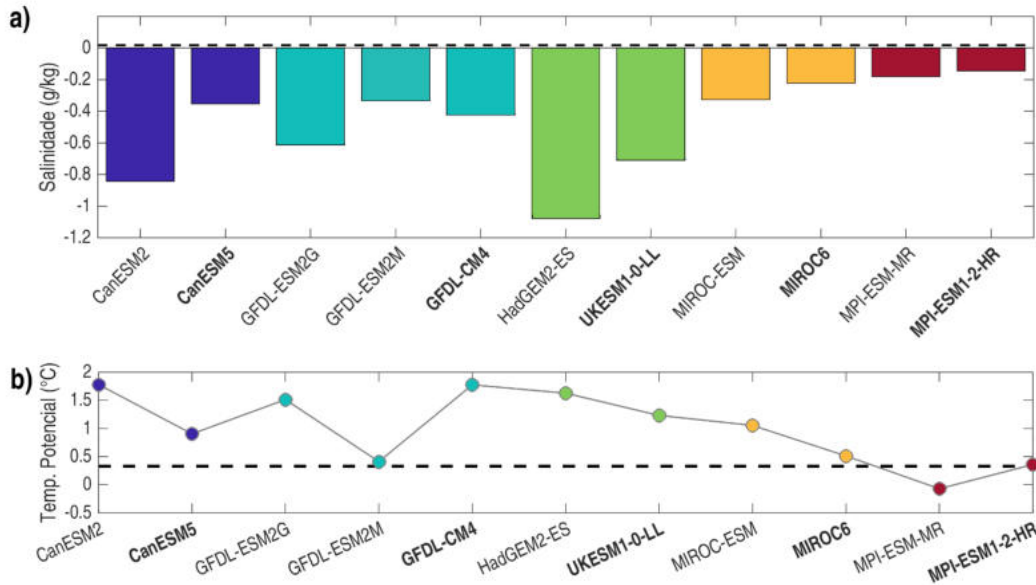


Figura 7: Viés de (a) salinidade e (b) de temperatura potencial em cada um dos modelos na camada superficial da AT+ACAS. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 8, onde temos o viés de salinidade e temperatura potencial da camada intermediária, vemos que o comportamento da da temperatura potencial da camada anterior não se repete, já que a maioria dos modelos do CMIP6 estão mais distantes do WOA23 que os modelos do CMIP5. Para a salinidade, os modelos canadenses e americanos possuem valores mais próximos à climatologia.

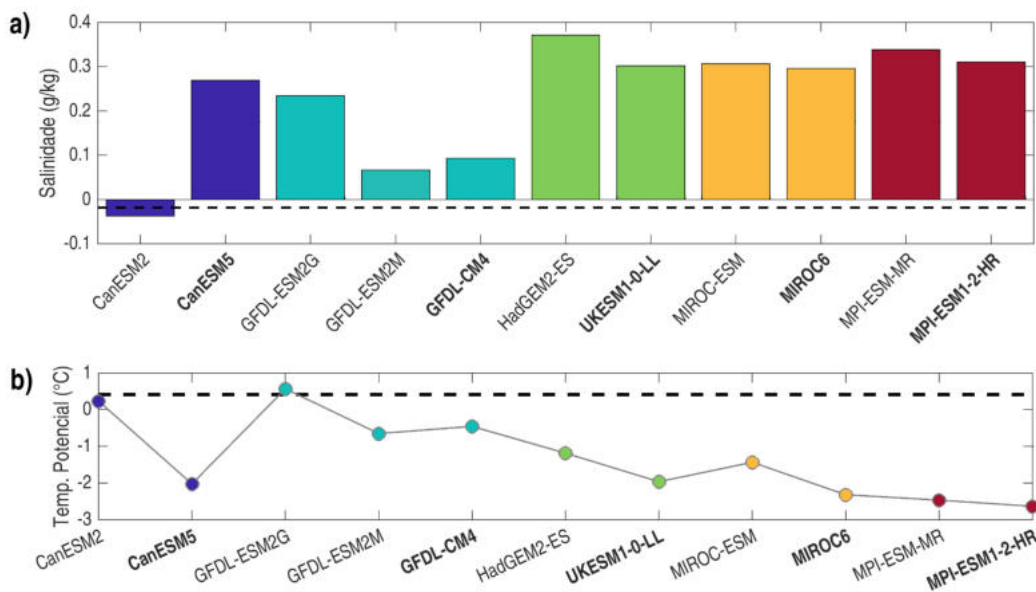


Figura 8: Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na camada da AIA. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. Fonte: Autor.

Na camada da APAN, apresentada na Figura 9, não há um padrão tão claro quando comparamos as versões do CMIP. Mas é interessante observar que o viés de salinidade dos

CanESM e do UKESM1-0-LL e a versão com o qual está sendo comparado, apresentam valores bastante semelhantes, enquanto o viés de salinidade de ambos se distingue.

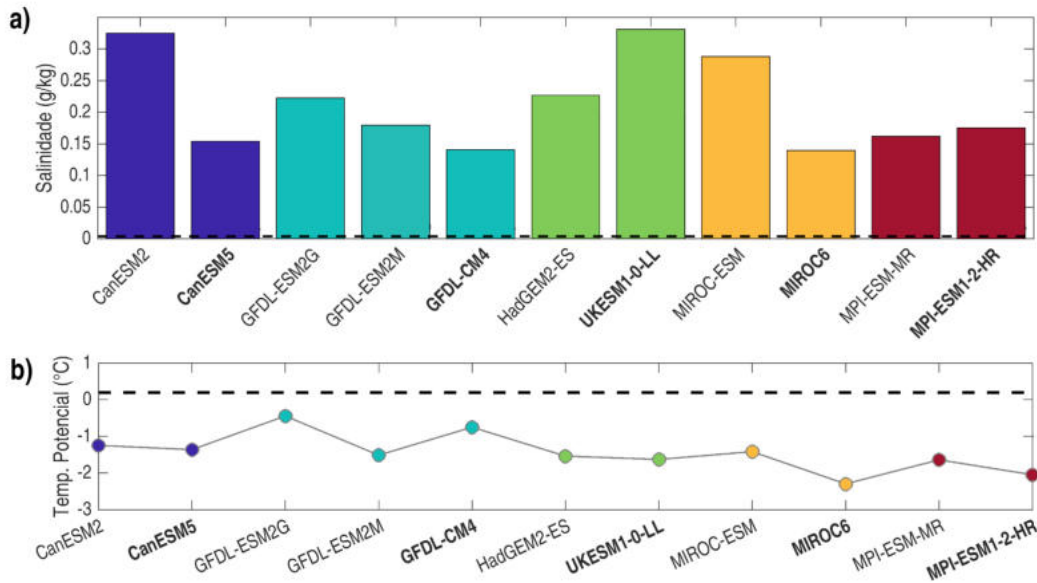


Figura 9: Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na camada da APAN. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. Fonte: Autor.

Já na AAF (Figura 10) podemos observar que o GFDL-CM4 tem a salinidade e temperatura potencial muito próxima a WOA23, ambas as versões do CMIP do modelo MPI também tem valores próximos, mas não há um padrão de redução do viés, nem da salinidade e nem da temperatura potencial, na versão mais recente do CMIP em todos os modelos.

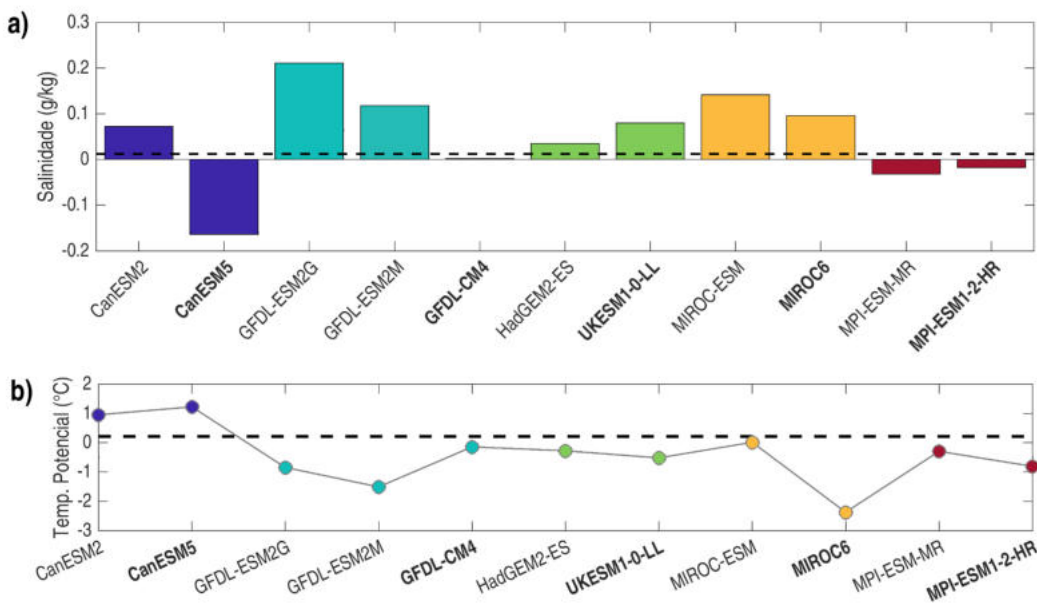


Figura 10: Viés de (a) salinidade e (b) temperatura potencial em cada um dos modelos na camada da AAF. A linha tracejada se refere ao viés da reanálise ORAS5 e os modelos em negrito são do CMIP6, os demais do CMIP5. Fonte: Autor.

### 3.2.2. O campo de velocidades e a representação das massas de água no período histórico

Ao serem gerados os campos de velocidade média da corrente (Figuras 11 a 13), a diferença de resolução espacial dos modelos, da reanálise e dos dados *in situ* fica evidente. Como é possível observar nas Tabelas 1 e 2, os modelos com melhor resolução são o MPI-ESM-MR, MPI-ESM1.2-HR e GFDL-CM4, mas a reanálise ORAS5 e os dados *in situ* também possuem resolução superior aos demais modelos. Em contrapartida, o modelo com menor resolução (maior espaçamento entre os pontos de grade) é o modelo MIROC-ESM, o que é possível notar ao analisar a representação da CB na Figura 12e: a mesma está afastada da costa, mais fraca e ocupando em torno de 5° de longitude. Ao contrário desta, temos os modelos citados anteriormente (Figuras 12f, 13c e 13e), onde a representação da CB está confinada mais próxima à costa, e observamos valores de velocidade no limite da escala estabelecida.

Na análise das massas d'água, parte-se da premissa de que a estrutura esperada para a região apresenta uma organização bem estabelecida: a Corrente do Brasil (CB) fluindo para o sul nas camadas superficiais, sobrepondo-se à circulação da Água Intermediária Antártica (AIA), que se desloca para o norte. Em níveis mais profundos, espera-se encontrar a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) escoando em direção ao sul, enquanto a Água Antártica de Fundo (AAF) avança para o norte nas maiores profundidades. Essa configuração caracteriza o arranjo típico observado na região de estudo. No entanto, verificou-se que alguns modelos não conseguiram representar integralmente essa estrutura para a região, no CMIP5 foram os CanESM2, MIROC-ESM (Figuras 12a, 12e). No CMIP6 foram os modelos dos mesmos centros de pesquisa que apresentaram este problema, ou seja, os modelos CanESM5 e MIROC6 (Figuras 13a, 13d), mas além desses também o UKESM1-0-LL (Figura 13c). Analisando os campos de velocidade, podemos observar que os modelos citados tiveram, em sua maioria, dificuldade em representar a AAF.

Dos modelos que conseguiram representar a estrutura completa de massas d'água da região podemos destacar o GFDL-ESM2G e GFDL-CM4 (Figuras 12c e 8b), como também o MPI-ESM-MR e o MPI-ESM1.2-HR (Figuras 12f e 8e). Estes modelos apresentam a CB próxima à quebra do talude, com velocidades intensas e profundidades que se aproximam dos dados *in situ* (Figura 11a) e da reanálise ORAS5 (Figura 11b).

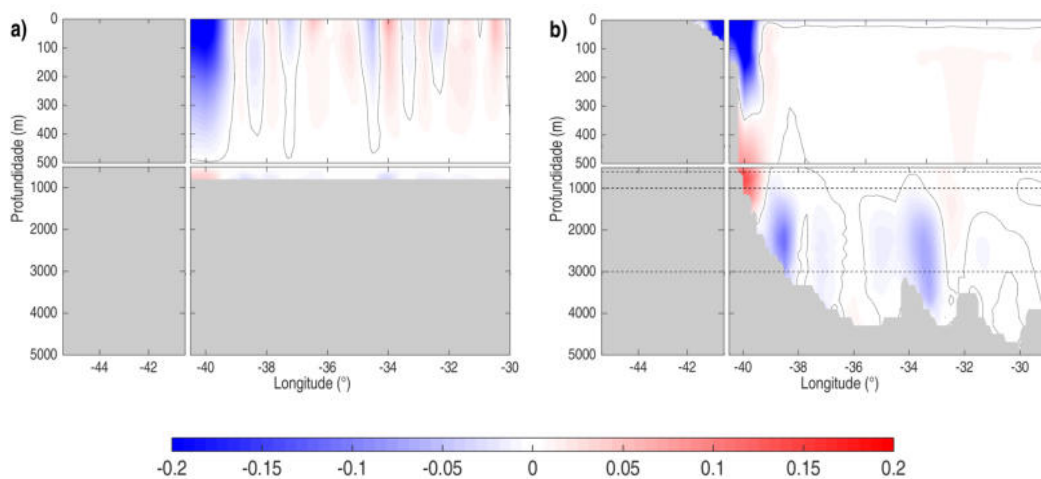


Figura 11: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) dados *in situ* do MOVAR (b) Reanálise ORAS5. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

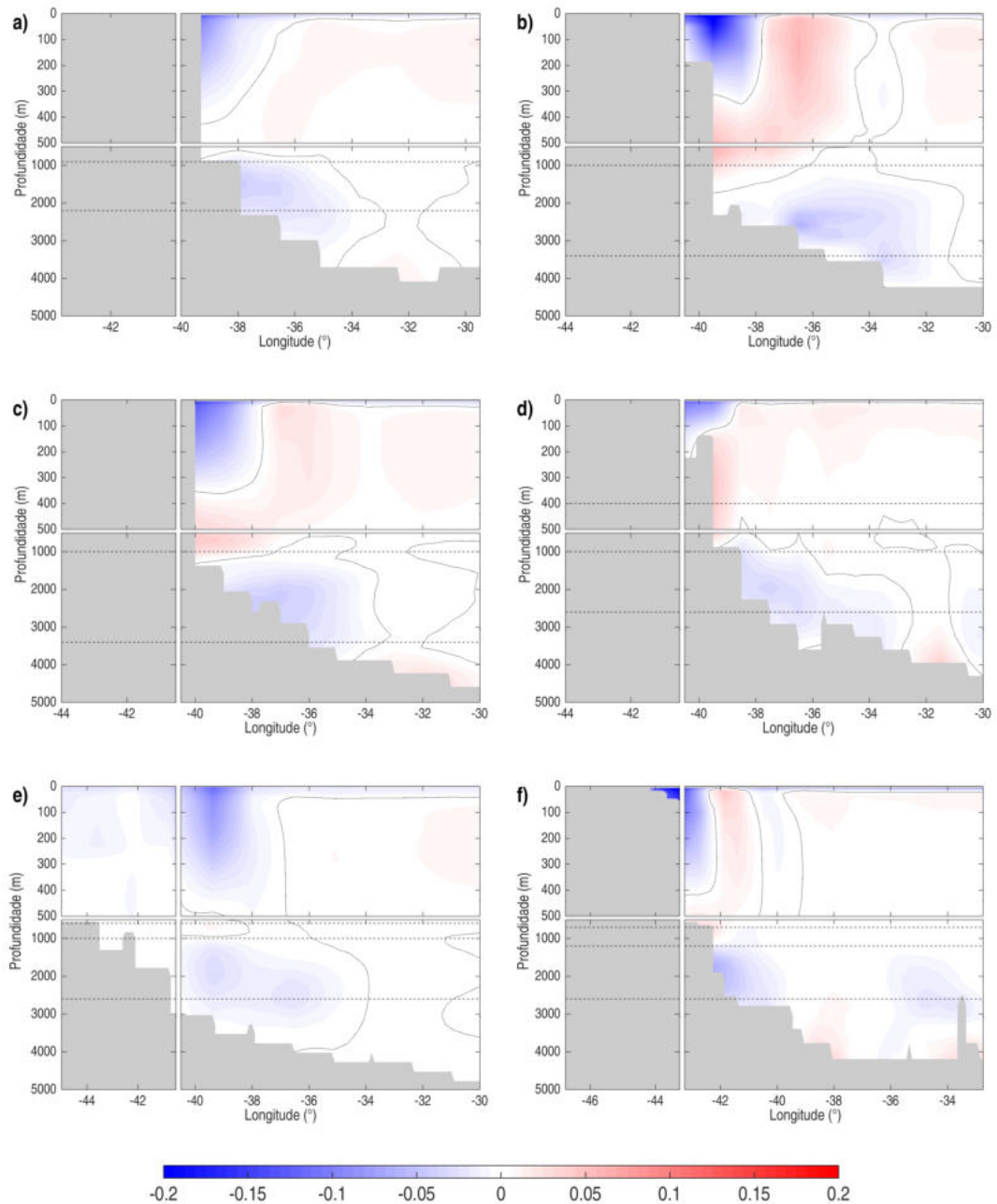


Figura 12: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) CanESM2 (b) GFDL-ESM2G (c) GFDL-ESM2M (d) HadGEM2-ES (e) MIROC-ESM (f) MPI-ESM-MR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

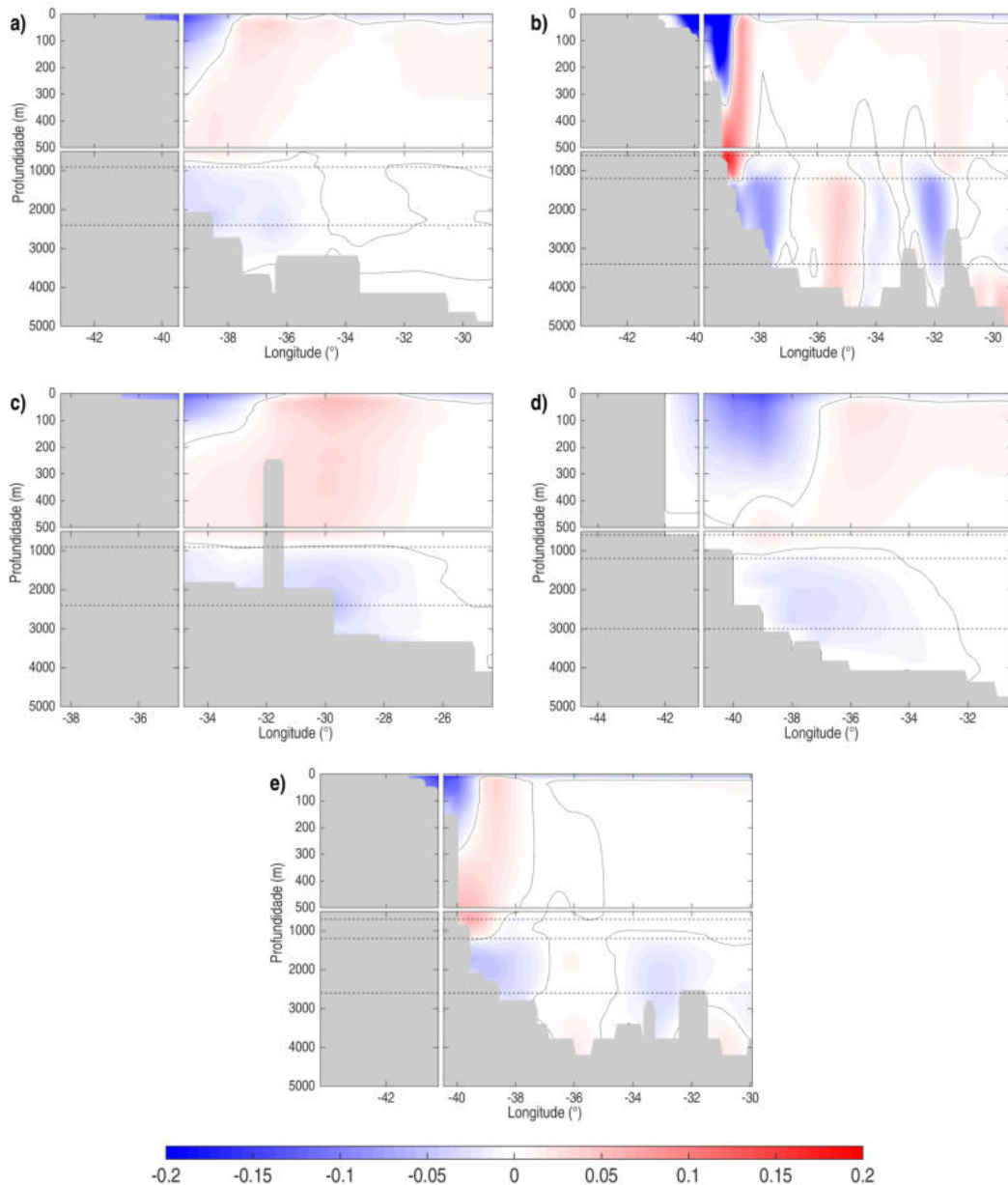


Figura 13: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte), as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

O anexo deste documento traz as imagens dos mesmos centros de pesquisa mundiais no CMIP5 e CMIP6 para comparação do ganho nas melhorias implementadas no AR6. Assim é possível comparar mais diretamente as diferenças entre ambas as fases. Na comparação entre as versões dos modelos canadense (Figura 1A) no CMIP5 e no CMIP6, observa-se que a AIA é melhor representada na versão mais recente. Por outro lado, a AAF, presente na versão 5, deixou de ser reproduzida no CMIP6. Além disso, o fluxo da CB apresenta um núcleo mais intenso na versão 6, mais condizente com o esperado. Todas as versões dos modelos americanos (Figura 2A) conseguem representar a estrutura de massas d'água da

região. No entanto, a maior resolução espacial da versão mais recente proporciona uma representação mais coerente, com a Corrente do Brasil bem delimitada junto à quebra da plataforma e imediatamente acima dela. No caso dos modelos do Reino Unido (Figura 3A), observa-se uma mudança significativa entre o CMIP5 e o CMIP6, resultando em representações, em relação à estrutura das massas d'água, bastante discrepantes, com o HadGEM2-ES (Figura 3Aa) apresentando um desempenho superior. O modelo japonês (Figura 4A) apresentou uma melhoria significativa em sua versão mais recente, provavelmente em função do aumento da resolução espacial. Essa atualização permitiu a representação da AIA, embora a AAF ainda não seja adequadamente capturada. Observa-se também que a CB se aproxima mais da costa, corrigindo uma limitação presente na versão anterior. Apesar desses avanços, em ambas as versões a CB permanece excessivamente espalhada, quando o esperado seria uma configuração mais concentrada junto à quebra da plataforma. Em ambas as versões dos modelos do Max Planck Institute (MPI) (Figura 5A), a estrutura de massas d'água é bem representada. Desde o CMIP5, esse já era o modelo com a melhor resolução espacial entre os analisados. Na versão mais recente, entretanto, observam-se algumas diferenças, como a CB mais superficial e a AIA mais intensa.

As Figuras 6A e 8A têm os campos do desvio padrão dos modelos, onde podemos observar que os dados *in situ* e da reanálise tem um desvio padrão muito superior à maioria dos modelos analisados. Isso se deve ao fato de ambas possuírem uma resolução espacial maior, o único modelo que se assemelha é o GFDL-CM4 (Figura 8Ab), que também possui uma resolução de  $0.25^\circ$  de longitude no oceano. Apesar da resolução espacial do modelo HadGEM2-ES não ser tão alta, na região da CB, este modelo apresenta valores significativos de desvio padrão (Figura 7Ad), chegando a profundidade maiores que os demais. Considerando se tratar de médias mensais, esse comportamento não é o esperado para os modelos analisados, uma vez que o processo de média tende a suavizar desvios acentuados..

### 3.2.3. Transporte de volume

Na Figura 14 é apresentado o transporte de volume acumulado ao longo da longitude para a camada do oceano onde se localiza a CB. Cabe ressaltar que as batimetrias em cada modelo diferem entre si em função da resolução espacial e do tratamento do relevo submarino, o que pode influenciar a estrutura da circulação simulada e, conseqüentemente, os valores de transporte de volume estimados. Ao analisar a camada da AT combinada com a ACAS, observa-se que os modelos HadGEM2-ES (Figura 14a) e UKESM1-0-LL (Figura 14b) apresentam um comportamento inesperado para a região, uma vez que a CB é

caracterizada por transportar um grande volume de água em direção ao sul, o que não é representado adequadamente por nenhum dos dois modelos mencionados. Tanto os dados *in situ* quanto os provenientes da reanálise mostram comportamentos bastante semelhantes entre si. Embora os dados do projeto MOVAR apresentem um transporte mais intenso, os modelos que mais se aproximam desse padrão observado são o MIROC-ESM (Figura 14a) e o MIROC6 (Figura 14b). Ao compará-los com os dados da reanálise, destaca-se o bom desempenho dos modelos do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), cujas três versões apresentam resultados bastante consistentes, especialmente a versão CM4.

Na camada intermediária, verifica-se que todos os modelos da versão CMIP6 conseguiram representar o transporte em direção ao norte, o que não foi observado na versão anterior (CMIP5). De forma semelhante à camada superior, os modelos do GFDL continuam apresentando melhor concordância com os dados da reanálise, enquanto os demais modelos indicam um transporte menos acentuado. Em relação à APAN, diferentemente das demais massas d'água, todos os modelos indicam transporte para o sul, como é esperado para essa camada. No entanto, nenhum modelo apresenta um padrão de transporte que se assemelhe ao da reanálise ao longo de toda a seção longitudinal, sendo o modelo GFDL-ESM2G o que mais se aproxima da reanálise, especialmente na porção final da radial. Por fim, na camada de fundo, observa-se uma divergência entre os modelos quanto à direção do transporte (norte ou sul), ao contrastar as diferentes versões do CMIP, sendo esse comportamento identificado tanto nos modelos CanESM quanto nos modelos GFDL. Esta camada, por sua profundidade e menor disponibilidade de dados observacionais, é notoriamente mais difícil de ser representada pelos modelos climáticos. Além disso, a identificação precisa de sua localização constitui um desafio adicional. Por essa razão, de modo geral, não se observa uma reprodução fiel do comportamento esperado nos modelos avaliados.

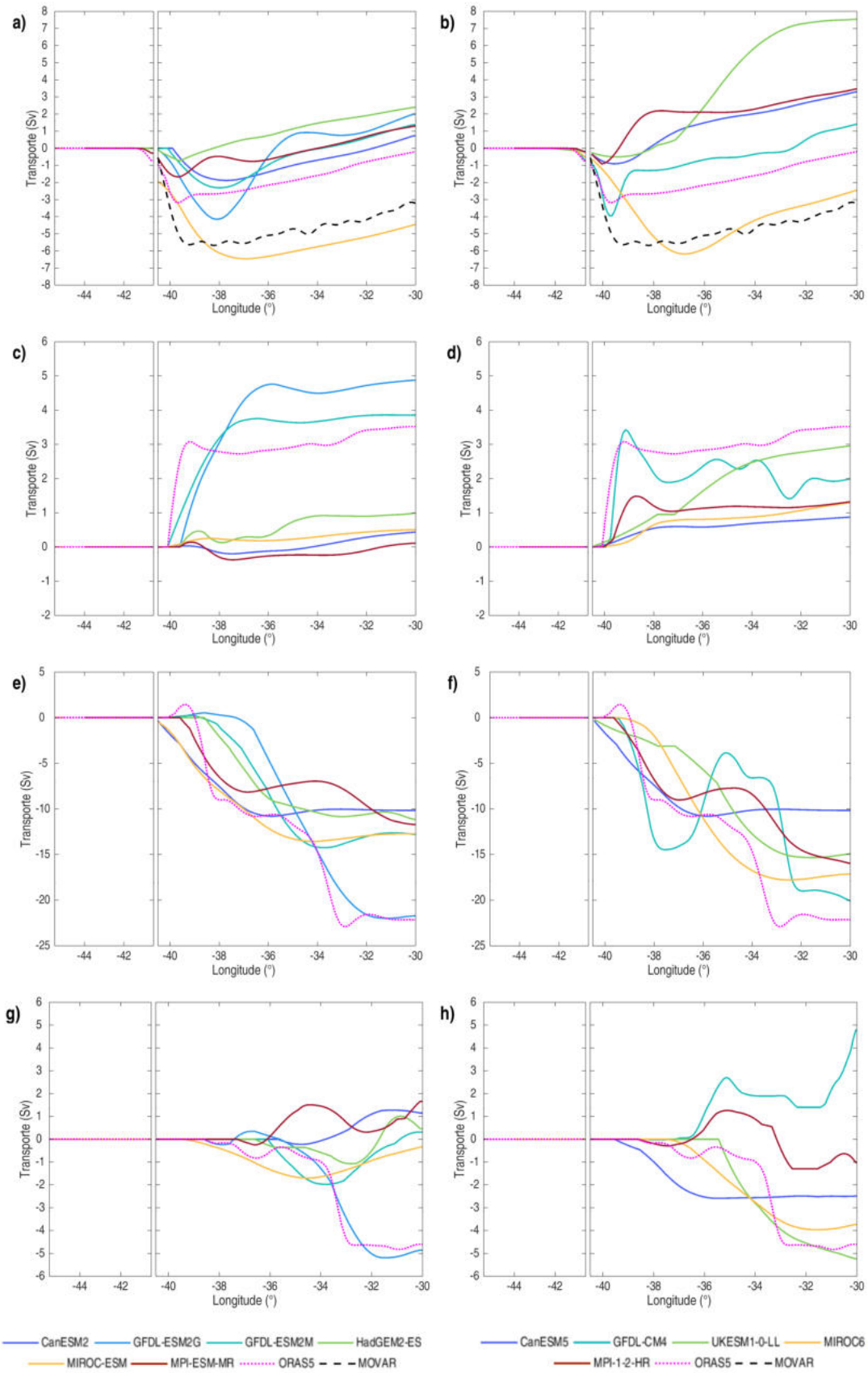


Figura 14: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude para cada uma das massas d'água na camada da (a-b) AT+ACAS, (c-d) AIA, (e-f) APAN e (g-h) AAF. Os gráficos à esquerda sendo do CMIP5 e os gráficos à direita do CMIP6. Fonte: Autor.

### 3.3. Projeções dos Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

Nesta seção são apresentadas as projeções futuras para a região da CB, considerando os diferentes SSPs do CMIP6. A análise contempla os diagramas T-S, os transportes de volume e de calor, os dois últimos discutidos em subseções específicas. Optou-se por utilizar apenas os modelos da fase CMIP6, uma vez que esta geração mais recente incorpora avanços em relação ao CMIP5, sobretudo na forma como os cenários futuros são construídos. Enquanto no CMIP5 eram empregados os *Representative Concentration Pathways* (RCPs), definidos com base nas trajetórias de concentração de gases de efeito estufa, no CMIP6 foram introduzidos os SSPs, que integram aspectos socioeconômicos, como crescimento populacional, desenvolvimento tecnológico, padrões de uso da terra e políticas de mitigação, em conjunto com as projeções de emissões. Essa mudança permitem explorar futuros mais realistas e abrangentes, fornecendo uma base mais consistente para avaliar os impactos regionais das mudanças climáticas. Além disso, houve um aperfeiçoamento, em alguns casos, na resolução espacial, o que a torna mais adequada para a avaliação de projeções climáticas.

Os gráficos apresentados na Figura 15 são diagramas T-S dos modelos, esses diagramas mostram como a temperatura potencial e a salinidade do oceano variam em diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa e nos diferentes períodos estudados. As curvas de densidade constante (isopicnais) ajudam a interpretar as mudanças na estratificação da coluna de água e revelam mudanças nas propriedades físico-químicas da coluna d'água ao longo do século. De maneira geral, ocorre um aquecimento progressivo dessas massas d'água, com as curvas de temperatura se deslocando para valores levemente mais elevados do que no período histórico em todos os modelos, especialmente sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), indicando um aumento mais acentuado até o fim do século. Esse comportamento só não ocorre no modelo MIROC6, ao analisar a camada superficial, que mostra que o final do século possui temperaturas menores neste cenário. Também é possível notar que alguns modelos indicam um aumento da salinidade na camada superficial, isso pode estar ligado a um possível aumento da evaporação na região. Dentre os modelos analisados, MIROC6 e UKESM1-0-LL apresentaram as projeções com maiores desvios em relação ao período histórico, sendo o último com a maior diferença na camada superficial. Por outro lado, os modelos CanESM5, GFDL-CM4 e MPI-ESM1-2-HR mostraram projeções mais próximas ao que ocorreu no período histórico. Observou-se também que, apesar das variações entre os modelos, a camada intermediária exhibe tendências consistentes de salinização.

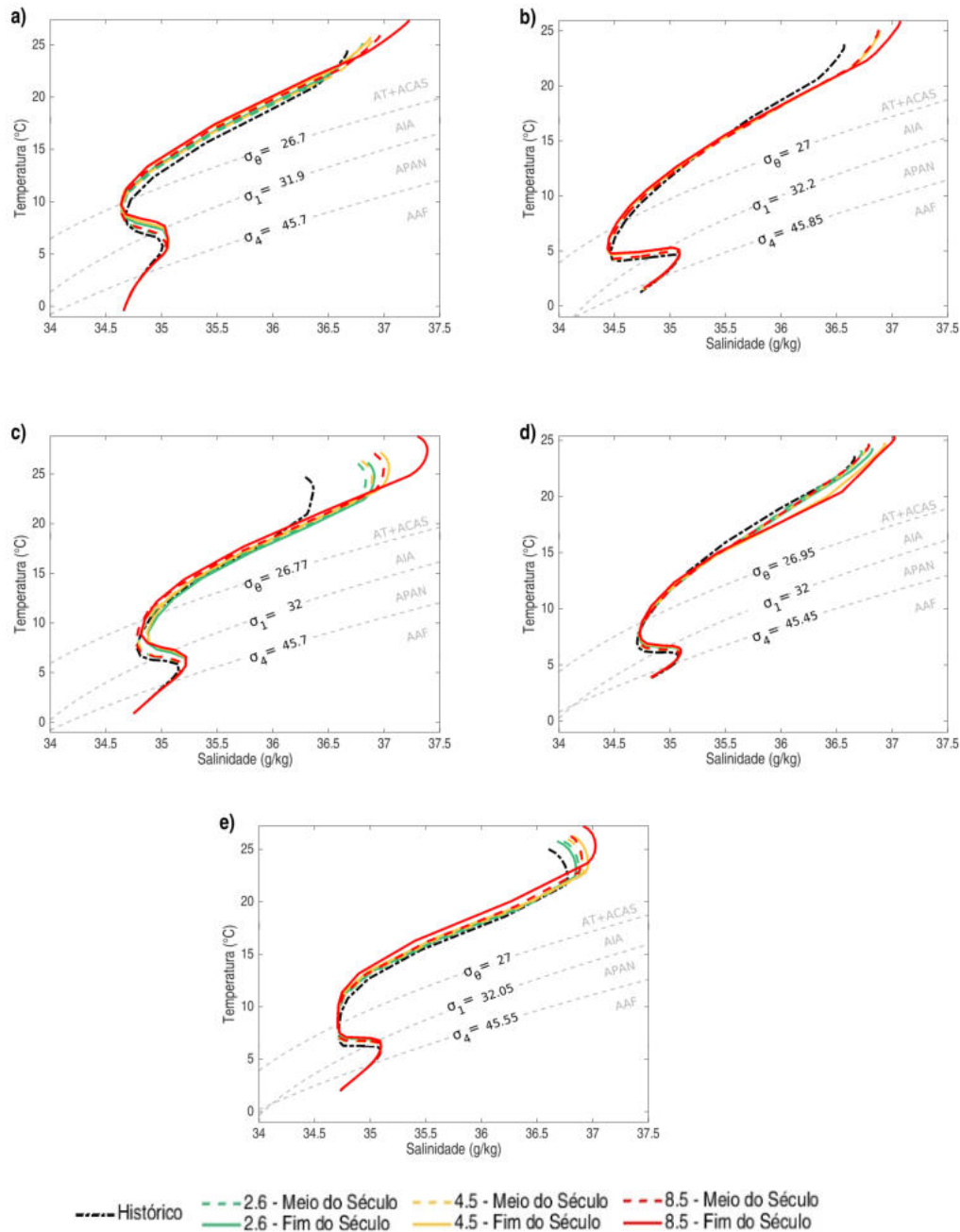


Figura 15: Comparação do Diagrama T-S dos modelos durante o período histórico e os períodos de meio e final do século dos SSPs para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas tracejadas são as densidades de referência para a divisão das massas d'água de cada modelo. Fonte: Autor.

### 3.3.1. Transporte de Volume

Nesta seção, apresenta-se o cálculo do transporte de volume na região da Corrente do Brasil, com foco nas principais massas d'água que a compõem (AT+ACAS, AIA, APAN e AAF). O transporte de volume auxilia a caracterizar o fluxo de água e a dinâmica oceânica na região, permitindo avaliar como cada massa d'água contribui para o fluxo total da corrente. Para isso, os transportes foram calculados a partir da integração das velocidades das correntes pela área e acumulados ao longo das longitudes que delimitam a área de estudo.

A Figura 16 traz o transporte de volume na camada superficial do oceano para o período histórico e os períodos de meio e final do século em cada um dos SSPs. De modo geral, todos os modelos apontam para alterações na magnitude do transporte, com tendência de intensificação nas projeções. O modelo CanESM5 (Figura 16a) mantém um padrão semelhante ao histórico, com um aumento consistente, apesar de pequeno, no transporte líquido para todos os cenários futuros, sendo mais acentuado no cenário de baixas emissões (SSP1-2.6). O modelo GFDL-CM4 (Figura 16b) apresenta um aumento do transporte para sul nos cenários futuros, especialmente no final do século. Já o modelo UKESM1-0-LL (Figura 16d) mostra uma redução do transporte para sul no meio do século em relação ao período histórico e um aumento no final do século, com a maior evidência no cenário mais brando de emissões. O modelo MIROC6 (Figura 16c) destaca-se pela diferença clara que os transportes no meio do século possuem em relação ao de final do século, quando estão mais acentuados. Por fim, o modelo MPI-ESM1-2-HR (Figura 16e) mostra, dentro de suas variações, que o cenário de altas emissões (SSP5-8.5) é o que apresenta maiores transportes. Em conjunto, os resultados não indicam um padrão de em todos os modelos quando comparamos os períodos ou os SSPs, já que, apesar dos modelos GFDL-CM4 e MPI-ESM1.2-HR indicarem um transporte maior no final do século no SSP5-8.5, o mesmo não ocorre nos demais modelos que apresentam o maior transporte no SSP1-2.6. Isso aponta que, apesar dos SSPs terem uma tendência de aumento das forçantes, as projeções dos modelos não concordam que o mesmo irá causar um aumento ou diminuição do transporte na região.

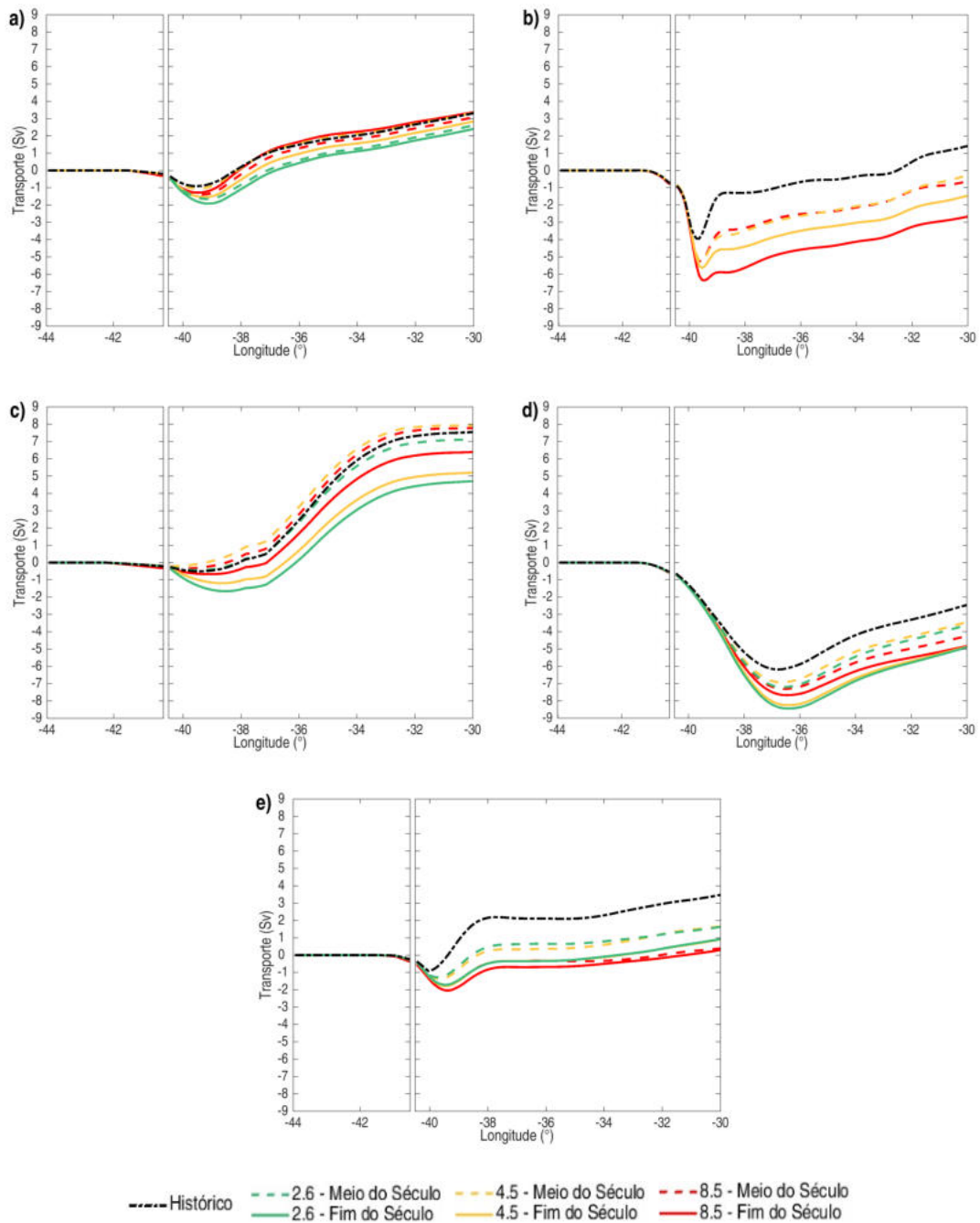


Figura 16: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AT+ACAS dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. Fonte: Autor.

A Figura 17 mostra o transporte de volume líquido acumulado ao longo da longitude para a camada intermediária. De maneira geral, não se observa uma tendência de intensificação do transporte ao longo do século. O modelo CanESM5 (a) apresenta uma discrepância grande quando olhamos para o cenário SSP5-8.5, com o fluxo do transporte passando a fluir para sul. Em contraste, MPI-ESM1.2-HR (e) mostra uma intensificação expressiva do transporte para norte neste cenário, enquanto os cenários SSP1-2.6 e SSP2-4.5

mostram uma diminuição do transporte para norte. Diferente dos anteriores, os modelos UKESM1-0-LL (c) e MIROC6 (d) concordam no comportamento do transporte quando comparado com o período histórico, todos apresentando uma desintensificação do transporte para o norte, ainda assim não vemos um padrão entre cenários e períodos.

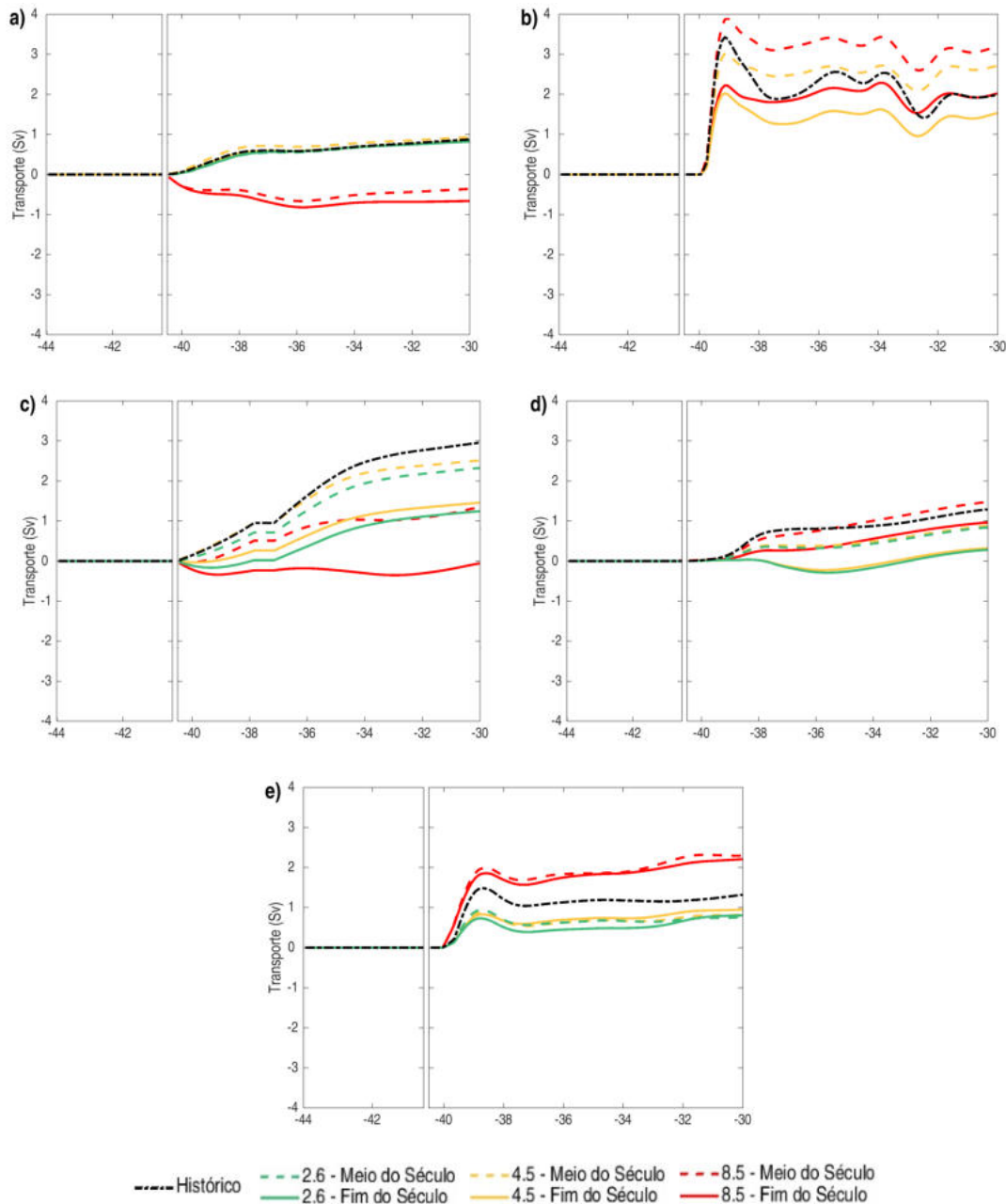


Figura 17: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AIA dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. Fonte: Autor.

A Figura 18 apresenta o transporte de volume líquido acumulado ao longo da longitude para a camada da APAN. O modelo CanESM5 (a) mantém um padrão relativamente estável, com pequenas variações ao longo do tempo. Já o GFDL-CM4 (b) exhibe

um transporte com maiores variações, em geral menos intenso que o período histórico. Os modelos MIROC6 (c) e UKESM1-0-LL (d) demonstram um transporte menos intenso para sul, com exceção do meio do século no cenário com maiores concentrações de GEE no modelo UKESM1-0-LL, no modelo MIROC6 é possível notar que existe uma desintensificação gradual ao longo do aumento das concentrações de GEE nos cenários. Por fim, o modelo MPI-ESM1-2-HR (e) demonstra uma intensificação no transporte para sul em relação ao período histórico, mas não é claro uma ligação entre este aumento e as concentrações de gases nos diferentes cenários. Esses resultados apontam que, assim como a camada anterior, não existe uma tendência robusta de aumento ou diminuição do transporte de volume oceânico na camada da APAN, nem sob cenários mais severos de mudança climática.

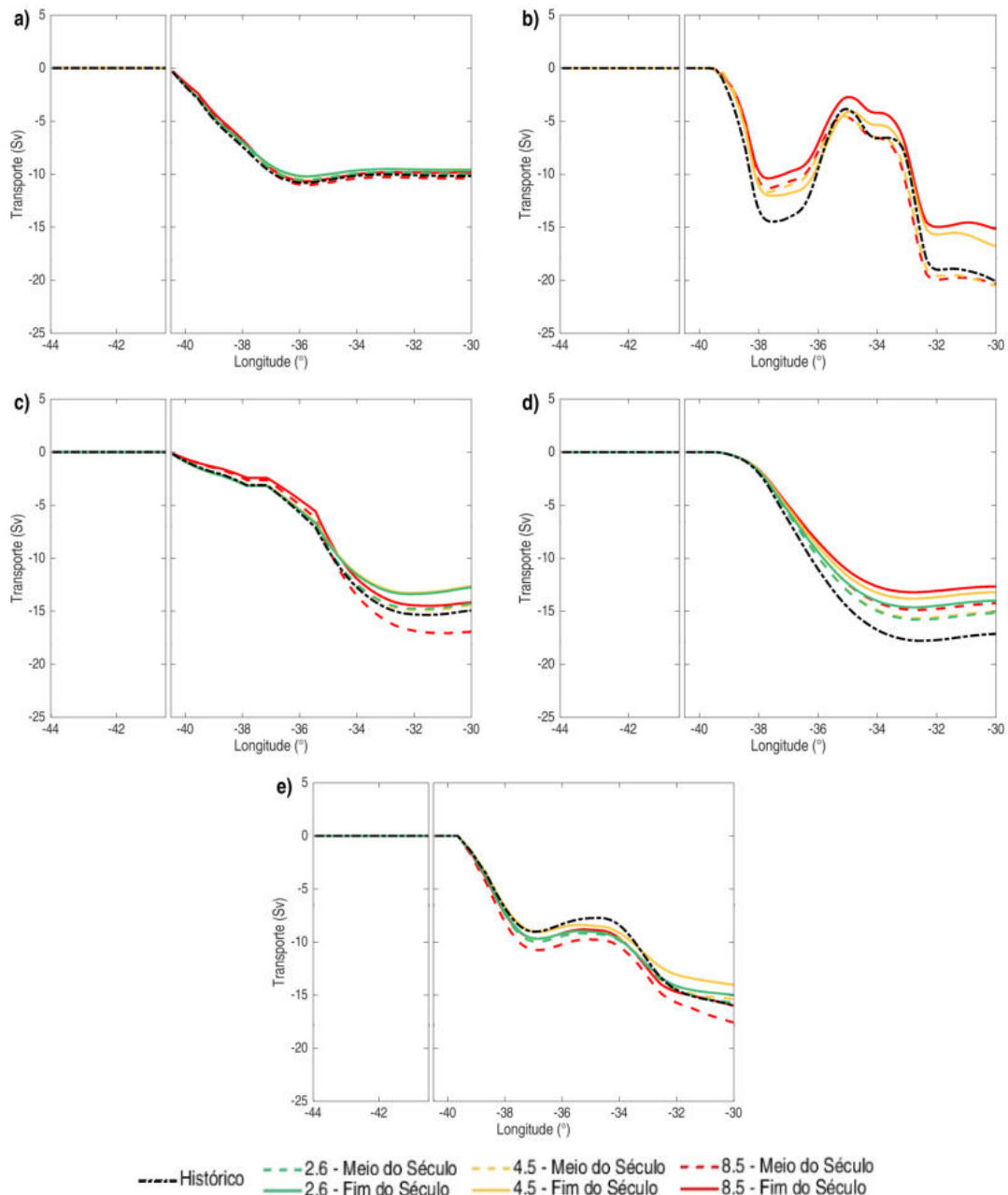


Figura 18: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada APAN dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. Fonte: Autor.

A Figura 19 mostra o comportamento do transporte de volume líquido acumulado ao longo da longitude na camada de fundo associada a AAF. Nesta camada, o modelo MPI-ESM1-2-HR (e), embora também aponte para uma desintensificação no transporte, é o que apresenta variações mais sutis em relação ao período histórico. Os demais modelos apresentam variações com maiores intensidades, onde os modelos CanESM5 (a) e UKESM1-0-LL (d) apresentam os cenários mais brandos com um transporte bem próximo ao período histórico e o cenário com maiores emissões (SSP5-8.5), diminuindo muito o

transporte para sul nessa camada de fundo. Este comportamento é o oposto que podemos observar no modelo MIROC6 (d), cujo o cenário citado possui um transporte para sul maior que os demais. Nesta camada é possível ver que o cenário de altas emissões possui uma resposta que pode ser vista nos modelos, mas a mesma não possui consistência no impacto ser uma intensificação ou enfraquecimento do transporte.

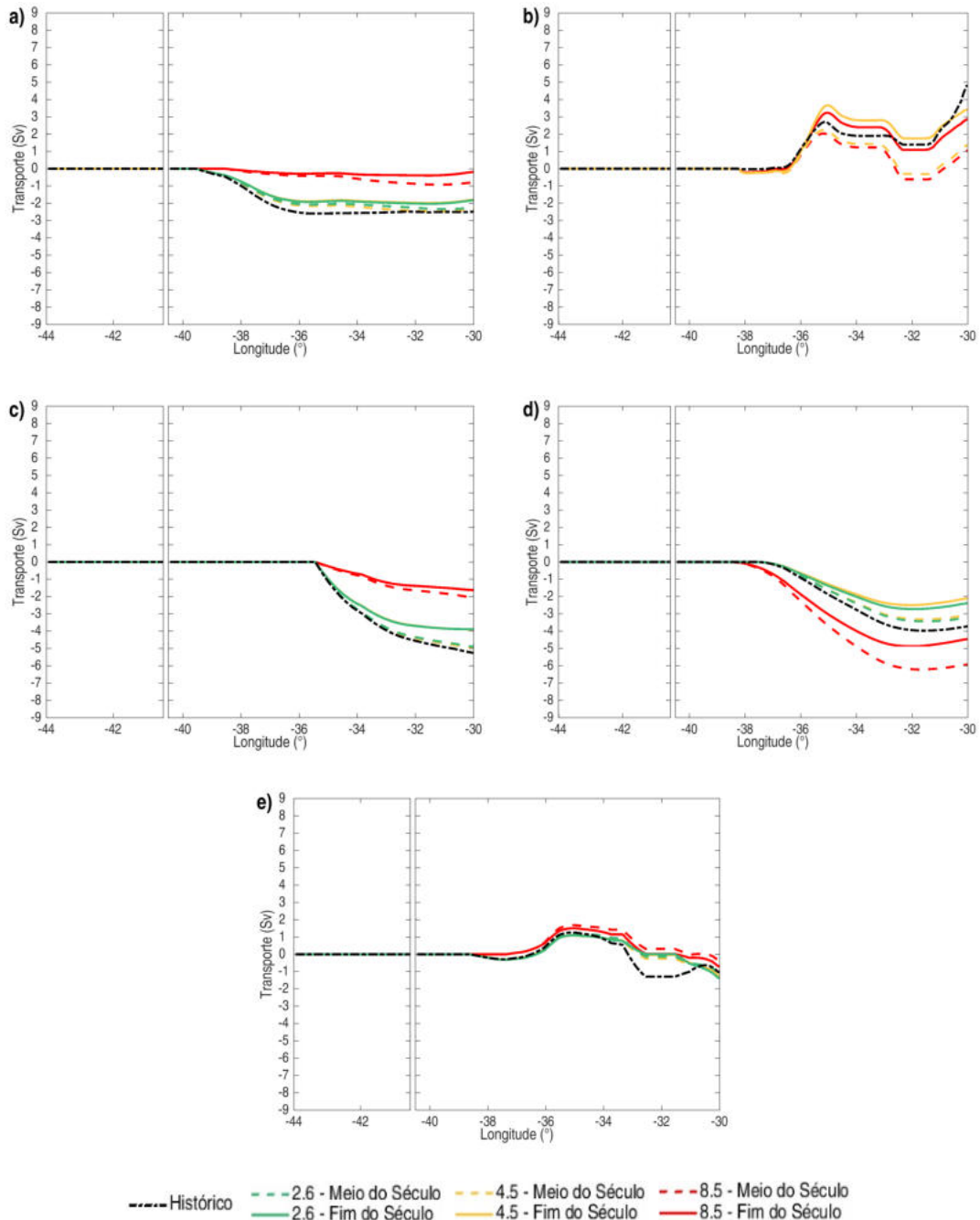


Figura 19: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude na camada AAF dos modelos do CMIP6, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência para os modelos (a) CanESM5, (b) GFDL-CM4, (c) UKESM1-0-LL, (d) MIROC6 e (e) MPI-ESM1.2-HR. Fonte: Autor.

Em ambas as Figuras 18 e 19, observa-se, em alguns casos, uma desintensificação do transporte de volume, Zhou *et al.* (2023) mostrou que, ao longo das últimas cinco décadas, a AAF tem passado por um processo de aquecimento e dessalinização, acompanhado por uma redução de seu volume, isso pode ser uma consequência atribuída ao enfraquecimento de sua taxa de formação. Um processo análogo pode ser considerado para a APAN, uma vez que a formação de ambas as massas d'água está diretamente associada aos processos de formação de gelo nas regiões polares.

### 3.3.2. Transporte de Calor

Nesta seção, apresenta-se a análise do transporte de calor meridional na região da Corrente do Brasil, considerando cinco modelos climáticos do CMIP6. O transporte de calor é uma medida fundamental para caracterizar o fluxo de energia no oceano e sua influência na circulação e no clima regional. O objetivo é comparar os padrões históricos (1976–2005) com projeções futuras sob diferentes cenários de emissão (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), avaliando a consistência dos modelos e possíveis alterações na intensidade e direção do transporte de calor.

O transporte de calor foi calculado para toda a coluna d'água ao longo da seção de referência, seguindo metodologias publicadas para o Atlântico Sul (e.g. Dong *et al.*, 2015, 2021; Goes *et al.*, 2015, 2020; Pita *et al.*, 2024). Neste procedimento, a componente meridional da velocidade da corrente é integrada verticalmente da superfície ao fundo e ao longo da longitude da seção, multiplicada pela densidade média da água ( $\rho_0 = 1025 \text{ kg m}^{-3}$ ) e pelo calor específico da água do mar ( $c_p = 4187 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), e pelo valor da temperatura potencial ( $\theta$ ) ao longo da seção, resultando no transporte total de calor em petawatts (PW). Para conferir a coerência dos resultados, os valores obtidos foram comparados com referências anteriores. Por exemplo, Pita *et al.* (2024) estimou um transporte de calor de aproximadamente -0,7 PW para a CB na latitude de 22.5°S, bem próxima a região de estudo, que utilizou como base, entre outros, os dados do Projeto MOVAR. Os modelos que se aproximaram mais desse valor foram os modelos MIROC6 e o GFDL-CM4, tanto no período histórico, quanto nos SSPs. A representação precisa do modelo GFDL-CM4 pode ser atribuída à sua maior resolução espacial, o que permite uma melhor representação da região, mas outras causas não podem ser descartadas. Já a performance do MIROC6 está provavelmente relacionada à sua simulação de uma CB mais dispersa, o que pode resultar em valores de transporte de calor mais elevados ao sul.

A Figura 20 apresenta a média anual do transporte de calor para cinco modelos climáticos do CMIP6, evidenciando as diferenças entre o período histórico (1976–2005) e os cenários projetados de emissões (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5) até o final do século XXI. Observa-se que, no período histórico (Figura 20a), o transporte de calor do modelo CanESM5 inverte de sul para norte, enquanto o modelo UKESM1-0-LL mostra um aumento para norte, mais facilmente notado nas figuras na Figura 13A no anexo deste documento. Ao contrário destes, o modelo GFDL-CM4 intensifica o transporte de calor para sul. Nos SSP1-2.6 e SSP2-4.5 (Figura 20b e 20c), todos os modelos apresentam uma ligeira intensificação do transporte de calor para sul.

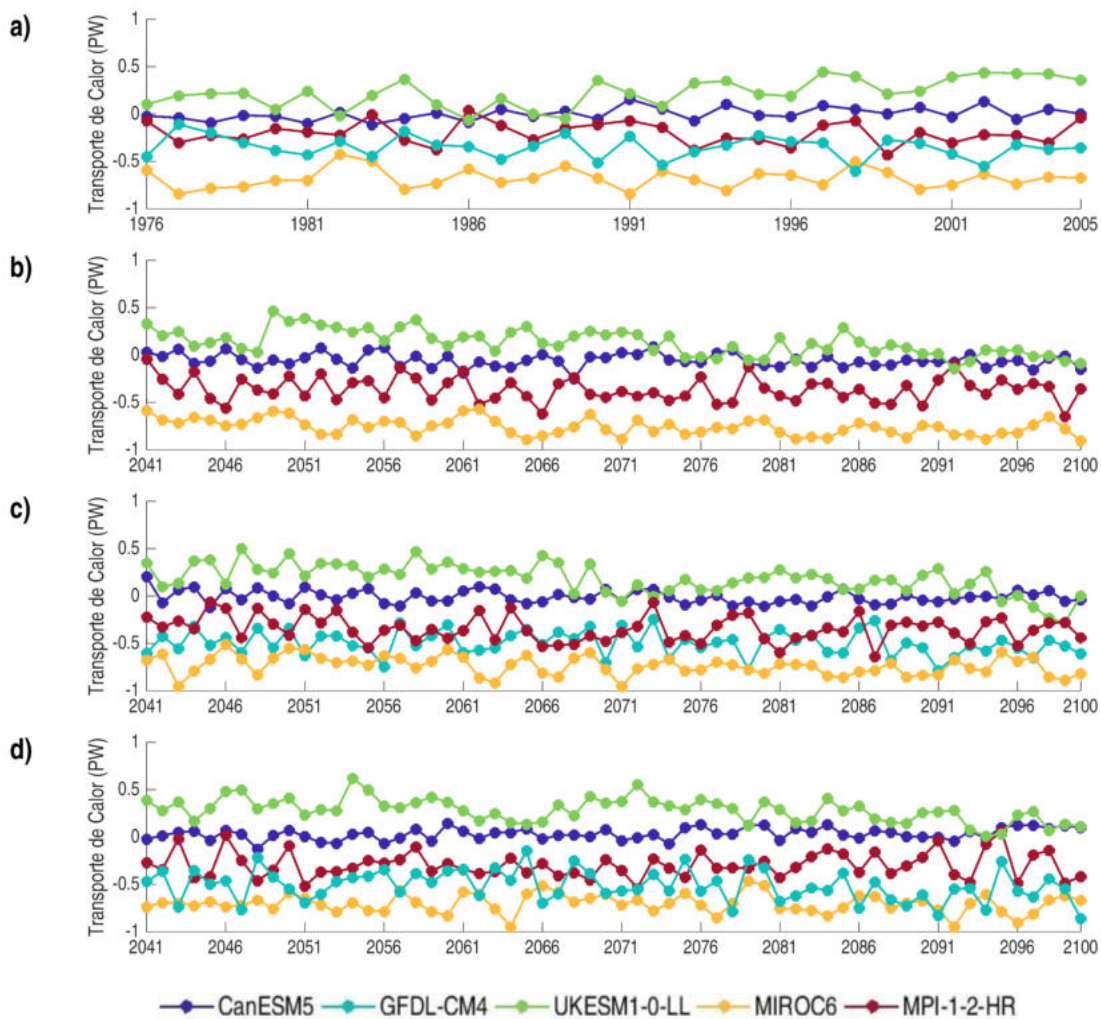


Figura 20: Média anual do transporte de calor para cada um dos modelos do CMIP6 no (a) período histórico e os períodos do meio (1941-1970) e do final do século (1971-2100) no (b) SSP1-2.6, (c) SSP2-4.5 e (d) SSP5-8.5. Fonte: Autor.

## 4. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo uma avaliação abrangente e contextualizada da representação da estrutura termohalina e da circulação oceânica na região da CB da radial de XBT NOAA AX-97. A análise concentrou-se na coluna d'água ao longo da radial de alta densidade de XBT NOAA-AX97, um dos monitoramentos mais longos e importantes da região, que devido sua continuidade traz uma representação mais realista da região de estudo. Ao examinar as simulações dos modelos do CMIP5 e CMIP6, buscando compreender a capacidade desses modelos em reproduzir as massas de água e os processos dinâmicos associados, tanto no período histórico quanto em cenários de projeções futuras, em contraste com dados *in situ* do Projeto MOVAR, a reanálise ORAS5 e o WOA23.

A análise das densidades potenciais, diagramas T-S e extremos de salinidade e temperatura potencial evidencia que os modelos apresentam desempenho discrepante na representação das massas de água da região. Enquanto alguns modelos do CMIP6, como GFDL-CM4 e MPI-ESM1-2-HR, reproduzem de forma relativamente precisa as interfaces superficial e intermediárias, outros apresentam subestimações ou superestimações, especialmente nas camadas profundas, como a Água Antártica de Fundo. Apesar dessas divergências, observa-se que a compensação entre salinidade e temperatura potencial permite que as densidades das interfaces permaneçam próximas aos valores observados, mesmo quando os valores absolutos divergem. Estes resultados indicam que, embora haja melhorias pontuais em alguns modelos recentes, não existe um avanço generalizado, reforçando a importância de referências observacionais, como a reanálise ORAS5 e a climatologia WOA23, para validar e aprimorar as simulações termohalinas na região de estudo.

Um dos resultados observados neste trabalho foi que o modelo GFDL-CM4 apresentou o desempenho mais satisfatório entre os modelos avaliados, tanto na representação da estrutura das massas d'água quanto na simulação dos campos de velocidade e transporte de volume. Sua maior resolução espacial, de  $0,25^\circ$ , permitiu representar com maior precisão as feições dinâmicas da região, aproximando-se mais dos dados da reanálise ORAS5 e das observações do projeto MOVAR na camada superior do oceano (até aproximadamente 700 m de profundidade). Isso também pode ser observado nos resultados do viés de temperatura e salinidade, nos quais os dados desse modelo apresentam os menores desvios em relação aos dados utilizados na comparação.

Apesar das melhorias esperadas na transição do CMIP5 para o CMIP6, os resultados não evidenciam mudanças sistemáticas ou consistentes entre as duas gerações de modelos. As

variações observadas entre modelos de diferentes fases parecem estar mais relacionadas às diferenças nas resoluções espaciais do que propriamente às melhorias metodológicas entre os ciclos do CMIP. Modelos do mesmo centro de pesquisa que, na fase seis, aprimoraram a resolução espacial apresentaram melhor desempenho.

No que se refere às projeções futuras, não foi identificado um padrão robusto de resposta nos transportes de volume ou calor entre os diferentes cenários socioeconômicos (SSPs), nem uma resposta clara entre os SSPs e o período histórico. É importante destacar que, no caso do transporte de volume, a avaliação considerou todas as massas de água ao longo de toda a coluna d'água, enquanto que, para o transporte de calor, a análise foi realizada considerando a coluna d'água como um todo. As respostas dos modelos às mudanças climáticas futuras variam significativamente, e, em alguns casos, os cenários de baixas emissões apresentaram transportes mais intensos do que os cenários de altas emissões. Essa inconsistência sugere que as projeções para a região ainda carregam grande incerteza e dependem fortemente da estrutura interna de cada modelo e possivelmente de suas resoluções espaciais.

Portanto, os resultados aqui apresentados reforçam a importância de se considerar a resolução espacial e as particularidades de cada modelo ao interpretar simulações climáticas, especialmente em regiões complexas como a região de estudo. A continuidade de estudos observacionais, como o projeto MOVAR, é fundamental para aprimorar a validação dos modelos e reduzir as incertezas associadas às projeções futuras. Assim, este estudo oferece uma avaliação inicial do desempenho dos modelos na região de interesse, constituindo um passo preliminar para a identificação daqueles com maior potencial de aplicação em estudos de regionalização.

## 5. Referências

ALLEY, Richard B. *et al.* Summary for policymakers. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, v. 6, n. 07, p. 333, 2007.

ARORA, V. K. *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 5, p. 3–8, 2011.

BALMASEDA, Magdalena Alonso; MOGENSEN, Kristian; WEAVER, Anthony T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 139, n. 674, p. 1132–1161, 2013.

BOYER, T. *et al.* WORLD OCEAN ATLAS 2018 Product Documentation Ocean Climate Laboratory NCEI/NESDIS/NOAA NOAA National Centers for Environmental Information, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34758.01602>. Acesso em: 23 abr., 2024.

BROGGIO, Micael Fernando; GARCIA, Carlos Alberto Eiras; SILVA, Renato Ramos da. Open-access Evaluation of South Atlantic Thermohaline Properties from BESM-OA2.5 and Three Additional Global Climate Models. *Ocean and Coastal Research*, São Paulo, v. 69, 2021. DOI: 10.1590/2675-2824069.21012mfb

CHENG, L. *et al.* Time, Probe Type, and Temperature Variable Bias Corrections to Historical Expendable Bathythermograph Observations. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, v. 31, n. 8, p. 1793–1825, 2014.

CIRANO, Mauro *et al.* A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação Global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 2, p. 209–230, 2006.

CRUZ, S. B. O. Corrente Do Brasil: Uma Análise da sua Estrutura e Variabilidade com base na Linha de Monitoramento de XBT de Alta Densidade NOAA-AX97. 2022. 36. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

DA SILVEIRA, Ilson C. A.; DE MIRANDA, Luiz B.; BROWN, Wendell S. On the origins of the North Brazil Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 99, n. C11, p. 22501–22512, 1994.

DIFFENBAUGH, Noah S.; BURKE, Marshall. Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 20, p. 9808–9813, 2019.

DONG, Shenfu *et al.* Synergy of In Situ and Satellite Ocean Observations in Determining Meridional Heat Transport in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 126, n. 4, p. e2020JC017073, 2021.

DONG, Shenfu; GONI, Gustavo; BRINGAS, Francis. Temporal variability of the South Atlantic Meridional Overturning Circulation between 20°S and 35°S. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 18, p. 7655–7662, 2015.

DUNNE, John Patrick *et al.* GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, v. 25, n. 19, p. 6646–6665, 2012.

EMERY, William. Water Types and Water Masses. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, v. 4, p. 3179–3187, jul. 2001.

EMERY, William; THOMSON, R. E. *Data Analysis Method in Physical Oceanography*. Elsevier, p. 800, 2024.

EMÍLSSON, Ingvar. The shelf and coastal waters off southern Brazil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 11, n. 2, p. 101–112, 1961.

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

EYSTER, Tim; et al. The CMIP6 landscape of climate model projections. *Nature Climate Change*, v. 9, p. 1–9, 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0599-1.

FERREIRA, Tayanne P.; MARANGONI G.M.P., Paula; CIRANO, Mauro; PAIVA, Afonso M.; CRUZ, Samantha B.O.; FREITAS, Pedro P.; GOES, Marlos; MATA, Maurício M. Twenty years monitoring the Brazil Current along the NOAA AX97 high-density XBT transect. *Oceanography*, v. 38, sup. 1, p. 61–66, 2025. DOI: 10.5670/oceanog.2025e113.

FLATO, Gregory M. Earth system models: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 2, n. 6, p. 783–800, 2011.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* Climate--carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of climate*, v. 19, n. 14, p. 3337–3353, 2006.

GIORGETTA, M. A. *et al.* Berichte zur Erdsystemforschung Reports on Earth System Science. *Berichte zur Erdsystemforschung*, n. 135, 2013.

GOES, Marlos; GONI, Gustavo; DONG, Shenfu. An optimal XBT-based monitoring system for the South Atlantic meridional overturning circulation at 34°S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 1, p. 161–181, 2015.

GOES, M. *et al.* Long-Term Monitoring of the Brazil Current Transport at 22°S From XBT and Altimetry Data: Seasonal, Interannual, and Extreme Variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 124, n. 6, p. 3645–3663, 2019.

GOES, Marlos *et al.* The Complementary Value of XBT and Argo Observations to Monitor Ocean Boundary Currents and Meridional Heat and Volume Transports: A Case Study in the Atlantic Ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 37, n. 12, p. 2267–2282, 2020.

HANSEN, James *et al.* Global surface temperature change. *Reviews of geophysics*, v. 48, n. 4, p. 29, 2010.

HELD, I. M. *et al.* Structure and Performance of GFDL's CM4.0 Climate Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 11, n. 11, p. 3691–3727, 2019.

HOGG, Nelson G.; JOHNS, William E. Western boundary currents. *Reviews of Geophysics*, v. 33, n. S2, p. 1311–1334, 1995.

HOUGHTON, John. *Global warming: the complete briefing*. Cambridge university press. p. 438, 2009.

HURRELL, James W. *et al.* The community earth system model: a framework for collaborative research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 94, n. 9, p. 1339–1360, 2013.

JIN, Ying *et al.* Sea level variation in the Arctic Ocean since 1979 based on ORAS5 data. *Frontiers in Marine Science*, v. 10, p. 1197456, 2023.

JONES, C. D. *et al.* The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, v. 4, n. 3, p. 543–570, 2011.

KUHLBRODT, Till *et al.* The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC3.1: Development and Evaluation for Global Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 10, n. 11, p. 2865–2888, 2018.

LE TREUT, Hervé *et al.* Historical Overview of Climate Change, Chapter 1. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. p. 1-36, 2007.

LEYBA, Inés M.; SOLMAN, Silvina A.; SARACENO, Martín. Trends in sea surface temperature and air–sea heat fluxes over the South Atlantic Ocean. *Climate Dynamics*, v. 53, n. 7, p. 4141–4153, 2019.

LIAN, Tao *et al.* Investigating the uncertainty in global SST trends due to internal variations using an improved trend estimator. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 123, n. 3, p. 1877–1895, 2018.

LIMA, Mateus O. *et al.* An Assessment of the Brazil Current Baroclinic Structure and Variability Near 22°S in Distinct Ocean Forecasting and Analysis Systems. *Ocean Dynamics*, v. 66, n. 6, p. 893-916, 2016.

MATA, Mauricio *et al.* Observations of Brazil Current baroclinic transport near 22°S. variability from the AX97 XBT transect. *Clivar Exchanges*, v. 58, p. 5–10, jul. 2012.

MATSUURA, Y. Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e o Cabo de Santa Marta Grande (SC). *Ciência e Cultura*, 1986.

MIRANDA, Luiz Bruner de. Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 33, n. 2, p. 105–119, 1985.

MÜLLER, W. A. *et al.* A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 10, n. 7, p. 1383–1413, 2018.

NOBRE, Paulo *et al.* Climate simulation and change in the brazilian climate model. *Journal of Climate*, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013.

PITA, I. *et al.* An ARGO and XBT Observing System for the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Meridional Heat Transport (AXMOC) at 22.5°S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 129, n. 1, p. e2023JC020010, 2024.

RANDALL, David A. *et al.* *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Agenda*, v. 6, n. 07, p. 333, 2007.

RIahi, Keywan; VAN VUUREN, Detlef P.; KRIEGLER, Elmar; EDMONDS, Jae; O'NEILL, Brian C.; FUJIMORI, Shinichiro; *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, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

RHEIN, M. *et al.* Observations: ocean in climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 255–316, 2013.

SHIOGAMA, H. *et al.* MIROC6 Large Ensemble (MIROC6-LE): experimental design and initial analyses. *Earth System Dynamics*, v. 14, n. 6, p. 1107–1124, 2023.

SILVEIRA, Ilson Carlos Almeida da *et al.* A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 48, n. 2, p. 177–183, 2000.

STOUFFER, R. J. *et al.* CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 98, n. 1, p. 95–105, 2017.

STRAMMA, Lothar. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. *Journal of Marine Research*, v. 49, n. 2, p. 281–294, 1991.

STRAMMA, Lothar; ENGLAND, Matthew. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 1042, p. 20863–20884, 1999.

SVERDRUP, Harald Ulrik; JOHNSON, Martin Wiggo; FLEMING, Richard Howell. *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology. [S.l.]: Prentice-Hall New York*, p. 1087, 1942.

SWART, N. C. *et al.* The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 11, p. 4823–4873, 2019.

TALLEY, Lynne *et al.* Descriptive physical oceanography: An introduction: Sixth edition. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction: Sixth Edition, p. 560, jul. 2011.

TATEBE, H. *et al.* Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. Geoscientific Model Development, v. 12, n. 7, p. 2727–2765, 2019.

TOMCZAK, Matthias; GODFREY, Stuart. Regional Oceanography: An Introduction. *In: Bull. Am. Meteorol. Soc. [S.l.: S.n.]*. v. 2 p. 382.

WATANABE, S. *et al.* MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geoscientific Model Development, v. 4, n. 4, p. 845–872, 2011.

WU, Lixin *et al.* Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. Nature Climate Change, v. 2, n. 3, p. 161–166, 2012.

ZUO, Hao; BALMASEDA, Magdalena A.; MOGENSEN, Kristian. The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis: description, evaluation and uncertainties in climate signals. Climate Dynamics, v. 49, n. 3, p. 791–811, 2017.

ZHOU, Shenjie; MEIJERS, Andrew J. S.; MEREDITH, Michael P.; ABRAHAMSEN, E. Povl; HOLLAND, Paul R.; SILVANO, Alessandro; SALLÉE, Jean-Baptiste *et al.* Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes. Nature Climate Change, v. 13, p. 701–709, 2023. DOI: 10.1038/s41558-023-01695-4.

## ANEXO

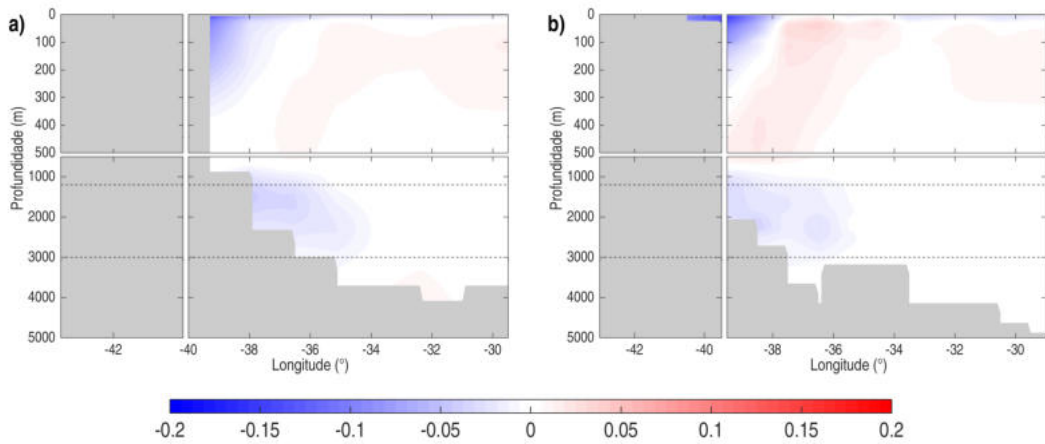


Figura 1A: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) CanESM2 (CMIP5) (b) CanESM5 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

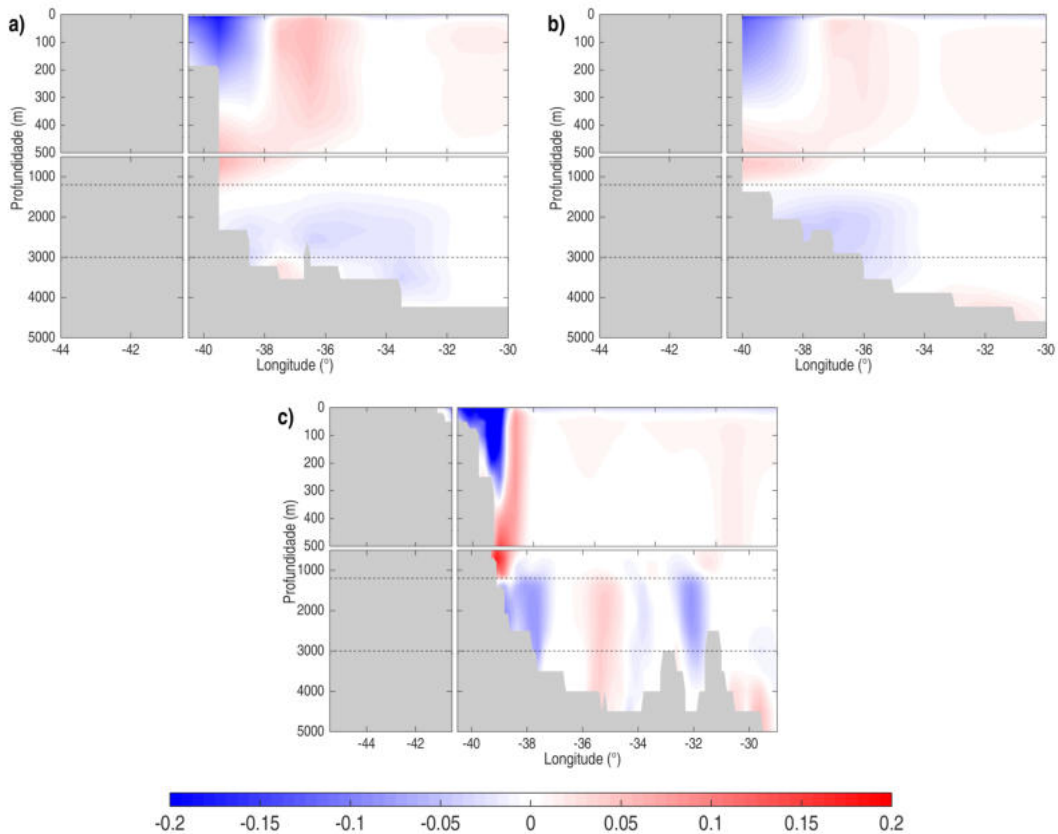


Figura 2A: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) GFDL-ESM2G (CMIP5), (b) GFDL-ESM2M (CMIP5) e (c) GFDL-CM4 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

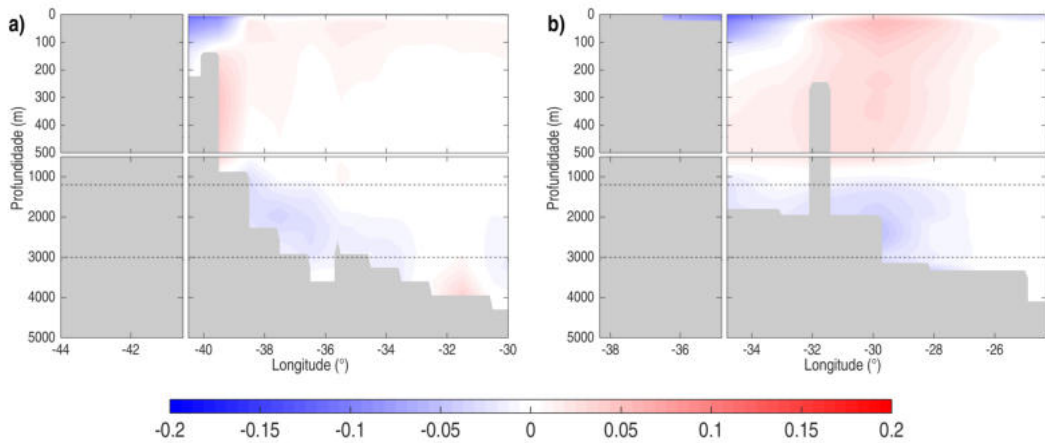


Figura 3A: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) HadGEM2-ES (CMIP5) (b) UKESM1-0-LL (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

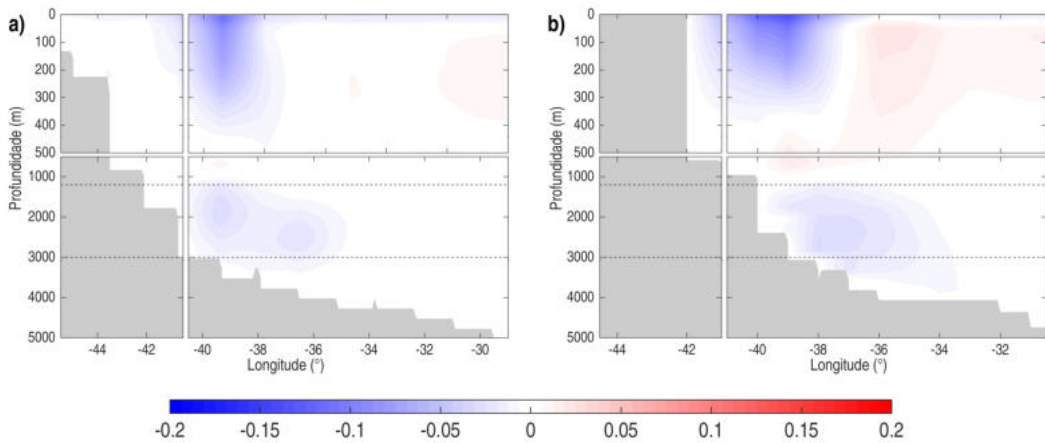


Figura 4A: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) MIROC-ESM (CMIP5) (b) MIROC6 (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

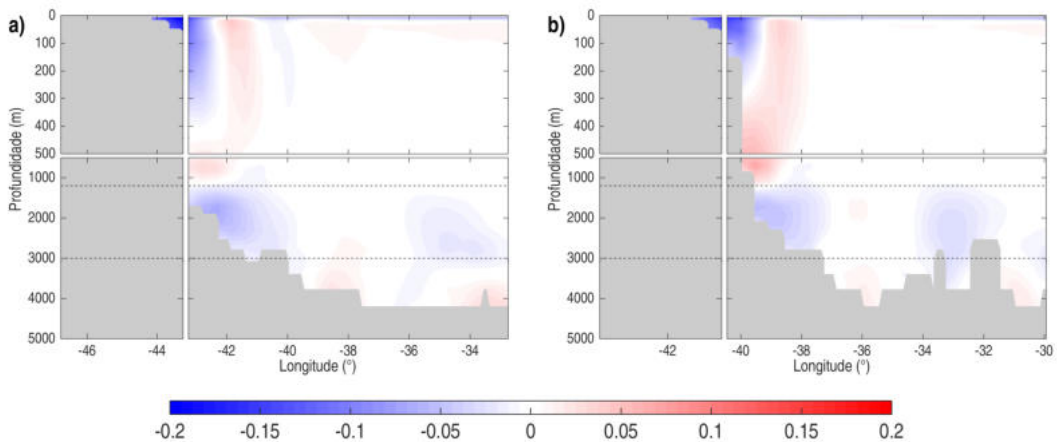


Figura 5A: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) MPI-ESM-MR (CMIP5) (b) MPI-ESM1.2-HR (CMIP6). As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte) e as linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

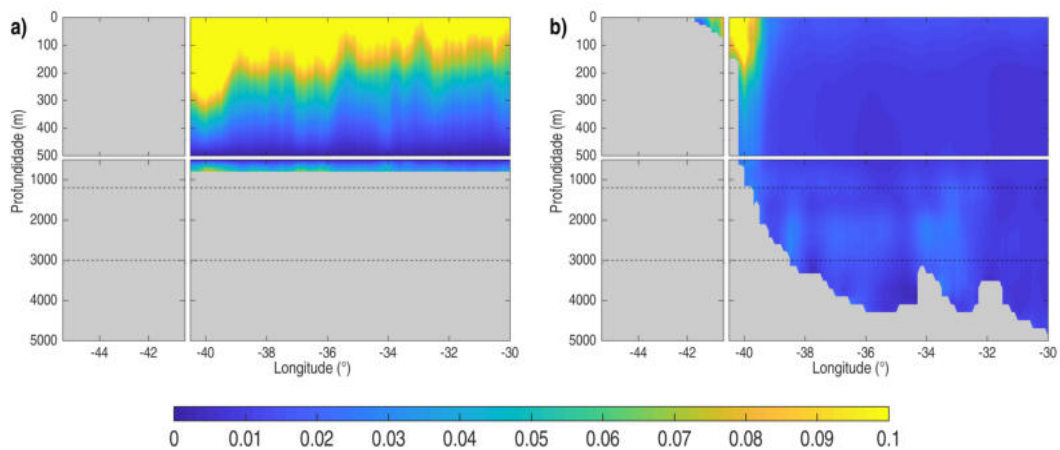


Figura 6A: Campos de desvio padrão da corrente (m/s) durante o período histórico para (a) dados in situ do MOVAR (b) Reanálise ORAS5. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

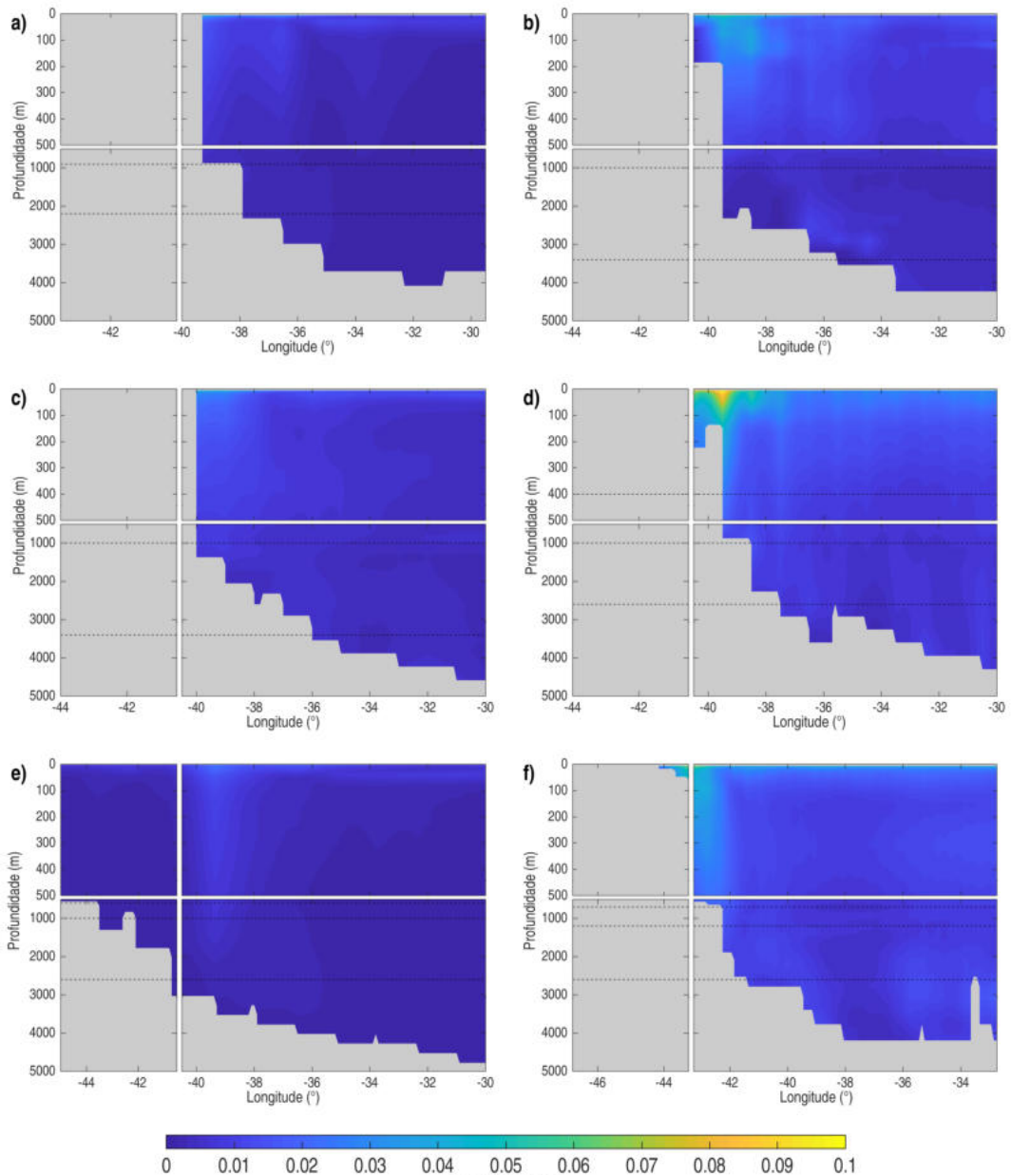


Figura 7A: Campos de desvio padrão da corrente (m/s) da corrente durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) CanESM2 (b) GFDL-ESM2G (c) GFDL-ESM2M (d) HadGEM2-ES (e) MIROC-ESM (f) MPI-ESM-MR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

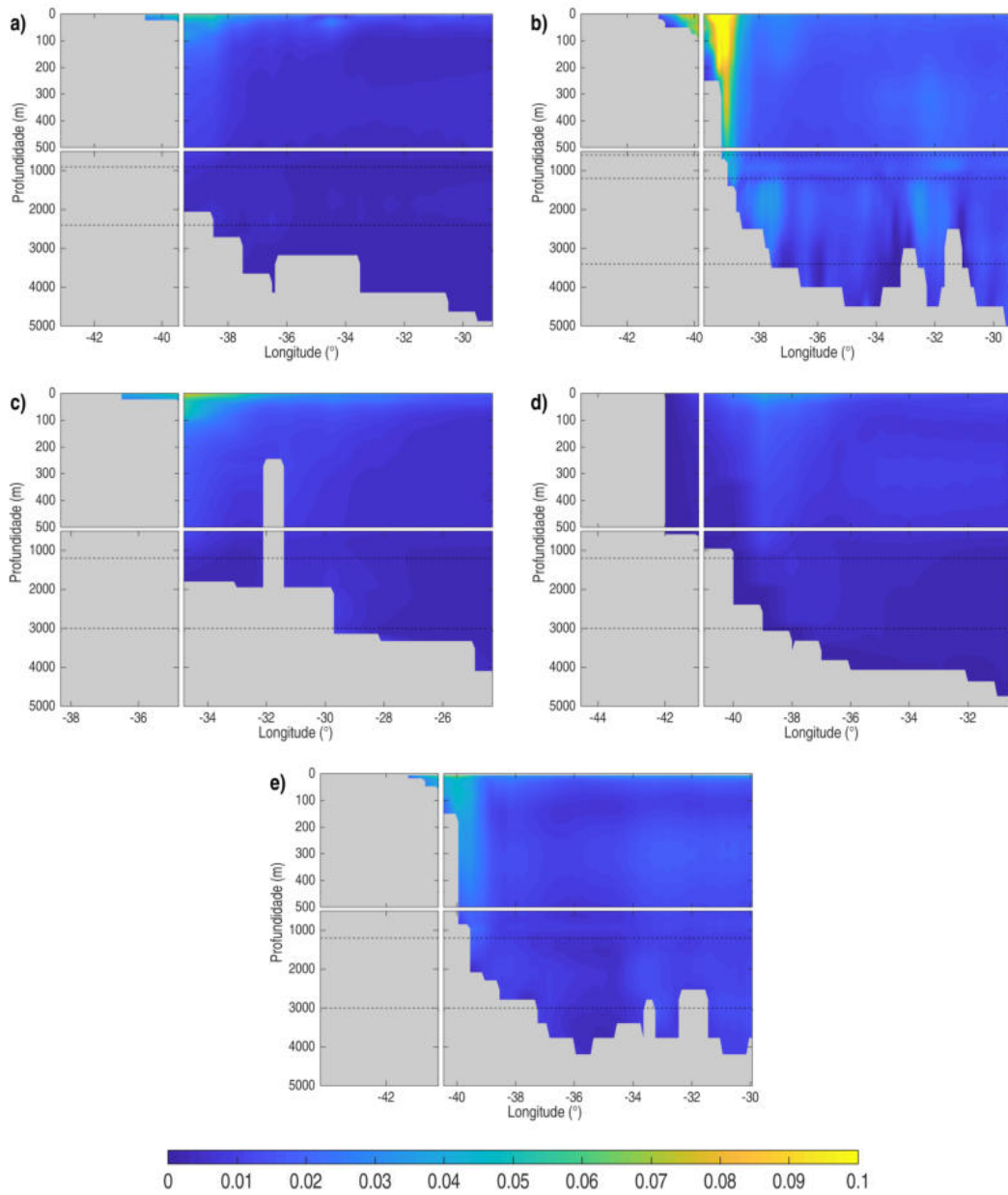


Figura 8A: Campos de desvio padrão da corrente (m/s) durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

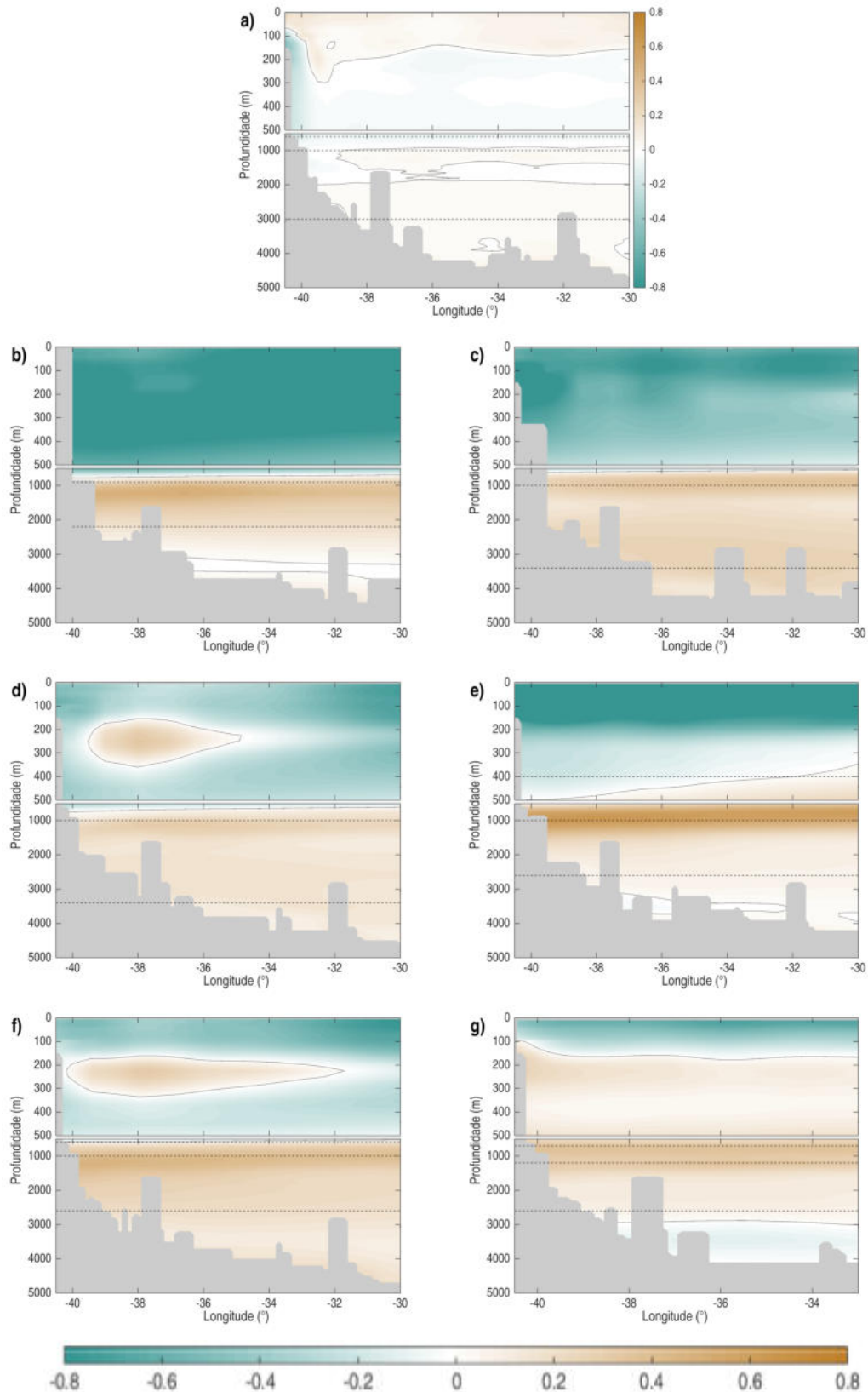


Figura 9A: Campos de viés da salinidade durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

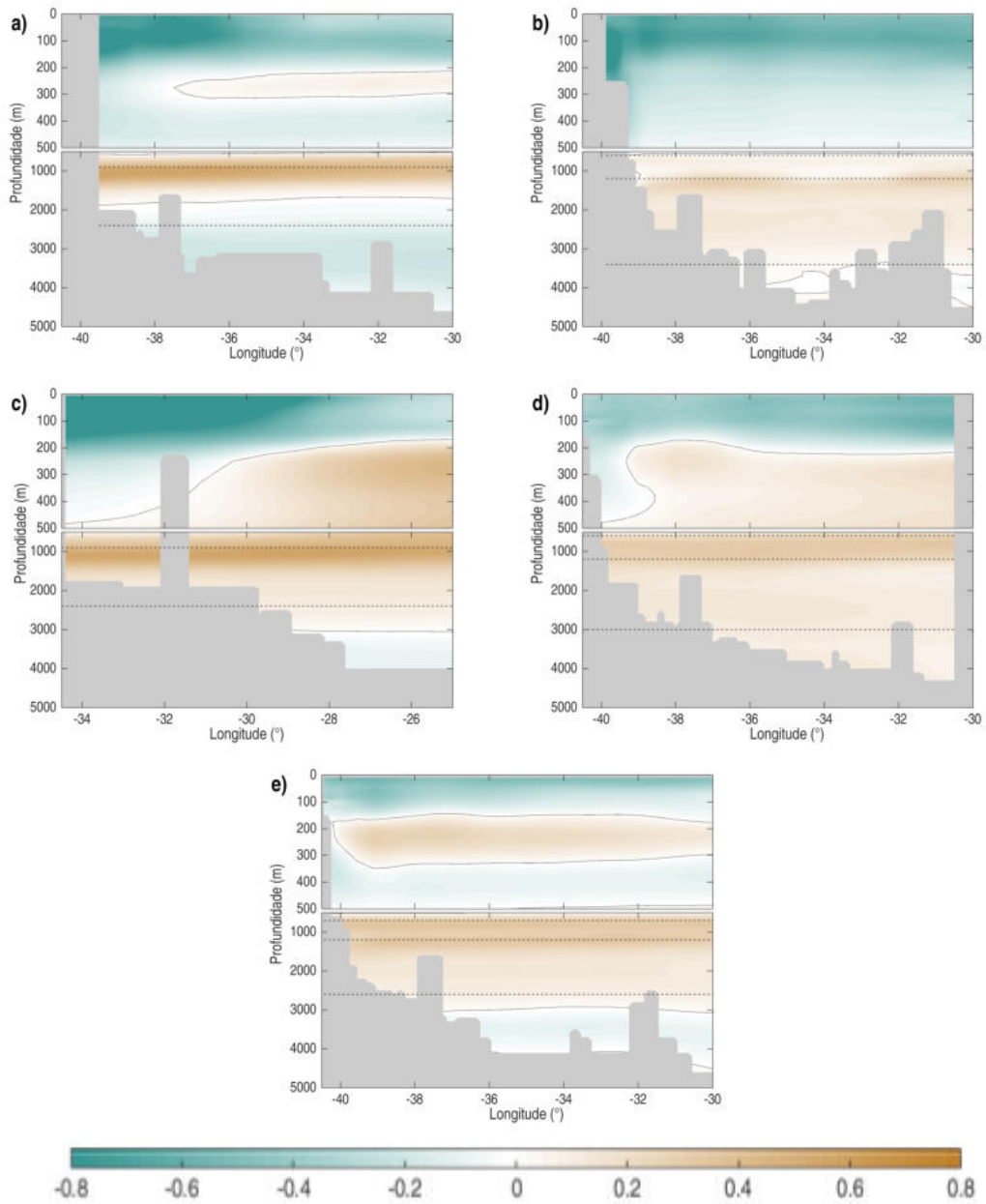


Figura 10A: Campos de viés da salinidade durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água. Fonte: Autor.

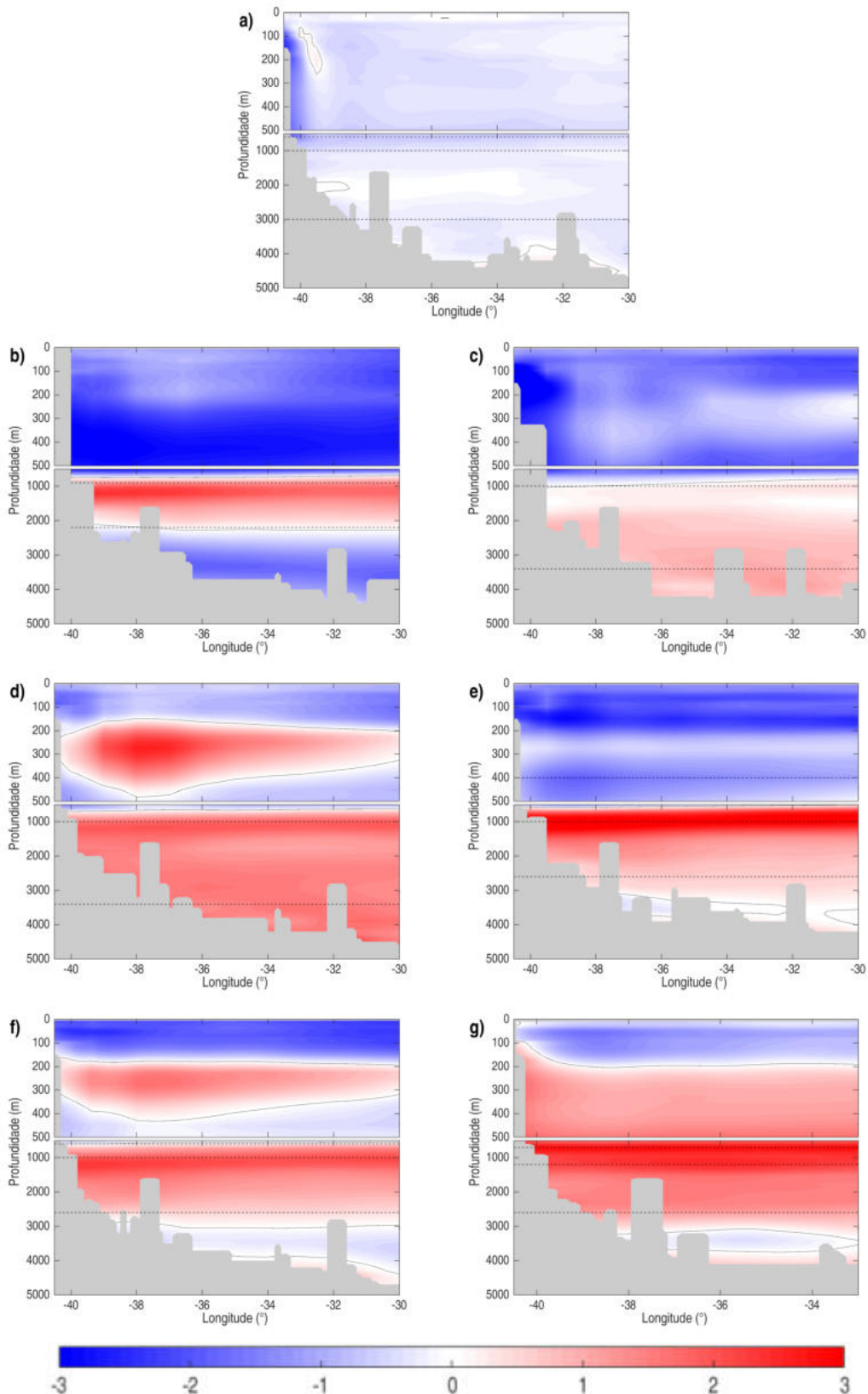


Figura 11A: Campos de viés da temperatura potencial durante o período histórico para os modelos do CMIP5 descritos na Tabela 1 (a) ORAS5 (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

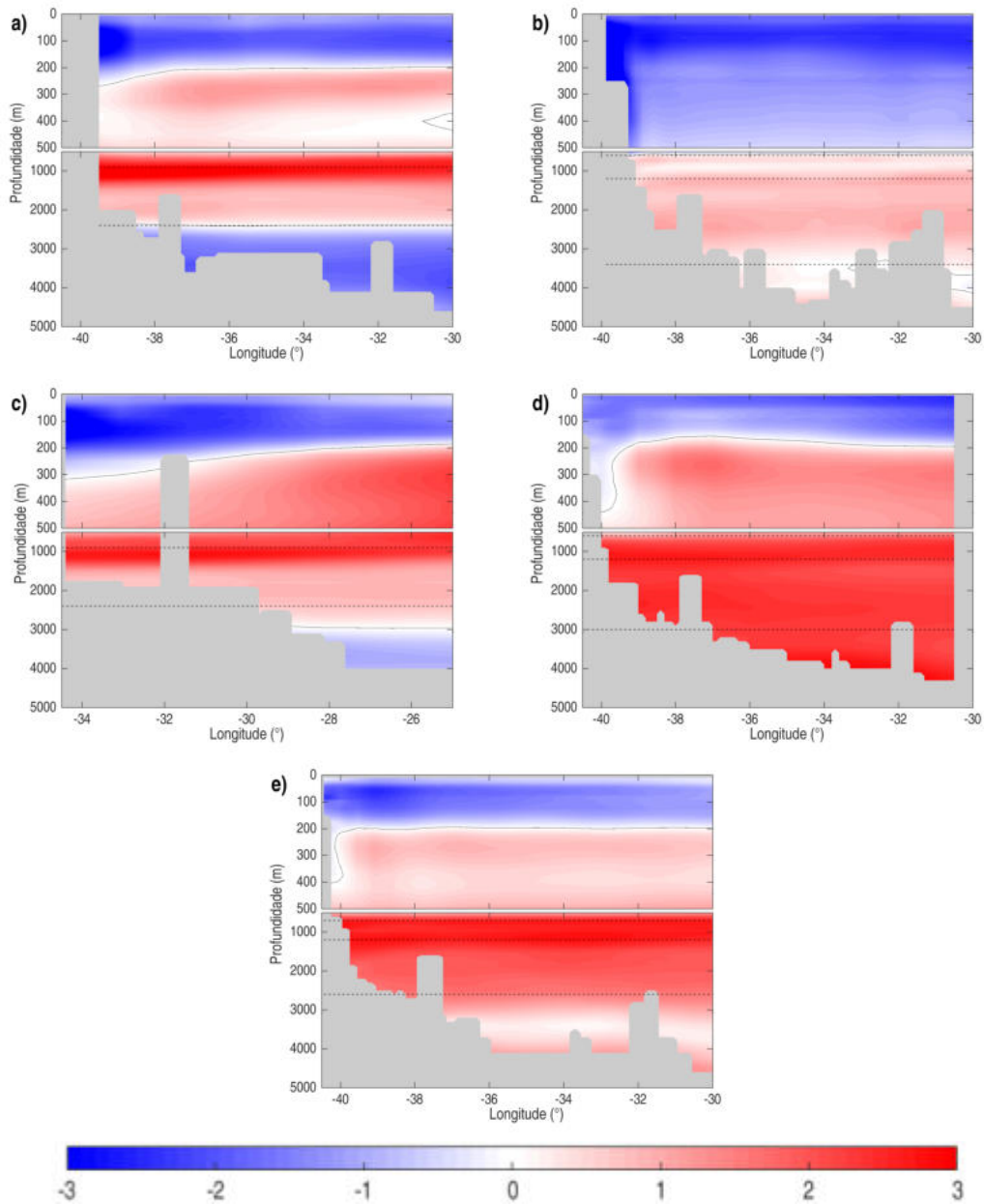


Figura 12A: Campos de viés da temperatura potencial durante o período histórico para os modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. As linhas horizontais pontilhadas indicam os limites utilizados para definir as interfaces entre as diferentes massas d'água Fonte: Autor.

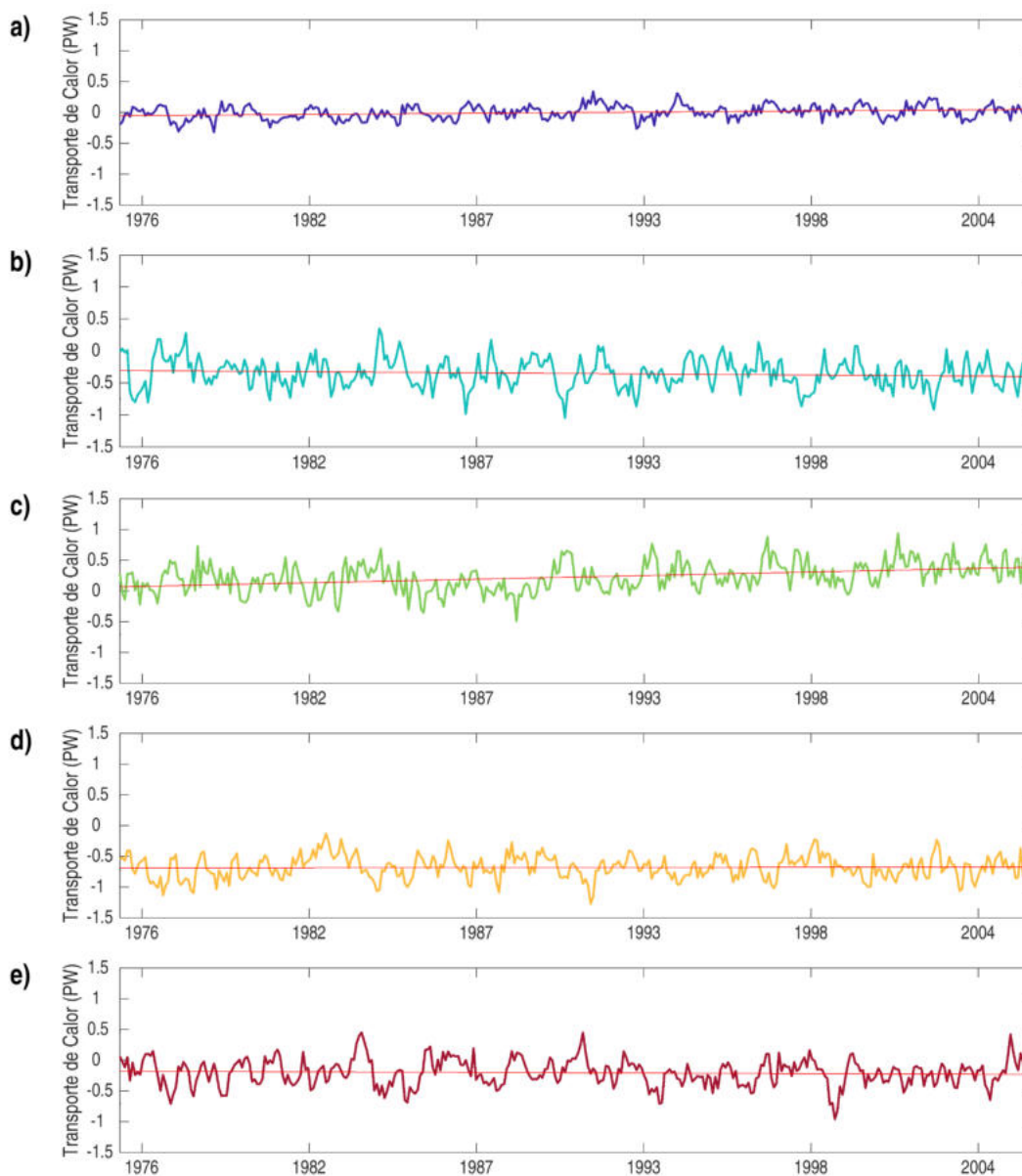


Figura 13A: Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando o período histórico (1976-2005) do (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência. Fonte: Autor.

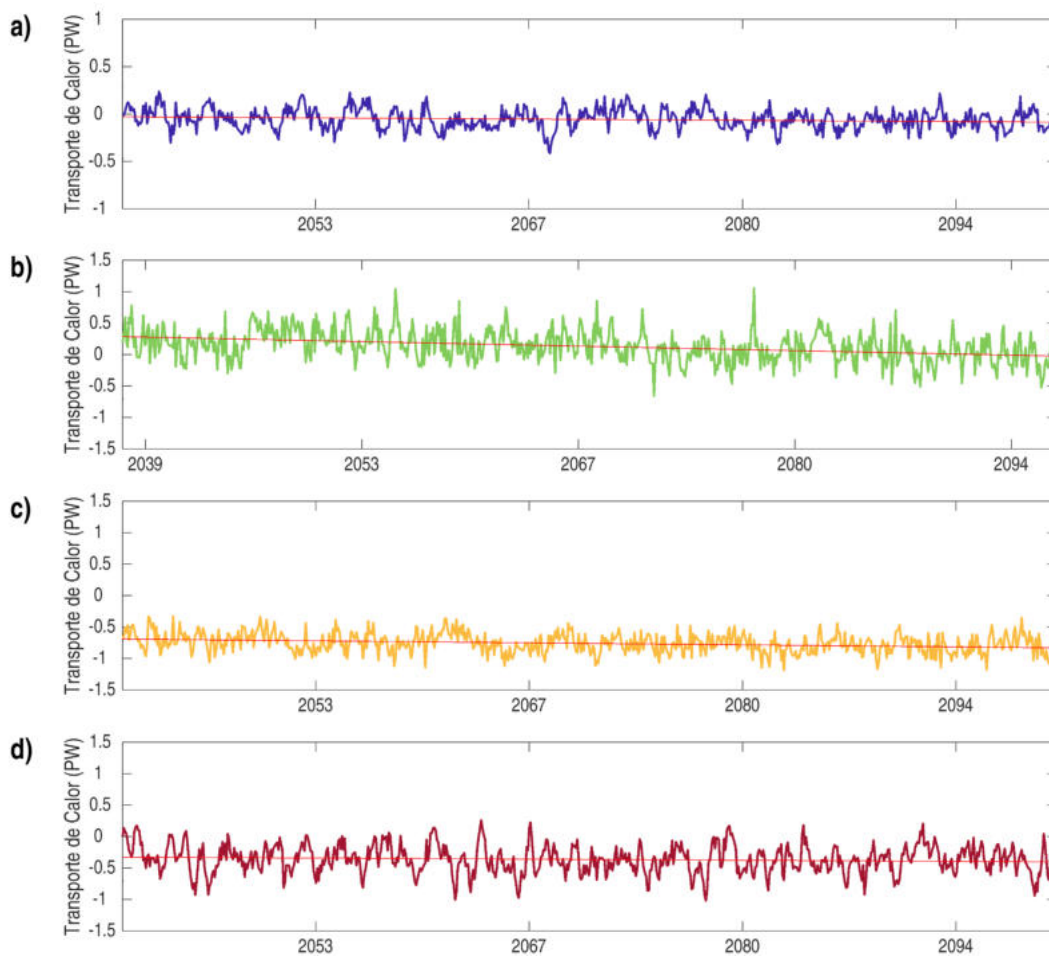


Figura 14A: Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP1-2.6 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência. Fonte: Autor.

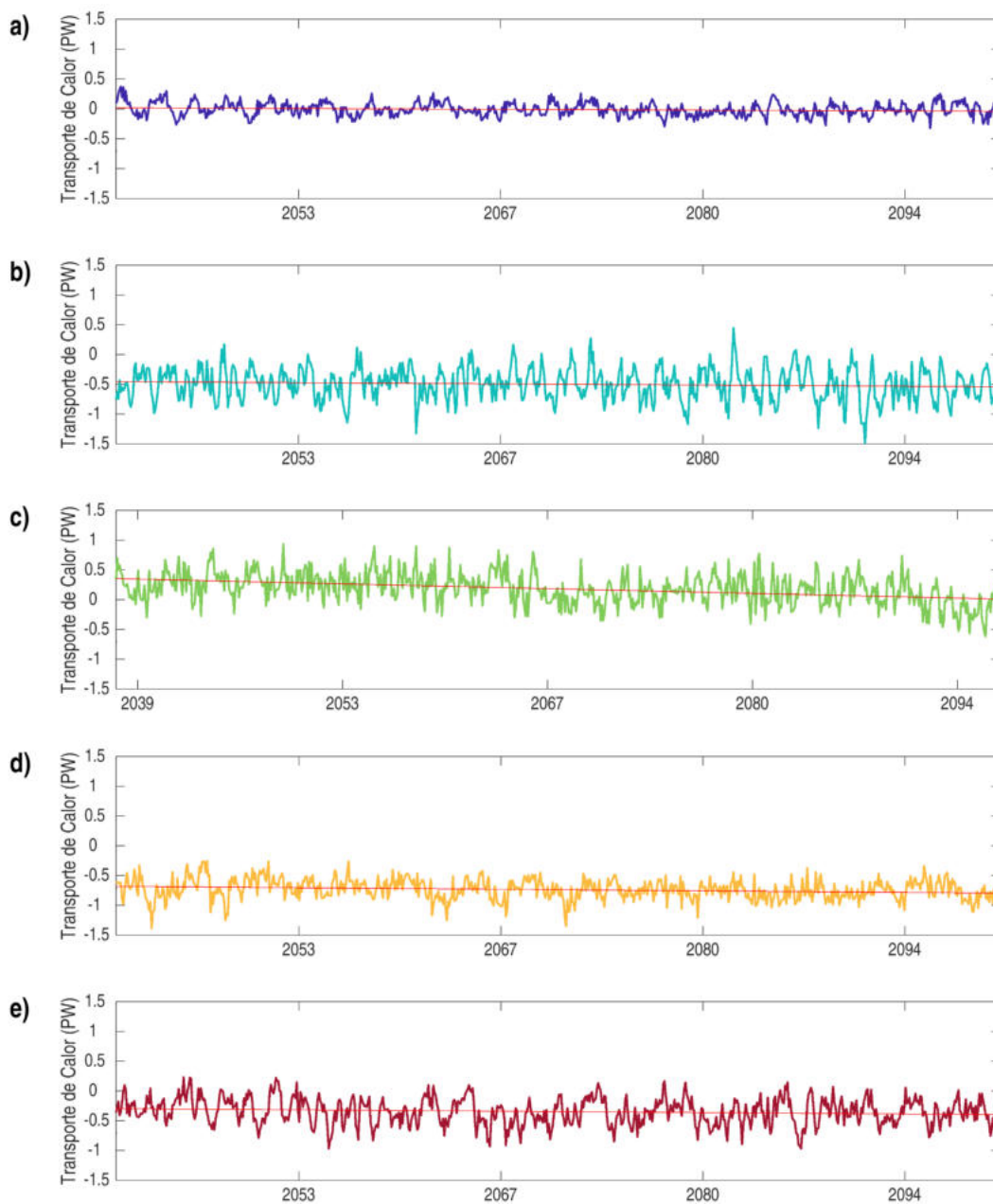


Figura 15A: Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP2-4.5 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência. Fonte: Autor.

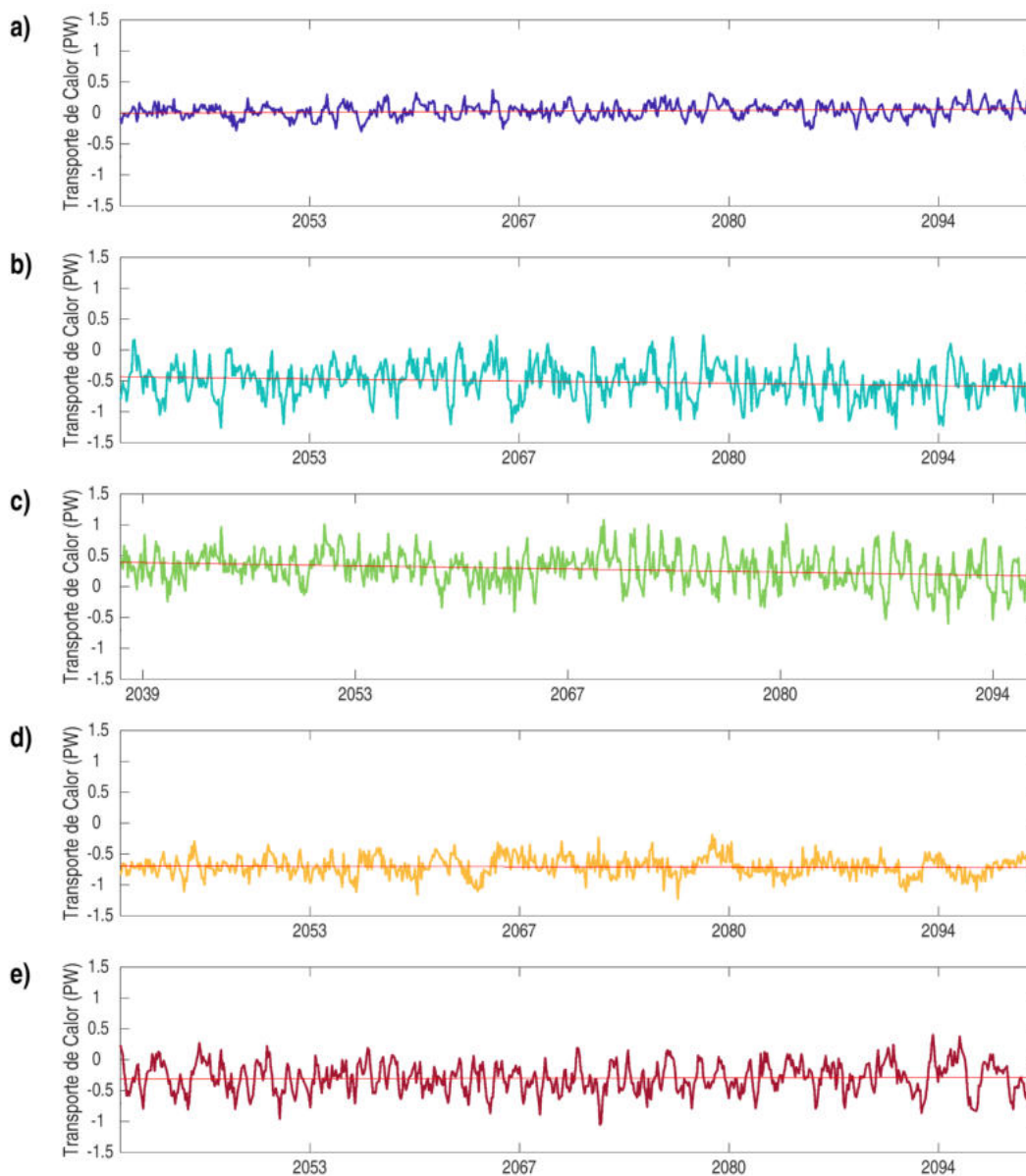


Figura 16A: Transporte de calor de toda a camada d'água acumulado na longitude dos modelos do CMIP6 descritos na Tabela 2, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século para o cenário SSP5-8.5 (a) CanESM5 (b) GFDL-CM4 (c) UKESM1-0-LL (d) MIROC6 (e) MPI-ESM1.2-HR. Em vermelho a linha de tendência. Fonte: Autor.