



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

JÉSSICA LOBATO DE LIMA

**AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA TERRESTRE DO
CMIP5 NA REPRESENTABILIDADE DO SISTEMA DE
CORRENTES DE CONTORNO OESTE E MASSAS DE ÁGUA
ASSOCIADAS AO LONGO DA RADIAL DE XBT DE ALTA
DENSIDADE NOAA-AX97 (MOVAR), ENTRE O RIO DE
JANEIRO E A ILHA DE TRINDADE, BRASIL - PERÍODO
HISTÓRICO E CENÁRIOS FUTUROS**

Rio de Janeiro

Outubro de 2022

La Lobato de Lima, Jéssica
AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA TERRESTRE DO
CMIP5 NA REPRESENTABILIDADE DO SISTEMA DE CORRENTES
DE CONTORNO OESTE E MASSAS DE ÁGUA ASSOCIADAS AO
LONGO DA RADIAL DE XBT DE ALTA DENSIDADE NOAA-AX97
(MOVAR), ENTRE O RIO DE JANEIRO E A ILHA DE
TRINDADE, BRASIL - PERÍODO HISTÓRICO E CENÁRIOS
FUTUROS / Jéssica Lobato de Lima. -- Rio de
Janeiro, 2022.
51 f.

Orientador: Mauro Cirano.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Geociências, Bacharel em Meteorologia, 2022.

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

JÉSSICA LOBATO DE LIMA

**AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA TERRESTRE DO
CMIP5 NA REPRESENTABILIDADE DO SISTEMA DE
CORRENTES DE CONTORNO OESTE E MASSAS DE ÁGUA
ASSOCIADAS AO LONGO DA RADIAL DE XBT DE ALTA
DENSIDADE NOAA-AX97 (MOVAR), ENTRE O RIO DE
JANEIRO E A ILHA DE TRINDADE, BRASIL - PERÍODO
HISTÓRICO E CENÁRIOS FUTUROS**

Trabalho de conclusão de curso
para a obtenção do grau de
Bacharel em Meteorologia pela
Universidade Federal do Rio de
Janeiro

Orientador:

Prof. Dr. Mauro Cirano

Rio de Janeiro

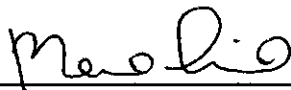
Outubro de 2022

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA TERRESTRE DO CMIP5 NA REPRESENTABILIDADE DO SISTEMA DE CORRENTES DE CONTORNO OESTE E MASSAS DE ÁGUA ASSOCIADAS AO LONGO DA RADIAL DE XBT DE ALTA DENSIDADE NOAA-AX97 (MOVAR), ENTRE O RIO DE JANEIRO E A ILHA DE TRINDADE, BRASIL - PERÍODO HISTÓRICO E CENÁRIOS FUTUROS

Jéssica Lobato de Lima

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:




D. Sc. Mauro Cirano - IGEO/UFRJ

(Orientador)



D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira - IGEO/UFRJ



B. Sc. Ana Maria Bueno Nunes - IGEO/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ

Outubro, 2022

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família, que sempre foi minha base nos momentos difíceis, aos meus amigos que trouxeram um riso aos meus lábios, aos meus primos que me inspiraram com a vontade dos que estão por vir. Mas acima de tudo dedico a minha mãe, que seja pra me impulsionar para cima, me colocar ao seu lado ou me afastar dos perigos, sempre esteve ao meu lado, você é a razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos amigos que fiz durante este caminho, aqueles que me inspiraram, os que me auxiliaram e os que viveram tudo isso ao meu lado. Principalmente a Aline, Andressa e Leonardo, obrigada por tornar a jornada um pouco mais leve, dividir o peso com vocês fez toda a diferença. Às minhas eternas chefes, Silva e Patrícia, que me fizeram amar essa profissão. E ao meu orientador, pela incrível paciência, compreensão e todas as conversas e ensinamentos.

RESUMO

O clima global é guiado tanto por processos atmosféricos quanto por processos oceânicos. Um dos processos oceânicos responsáveis pelo transporte de calor no globo está associado às Correntes de Contorno Oeste (CCO), que são responsáveis pelo transporte de calor da região equatorial para as altas latitudes e gerariam um grande impacto no clima global caso seu regime fosse alterado. O sistema de CCO pode ser dividido em suas componentes superior, intermediária e profunda. Na componente superior, as correntes oceânicas transportam águas quentes das regiões equatoriais para altas latitudes. A corrente que exerce esta função no Atlântico sul é a Corrente do Brasil (CB), que percorre toda a margem continental brasileira. Neste estudo focou-se na CB, na Corrente de Contorno Intermediária (CCI) e na Corrente de Contorno Profunda (CCP) que formam o sistema de CCOs do oceano Atlântico Sul. O *Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5* (CMIP5) é um esforço colaborativo de vários laboratórios no mundo para que se compreenda melhor as mudanças climáticas através de modelagem. Dentro destes modelos têm-se alguns Modelos do Sistema Terrestre (*Earth System Models* – ESM) que são a mais nova geração de modelos climáticos. Neste trabalho foram escolhidos 7 ESM para avaliar o comportamento da CB, CCI e CCP tanto no meio do século (2041-2070) quanto no final do século (2071-2100). Para a validação dos modelos, foram utilizados os dados coletados ao longo da radial de XBT NOAA AX97, além de dados da ECMWF *Ocean Reanalysis System 4* (ORAS4) no período histórico (1976-2005). O sistema de CCOs foi dividido em suas massas d'água e a análise e a validação também foi feita através da literatura disponível para a região. Para as projeções climáticas foram utilizados três *Representative Concentration Pathway* (RCPs) do *IPCC Fifth Assessment Report* (AR5). Esses RCPs têm como base a quantidade de gases do efeito estufa que serão emitidos nos próximos anos até 2100. A análise está sendo feita entre o RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 para que seja possível observar se haverá impacto na CB devido a diferença entre os mesmos, além de observar alguma diferença entre os dois períodos analisados, meio e final do século. Como resultados das análises o que apresentou um melhor desempenho nos resultados analisados foi o GFDL-ESM2G. Além disso, foi observado que não existe uma grande diferença entre os RCPs e nem os períodos de meio e fim do século.

ABSTRACT

The global climate is driven by both atmospheric and oceanic processes. One of the oceanic processes responsible for the transport of heat on the globe is associated with the Western Boundary Currents (WBC), which are responsible for transporting heat from the equatorial region to high latitudes and would have a major impact on the global climate if its regime were altered. The WBC system can be divided into its upper, middle and deep components. In the upper component, ocean currents transport warm waters from the equatorial regions to high latitudes. The current that performs this function in the South Atlantic is the Brazil Current (BC), which runs along the entire Brazilian continental margin. In this study we will focus on the BC, the Intermediate Boundary Current (IBC) and the Deep Boundary Current (DBC) that form the South Atlantic Ocean WBCs system. The Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5 (CMIP5) is a collaborative effort by several laboratories around the world to better understand climate change through modeling. Within these models we have some Earth System Models (ESM) which are the newest generation of climate models. In this work, 7 ESM were chosen to evaluate the behavior of the BC, IBC and DBC both in the middle of the century (2041-2070) and at the end of the century (2071-2100). For the validation of the models, data collected along the radial of XBT NOAA AX97 were used, in addition to data from the ECMWF Ocean Reanalysis System 4 (ORAS4) in the historical period (1976-2005). The WBCs system was divided into its water masses and for analysis and validation was also carried out through the literature available for the region. For climate projections, three Representative Concentration Pathways (RCPs) from the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) were used. These RCPs are based on the amount of greenhouse gases that will be emitted in the coming years until 2100. The analysis is being carried out between RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 so that it is possible to observe if there will be an impact on the BC due to the difference between them, besides trying to observe a difference between the two analyzed periods, middle and end of the century. As a result of the analysis, the one that presented a better performance in the analyzed results was the GFDL-ESM2G. Furthermore, it was observed that there is not a big difference between the RCPs nor the mid- and late-century periods.

LISTA DE SIGLAS

ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AIA	Água Intermediária Antártica
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
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
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
ORAS4	Ocean Reanalysis System 4
RCP	Representative Concentration Pathway

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 METODOLOGIA.....	15
3 RESULTADOS.....	20
3.1 ANÁLISE DO PERÍODO HISTÓRICO.....	20
3.2 ANÁLISE DAS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	28
4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	40
5 REFERÊNCIAS.....	41
ANEXOS.....	47

1 INTRODUÇÃO

O clima global é guiado tanto por processos atmosféricos quanto por processos oceânicos e diversos estudos indicam um aquecimento global devido às atividades antrópicas. Já foram observados impactos desse aquecimento sobre os sistemas, tanto natural quanto humano, onde houve alterações em muitos ecossistemas terrestres e oceânicos e em seus impactos secundários (IPCC, 2018). Os oceanos representam o maior reservatório de calor do sistema climático global, modulando processos atmosféricos de escalas temporais que variam de horas a milhares de anos. A base física de controle climático pelos oceanos reside na absorção de grande parte da energia solar na região equatorial do planeta e sua redistribuição através do sistema de correntes oceânicas de superfície e profundas. Quando refere-se a energia armazenada no sistema climático, o aquecimento dos oceanos é quem prevalece, responsável por mais de 90% da energia acumulada entre 1971 e 2010, sendo a atmosfera responsável apenas por cerca de 1% (IPCC, 2014). No entanto, o próprio sistema de correntes oceânicas é gerado pela interação com a atmosfera, através não somente dos fluxos de calor, mas também de momento e água. Assim, a atmosfera e o oceano formam um sistema complexo acoplado com processos de retroalimentação que contribuem para modular o clima do planeta. Modelos acoplados oceano-atmosfera constituem, desta forma, um conjunto de ferramentas imprescindíveis para o estudo do clima, sua variabilidade e mudança. Através do ciclo hidrológico global, os oceanos, continentes e atmosfera formam um sistema complexo acoplado com inter-relações múltiplas.

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, as Correntes de Contorno Oeste (CCO), que transportam águas quentes das regiões tropicais para as regiões polares, onde o calor é removido (HOGG; JOHNS, 1995). As CCOs têm um papel importante no balanço de calor do planeta, pois como correntes intensas, estreitas e profundas, transportam uma grande quantidade de calor da região equatorial para os trópicos nas camadas superficiais dos oceanos.

A Corrente do Brasil (CB) é a CCO associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul (Figura 1). Origina-se 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; 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). Na comparação da CB com a sua análoga no Hemisfério Norte, a Corrente do Golfo (CG), observa-se que a mesma não possui a mesma magnitude que a anterior. Ainda assim, saber o seu comportamento no futuro é essencial para se ter um maior conhecimento do clima segundo as projeções climáticas.

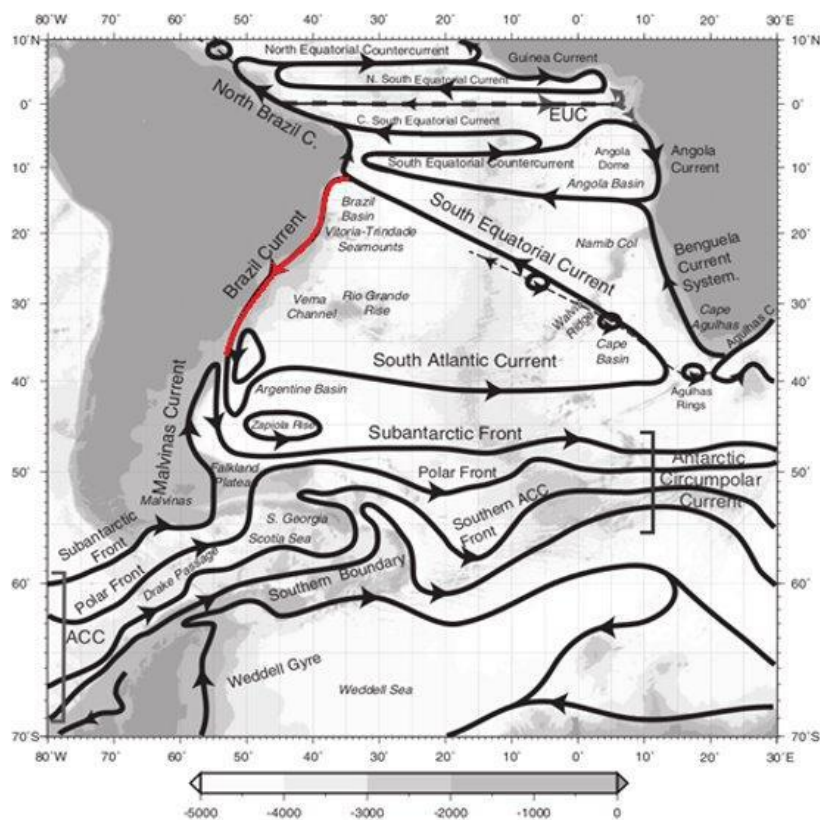


Figura 1: Correntes superficiais do Atlântico Sul, com destaque em vermelho para a CB. Fonte: Talley *et al.* (2011)

A região da CB é formada pelo empilhamento das massas de água características do Atlântico Sul (Figura 2). Nos primeiros três quilômetros de coluna d'água encontram-se a Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA) e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (SILVEIRA *et al.*, 2000).

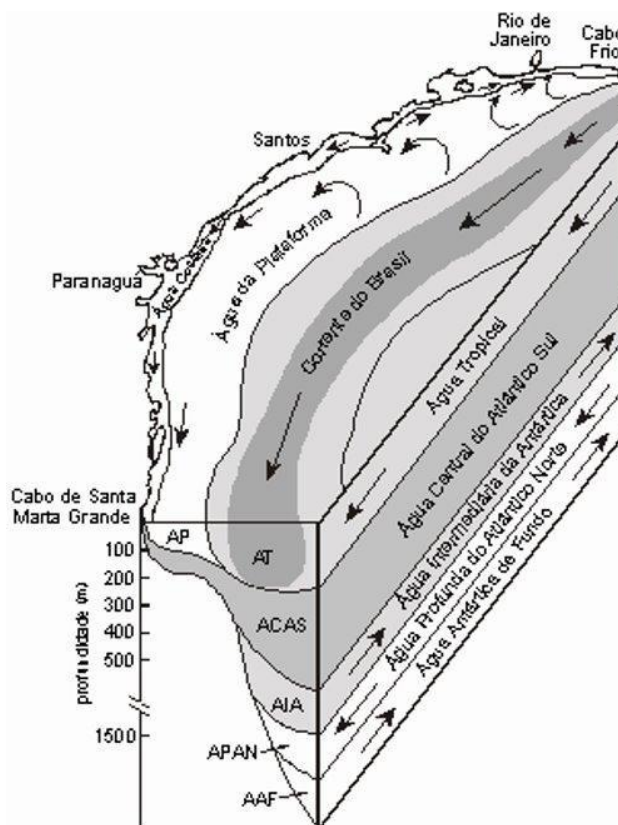


Figura 2: Estrutura oceanográfica na região sudeste-sul brasileira. Fonte: Modificado de Matsuura, 1986.

A AT foi descrita por Emilson (1961) como parte da massa de água quente ($>20^{\circ}\text{C}$) e salina (>36 ups) que ocupa a superfície do Atlântico Sul Tropical, a qual é transportada para o sul pela CB. A 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 ups. Fluindo abaixo da ACAS, tem-se a AIA, que foi definida por Sverdrup (1942), esta flui em direção ao equador ao longo da costa brasileira e possui limites termohalinos entre 3°C e 6°C e 34,2 e 34,6 ups. Abaixo desta, observa-se a APAN, que se desloca em direção ao Pólo Sul, e é caracterizada por valores de temperatura entre 3°C e 4°C e de salinidade entre 34,6 e 35 ups.

O monitoramento mais longo da CB vem sendo realizado pelo projeto 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. As medidas de temperatura são feitas na camada superficial do oceano, com pontos de coleta de dados com dois espaçamentos diferentes: 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; a partir da isóbata de 2000 m, a coleta passa a ser realizada a cada 15 mn ($\sim 27,8$ km).

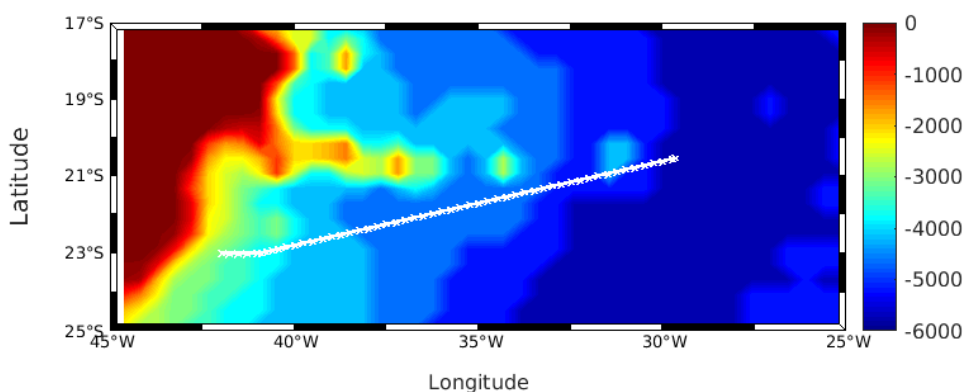


Figura 3: Região da área de estudo sobreposta com a batimetria local em metros fornecida pelo modelo MPI-ESM-MR, onde a linha pontilhada indica a radial de referência AX97 e a radial costeira considerada. Fonte: Autor.

Os modelos do sistema terrestre (*Earth System Models – 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. Em 2014 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) propôs quatro *Representative Concentration Pathway (RCP)* no *IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*, esses RCPs tem como base a quantidade de gases do efeito estufa que serão emitidos nos próximos anos até 2100. É possível obter as saídas dos ESMs em cada um dos RCPs através do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)*, este é um esforço colaborativo com o objetivo de melhorar o conhecimento sobre mudanças climáticas. O CMIP5 envolve 20 grupos de pesquisa de modelagem climática em todo o mundo com 40 *Global Climate Models (GCM)*. Os resultados do CMIP5 incluem simulações climáticas históricas para os anos 1850–2005 e projeções climáticas de curto prazo (até cerca de 2035) e longo prazo (até

2100 e além) considerando 4 RCPs (KAMWORAPAN; SURUSSAVADEE, 2019). A maioria das simulações CMIP5 com ESM foram realizadas com concentrações de CO₂ atingindo 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) e 936 ppm (RCP8.5) até o ano 2100 (IPCC, 2013) (Figura 4).

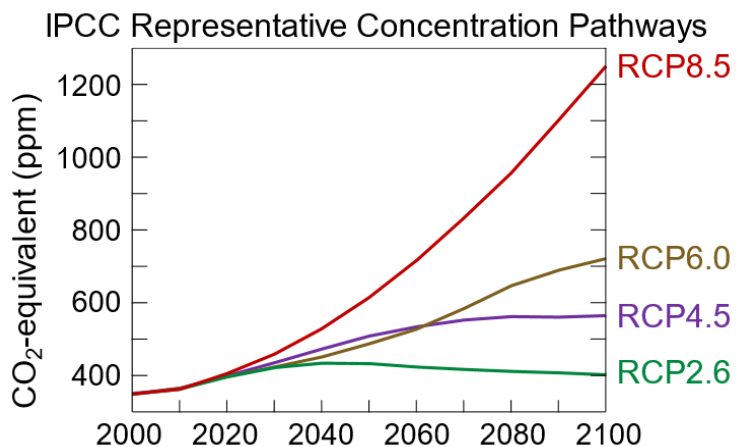


Figura 4: Concentração de Dióxido de Carbono de cada RCP até o fim do Século. Fonte: IPCC (2014).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar e avaliar a capacidade dos ESM do CMIP5 de representar o Sistema de CCO e massas de água associados, durante o período histórico. Além disso, serão avaliadas três projeções para os cenários futuros entre o meio e o fim do século com base em 3 diferentes RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) a fim de observar se haverá mudança no sistema de correntes na região estudada.

2 METODOLOGIA

Para as análises do período histórico e dos cenários futuros, foram escolhidos sete ESMs dos principais centros de pesquisa mundiais. Os mesmos foram definidos com base na representatividade e relevância e também de acordo com as referências bibliográficas e disponibilidade de dados. Os ESMs selecionados, assim como as suas resoluções, modelos atmosféricos, esquemas de superfície e seus modelos oceânicos encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações dos Modelos do Sistema Terrestre e Reanálise utilizados.

Modelos do Sistema Terrestre								Reanálise
	BESM	CanESM2	GFDL-ESM2G	GFDL-ESM2M	HadGEM2-ES	MIROC-ESM	MPI-ESM-MR	ORAS4
Modelo Atmosférico	MCGA	CanAM4	Atmospheric Model 2.0	Atmospheric Model 2.0	HadGEM2	MIROC-AGCM	ECHAM 6	-
Esquema de Superfície	INLAND	CLASS 2.7	Land Model 3.0	Land Model 3.0	MOSES II	MATSIRO	JSBACH	-
Modelo Oceânico	MOM4p1	CanOM4	GOLD	MOM4p1	HadGEM2 Ocean Component	COCO 3.4	MPIOM	NEMOv3.0
Resolução Horizontal (Oceano)	Latitude 1° a 0.3° (pólo-equador)	0.9° a 1.1° (pólo-equador)	0.5° a 0.3° (pólo-equador)	1° a 0.3° (pólo-equador)	1° a 0.3° (pólo-equador)	1.7° a 0.5° (pólo-equador)	Resolução Máxima 0.4°	1° a 0.3° (pólo-equador)
	Longitude 1°	1.4°	1°	1°	1°	1.4°	Resolução Máxima 0.4°	1°
Coordenada Vertical	40 níveis (z)	40 níveis	50 níveis (isopícnais)	50 níveis (z)	40 níveis (z)	50 níveis (Sigma-z)	40 níveis (z)	42 níveis
Referências	Nobre <i>et al.</i> , 2013	Arora <i>et al.</i> , 2011	Dunne <i>et al.</i> , 2012	Dunne <i>et al.</i> , 2012	Jones <i>et al.</i> , 2011	Watanabe <i>et al.</i> , 2011	Giorgetta <i>et al.</i> , 2013	Balmaseda <i>et al.</i> , 2013

Os dados do Projeto MOVAR foram utilizados para validação dos ESMs, tal projeto tem sua base no Laboratório de Oceanografia Física - LOF/IGEO/UFRJ, em parceria com a Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e conta com o apoio logístico da Marinha do Brasil e da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Este projeto coleta dados de XBT 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 (Figura 3). A coleta de dados teve início em agosto de 2004 e, em média, é realizada

bimestralmente. É importante ressaltar que essa linha de monitoramento faz parte de um conjunto global de linhas de monitoramento de XBT, cuja definição mais recente é apresentada por Goni *et al.* (2019). O projeto contribui para o aumento do número de dados oceanográficos observacionais do oceano Atlântico Sul, que representa a contribuição brasileira para esse programa global.

A amostragem XBT é realizada com um espaçamento horizontal típico de 27 km ao longo do transecto, com a resolução aumentando para 18 km próximo à borda continental. A grande maioria das amostras utilizou sondas Sippican Deep Blue, que medem perfis de temperatura até aproximadamente 800 m de profundidade, com amostragem adicional realizada com sondas Sippican T-5, que medem a temperatura até 1830 m de profundidade. As medições XBT são realizadas pela temperatura de amostragem e o tempo decorrido de descida das sondas XBT. 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.*, 2018). 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 foram 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).

O período histórico dos ESMs foi considerado de janeiro de 1976 até dezembro de 2005, como descrito na Tabela 2, já o do projeto MOVAR começou no ano de 2004 e foram utilizados dados até dezembro de 2019. Apesar da diferença entre os dois períodos, 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 ESMs. Devido a discrepância de datas, foi inserida também uma comparação com os dados da *Ocean Reanalysis System 4* (ORAS4) que é um produto global de reanálise oceânica feita pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com o intuito de apresentar mais uma forma de validação dos ESMs, o mesmo também é descrito pela Tabela 1.

Tabela 2: Datas selecionadas para os períodos históricos, meio do século e final do século presentes nesse estudo (onde N/A significa *não se aplica*).

	Período Histórico		Projeção para o Meio do Século		Projeção para o Fim do Século	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
Modelos do Sistema Terrestre	1 de janeiro de 1976	31 de dezembro de 2005	1 de janeiro de 2041	31 de dezembro de 2070	1 de janeiro de 2071	31 de dezembro de 2100
ORAS4	1 de janeiro de 1976	31 de dezembro de 2005	N/A	N/A	N/A	N/A
MOVAR	30 de agosto de 2004	8 de dezembro de 2019	N/A	N/A	N/A	N/A

Foram utilizados os dados de velocidade zonal e meridional dos ESMs e da reanálise ORAS4, todos os dados foram rotacionados para serem analisados juntamente com os dados do MOVAR em sua radial NOAA-AX97, sendo também adicionada uma radial costeira. Além dessas comparações, foram feitas comparações com a literatura, onde se utilizou o artigo de Pereira *et al.* (2014), para isso foi aplicada a mesma metodologia que é apresentada no artigo, onde a mesma considera o final da CB na longitude de 039.3°W. Para tornar possível a comparação e observar se os resultados dos ESMs estavam conseguindo representar o sistema de massas d'água que percorrem a costa leste do Brasil.

As massas de água foram divididas com base em níveis pré-definidos de profundidade como mostrado na Figura 5, sendo que a AT e a ACAS foram consideradas juntas, como uma camada, já que ambas formam a CB. A profundidade da CB foi considerada até 500 m, a AIA foi considerada estando presente entre as profundidades de 500 a 1200 m de profundidade, já a APAN foi delimitada entre 1200 a 3000 m de profundidade, por fim, a Água Antártica de Fundo (AAF) entre 3000 m até o fundo oceânico de cada modelo.

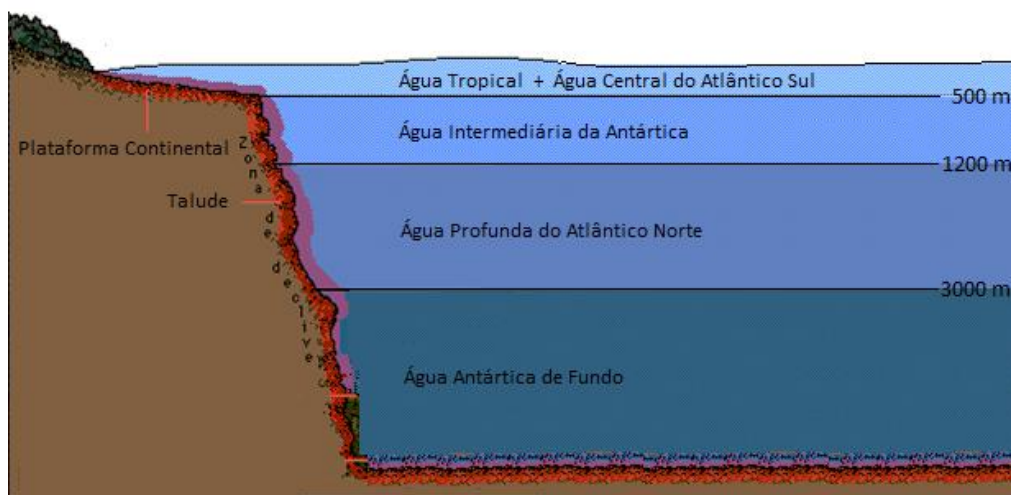


Figura 5: Divisão de massas d'água utilizada, de acordo com a profundidade. Fonte: Autor.

A primeira análise realizada foi observar se os dados apresentavam uma sazonalidade que precisaria ser levada em consideração. Se a corrente apresentasse um comportamento discrepante entre as estações do ano, isso seria considerado para as análises realizadas. Assim, foram gerados os campos de velocidade dos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF), meses referentes ao verão austral; juntamente com o campo da corrente para os meses de Julho, Junho e Agosto (JJA), meses representativos do inverno austral. Como não houve uma diferença significativa sazonal para que as estações fossem analisadas de forma separada, concluiu-se então que as médias anuais seriam a melhor maneira de analisar os dados.

É importante ressaltar que o projeto MOVAR coleta dados *in situ* de temperatura da água do mar, mas 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 400 m (MATA *et al.*, 2012), o nível de não-movimento sendo considerado na isopicnal 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.* em 2019, de modo a simplificar a análise.

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. Todos os modelos sofreram uma interpolação simples para uma grade menor, para que assim pudessem ser comparados. Para uma comparação mais simplificada para toda a radial, o transporte foi acumulado na longitude, para que ao final da radial NOAA-AX97 fosse considerado o transporte de todo o transecto.

Após a análise do período histórico foram utilizadas três saídas dos RCPs do AR5, o RCP2.6, o RCP4.5 e o RCP8.5, onde as comparações que foram utilizadas para validação do período histórico, foram aplicadas para que se pudesse avaliar as alterações de cada um dos modelos entre seu período histórico e as projeções climáticas, mas também analisar quais as mudanças os mesmos projetam para o meio do século (janeiro de 1941 até dezembro de 1970) e final do século (janeiro de 1971 até dezembro de 2100) entre si, além de observar as diferenças entre os modelos que representaram melhor os aspectos da corrente no período histórico.

3 RESULTADOS

3.1 Análise do Período Histórico

Ao serem gerados os campos de velocidade média da corrente (Figura 6 e Figura 7), foi possível identificar a diferença de resolução apresentada nos modelos. Como mostrado na Tabela 1, os resultados do modelo MPI-ESM-MR são os que apresentam resolução horizontal mais grosseira, o que fica claro ao analisar estes campos, onde a CB fica restrita apenas à radial costeira, não sendo possível observá-la na radial NOAA-AX97. Contrário a este modelo, existe o MIROC-ESM, que neste trabalho é o modelo com a maior resolução horizontal e o mesmo apresenta apenas os sistemas de massas d'água que se deslocam para o sul e uma CB mais fraca e mais afastada da costa.

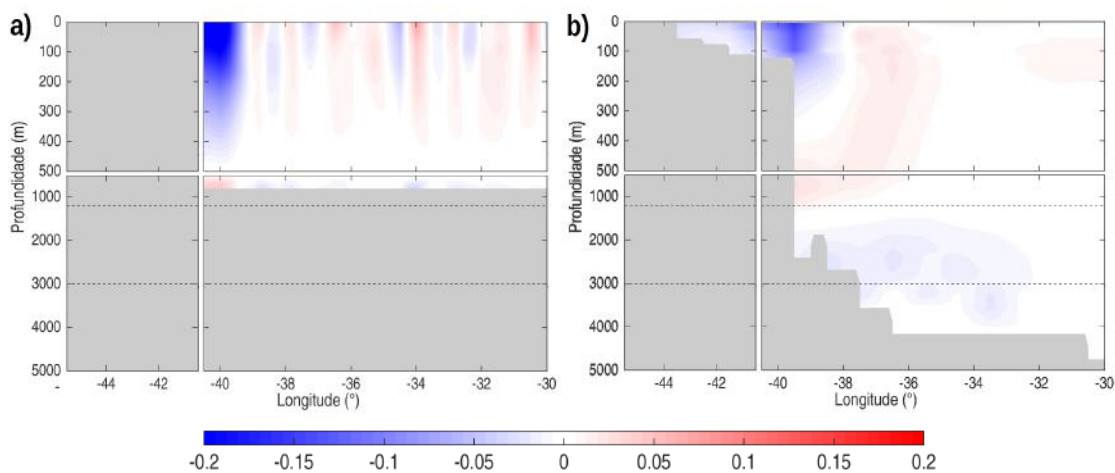


Figura 6: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico definido na Tabela 2 para (a) dados in situ do MOVAR (b) Reanálise ORAS4. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

Dentre os modelos analisados, os únicos que apresentaram a estrutura completa de massas d'água que formam o Sistema de CCO foram o CanESM2, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES e o MPI-ESM-MR. No entanto, é importante ressaltar que o modelo CanESM2, apesar de ter a AIA representada, a mesma se encontra longe da região do talude, o que não é o esperado. Os modelos BESM, GFDL-ESM2G não conseguem representar a AAF, mas conseguem modelar bem a presença das outras massas d'água. Ao analisar os dados da CB nas

correções feitas nos dados do MOVAR, foi observado que a mesma se encontra bem próxima a costa do Brasil e mais intensa e profunda do que nos ESMs, o mesmo não pode ser observado na reanálise ORAS4, que possui uma CB mais rasa e espalhada.

Por fim, observa-se que os padrões da CB que estão mais próximos aos dados *in situ* são os do GFDL-ESM2G, sendo que este apresenta o núcleo da corrente intenso e próximo a longitude de 40° e uma profundidade chegando a quase 400 m.

Nas figuras 8 e 9, observar-se os campos de variabilidade dos dados (desvio padrão) e constatar a grande diferença entre os dados *in situ* e os dados dos modelos e reanálise. Esse resultado era esperado devido a melhor resolução espacial presente nos dados *in situ* (~25 km) e sua pobre resolução temporal. Dentre os modelos vemos que o HadGEM2-ES apresenta a maior variabilidade, principalmente na área onde o mesmo modela a CB. O modelo MPI-ESM-MR também apresenta uma variabilidade um pouco maior na área da corrente, mas deve-se lembrar novamente que este é o modelo com a melhor resolução espacial dentre os que foram apresentados neste trabalho. Todos os outros modelos apresentam pouca variabilidade, mesmo na área onde se encontra a CB e fora dela, a variabilidade é próxima de zero.

Na Figura 10 foram comparados os resultados obtidos nas rodadas históricas dos modelos e os dados *in situ* com Pereira *et al.* (2014). Essa comparação foi obtida utilizando a mesma metodologia do artigo, dividindo as massas d'água em profundidades pré-definidas, calculando o transporte líquido das mesmas (transporte para sul menos o transporte para o norte) e o limite leste para a ocorrência da CB definido para 039,3° W. Pereira *et al.* (2014) realizou os estudos em quatro radiais zonais, sendo uma delas em 22°S que foi a utilizada para comparação, por se encontrar próxima da área da radial NOAA-AX97 como pode ser observado na Figura 11. Era esperado que os resultados obtidos nessa comparação fossem mais próximos, no entanto, a Figura 10 demonstra que não. Duas hipóteses foram levantadas para essa diferença nos resultados de Pereira *et al.* (2014) e os obtidos com os modelos ESMs do CMIP5. A primeira delas seria devido a ligeira inclinação da radial NOAA-AX97 em comparação com os dados de uma radial totalmente zonal como as do artigo, sendo que isso poderia acarretar numa diminuição do fluxo norte-sul devido a componente u que precisa ser levada em consideração na

rotação da radial. A segunda hipótese levantada, seria devido a resolução temporal e espacial dos modelos utilizados por Pereira *et al.* (2014) ser maior que as dos modelos e dos dados *in situ* analisados neste trabalho.

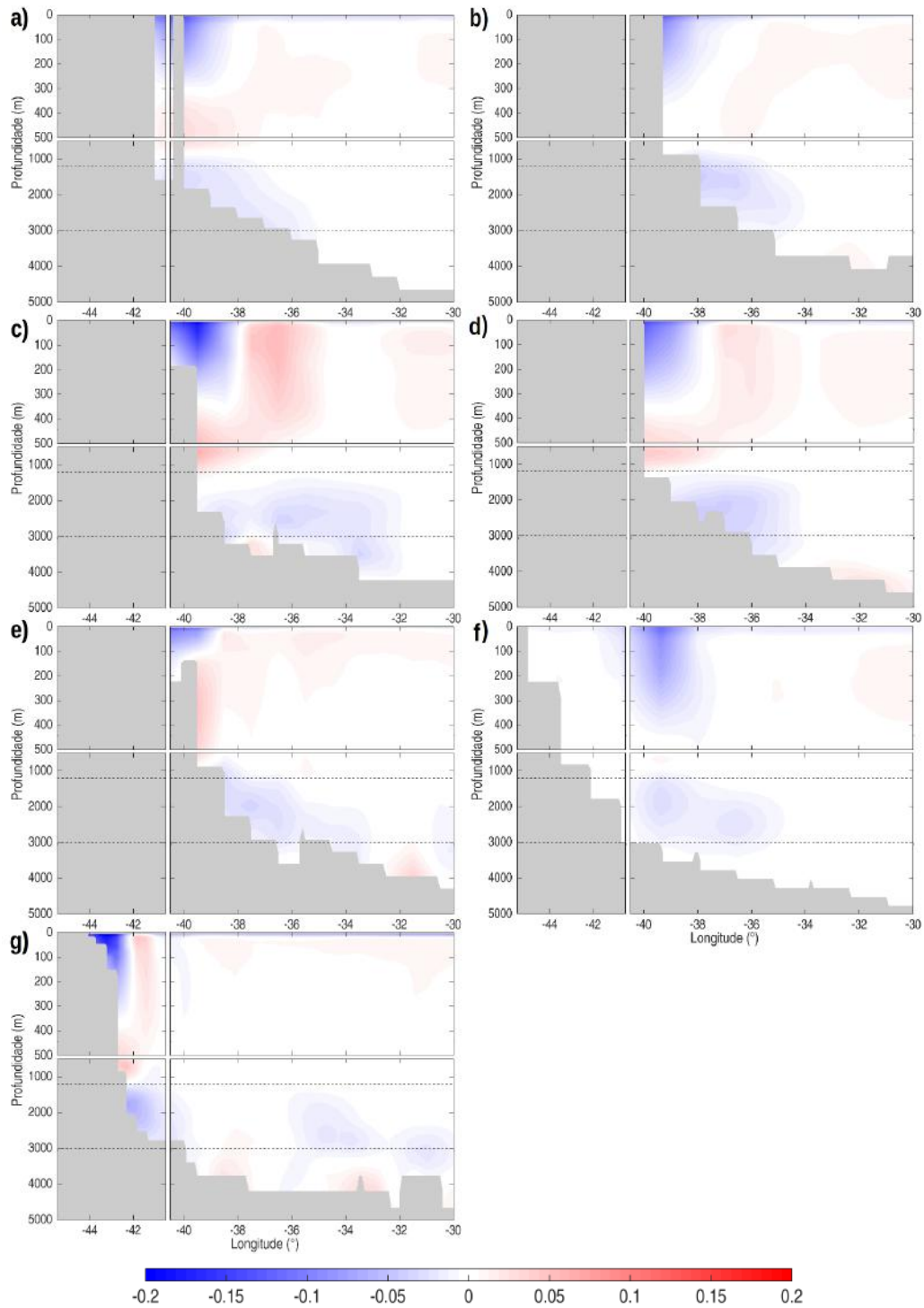


Figura 7: Campos de velocidade média da corrente (m/s) durante o período histórico definido na Tabela 2 para (a) BESM (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

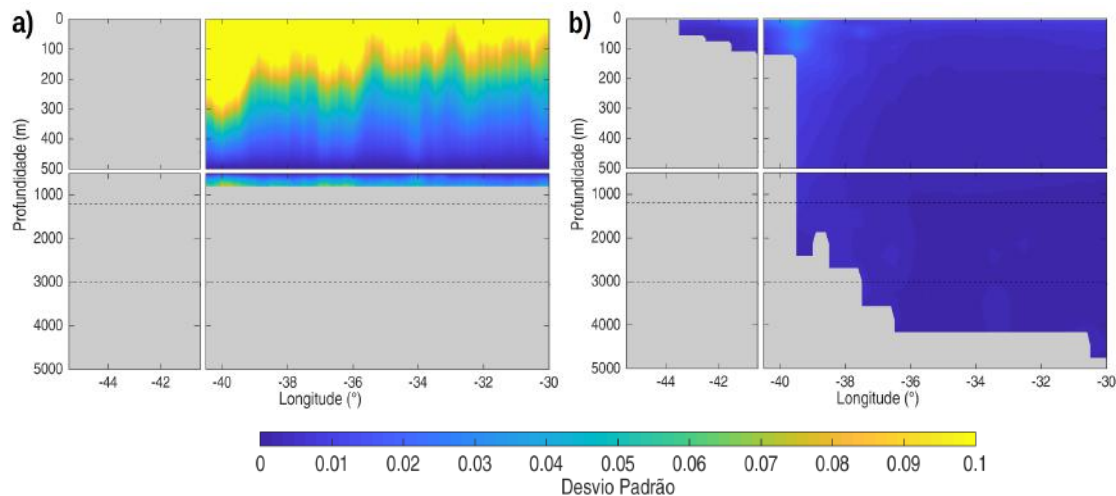


Figura 8: Campos de variabilidade da corrente durante o período histórico definido na Tabela 2 para (a) dados *in situ* do MOVAR (b) Reanálise ORAS4. Fonte: Autor.

Por fim, foram analisados os transportes líquidos e acumulados na radial de cada uma das massas d'água. Na Figura 12a é possível perceber como o modelo MPI-ESM-MR difere dos demais resultados em relação ao posicionamento da CB que se encontra na radial costeira, já todos os demais colocam o seu posicionamento na radial NOAA-AX97. Todas as correções dos dados *in situ* marcam o posicionamento da CB no mesmo local, diferindo apenas na quantidade de volume transportada pela mesma. Dos ESM observar-se que o HadGEM2-ES marca o posicionamento da CB no mesmo local dos dados *in situ*, mas a sua intensidade é muito inferior às dos demais modelos e seu transporte líquido final é o que se encontra mais positivo. Os modelos BESM, GFDL-ESM2G e GFDL-ESM2M apresentam uma CB deslocada para oeste em comparação com os dados *in situ*, mas está de acordo com o observado na reanálise ORAS4. Os dois últimos modelos apresentados nesta figura, MIROC-ESM e CanESM2 são os que colocam a CB mais para oeste que os demais, sendo o MIROC-ESM o modelo que apresenta o transporte líquido mais negativo ao final da radial.

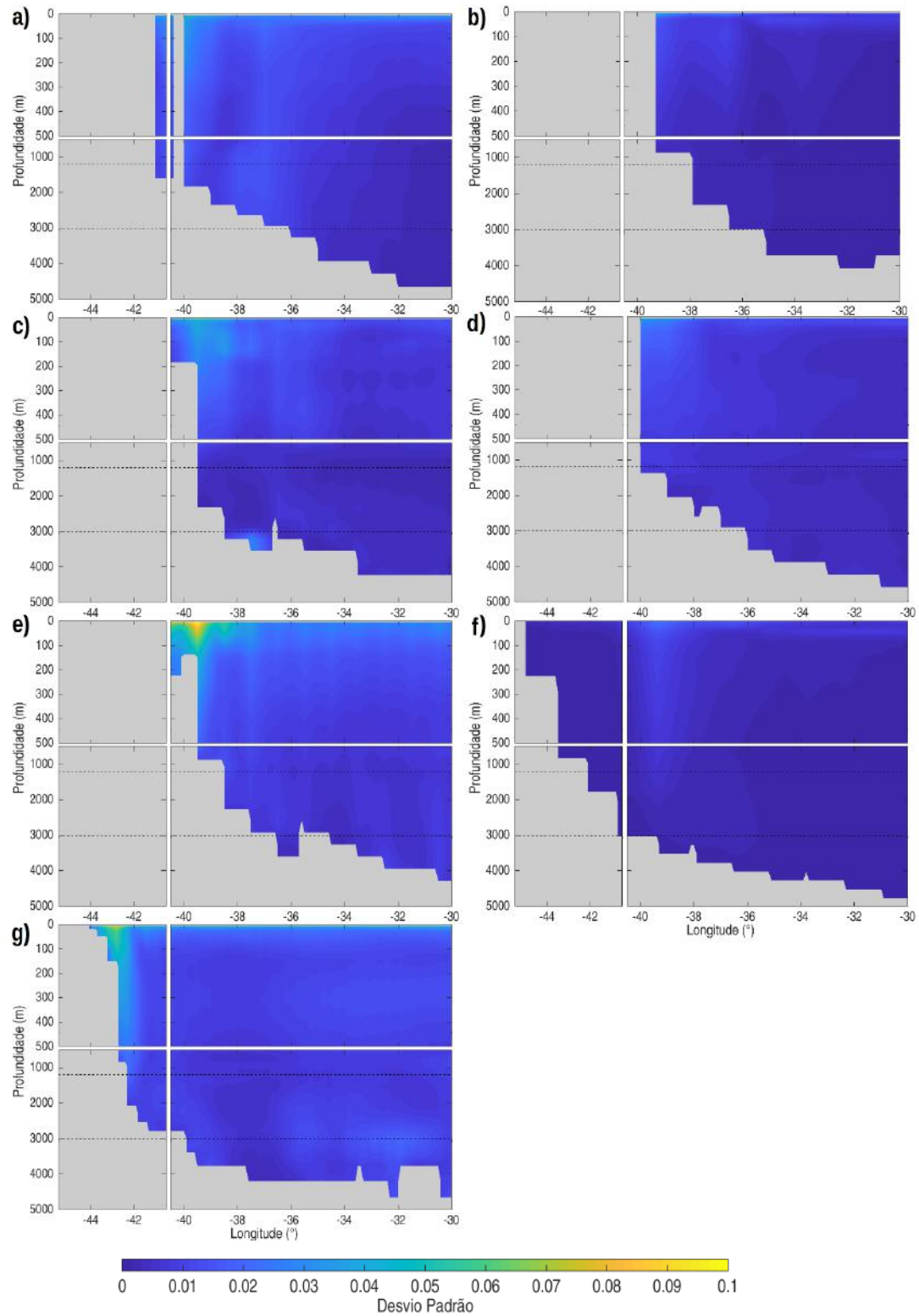


Figura 9: Campos de variabilidade da corrente durante o período histórico definido na Tabela 2 para (a) BESM (b) CanESM2 (c) GFDL-ESM2G (d) GFDL-ESM2M (e) HadGEM2-ES (f) MIROC-ESM (g) MPI-ESM-MR. As cores em azul (vermelho) representam deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

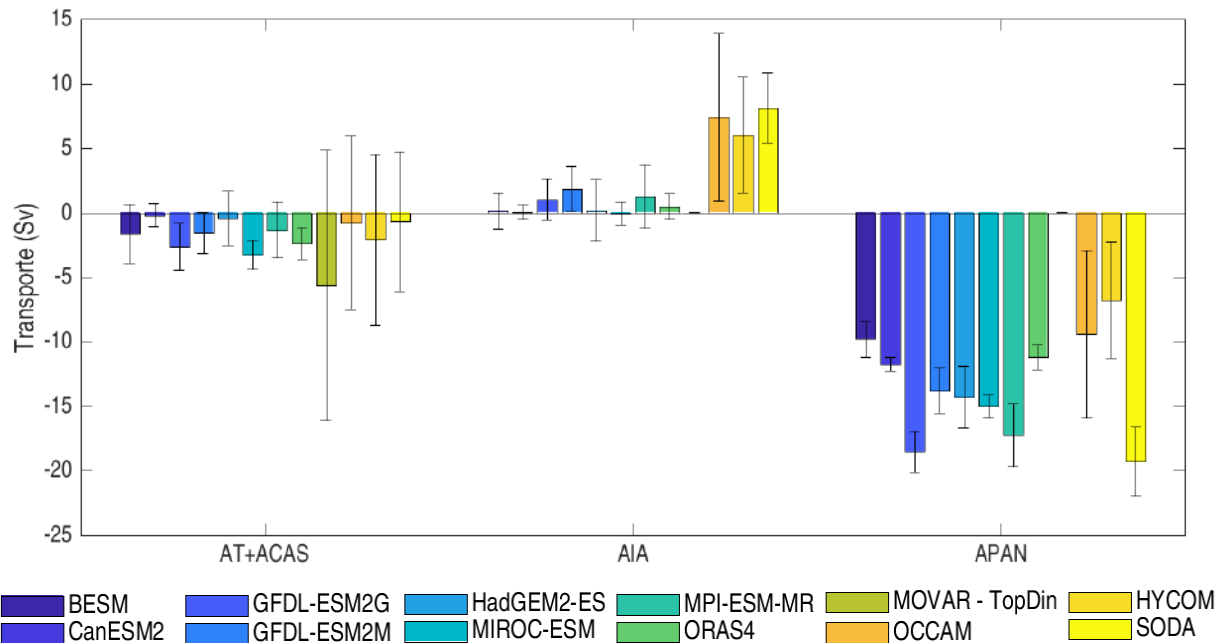


Figura 10: Comparação do transporte líquido (componente norte e sul somadas) para as massas de água definidas na Figura 5 até o nível da APAN, tendo como base os resultados dos ESMs, ORAS4, dados *in situ* e os resultados dos OCCAM, HYCOM e SODA presentes em Pereira *et al.* (2014) e para a região definida na Figura 10. Fonte: Autor.

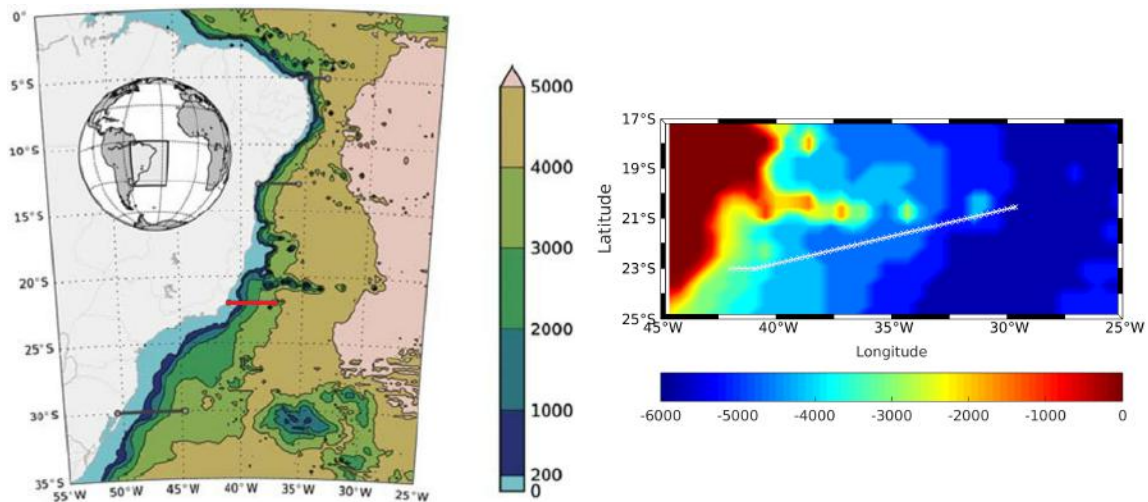


Figura 11: Comparação da área de estudo de (a) Pereira *et al.* (2014), com a radial utilizada neste trabalho destacada com (b) os dados da radial NOAA-AX97 e radial costeira analisadas neste trabalho. Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2014) (a) e Autor (b).

Na Figura 12b seria esperado que todos os modelos e a reanálise apresentassem resultados com o transporte positivo, o que indicaria um deslocamento para o norte, que seria esperado ao analisar-se a AIA. Contudo, a Figura 12b mostra que apenas os modelos

MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2G e GFDL-ESM2M e a reanálise ORAS4 tem esse resultado, os demais modelos apresentam um transporte próximo de zero ou negativo (deslocamento para sul). Para comparação com os modelos nesta camada, não há dados *in situ*, apenas a reanálise e os únicos modelos que demonstram um comportamento similar a mesma são o GFDL-ESM2G e GFDL-ESM2M, já que o MPI-ESM-MR apesar de apresentar um transporte coerente com os estudos anteriores sobre esta massa d'água, está em discordância do local onde esse transporte ocorre. Isso não significa que o mesmo esteja incorreto, apenas que não é possível definir, já que todos os outros modelos e a reanálise utilizada estão em uma grade mais espaçada que o mesmo.

Na Figura 12c é possível observar a mesma dificuldade com o modelo MPI-ESM-MR apresentado nas duas anteriores. Para além disso, nota-se que o comportamento dos demais modelos é o esperado para a APAN e apesar dos modelos apresentarem discordância sobre o núcleo dessa massa d'água e o total do seu transporte, não é possível concluir que nenhum dos modelos apresente uma disparidade com o esperado nessa profundidade do oceano.

Por último, a Figura 12d que traz o transporte líquido da AAF e, assim como observou-se na AIA, nem todos os modelos e inclusive a reanálise, está apresentando um comportamento que seria o esperado para essa massa d'água. Nessa profundidade da coluna d'água, a literatura nos diz que o transporte líquido é para norte, o que é mostrado apenas pelo MPI-ESM-MR e um com menor intensidade pelo CanESM2. Os demais modelos apresentam transporte para sul. Isso era esperado já que nos campos de velocidade foi possível ver que a maioria dos modelos não conseguia modelar essa massa d'água e mesmo os que o fizeram, podem ter sido em diferentes profundidades das determinadas neste trabalho para os cortes das massas d'água.

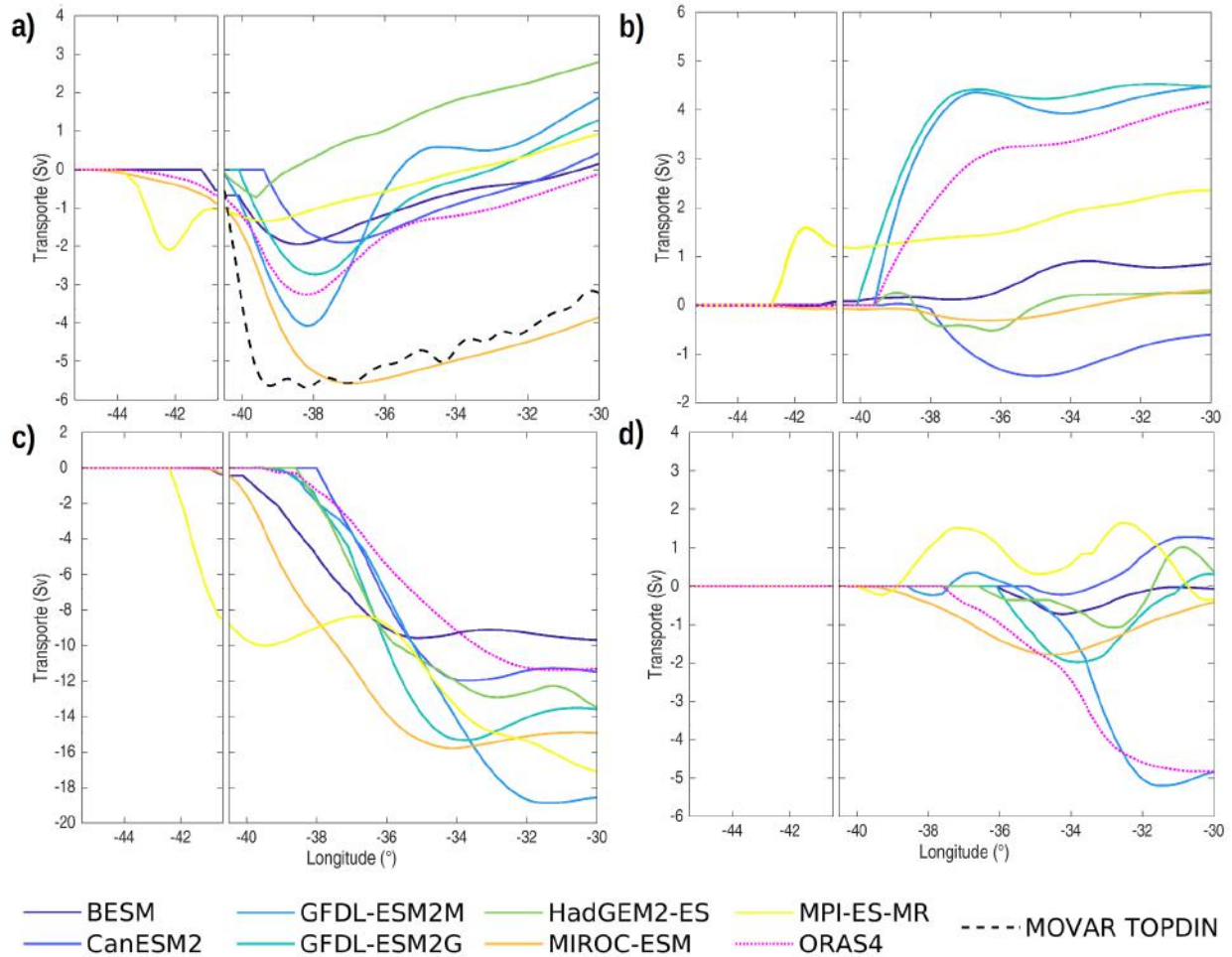


Figura 12: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude para cada uma das massas d'água (a) AT+ACAS, (b) AIA, (c) APAN e (d) AAF. Fonte: Autor.

3.2 Análise das Projeções Climáticas

Após a análise do desempenho dos modelos no período histórico, agora irá se observar como os ESMs esboçam a mudança para o meio e final do século XXI. Da Figura 13 até a Figura 19 observa-se os ESMs para cada um dos RCPs nas projeções para o meio do século, assim como seu respectivo período histórico para comparação.

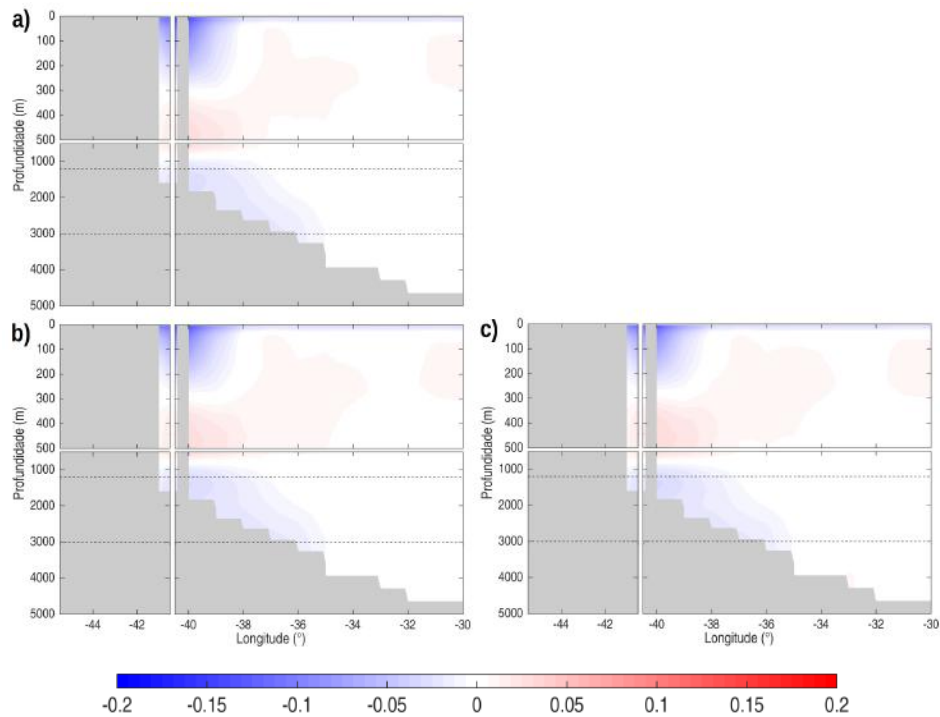


Figura 13: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do BESM e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP4.5 e (c) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

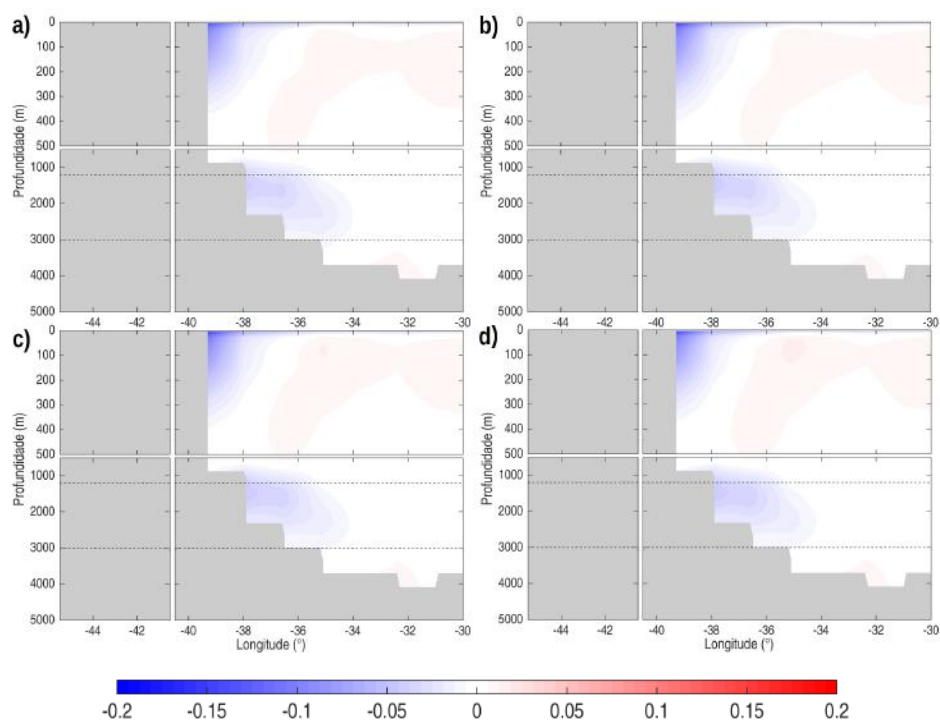


Figura 14: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do CanESM2 e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

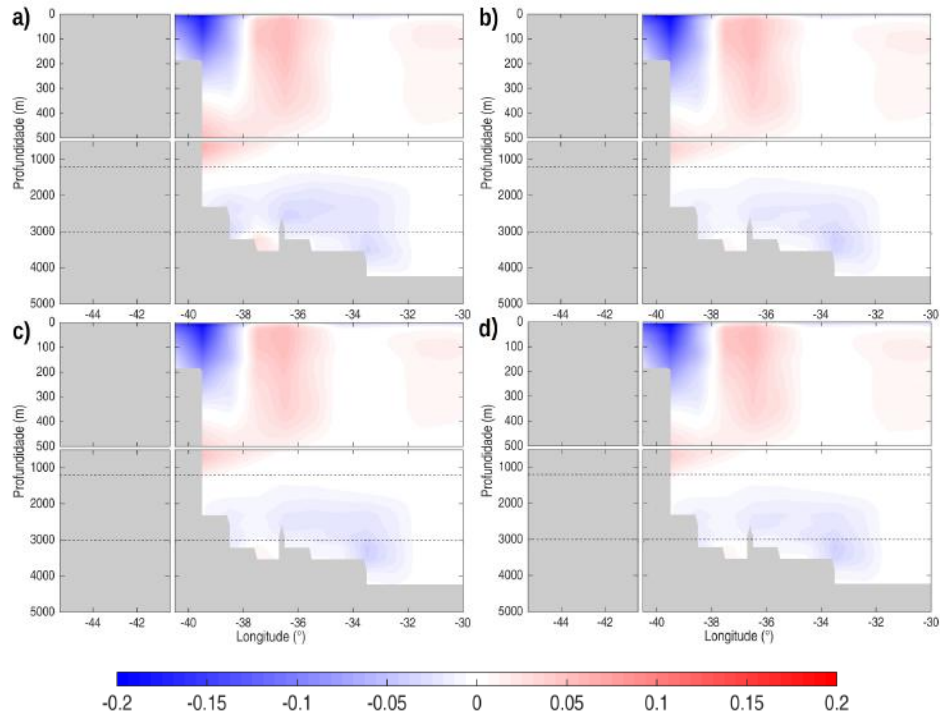


Figura 15: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do GFDL-ESM2G e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

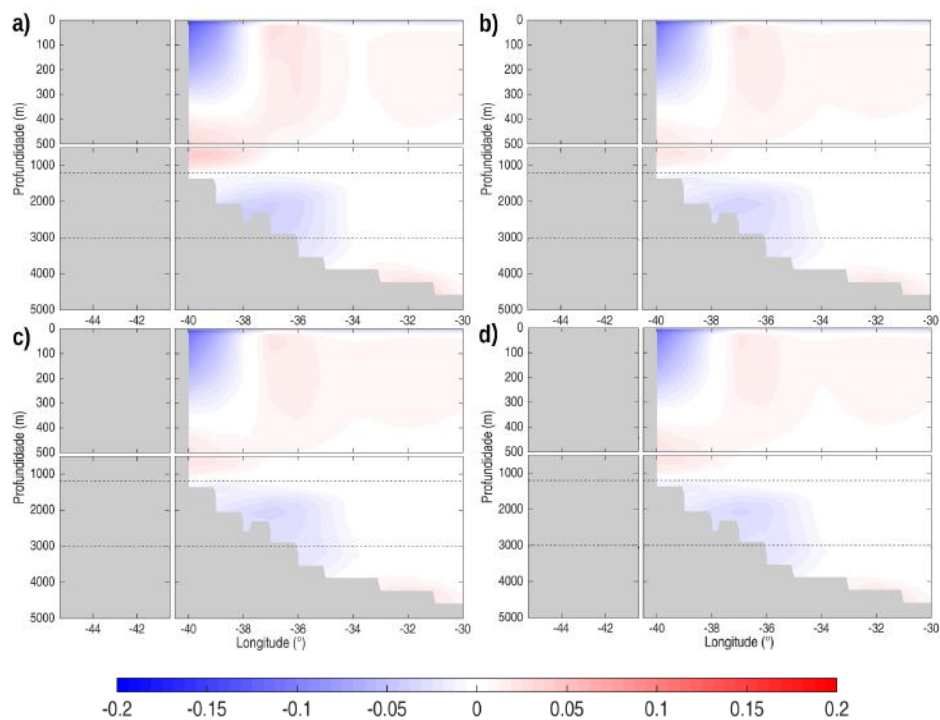


Figura 16: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do GFDL-ESM2M e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

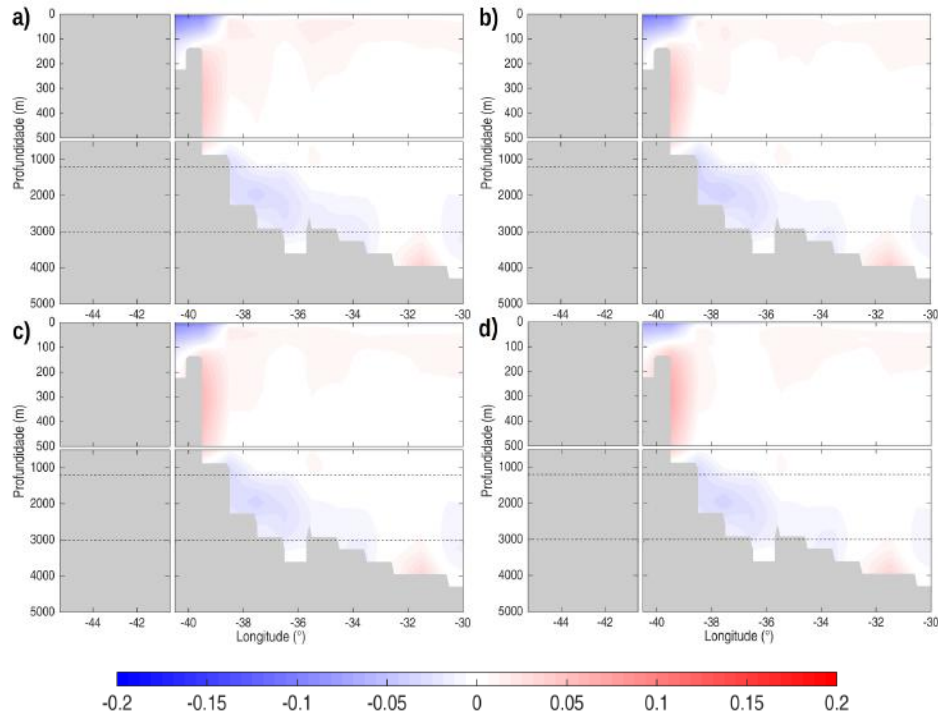


Figura 17: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do HadGEM2ES e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

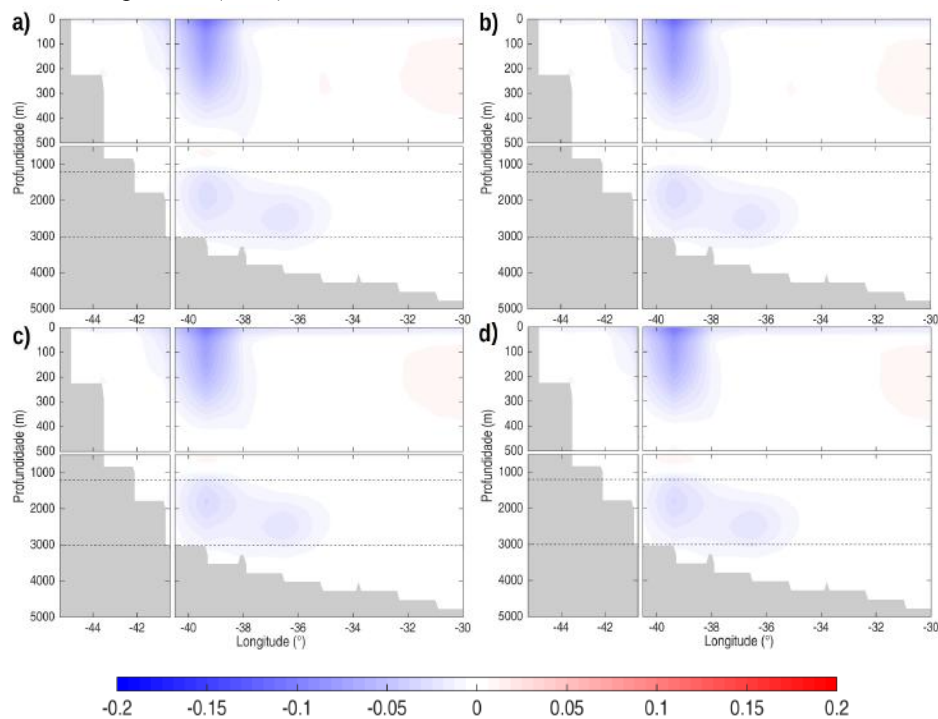


Figura 18: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do MIROC-ESM e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

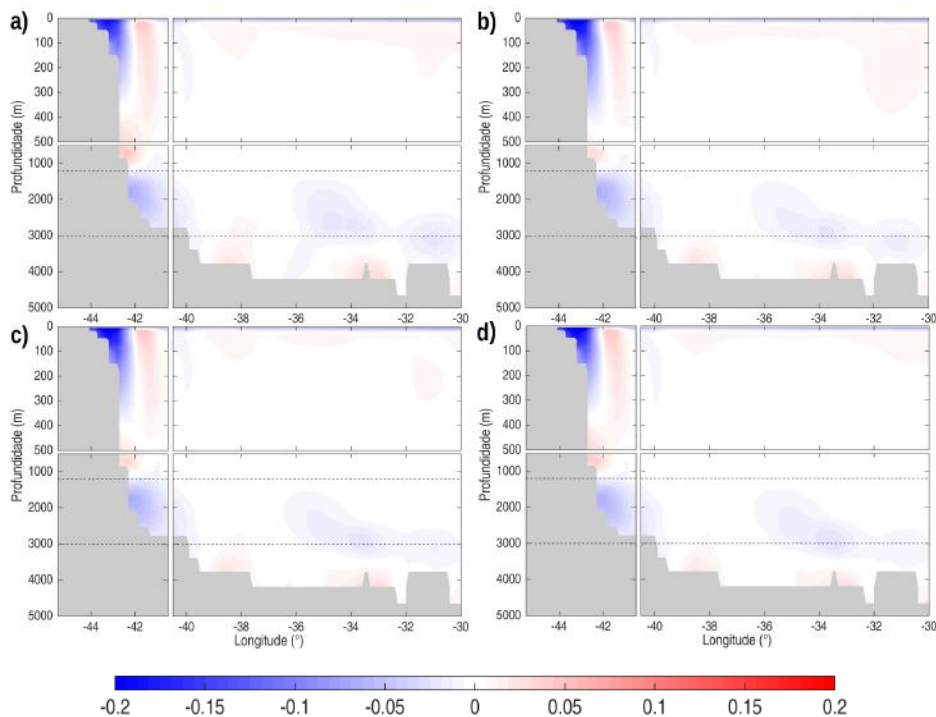


Figura 19: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do MPI-ESM-MR e projeções para o meio do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

Todos os modelos apresentaram mudanças que não são possíveis de detectar na comparação das imagens de velocidade da corrente, entre o seus períodos históricos e suas projeções para o meio (figuras 13 a 19) e final do século (figuras 20 a 26). Isso traz a possibilidade de que haverá pouca mudança na velocidade da CB, o que pode ser observado mais detalhadamente nas Figuras 1 a 6-A, tanto para o meio do século quanto para o final do século no Anexo, onde as anomalias trazem mudanças na ordem máxima de $\pm 0,02$ m/s de variação.

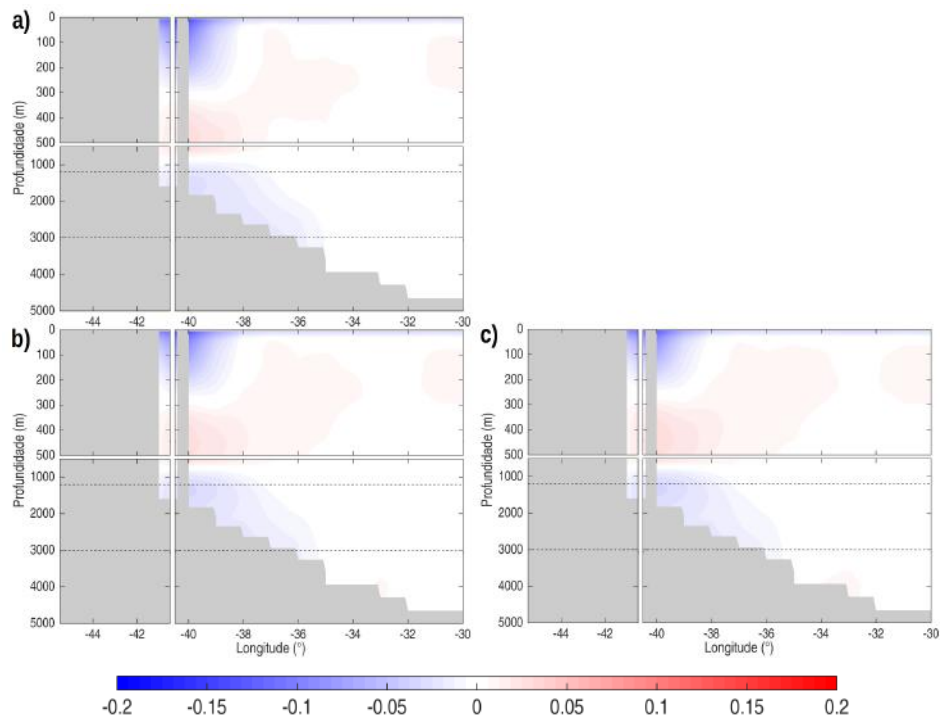


Figura 20: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do BESM e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

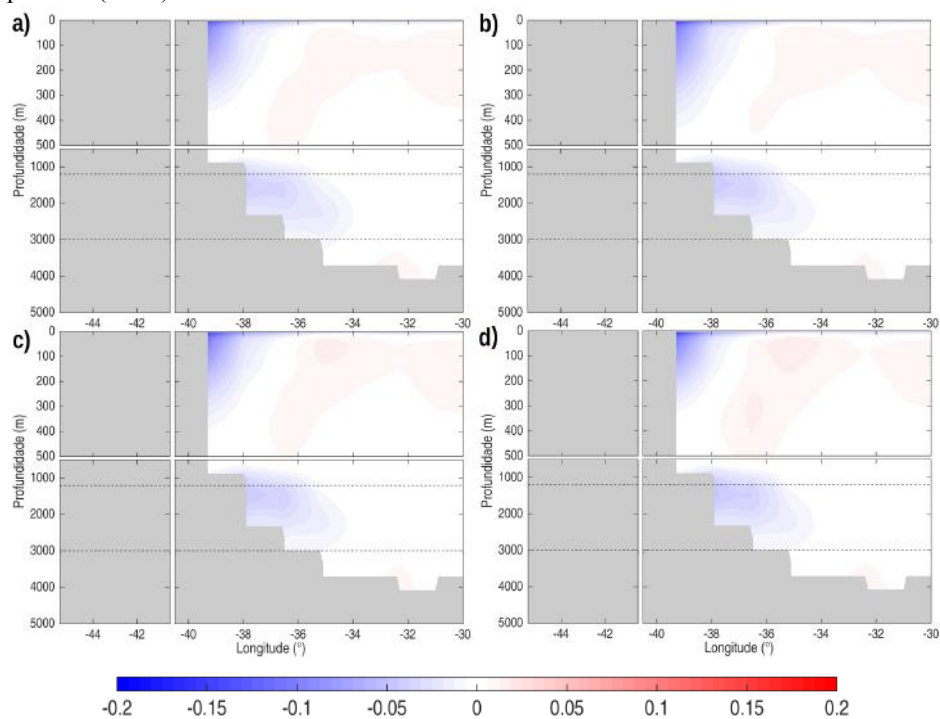


Figura 21: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do CanESM2 e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

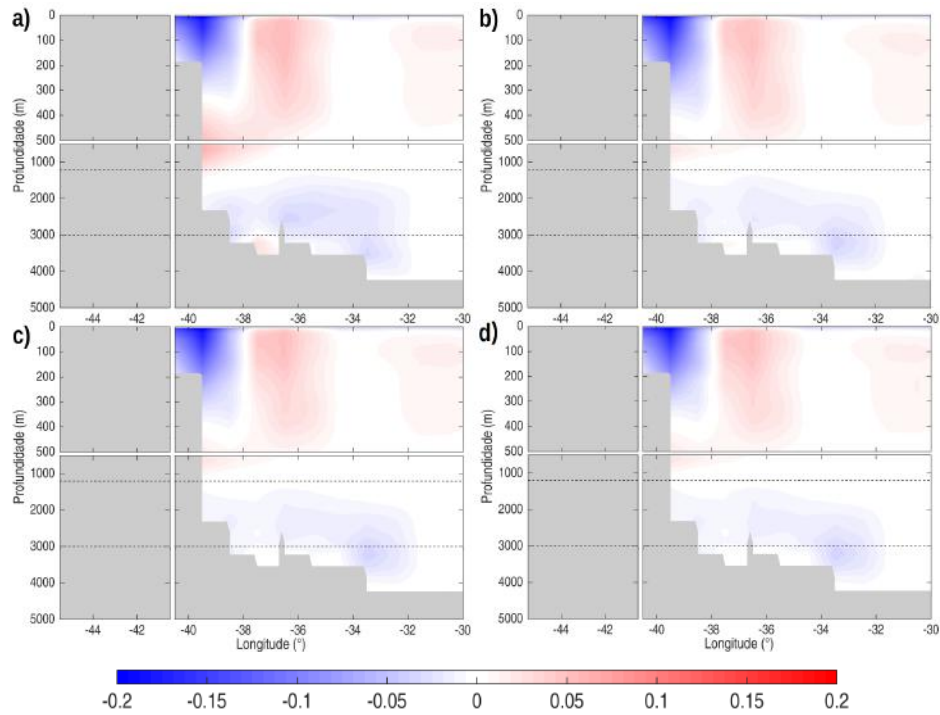


Figura 22: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do GFDL-ESM2G e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente para os cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

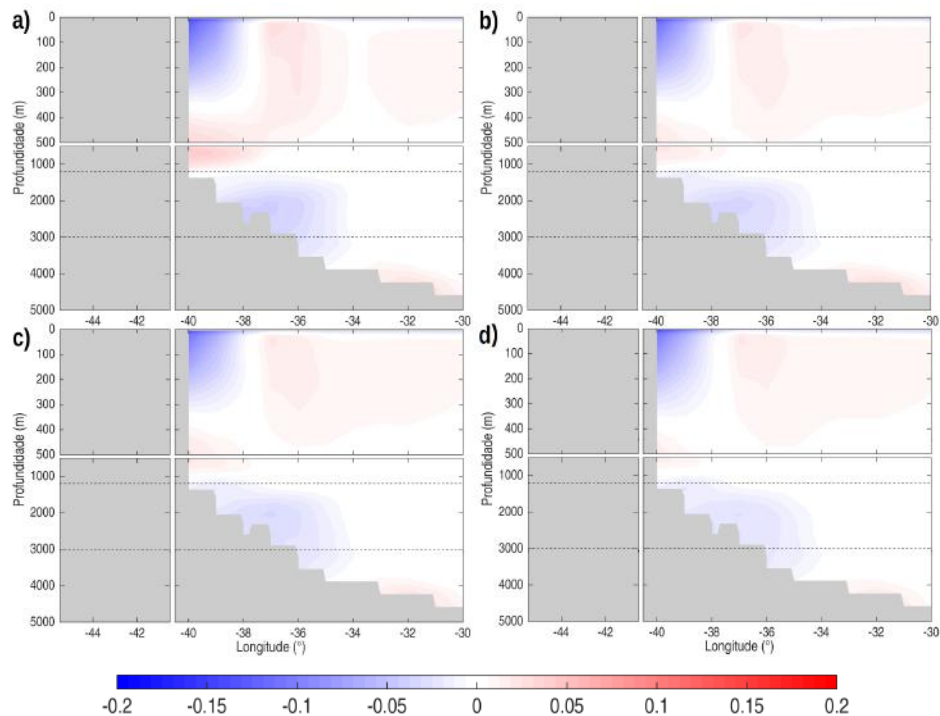


Figura 23: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do GFDL-ESM2M e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

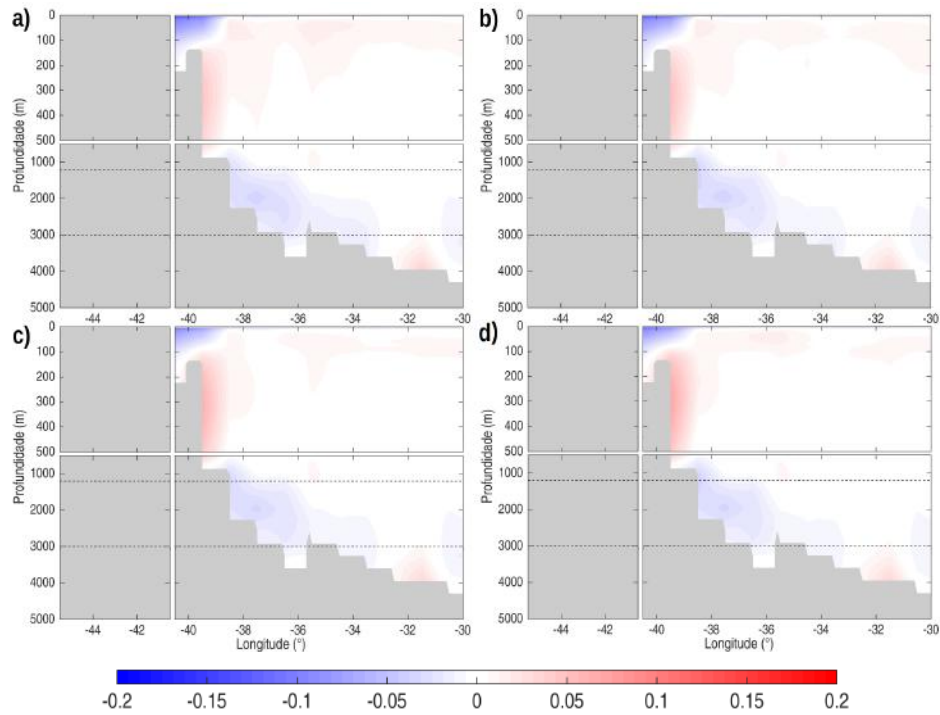


Figura 24: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do HadGEM2-ES e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

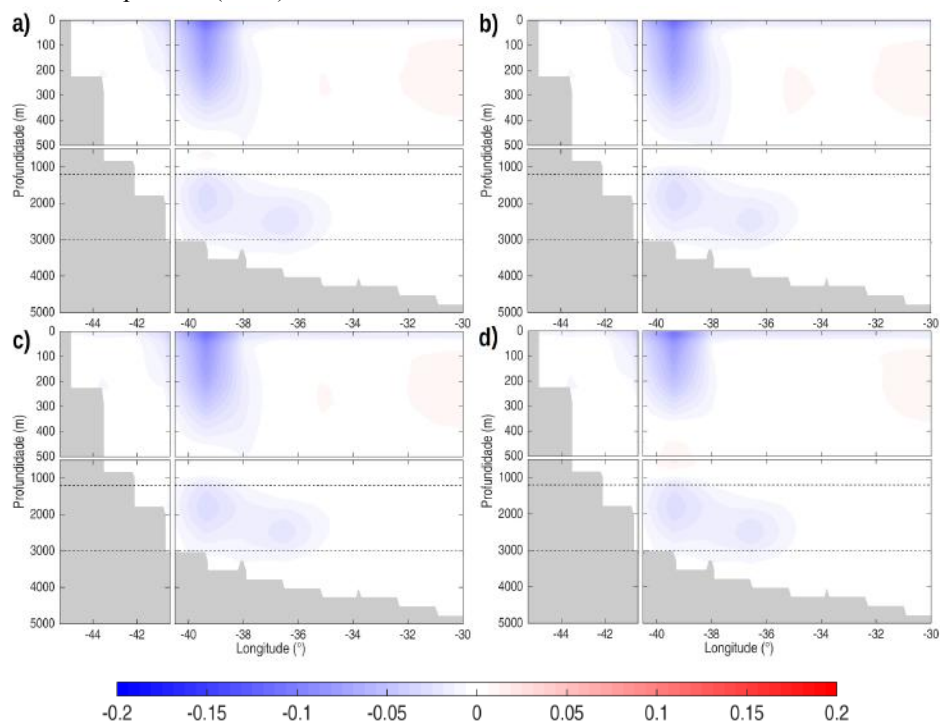


Figura 25: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do MIROC-ESM e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

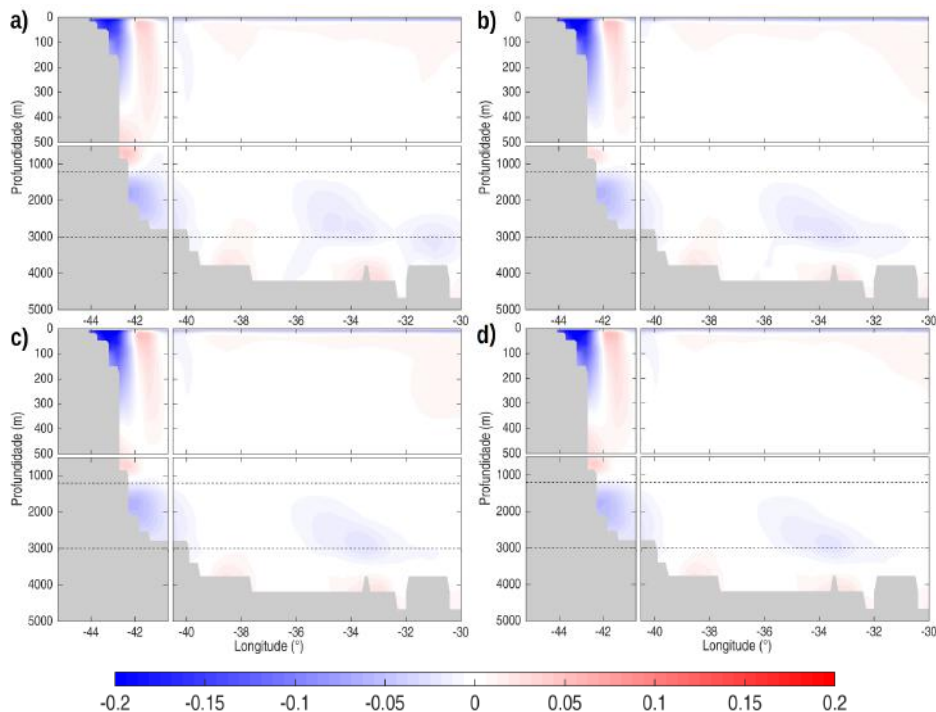


Figura 26: Velocidade média da corrente para (a) o período histórico do MPI-ESM-MR e projeções para o fim do século da velocidade média da corrente nos cenários (b) RCP2.6 (c) RCP4.5 e (d) RCP8.5. Azul (vermelho) representa deslocamento para sul (norte). Fonte: Autor.

Também é possível notar que há mudanças nas correntes quando comparamos seus respectivos transportes na camada da CB (AT+ACAS), trazidos na Figura 27. Esta figura apresenta diversos resultados que diferem em cada modelo. Observa-se que os que apresentam menor variação entre todos os períodos são os modelos GFDL-ESM2M (Figura 27d) e HadGEM2-ES (Figura 27e), mas em ambos nota-se que conforme eleva-se a concentração de CO_2 , da forçante radiativa, dentre outros aspectos, nos cenários temos uma diminuição do transporte da corrente. Já o GFDL-ESM2G (Figura 27c) apresenta um comportamento muito parecido, porém o seu período histórico é o que apresenta o menor transporte e os transportes no final do século são sempre maiores que os do meio do século para um mesmo RCP. Em oposição a isto temos o MPI-ESM-MR (Figura 27g), onde todos os cenários de meio do século apresentam transporte maior que o projetado para o fim do século e o período histórico entre os dois. Isto é muito similar ao que ocorre no BESM (Figura 27a), tendo como diferença o transporte do período histórico sendo maior que ambas as projeções. O MIROC (Figura 27f) possui as

projeções de fim do século com transporte maior que as do meio do século para os RCP2.6 e RCP4.5, mas no RCP8.5 os dois transportes futuros estão mais próximos.

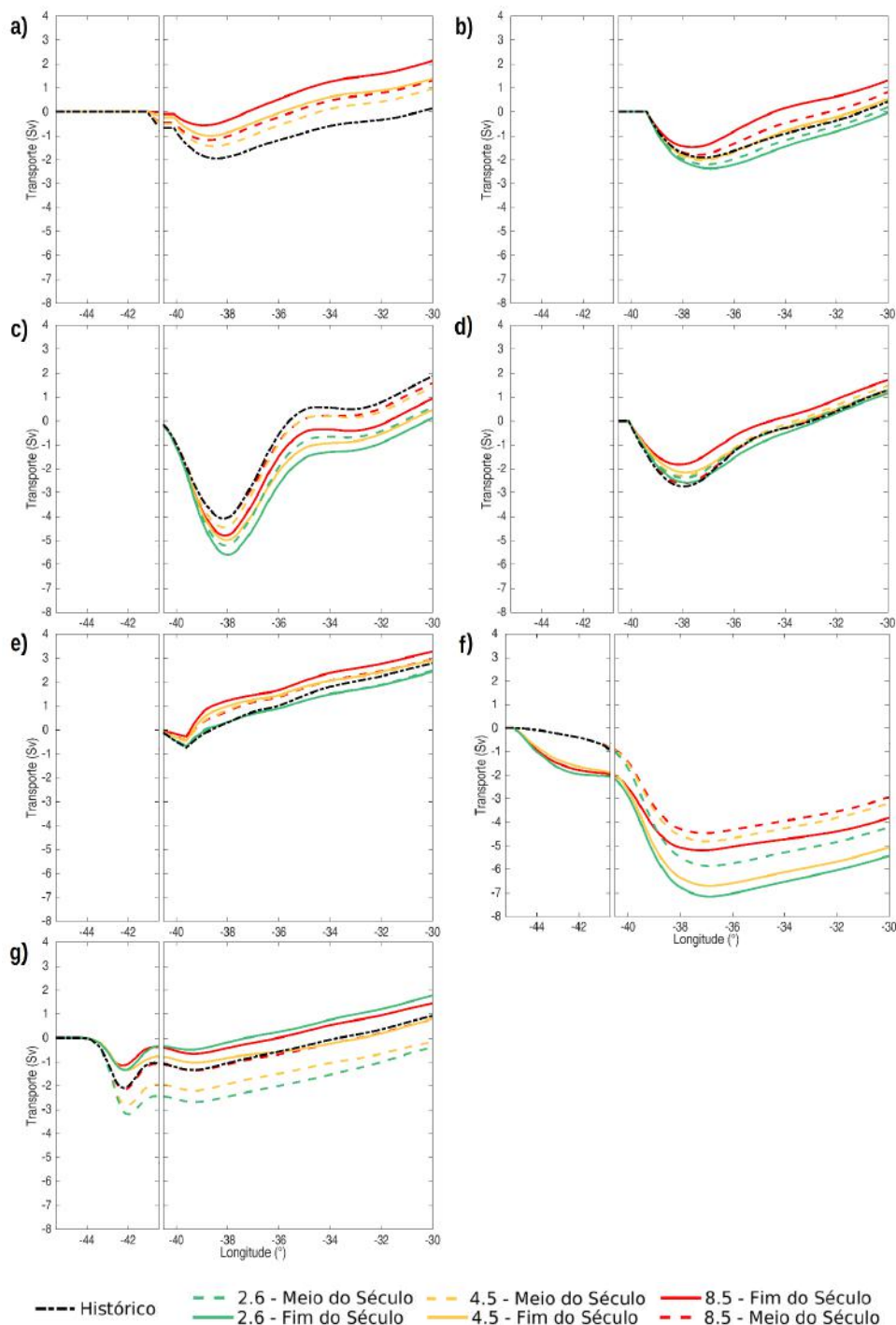


Figura 27: Transporte de volume líquido e acumulado na longitude para as massas d'água AT e ACAS, comparando os transportes para cada RCP, considerando os períodos do meio (1941-1970) e do final (1971-2100) do século e tendo o período histórico como referência. (a) BESM, (b) CanESM2, (c) GFDL-ESM2G, (d) GFDL-ESM2M, (e) HadGEM2-ES, (f) MIROC-ESM e (g) MPI-ESM-MR. Valores negativos indicam transporte para sul. Fonte: Autor.

Na Figura 28 foi comparada a velocidade máxima do núcleo da CB (Figura 28a) e o desvio padrão máximo desse núcleo (Figura 28b) em cada um dos RCPs. É interessante notar que há uma intensificação na velocidade do modelo CanESM2 nos RCPs se comparado ao período histórico, e esta intensificação é cada vez maior para um cenário com mais emissões de CO₂. Em contrapartida, nota-se um comportamento oposto do GFDL-ESM2M para a mesma variável. Um fato esperado, e que é possível observar no gráfico, é que o MPI-ESM-MR apresentasse a maior velocidade e que o MIROC-ESM a menor. Isto se deve às grades dos modelos, onde o primeiro apresenta uma grade com espaçamento menor entre seus pontos, enquanto o outro um espaçamento maior. Essa grade, com menos pontos no geral, faz com que o MIROC-ESM não seja capaz de detectar o núcleo da CB e não apresenta velocidades mais significativas como o MPI-ESM-MR. Na Figura 28b não há grande variação nos desvios padrões do núcleo da corrente. E de forma similar e oposta, o modelo MIROC-ESM traz menores valores de desvio padrão e o MPI-ESM-MR maiores, pelo mesmo motivo já descrito acima. No entanto, existe uma exceção interessante, mesmo com a velocidade do núcleo da corrente sendo pequena, o HadGEM2-ES possui a maior variabilidade desse núcleo dentre todos os modelos, o que corrobora com o que foi apresentado na Figura 9.

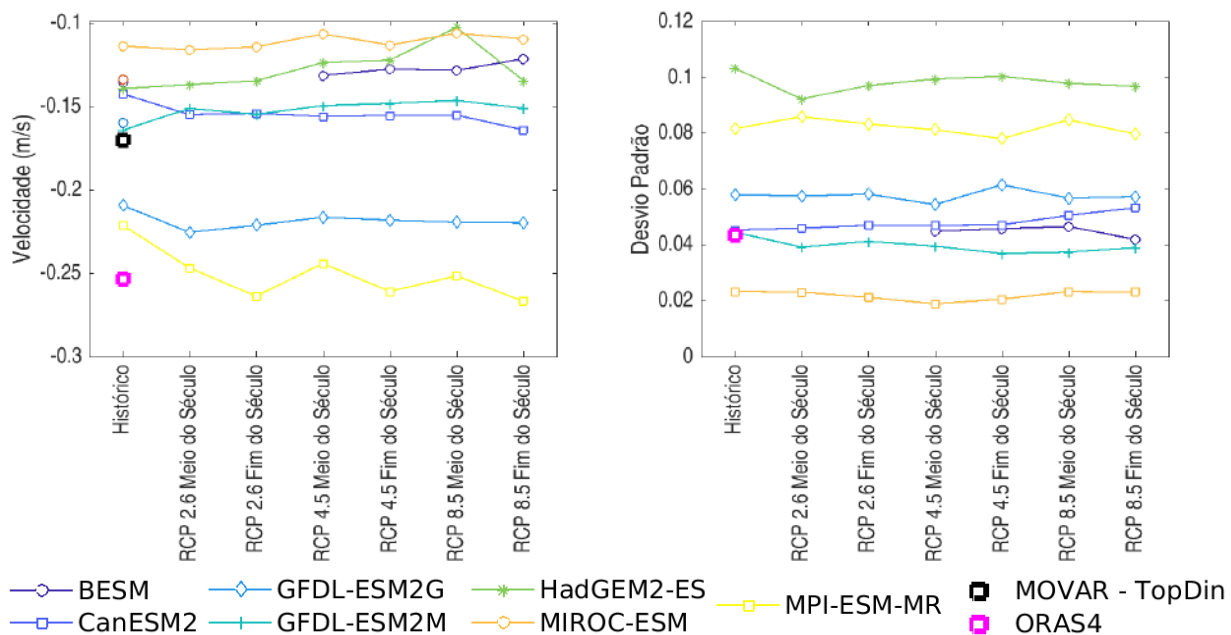


Figura 28: Comparação da velocidade máxima do núcleo da CB (a) e o desvio padrão máximo desse núcleo (b) no período histórico e em cada um dos RCPs para o meio e fim do século. Os valores associados aos dados in situ (quadrado preto) e à reanálise (quadrado roxo) são apresentados para comparação. Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 29 traz os transportes máximos para sul para as massas de água AT e ACAS (Figura 27) em cada um dos RCPs e a comparação com o período histórico. Os que possuem as menores intensidades de transportes são o BESM e o HadGEM2-ES e ambos apresentando um leve declínio neste transporte devido ao aumentos das forçantes dos cenários. Em contrapartida, o GFDL-ESM2G e o MIROC-ESM são os que apresentam as maiores intensidades de transportes e com os RCPs de fim do século sempre superando os de meio do século. Juntamente a estes o CanESM2 apresenta o maior transporte no fim do século do RCP2.6. Em contrapartida, o MPI-ESM-MR apresenta todos os transportes no meio do século superiores ao final dos mesmos RCPs.

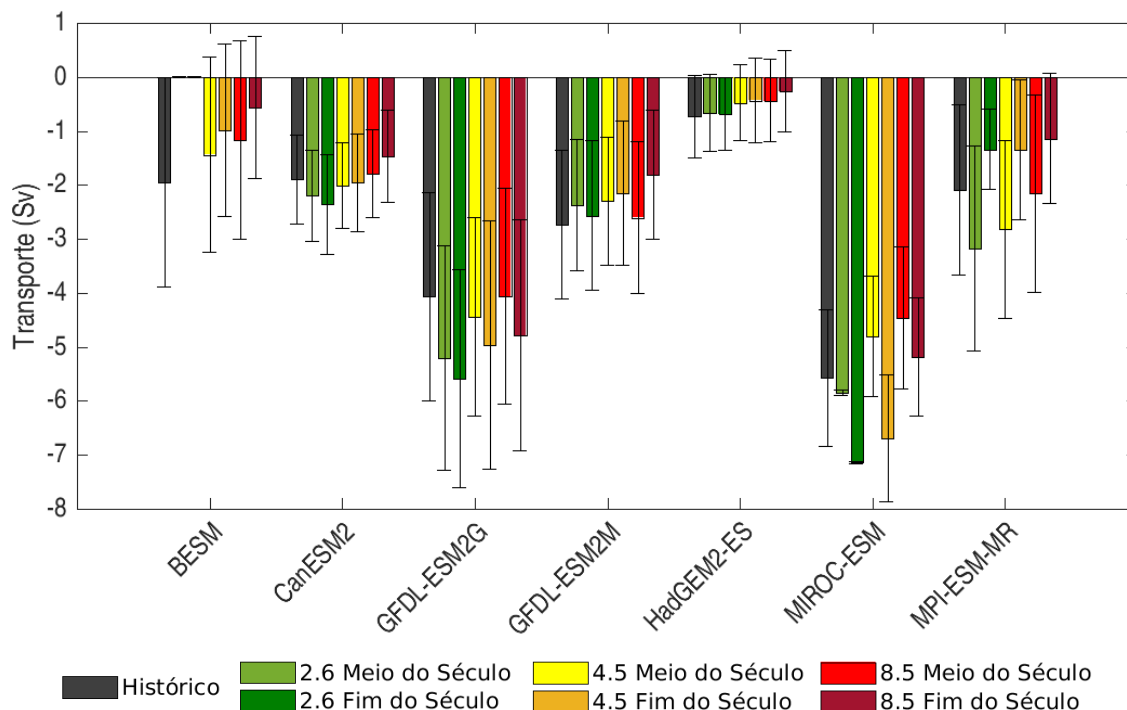


Figura 29: Transporte máximo para sul na camada de massas d'água AT+ACAS e variabilidade associado para cada um dos cenários apresentados na Figura 27. Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Para a análise da estrutura de massas d'água que fluem ao largo da margem continental brasileira, foram utilizados os dados *in situ* coletados pelo projeto MOVAR e a reanálise ORAS4, onde ambos permitiram a comparação com os dados históricos dos ESM. Isto possibilitou a validação dos mesmos, para que estes fossem considerados para a análise das suas projeções climáticas.

Analisando o período histórico dos ESM na região, é possível observar que todos os modelos conseguiram representar a CB e para além disso, os modelos CanESM2, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES e MPI-ESM-MR foram capazes de capturar os aspectos gerais de toda a estrutura de massas d'água da região. Em compensação, os modelos BESM, GFDL-ESM2G e MIROC-ESM não foram capazes de modelar a presença da AAF. Outro ponto que é necessário ressaltar é a diferença nas resoluções horizontais dos modelos MPI-ESM-MR que possui uma grade com menor espaçamento que os demais modelos e o MIROC-ESM que, em oposição ao anterior, possui uma grade com maior espaçamento. Estas diferenças tornaram ambos os modelos difíceis de comparar, o MPI-ESM-MR por manter toda a estrutura de massas d'água confinada próxima ao talude e o MIROC-ESM por não distinguir as massas d'água que se deslocam para norte e não ser capaz de modelar a intensidade da CB.

Na comparação dos dados com o artigo de Pereira *et al.* (2014) foi observada uma discrepância na primeira camada, onde foi considerada a presença da CB. Uma hipótese para esta diferença, é que a mesma pode ter ocorrido devido ao fato que a radial considerada neste trabalho (NOAA-AX97) possui uma rotação em relação ao eixo das latitudes, diferente da presente na literatura comparada. Isto pode ter ocasionado a diminuição da intensidade da CB devido a contribuição da componente zonal.

Outro ponto interessante nos dados do período histórico é que as apenas as estruturas próximas ao talude foram representadas nos ESM e na reanálise ORAS4, mas nos dados *in situ* é

possível visualizar diversos outros deslocamentos, tanto para norte quanto para sul, até o final da radial.

Apesar do modelo GFDL-ESM2G não distinguir todas as massas d'água presentes na região, quando analisamos apenas a CB, este é o modelo que melhor a representa ao compararmos com os dados *in situ*. Levando em consideração sua velocidade, profundidade e transporte.

A análise do período histórico é de extrema importância para que se possa observar as projeções climáticas levando em conta a limitação de cada um dos modelos. Porém, na análise dos períodos meio e final do século, não houve uma diferença gradativa ou discrepante entre os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 e entre os períodos considerados. Esta conclusão é um contrassenso do que seria esperado observar, mas de extrema importância para a área.

4.1 Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados terem mostrado poucas mudanças na CB em relação à sua velocidade, seria interessante observar se estas serão mais significativas caso melhore-se a metodologia em relação a divisão das massas d'águas, aplicando, por exemplo, uma divisão por níveis isopicnais, e ainda mais importante, incluir a análise do transporte de calor, que é de suma importância para o Atlântico Sul. Assim, como perspectivas futuras, na continuidade deste trabalho serão feitas tais implementações, além de trazer uma comparação com os modelos do Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6), analisando os Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) em comparação com os RCPs, para analisar as diferenças que foram trazidas com o aprimoramento implementado no IPCC Sixth Assessment Report (AR6).

5 REFERÊNCIAS

ARORA, V. K.; SCINOCCHA, J. F.; BOER, G. J.; CHRISTIAN, J. R.; DENMAN, K. L.; FLATO, G. M.; KHARIN, V. V.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J. 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, M. A.; MOGENSEN, K.; WEAVER, A. 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.; BARANOVA, O.; LOCARNINI, R.; MISHONOV, A.; GRODSKY, A.; PAVER, C.; WEATHERS, K.; SMOLYAR, I.; REAGAN, J.; SEIDOV, D.; ZWENG, M. WORLD OCEAN ATLAS 2018. **Product Documentation Ocean Climate Laboratory NCEI / NESDIS / NOAA NOAA National Centers for Environmental Information**, 2018.

CHENG, L.; ZHU, J.; COWLEY, R.; BOYER, T.; WIJFFELS, S. 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.

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.

CIRANO, M.; MATA, M. M.; CAMPOS, E. J. D.; DEIRÓ, N. F. R. 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.

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

DUNNE, J. P.; JOHN, J. G.; ADCROFT, A. J.; GRIFFIES, S. M.; HALLBERG, R. W.; SHEVLIAKOVA, E.; STOUFFER, R. J.; COOKE, W.; DUNNE, K. A.; HARRISON, M. J.; KRASTING, J. P.; MALYSHEV, S. L.; MILLY, P. C.D.; PHILLIPPS, P. J.; SENTMAN, L. T.; SAMUELS, B. L.; SPELMAN, M. J.; WINTON, M.; WITTENBERG, A. T.; ZADEH, N. 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.

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

GIORGETTA, M. A.; ROECKNER, E.; MAURITSEN, T.; BADER, J.; CRUEGER, T.; ESCH, M.; RAST, S.; KORNBLUEH, L.; SCHMIDT, H.; KINNE, S.; HOHENEGGER, C.; MÖBIS, B.; KRISMER, T.; WIENERS, K.-H.; STEVENS, B. Berichte zur Erdsystemforschung Reports on Earth System Science. **Berichte zur Erdsystemforschung**, n. 135, 2013.

GOES, M.; CIRANO, M.; MATA, M. M.; MAJUMDER, S. 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.

GONI, G. J.; SPRINTALL, J.; BRINGAS, F.; CHENG, L.; CIRANO, M.; DONG, S.; DOMINGUES, R.; GOES, M.; LOPEZ, H.; MORROW, R.; RIVERO, U.; ROSSBY, T.; TODD, R. E.; TRINANES, J.; ZILBERMAN, N.; BARINGER, M.; BOYER, T.; COWLEY, R.; DOMINGUES, C. M.; HUTCHINSON, K.; KRAMP, M.; MATA, M. M.; RESEGHETTI, F.; SUN, C.; BHASKAR TVS, U.; VOLKOV, D. More Than 50 Years of Successful Continuous Temperature Section Measurements by the Global Expendable Bathythermograph Network, Its Integrability, Societal Benefits, and Future. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

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

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 104, 2013.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. **Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2014.

IPCC. Global Warming of 1.5°C. **An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development**, 2018.

JONES, C. D.; HUGHES, J. K.; BELLOUIN, N.; HARDIMAN, S. C.; JONES, G. S.; KNIGHT, J.; LIDDICOAT, S.; O'CONNOR, F. M.; ANDRES, R. J.; BELL, C.; BOO, K. O.; BOZZO, A.; BUTCHART, N.; CADULE, P.; CORBIN, K. D.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GORNALL, J.; GRAY, L.; HALLORAN, P. R.; HURTT, G.; INGRAM, W. J.; LAMARQUE, J. F.; LAW, R. M.; MEINSHAUSEN, M.; OSPREY, S.; PALIN, E. J.; PARSONS CHINI, L.; RADDATZ, T.; SANDERSON, M. G.; SELLAR, A. A.; SCHURER, A.; VALDES, P.; WOOD, N.; WOODWARD, S.; YOSHIOKA, M.; ZERROUKAT, M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 543–570, 2011.

KAMWORAPAN, S.; SURUSSAVADEE, C. Evaluation of CMIP5 global climate models for simulating climatological temperature and precipitation for southeast Asia. **Advances in Meteorology**, v. 2019, 2019.

LIMA, M. O.; CIRANO, M.; MATA, M. M.; GOES, M.; GONI, G.; BARINGER, M. 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, M.; CIRANO, M.; VAN CASPEL, M.; FONTELES, C.; GONI, G.; BARINGER, M. Observations of Brazil Current baroclinic transport near 22°S. variability from the AX97 XBT transect. **Clivar Exchanges**, v. 58, p. 5–10, 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, L. B. 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.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S.P.; DE ALMEIDA, R. A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA, M.; IRBER, L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013.

PEREIRA, J.; GABIOUX, M.; MARTA-ALMEIDA, M.; CIRANO, M.; PAIVA, A. M.; AGUIAR, A. L. The bifurcation of the western boundary current system of the South Atlantic Ocean. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, p. 241–257, 2014.

SILVEIRA, I. C. A. DA; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S DE; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 177183, 2000.

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

SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. **The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology**. [s.l.] Prentice-Hall New York, 1942. v. 1087

TALLEY, L. D.; PICKARD, G. L.; EMERY, W. J.; SWIFT, J. H. Chapter 9 - Atlantic Ocean. In: TALLEY, L. D. et al. (Eds.). **Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition)**. Sixth Edition ed. Boston: Academic Press, 2011. p. 245–301.

WATANABE, S.; HAJIMA, T.; SUDO, K.; NAGASHIMA, T.; TAKEMURA, T.; OKAJIMA, H.; NOZAWA, T.; KAWASE, H.; ABE, M.; YOKOHATA, T.; ISE, T.; SATO, H.; KATO, E.; TAKATA, K.; EMORI, S.; KAWAMIYA, M. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 845–872, 2011.

ANEXOS

ANEXO A

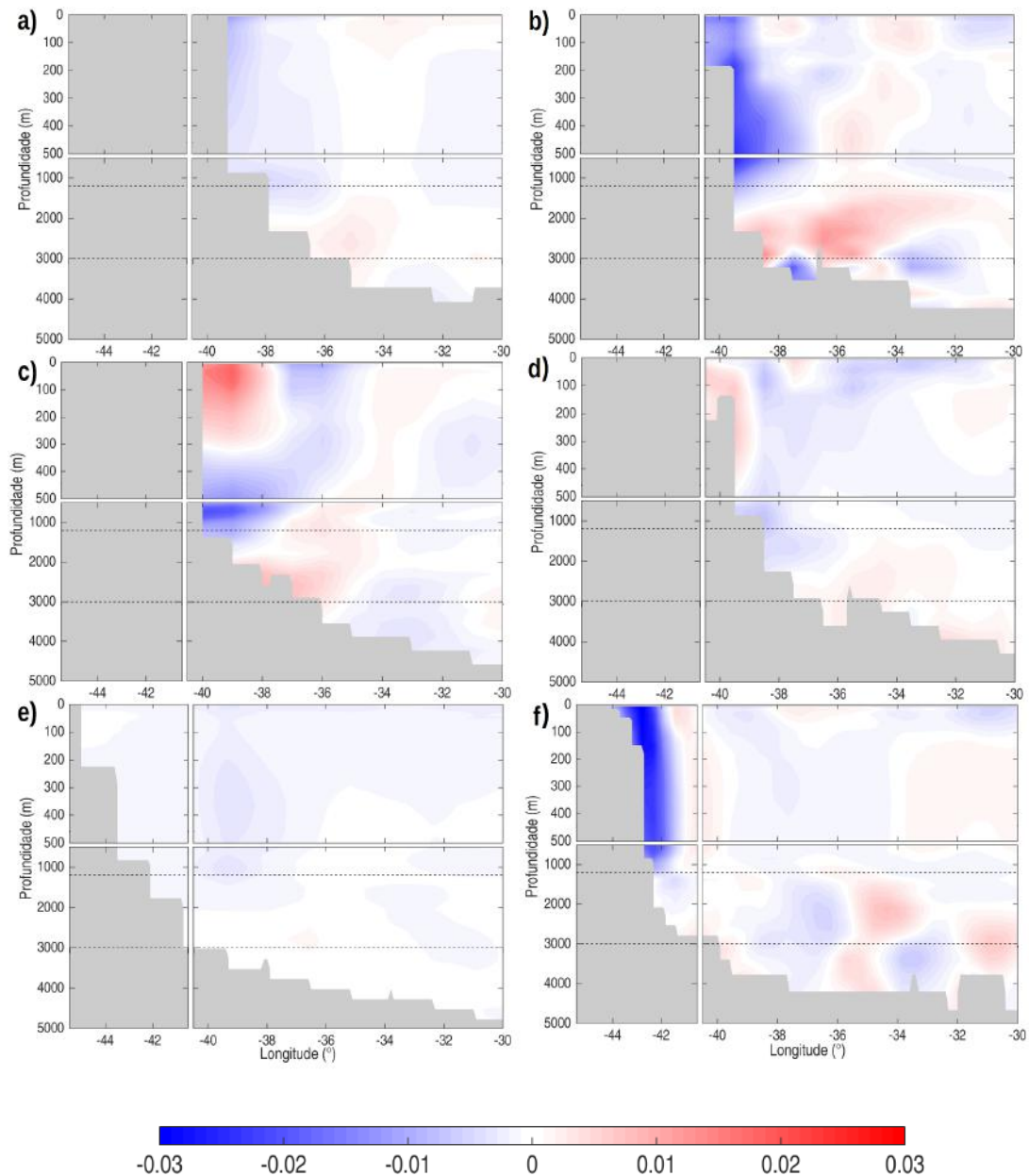


Figura 1-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o meio do século do RCP2.6 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.

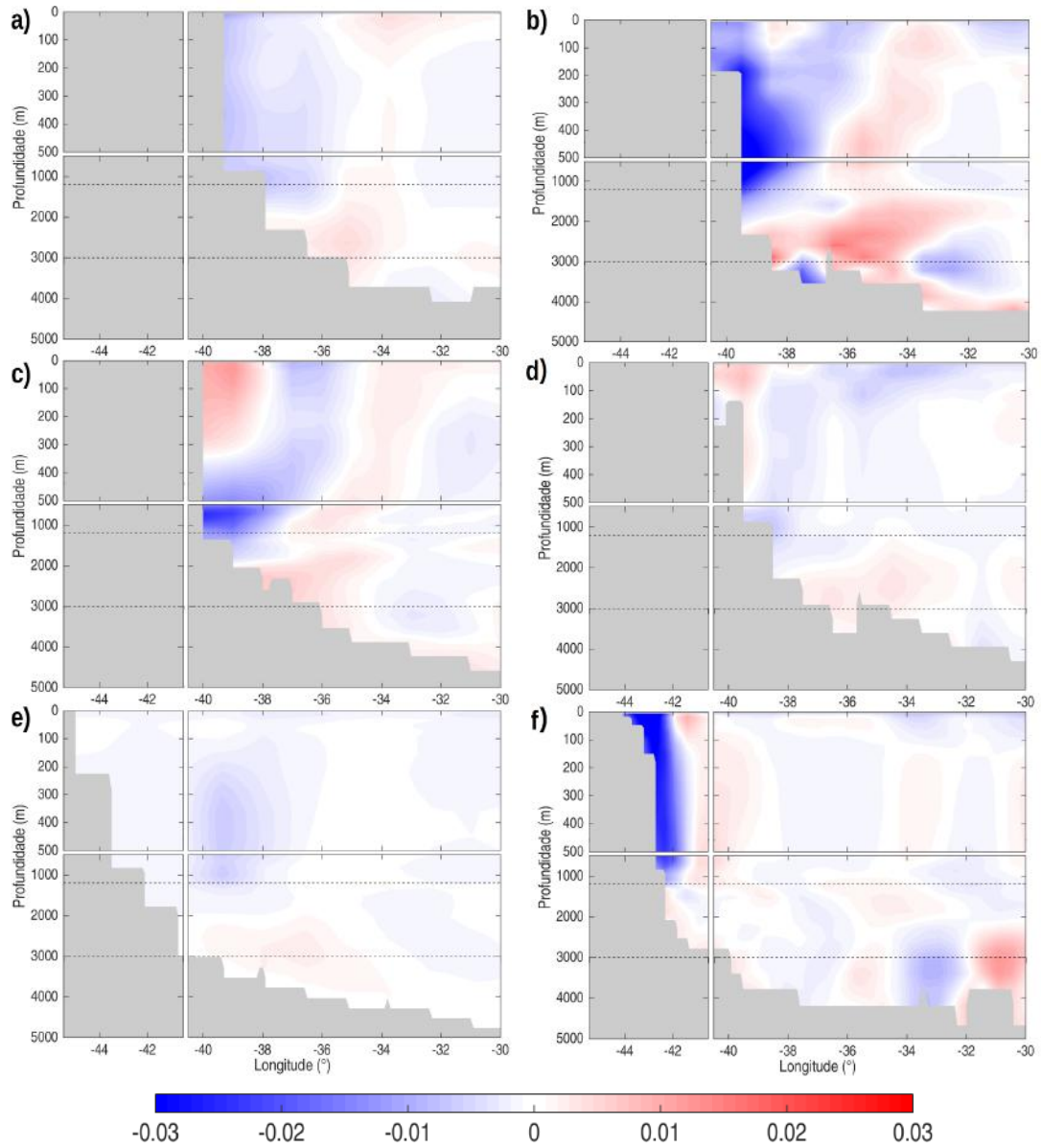


Figura 2-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o fim do século do RCP2.6 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.

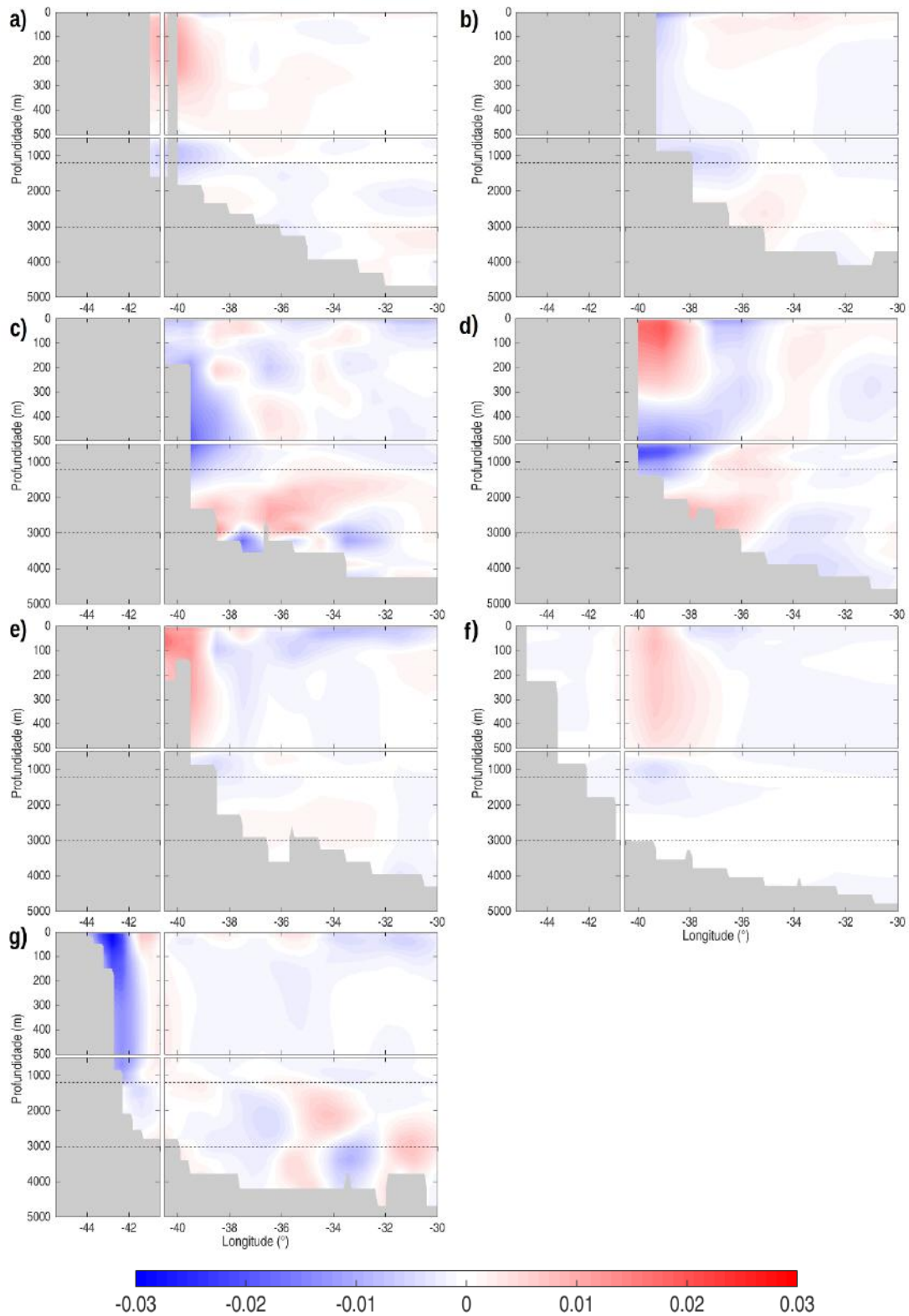


Figura 3-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o meio do século do RCP4.5 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.

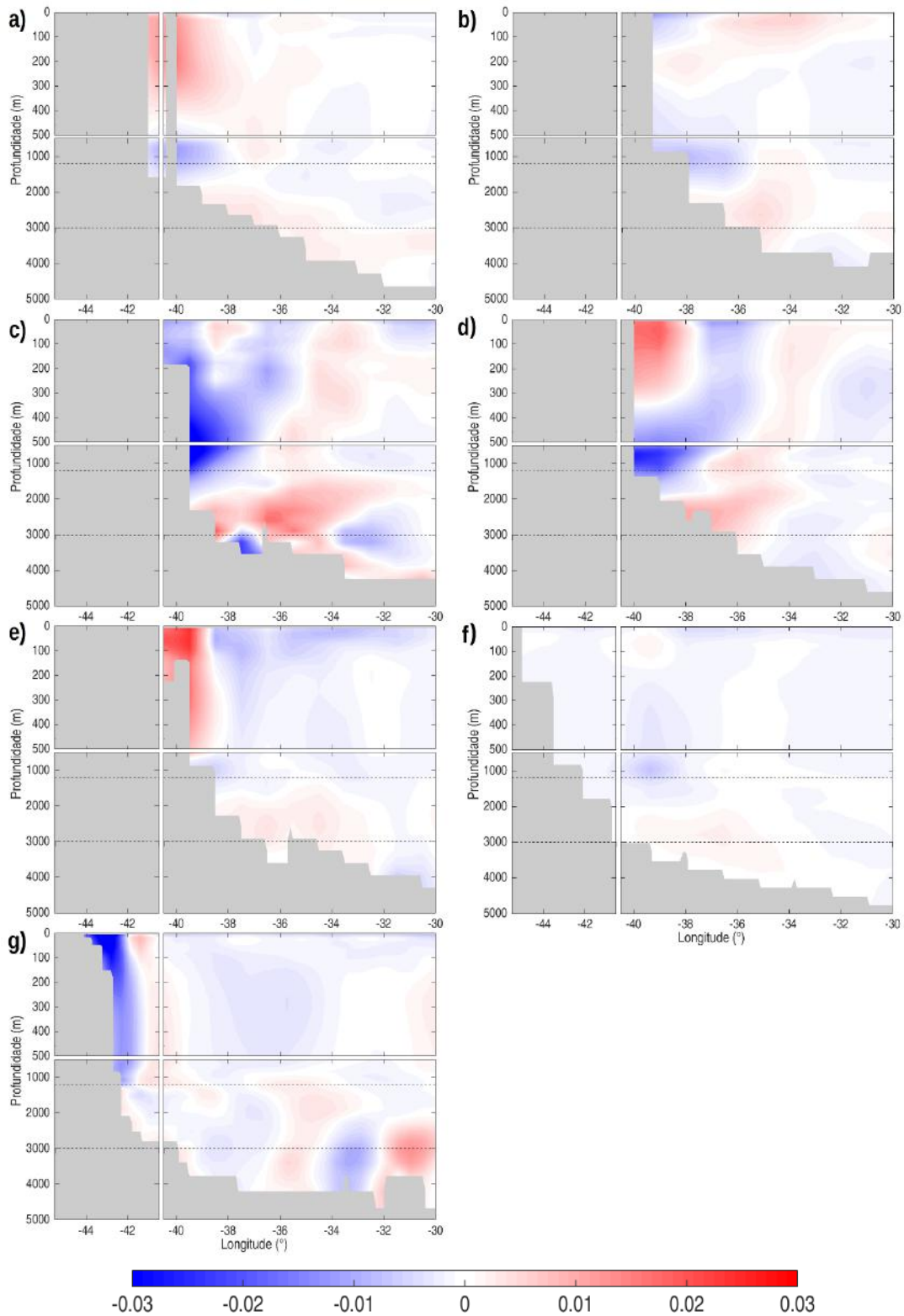


Figura 4-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o fim do século do RCP4.5 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.

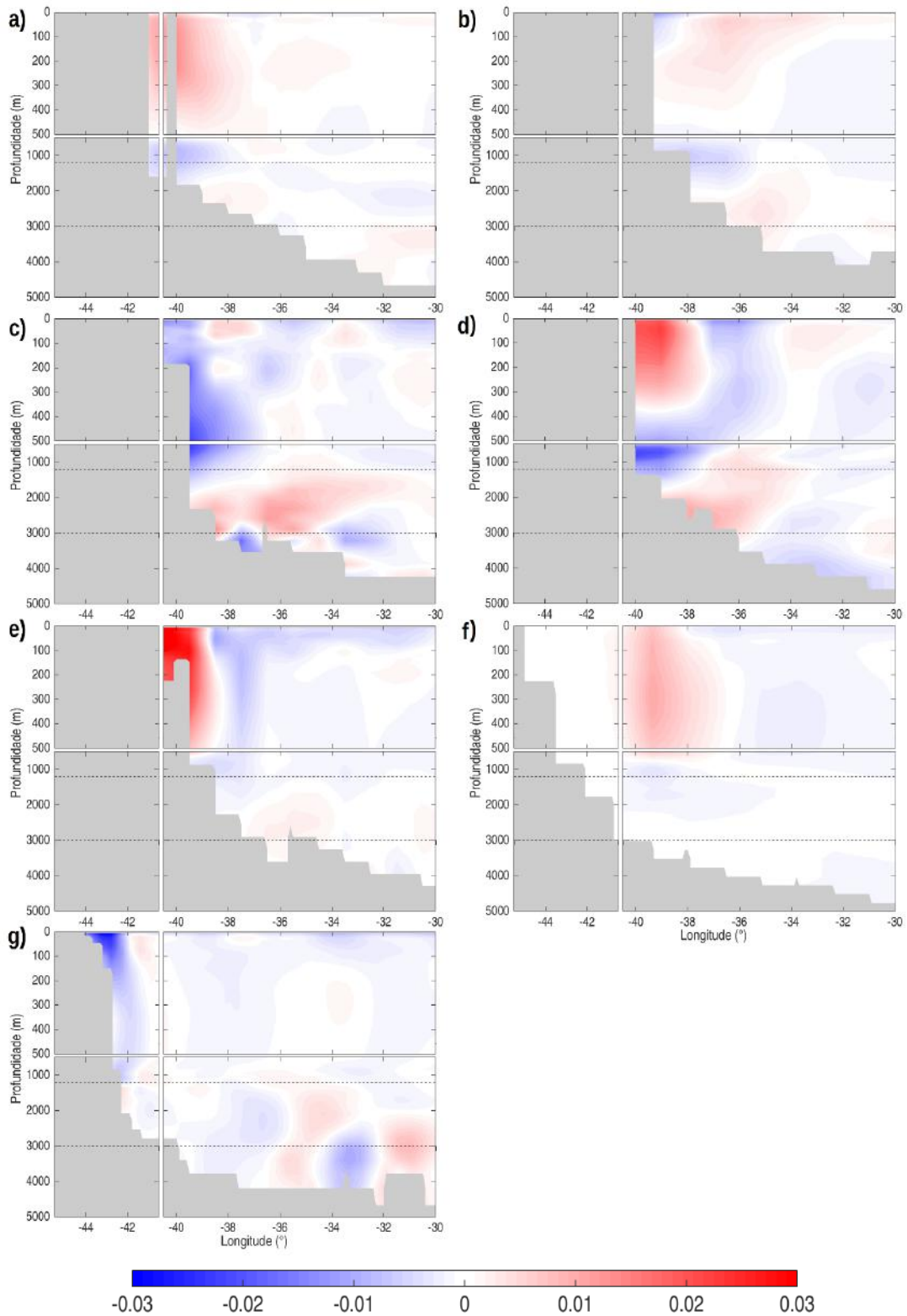


Figura 5-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o meio do século do RCP8.5 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.

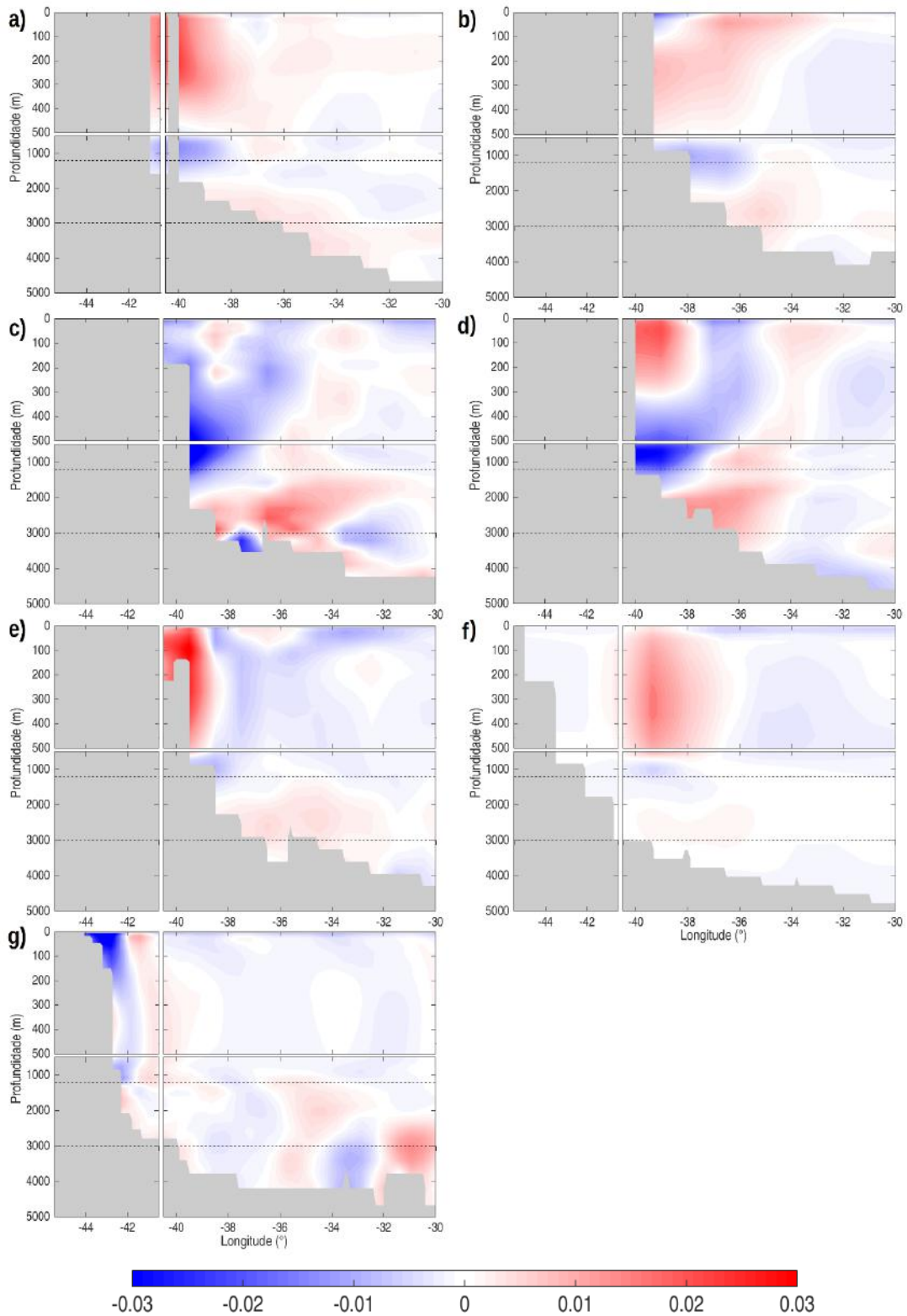


Figura 6-A: Anomalia da velocidade média da corrente (projeção para o fim do século do RCP8.5 menos o período histórico) do (a) CanESM2, (b) GFDL-ESM2G, (c) GFDL-ESM2M, (d) HadGEM2-ES, (e) MIROC-ESM e (f) MPI-ESM-MR. Fonte: Autor.