# UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS FACULDADE DE OCEANOGRAFIA

# LÍVIA MARIA BARBOSA SANCHO ALVARES MENDONÇA CABRAL

# ANÁLISE DOS TRANSPORTES ADVECTIVO DE CALOR E VOLUME NA BACIA DO ATLÂNTICO SUL FRENTE A CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia da Faculdade de Oceanografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

# ORIENTADOR

## DR. LUIZ PAULO DE FREITAS ASSAD

## **CO-ORIENTADOR**

## PROF. DR. ALEXANDRE MACEDO FERNANDES

RIO DE JANEIRO – 15 DE MARÇO DE 2012

#### SANCHO, LÍVIA MARIA BARBOSA ALVARES MENDONÇA CABRAL

#### ANÁLISE DOS TRANSPORTES ADVECTIVO DE CALOR E VOLUME NA BACIA DO ATLÂNTICO SUL FRENTE A CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências, Faculdade de Oceanografia – 2012

Bacharelado em Oceanografia

1. Atlântico Sul. 2. Mudanças Climáticas. 3. Transporte advectivo de calor. 4. Transporte de volume

I. Assad, L.P.F.

II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Oceanografia

III. Título

# Lívia Maria Barbosa Sancho Alvares Mendonça Cabral

# ANÁLISE DOS TRANSPORTES ADVECTIVO DE CALOR E DE VOLUME NA BACIA DO ATLÂNTICO SUL FRENTE A CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia da Faculdade de Oceanografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

## APROVADA EM 15 DE MARÇO DE 2012, PELA BANCA EXAMINADORA:

### **Dr. Alexandre Macedo Fernandes**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade De Oceanografia - Departamento de Oceanografia Física

Dr. Audalio Rebelo Torres Jr.

Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Geociências - Departamento de Meteorologia - Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos

### Dra. Hatsue Takanaca de Decco

Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia Civil - Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia

# AGRADECIMENTOS

À Deus por me guiar quando estive cega. Por ser meu farol, meu ajudante, meu amigo, meu Pai.

À minha mãe por caminhar não na minha frente, nem atrás de mim, mas sempre ao meu lado. Por abrir mão de tanto e pedir tão pouco em troca. Por ser um exemplo de mãe e de mulher.

À minha família, pela preocupação, incentivo e apoio sempre, mesmo quando não tinham idéia do que eu fazia. Por me ensinarem que conhecimento é a melhor herança que se pode deixar.

Às minhas irmãs e meu pai por compartilharem da minha crença de que o coração tem mais poder que o sangue. Por serem minha família.

À Jorge por se comprometer com a minha formação. Por embarcar nas minhas idéias malucas. Por se arrepender. Por tentar. Por conseguir.

Aos amigos Ana, Elisa, Felipe, Vanessa, Patrícia, Victor, Helen, André e Mayra pelo apoio, incentivo e por se mostrarem presentes quando eu precisava. Às que dividem não só o apartamento, mas as frustrações, medos, risos e loucuras.

Às amigas Lara, Hanna, Paulinha, Lelê e Thata que viram meu sonho ganhar forma, cresceram e amadureceram junto comigo.

Ao Prof. Alexandre, pela boa vontade, paciência e por não desistir de mim quando me vi em desespero. Por me ensinar sobre ética. Por ser um exemplo.

À Hatsue, Audálio e Candella, por compartilharem sugestões e idéias.

Ao Luiz Paulo, sem o qual esse trabalho não existiria. Pelos incentivos e pelo voto de confiança.

# DEDICATÓRIA

Aos homens da minha vida: Lucas e Caio

# PENSAMENTO

Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.

São Francisco de Assis

## RESUMO

O presente trabalho estudou alterações nos transportes oceânicos advectivo de calor e volume na bacia do Atlântico Sul frente a dois cenários de mudanças climáticas idealizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Através de resultados gerados pelo modelo climático CM 2.1 desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), foram feitas análises através de duas seções meridionais e uma seção zonal na área de estudo compreendida entre as latitudes 25°S e 70°S e longitudes 70°W e 20°E em diferentes camadas de densidade. Foram analisados campos prognósticos médios anuais referentes a experimentos com 100 anos de duração iniciados no ano de 2001. Os resultados do transporte de volume integrado em toda a coluna d'água evidenciam enfraquecimento das correntes nas seções da Passagem de Drake e da África-Antártida em meados da década de 2050. Na seção zonal situada no paralelo 25°S observa-se oscilações no sentido do transporte de volume integrado em toda a coluna d'água em função de variações dos mesmos transportes estimados para cada uma das camadas de densidade analisadas. As análises dos espectros de energia do transporte de volume integrado evidenciou maiores picos associados a fenômenos com processos interanuais em todas as seções. Por outro lado, o transporte advectivo de calor apresenta aumento nas seções do Drake e da África-Antártida. Tal fato pode estar associado ao aumento de calor nas bacias oceânicas vizinhas. Observa-se também uma diminuição do transporte de calor advectivo integrado na coluna d'água para norte na seção situada no paralelo 25°S, indicando enfraquecimento do Meridional Overturning Cell (MOC) na seção e um aquecimento do volume oceânico analisado. Observa-se também aumento no balanço de radiação incidente na superfície do oceano, em função do aumento da concentração de gases-estufa, além do aumento no calor estocado e da temperatura no oceano Atlântico Sul entre as seções monitoradas.

# ABSTRACT

The present work analysed changes in South Atlantic basin oceanic advective heat and volume transports face of two climate change scenarios, idealized by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Through results generated by the CM2.1 climate change model developed by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), several analysis were made through two meridional and one zonal section in the study area between the latitudes 25°S e 70°S and longitudes 70°W e 20°E in different density layers. Mean prognostics fields were analysed referring to a 100 year-old period experiments started at the year 2001. The results of the integrated volume transport throughout the column of water showed weakening of the Drake Passage and Africa-Antártida passage sections currents in the mid 2050's. At the zonal section, placed in the 25°S parallel, direction oscillations on the integrated volume transport throughout the column of water were observed due to variations of this transport for each analysed density layer. The integrated volume transport energy spectral analysis showed showed major spikes associated with interannual frequencie phenomena in all sections. On the other hand, the advective heat transport has increased on the Drake Passage and África-Antártida passage. Such fact may be related to a increase in the neighboring basins. The same thing doesn't happen on the 25°S parallel. There is a decreased of the advective heat transport, indicating a weakening of the Meridional Overturning Cell (MOC) and a heating of the analysed oceanic volume. Also, there is increasing on the net incident radiative on the ocean surface analysed, due to the increased of the greenhouse gases concentration. It's also observed the increasing in stored heat and temperature of the South Atlantic between the monitored sections.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO01		
2. <b>OBJETIVO</b>		
2.1.	Objetivos específicos	. 08
3. <b>Me</b>	ETODOLOGIA	. 08
3.1.	Área de estudo	. 08
3.1.1.	Estimativas do transporte de volume	. 08
3.1.2.	Estimativas do transporte advectivo de calor	. 09
3.1.3.	A circulação do oceano Atlântico Sul	. 10
3.2.	Resultados Utilizados	. 11
3.2.1.	Métodos utilizados	. 11
3.3.	Experimentos utilizados	. 13
3.4.	Definição das seções monitoradas	. 14
3.5.	Estimativas dos transportes e obtenção das anomalias	. 23
4. <b>RESULTADOS</b>		
4.1.	Camadas de densidade	. 25
4.2.	Transporte de volume	. 30
4.2.1.	Seção na Passagem de Drake	. 30
4.2.2.	Seção na Passagem África-Antártida	. 34
4.2.3.	Seção no Paralelo 25°S	. 36
4.3.	Anomalia do transporte de volume	. 45
4.4.	Transporte advectivo de calor	. 51
4.4.1.	Seção na Passagem de Drake	. 51
4.4.2.	Seção na Passagem África-Antártida	. 53
4.4.3.	Seção no Paralelo 25°S	. 61
4.5.	Anomalia do transporte advectivo de calor	. 66

4.6	Balanço do Fluxo Radiativo e Estimativa do Estoque de Calor. 72	2
4.6	1. Balanço do Fluxo Radiativo72	2
4.6	2. Estimativa do Estoque de Calor7	5
4.7	Variação da temperatura70	6
5.	DISCUSSÕES	7
5.1	Transporte de Volume e advectivo de Calor7	7
5.2	Estoque de Calor7	9
6.	CONCLUSÕES	2
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
APÊN	9 <b>ICE I</b>	1
1.	<b>CM 2.1</b> 9	1
1.1.	/IOM 4.0	1
APÊN	90 <b>ICE II</b>	6
1.	Experimento clima	6
2.	Experimento A1FI	7
3.	Experimento B1	7

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1-I: Fluxo de calor resultante médio anual integrado em PW (1PW = 1015W) na superfície do oceano. Valores positivos indicam ganho de calor4
Tabela 3.4-I: Intervalos típicos de densidade potencial ( $\delta_{\theta}$ ) para as diferentes massas d'água nos oceanos, onde $\theta$ representa a temperatura potencial16
Tabela 3.4-II: Intervalos de densidade potencial ( $\sigma_{\theta}$ ) para as camadas escolhidas, onde $\theta$ representa a temperatura potencial
Tabela 3.4-III: Identificação dos índices termohalinos de diversas massas d'águaencontradas no oceano Atlântico Sul
Tabela 4.1-I: Índices termohalinos e densidade das massas d'água descritas porCirano et al. (2006) e Silveira et al. (2000)
Tabela 4.2.1-I: Médias do transporte de volume para o período de declínio nos experimentos A1FI e B1
Tabela 4.2.2-I: Médias do transporte de volume para o período de mudanca nos
experimentos A1FI e B1
Tabela 4.2.3-I: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de volume por
camada dos experimentos A1FI e B143
Tabela 4.2.3-II: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de volume
integrado dos experimentos A1FI e B144
Tabela 4.3.1-I: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B153
Tabela 4.3.2-I: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B154
Tabela 4.3.2-II: Médias do transporte de volume para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B155
Tabela 4.3.2-III: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B156

Tabela 4.3.3-1: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B162
Tabela 4.3.3-III: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de calor por
camada dos experimentos A1FI e B164
Tabela 4.3.3-VI: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de calor
integrado dos experimentos A1FI e B165
Tabela 4.6.1-I: Médias do balanço de radiação atmosférica para o experimento clima
(H2)73
Tabela 4.6.1-II: Médias do balanço de radiação atmosférica para o período de
mudança nos experimentos A1FI e B175
Tabela 4.6.2-I: Médias do calor estocado para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B176
Tabela 4.7-I: Médias do calor estocado para o período de mudança nos
experimentos A1FI e B177

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Ciclo anual do fluxo de calor resultante na superfície do oceano global (vermelho), para o Hemisfério Sul (azul) e para o Hemisfério Norte (verde)3
Figura 1-2: Desenho esquemático das regiões cujos fluxos de calor estão representados na tabela 1-I5
Figura 1-3: Transporte de calor meridional no oceano Atlântico para diversas estimativas em PW (1PW = 1015W). Valores positivos indicam fluxo para norte. Os números acima das setas representam fluxos atmosfera-oceano; vermelho para ganho de calor pelo oceano e azul para perda de calor pelo oceano
Figura 3.1.1-1: Representação da circulação superficial do Atlântico Sul11
Figura 3.3-1: a - Série temporal das emissões antropogênicas de $CO_2$ em gigatoneladas de carbono (GtC – 1Gt=10 <sup>6</sup> t). b – Concentração atmosférica de $CO_2$ em partes por milhão por volume (ppmv) para os diversos experimentos do modelo CM 2.1
Figura 3.4-1: Representação do oceano Atlântico Sul com a localização das seções a serem monitoradas15
Figura 3.4-2: Representação da seção da Passagem de Drake com as camadas sigma correspondentes para o ano 200017
Figura 3.4-3: Representação da seção da Passagem África-Antártida com as camadas sigma correspondentes para o ano 200018
Figura 3.4-4: Representação da seção 25°S com as camadas sigma correspondentes para o ano 200019
Figura 3.4-5: Representação do diagrama T-S para o ano 2000 da seção da Passagem de Drake com suas respectivas massas d'água
Figura 3.4-6: Representação do diagrama T-S para o ano 2000 da seção da passagem África-Antártida com suas respectivas massas d'água
Figura 3.4-7: Representação do diagrama T-S para o ano 2000 da seção do paralelo 25°S com suas respectivas massas d'água23

Figura 4.1-1 Geometria da seção da Passagem de Drake com as isopicnais monitoradas e as isopicnais referentes às massas d'água do oceano Atlântico Sul descritas na literatura; vermelho – base da ACAS e verde – base da AIA......27

Figura 4.2.2-1: Transporte de volume integrado na seção da passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima......35

Figura 4.3.2-1 – Transporte de calor integrado na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima......54

Figura 4.3.2-3 – Transporte de calor na camada superior na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima......56

Figura 4.3.2-7: Média para o ano 2100 do perfil de velocidades na região da retroflexão da Corrente das Agulhas no experimento A1FI......60

Figura 4.3.2-9 – Transporte de volume na região do escape da retroflexão da Corrente das Agulhas para o experimento clima (H2)......61

Figura 4.6.2-1: Série temporal do calor estocado no volume do oceano entre as seções monitoradas para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha

## 1. INTRODUÇÃO

O tempo e o clima possuem uma importância fundamental no planeta. Ambos influenciam a vida dos seres humanos, seja na saúde, na produção de alimentos ou no bem-estar (IPCC, 2001). O clima é um sistema dinâmico, e como tal, apresenta variabilidades e flutuações ao longo dos anos. Compreender, estudar e prever os processos que desencadeiam tais variabilidades torna-se então essencial para as atividades humanas no planeta.

A determinação da influência humana no clima é complexa, uma vez que essa influência se sobrepõe às variações naturais do sistema climático. Porém, já foi verificado que o homem vem alterando o clima nos últimos cem anos (BERNEM *et al.*, 2010; HOUGHTON, 2004, 2009). Tais alterações vem ocorrendo principalmente através da queima de combustíveis fósseis. Dessa forma, o ser humano tem potencializado o efeito estufa de forma crescente desde o período pré-industrial, promovendo o aquecimento gradual da atmosfera do planeta. Esse aquecimento é transferido para os demais componentes climáticos como os oceanos, potencializando alterações em sua dinâmica (HOUGHTON, 2004).

O sistema climático global é formado pela atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera que são conectados e interagem entre si trocando energia, momentum e massa (GIORGI, 2005; HOUGHTON, 2004; PEIXOTO & OORT, 1992). Esses componentes são influenciados por diversos forçantes; entre eles, o que desempenha o papel mais importante é a radiação solar (IPCC, 2001). No entanto, para o entendimento do sistema climático como um todo e dos processos de interação entre seus componentes, torna-se necessário entender o funcionamento da dinâmica associada a cada componente.

Dois importantes componentes do sistema climático são a atmosfera e a hidrosfera; esta representada principalmente pelos oceanos (HOUGHTON, 2004). A circulação atmosférica tem início em resposta ao aquecimento solar diferenciado sobre o planeta. Esse componente tem como característica a instabilidade a qual, associada com tempo curto de resposta às mudanças

impostas, está relacionada à sua alta compressibilidade, além de baixos valores de densidade e calor específico (IPCC, 2001).

O entendimento da composição atmosférica e de suas alterações é de fundamental importância para as mudanças climáticas, uma vez que os gasesestufa, responsáveis por tornar possível a vida na Terra, representam menos de 2% de sua composição (HOUGHTON, 2004; IPCC, 2001). Ainda de acordo com IPCC (2001), a água é o componente mais variável na atmosfera. Sua fase gasosa é referenciada como o gás-estufa com maior potência. Suas mudanças de fase absorvem, liberam e transportam calor através da própria atmosfera e entre os componentes do sistema climático, fato que torna esse elemento essencial para as variabilidades e mudanças do clima (HOUGHTON, 2004; IPCC, 2001).

A circulação oceânica, impulsionada pela força do vento (circulação superficial) e por gradientes de densidade (circulação Termohalina) redistribui o calor obtido pela atmosfera por todo o globo, amortecendo fortes mudanças de temperatura e funcionando como um grande componente regulador do clima da Terra (HOUGHTON, 2004; IPCC, 2001). Os oceanos possuem uma alta capacidade térmica. Uma coluna d'água de apenas três metros de espessura contém maior capacidade térmica que toda a coluna atmosférica acima. Essa propriedade física permite que os oceanos armazenem e transportem o calor absorvido para as diversas partes da Terra (HOUGHTON, 2004).

Os processos de interação entre a atmosfera e o oceano são essenciais para a distribuição da energia térmica do sol sobre o planeta. A radiação líquida incidente gera ganho de energia nas baixas latitudes e perda de energia nas altas latitudes. Enquanto que a redistribuição dessa energia sobre os continentes é feita exclusivamente pela atmosfera, sobre os oceanos ela é realizada pelo oceano em conjunto com a atmosfera transportando calor para várias regiões da Terra, com o potencial de alterar o clima global. Conhecer e entender os mecanismos de interação entre oceano e atmosfera, assim como os transportes desempenhados por cada um desses componentes em escala global, torna-se fundamental para os estudos climáticos do planeta (ASSAD, 2006, GARLOZI; BARINGER, 2007). Analisando de forma mais específica, os oceanos do hemisfério sul funcionam como um grande reservatório de calor do sistema climático da Terra (ASSAD, 2006). Esse fato está relacionado, dentre outros fatores, com a razão continente/oceano em cada um dos hemisférios e a maior capacidade térmica dos oceanos em relação às porções terrestres. Por essas razões, o hemisfério sul é o grande reservatório de calor da Terra como se observa na figura 1-1 (ASSAD, 2006). Nesta figura está representado o ciclo anual do fluxo de calor resultante na superfície do oceano oriundo da base OMIP (*Ocean Modelling Intercomparasion Project*) (RÖESKE, 2001). Pode-se observar valores negativos nos meses de inverno (austral e boreal) indicando perda de calor para a atmosfera. Em contrapartida, observam-se valores positivos nos meses de verão, indicando ganho de calor pelos oceanos. Nota-se que a curva global acompanha a curva relativa aos oceanos do hemisfério sul, corroborando as informações mencionadas.



Figura 1-1: Ciclo anual do fluxo de calor resultante na superfície do oceano global (vermelho), para o Hemisfério Sul (azul) e para o Hemisfério Norte (verde).

Fonte: Retirado de Assad (2006).

A análise da tabela 1-I nos revela que o fluxo de calor anual para os oceanos do hemisfério sul assume valores positivos, indicando que estão estocando calor ao longo do ano ao contrário dos oceanos do hemisfério norte que perdem calor ao longo do ano (valores negativos). Nota-se que os maiores valores estão associados às bacias do Pacífico Sul e Norte por possuírem as maiores áreas consideradas conforme exposto na figura 1-2.

Tabela 1-I: Fluxo de calor resultante médio anual integrado em PW (1PW =  $10^{15}$ W) na superfície do oceano. Valores positivos indicam ganho de calor.

Área	Fluxo de calor resultante (PW)
Atlântico Equatorial	1,12
Atlântico Norte	-1,9
Atlântico Sul	0,93
Índico	1,76
Pacífico Norte	-2,32
Pacífico Sul	3,93

Fonte: Modificado de Assad (2006).





Fonte: Modificado de Assad (2006).

De acordo com o exposto nos parágrafos anteriores, para o melhor entendimento do sistema climático global, é de fundamental importância que haja o monitoramento dos transportes advectivo de calor e volume oceânicos (GARLOZI; BARINGER, 2007; ASSAD *et al.*, 2009b). Segundo Houghton (2004), mesmo pequenas mudanças nos transportes regionais de calor oceânico podem ter grandes conseqüências nas mudanças climáticas, impulsionando mudanças climáticas em escalas regionais como, por exemplo, o aumento da freqüência de ocorrência de eventos atmosféricos extremos.

O Atlântico sul possui um papel particular na circulação oceânica global por transferir calor para o Atlântico Norte (ASSAD *et al.*, 2009b; BERNEM *et al.*, 2010; CAMPOS *et al.*, 1999; GANACHAUD; WUNSCH, 2000; RINTOUL, 1991), como representado na figura 1-3. Nessa figura está representado o transporte de calor meridional no oceano Atlântico obtido por diferentes fontes (GANACHAUD; WUNSCH, 2003). Apesar das diferenças entre as estimativas dos transportes meridionais de calor, todos indicam valores positivos, ou seja, fluxos para norte ao longo da bacia do Atlântico.



Figura 1-3: Transporte de calor meridional no oceano Atlântico para diversas estimativas em PW (1PW =  $10^{15}$ W). Valores positivos indicam fluxo para norte. As setas representam as regiões onde ocorre ganho ou perda de calor e os números acima delas representam a quantificação da perda ou do ganho, onde vermelho indica ganho de calor pelo oceano e azul indica perda de calor pelo oceano.

Fonte: Retirado de Ganachaud & Wunsch (2003).

De forma geral, obter dados oceanográficos principalmente em grande escala é um trabalho difícil e extremamente custoso e apesar de sua importância, o Atlântico Sul não possui muitos dados medidos quando comparado com outros oceanos (DONNERS *et al.*, 2005). Assim, é imperativo que busquemos alternativas que propiciem uma integralidade na distribuição espacial e temporal de parâmetros oceanográficos. Dessa maneira, a modelagem numérica computacional tenta suprir tal demanda para estudos climáticos que exigem um maior detalhamento espaço-temporal de propriedades dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera e dos oceanos. A modelagem numérica surgiu e tem crescido no meio científico com a finalidade de preencher lacunas que a aquisição de dados criou; além de proporcionar à comunidade científica a possibilidade de fazer previsões e obter estimativas passadas dos processos que lhes interessam hoje. Dessa forma, o estudo e previsão de fenômenos e processos à longo prazo através de modelos climáticos de circulação oceânica tem sido cada vez mais usado por cientistas do mundo inteiro e se constitui em uma tecnologia essencial para a evolução do conhecimento científico (GNANADESIKAN, *et al.*, 2006; PEIXOTO & OORT, 1992).

Apesar de se constituir numa ferramenta que facilita a aquisição de resultados, estes devem ser interpretados com a ciência de que a modelagem não representa realmente a realidade devido às diversas aproximações matemáticas e físicas ao longo da geração dos resultados. É importante ressaltar que os modelos numéricos são sistemas caóticos, ou seja, pequenas variações nas condições iniciais podem desencadear grandes alterações no resultado final (HOUGHTON, 2004). Portanto é de extrema importância que o desenvolvimento e a aplicação de modelos numéricos climáticos sejam realizados conjuntamente com a aquisição de dados oceanográficos e atmosféricos. Além disso, o desenvolvimento de técnicas que possam assimilar tais dados em modelos climáticos também é de fundamental importância a fim de garantir uma melhor representatividade do clima.

Esse trabalho pretende contribuir para o entendimento do clima oceânico comparando o estado médio atual e um possível estado futuro do clima do Atlântico Sul alterado a partir da estimativa dos transportes oceânicos advectivo de calor e volume nessa região a partir de resultados gerados com a aplicação de um modelo climático global.

#### 2. OBJETIVO

Identificar, caracterizar e discutir possíveis alterações nos transportes oceânicos advectivo de calor e volume na bacia do Atlântico Sul para os cenários de mudanças climáticas A1FI e B1 gerado pelo Modelo Climático Acoplado 2.1 (CM 2.1) desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL).

### 2.1. Objetivos específicos

- Identificar as massas d'água presentes nas camadas monitoradas.
- Calcular os transportes advectivo de calor e volume para as seções e camadas delimitadas.
- Estimar anomalias dos transportes citados.
- Estimar a contribuição do balanço de radiação na superfície do oceano
- Estimar o calor estocado no oceano.

#### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

A bacia do Atlântico Sul possui forte interação com os processos de interação ar-mar e os processos oceânicos que ocorrem em bacias adjacentes como as do Índico, do Pacífico Sul e do Atlântico Norte (CAMPOS *et al.*, 1999; DONNERS *et al.*, 2005; GARLOZI; BARINGER, 2007). Desse modo, transformações e mistura de massas d'água no Atlântico Sul podem acarretar impactos na Circulação Termohalina, por onde esse oceano exporta cerca de 15 Sv ( $1Sv = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (DONNERS *et al.*, 2005).

#### 3.1.1. Estimativas do transporte de volume

O oceano Atlântico é receptor de fluxos provenientes do oceano Pacífico, através da Passagem de Drake, e do oceano Índico através do vazamento de águas da retroflexão da Corrente das Agulhas (CA) (BIASTOCH *et al.*, 2009; CAMPOS *et al.*, 1999; GARLOZI; BARINGER, 2007; GORDON, 2003; PETERSON; STRAMMA, 1991). Ganachaud & Wunsch (2000) utilizaram um método hidrográfico inverso e obtiveram os campos de velocidades geostróficas relativas por meio de valores de temperatura e salinidade medidos através das seções monitoradas para o cálculo do transporte de volume e encontraram um transporte de 16±3 Sv em direção ao Equador para a latitude de 32°S no oceano Atlântico.

Rintoul (1991), através de dados hidrográficos históricos e métodos inversos, obteve valores para a corrente de contorno oeste (Corrente do Brasil) de 33 Sv com sentido norte. Ao longo da costa africana, o autor encontrou fluxo para norte de 28,7 Sv acima de 1000 metros e distância de 1000km da costa. Para que haja equilíbrio, os fluxos em direção ao Equador são transportados nas camadas superiores para compensar o fluxo da APAN nas camadas inferiores (ASSAD *et al.*, 2009b; CAMPOS *et al.*, 1999; DONNERS *et al.*, 2005; GARLOZI; BARINGER, 2007; GORDON, 1986; RINTOUL, 1991).

Utilizando um Modelo Global de Circulação Oceânica, Assad *et. al.* (2009b) calcularam os transportes de volume através de diversas seções zonais e meridionais. Em seu trabalho, Assad *et al.* (*op. cit.*) calcularam o transporte de volume integrado na coluna d'água nas seções da passagem de Drake e entre a África e a Antártica. Estimativas de transporte de volume na passagem de Drake na literatura são muito variáveis devido às diferentes técnicas empregadas (ASSAD, 2006). Para essas seções, os autores obtiveram valores de 141,3±11,1 Sv e 143,9±10,8 Sv respectivamente com sentido leste. Resultados semelhantes foram obtidos por Ganachaud & Wunsch (2000) e Rintoul (1991), os quais obtiveram 140±6 Sv e 130±13 Sv respectivamente para a Passagem de Drake.

Garlozi & Baringer (2007) determinaram, através de análises de dados de XBT (*expandable bathythermographs*), valor médio para o transporte de volume da Corrente de Benguela de 23±4 Sv. Para a Corrente do Brasil, os autores encontraram um valor médio de 19±4 Sv.

3.1.2. Estimativas do transporte advectivo de calor

Para o transporte advectivo de calor, Assad *et al.* (2009b) encontraram valores para a latitude de 32°S no oceano Atlântico de 0,60±0,02 PW em direção ao Equador, reforçando as informações anteriores de que o Atlântico Sul transfere calor para o Atlântico Norte. Para a passagem de Drake, foi obtido uma média de 1,52±0,0008 PW que está de acordo com o valor de 1,3 PW obtido por Ganachaud & Wunsch (2000). Para a passagem entre a África e a Antártida foi encontrado um valor de 0,98±0,004 PW por Assad *et al.* (2009b). Para a seção de 32°S, Rintoul (1991) obteve transporte resultante de calor advectivo em direção ao Equador de 0,25 PW.

Garlozi & Baringer (2007), em um cruzeiro transatlântico ao longo da latitude de 35°S encontraram um valor de transporte total de calor de 0,60±0,18 PW através desse paralelo em direção a norte para março de 2004. Para a latitude de 34°20'S, os autores encontraram um valor de 0,49±0,18 PW para maio de 2006.

3.1.3. A circulação do oceano Atlântico Sul

A circulação superficial do Atlântico Sul é dominada pelo vento (PETERSON & STRAMMA, 1991), que em latitudes subtropicais é dominado por um giro subtropical anticiclônico, o Giro Subtropical do Atlântico Sul. O Giro é formado pela Corrente de Benguela (CB), no lado leste do Atlântico Sul, pelo braço sul da Corrente Sul Equatorial (CSE), que atravessa o Atlântico de leste a oeste, pela Corrente do Brasil (CB), que flui em direção sul contornando a costa brasileira e pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), que atravessa o Atlântico de oeste a leste e fecha o giro como representado pela figura 3.1-1. O giro é delimitado ao sul pela Frente Subtropical do Atlântico Sul. Ao sul dessa frente, a Corrente Circumpolar Antártica (CCA) flui por todo o globo.

Aproximadamente entre as latitudes de 36°S e 38°S, a Corrente das Malvinas (CM), formada por um "braço" da CCA, encontra-se com a CB em uma região chamada Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Essa região possui variabilidade sazonal; no inverno a CBM se situa mais ao norte, fortalecida pela CM e no verão se situa mais ao sul, fortalecida pela CB (CAMPOS *et al.*, 1999).

A Convergência Subtropical é conhecida como o limite hidrográfico que separa o Giro Subtropical do Atlântico Sul e a CCA que flui em direção leste e contorna todo o continente antártico (KAMPEL & SILVA JR., 1996; PICKARD, 1974; RUSSEL, 2006). A CCA penetra no Atlântico Sul pela Passagem de Drake e deixa-o através da passagem entre a África e a Antártida. Essa corrente é forçada pela ação dos Ventos de Oeste do hemisfério sul, e através do transporte de Ekman, os ventos de oeste possibilitam a ocorrência de ressurgências na CCA de profundidades de até 2-3km (RUSSEL, 2006).



Figura 3.1.1-1: Representação da circulação superficial do Atlântico Sul. Fonte: Retirado de Campos *et al.*, 1999.

#### 3.2. Resultados utilizados

#### 3.2.1. Métodos utilizados

Para a realização deste trabalho, a aquisição dos resultados do modelo foi feita diretamente através do página do GFDL na *internet*. Os experimentos foram escolhidos de modo que se adequassem aos objetivos do trabalho assim como à viabilidade deste. Eles foram selecionados segundo as suas características, suas condições iniciais e de contorno, as quais foram disponibilizadas também na página do GFDL na *internet*.

Diversos dados foram selecionados. Os dados oceânicos escolhidos foram salinidade, temperatura potencial, velocidade zonal e velocidade meridional. Foram escolhidos também dados atmosféricos para calcular o balanço de radiação na superfície do oceano. Os dados atmosféricos obtidos foram fluxo de calor sensível superficial ascendente, fluxo de onda longa descendente no ar, fluxo de onda longa ascendente no ar, fluxo de onda curta descendente no ar e fluxo de onda curta ascendente no ar.

Para as análises, foi utilizado o Software MatLab 2011a, o Software Ferret e o Microsoft Office 2007. Foram realizadas séries temporais do transporte de volume, transporte advectivo de calor, balanço de radiação, do calor estocado e da temperatura no oceano. Foram realizados também perfis de velocidade e perfis exibindo as camadas de densidade e massas d'água nas seções monitoradas.

As séries temporais apresentam-se em forma de um gráfico xy onde no eixo x está representado o tempo e no eixo y está representado o parâmetro considerado. Para os transportes meridionais, valores no eixo y positivos indicam transporte para norte e valores negativos indicam transporte para sul.

Para os transportes zonais, valores no eixo y positivos indicam transporte para leste e valores negativos indicam transporte para oeste. De forma análoga, na série do balanço de radiação, valores no eixo y positivos indicam transporte para cima e valores negativos indicam transporte para baixo, em direção ao oceano.

Outras análises dos transportes de volume e advectivo de calor foram realizadas comparando-se os anos 2000 do experimento clima, 2050 e 2100 dos experimentos de mudanças climáticas.

Foram realizadas análises espectrais pelo método de Welch. Esse tipo de análise calcula a energia da densidade espectral do sinal de entrada do vetor dividindo os dados em seguimentos sobrepostos. Dessa forma, o método de Welch calcula periodogramas modificados dos segmentos sobrepostos. Na prática, o método permite modificar o grau de liberdade da amostra, o que pode tornar o gráfico mais alisado e, consequentemente, com menos ruídos. Com o método de Welch ganha-se em termos de variância mas perde-se em termos de resolução, e portanto, de polarização (WELCH, 1967).

Informações sobre o modelo climático CM 2.1 cujos resultados foram utilizados no estudo, assim como informações sobre a componente oceânica MOM4, de onde corresponde a fração dos experimentos utilizada podem ser obtidas no Apêndice I do presente estudo.

#### 3.3. Experimentos utilizados

Foram utilizados três experimentos obtidos através do modelo numérico CM2.1. Os experimentos foram obtidos em médias mensais e utilizados em médias anuais. O primeiro é denominado clima ou H2 (CM2.1U-D4\_1860-2000-AllForc\_H2) e caracteriza-se por simular o clima do século XX. O segundo experimento é denominado A1FI (CM2.1U-H2\_SresA1FI\_Z1) e caracteriza-se por ser um experimento de consumo intensivo de combustíveis fósseis. O terceiro experimento é denominado B1 (CM2.1U-H2\_SresB1\_Y1) e caracteriza-se por estabilizar suas concentrações de CO<sub>2</sub> em 550 ppm. Os experimentos foram disponibilizados no *site* do GFDL em 09 de março de 2005 (B1), 25 de agosto de 2005 (clima) e em 19 de janeiro de 2006 (A1FI). Maiores detalhes dos experimentos utilizados podem ser obtidos no Apêndice II do presente estudo.

Os experimentos A1FI e B1 estão representados em duas curvas na figura 3.3-1. Na figura 3.3-1a está representada a série temporal das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> e na figura 3.3-1b está representada a série temporal da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> para diversos experimentos do modelo CM2.1. Pode-se observar na figura 3.3-1a que as emissões de CO<sub>2</sub> do experimento A1FI são maiores do que as emissões do experimento B1. Na figura 3.3-1b pode-se observar que, enquanto o experimento A1FI é o mais crítico dentre todos representados, ou seja, apresenta a maior variação da concentração de CO<sub>2</sub> no mesmo intervalo de tempo, o experimento B1 tende a atingir uma estabilização ao final do período.



Figura 3.3-1: a - Série temporal das emissões antropogênicas de  $CO_2$  em gigatoneladas de carbono (GtC – 1Gt=10<sup>6</sup>t). b – Concentração atmosférica de  $CO_2$  em partes por milhão por volume (ppmv) para os diversos experimentos do modelo CM 2.1.

Fonte: Modificado de Houghton (2009).

### 3.4. Definição das seções monitoradas

Foram definidas uma seção zonal e duas meridionais na bacia do Atlântico Sul através das quais os transportes advectivo de calor e volume foram estimados para os experimentos descritos. As seções monitoradas representam a passagem de Drake; compreendida entre as latitudes 50°S e 70°S e longitude 70°W, a passagem entre a África e a Antártida; compreendida pelas latitudes 30°S e 75°S e longitude 20°E e o paralelo de 25°S, entre as longitudes 70°W e 20°E (Fig 3.4-1).



Figura 3.4-1: Representação do oceano Atlântico Sul com a localização das seções a serem monitoradas.

Nas seções mencionadas, foram adotados intervalos de densidade segundo os quais foram definidas camadas na coluna d'água nas quais os transportes foram estimados. Baseadas na classificação de Schmitz (1996) (Tab. 3.4-I), as camadas de densidade foram geradas com o intuito de representar diferentes massas d'água no Atlântico Sul e podem ser observadas na tabela 3.4-II. Tabela 3.4-I: Intervalos típicos de densidade potencial ( $\delta_{\theta}$ ) para as diferentes massas d'água nos oceanos, onde  $\theta$  representa a temperatura potencial.

Nome da camada da massa d'água	Intervalo $\sigma$ (kg m <sup>-3</sup> )
Água da Camada Superficial	$\sigma_{\theta}$ < 26,5
Água da Camada Superior	$\sigma_{\theta}$ < 26,8
Água Modal Subantártica	$26,5 \le \sigma_\theta \le 27,2$
Água Modal Subantártica Superior	$26,5 \le \sigma_\theta \le 26,8$
Água Modal Subantártica Inferior	$26,8 \le \sigma_\theta \le 27,2$
Água Intermediária Superior	$26,8 \le \sigma_\theta \le 27,2$
Água Intermediária Inferior	$27,2 \leq \sigma_{\theta} \leq 27,5(6)$
Água Intermediária Antártica	$27,2 \leq \sigma_{\theta} \leq 27,5$
Água Intermediária Total	$26,8 \leq \sigma_{\theta} \leq 27,5(6)$
Água Profunda	$27,5(6) \leq \sigma_\theta \leq 27,8$
Água de Fundo	$\sigma_{\theta} > 27,8$

Fonte: Modificado de Schmitz (1996)

Tabela 3.4-II: Intervalos de densidade potencial ( $\sigma_{\theta}$ ) para as camadas escolhidas, onde  $\theta$  representa a temperatura potencial.

Nome da camada	Intervalo σ (kg m <sup>-3</sup> )
Superior	σ <sub>θ</sub> < 26,8
Intermediária	$26,8 \le \sigma_\theta \le 27,5$
Profunda	$27,5 \le \sigma_\theta \le 27,8$
Funda	$\sigma_{\theta}$ > 27,8

A geometria das seções monitoradas, juntamente com as camadas sigma consideradas para a estimativa dos transportes em cada uma delas estão representadas nas figuras 3.4-2, 3.4-3 e 3.4-4, que foram geradas através dos dados de temperatura e salinidade do experimento clima para o ano 2000 (média dos 12 meses).

Nas figuras 3.4-2 e 3.4-3, que representam a geometria da Passagem de

Drake e da passagem África e Antártida respectivamente, podemos observar que as isopicnais estão inclinadas. Esse comportamento pode indicar o transporte de Ekman, forçado pelos ventos de Oeste conduzindo as águas superficiais para fora da CCA e inclinando as isopicnais como descrito por Russel (2006). Por outro lado, na figura 3.4-4, que representa a geometria do paralelo de 25° S, podemos observar que as isopicnais se apresentam quase paralelas, o que indica uma coluna d'água estratificada.



Figura 3.4-2: Representação da seção da Passagem de Drake com as camadas sigma correspondentes para o ano 2000.


Figura 3.4-3: Representação da seção da Passagem África-Antártida com as camadas sigma correspondentes para o ano 2000.



Figura 3.4-4: Representação da seção 25°S com as camadas sigma correspondentes para o ano 2000.

Diversas Massas d'Água foram classificadas por Schmitz (1996) e estão representadas na Tabela 3.4-I através de intervalos de densidade. Algumas delas serão estudadas neste trabalho através das camadas de densidades definidas na Tabela 3.4-II. São elas: Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), na camada superior ( $\sigma_{\theta} < 26,8$ ); Água Intermediária Antártica (AIA), na camada intermediária (26,8  $\leq \sigma_{\theta} \leq 27,5$ ) (SCHMITZ, 1996); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), na camada profunda (27,5  $\leq \sigma_{\theta} \leq$ 27,8) (PICKARD, 1974) e Água de Fundo Antártica (AFA), na camada funda ( $\sigma_{\theta}$ > 27,8) (PICKARD, 1974).

A tabela 3.4-III contém os índices termohalinos das massas d'água estudadas nesse trabalho. É importante ressaltar que os índices termohalinos contidos na tabela 3.4-III são relativos às regiões onde essas massas d'água foram formadas. As figuras 3.4-5, 3.4-6 e 3.4-7 representam os diagramas T-S de cada seção com a identificação das massas d'água estudadas, que foram

geradas através dos dados de temperatura e salinidade do experimento clima para o ano 2000 (média dos 12 meses).

Massa	Poforâncio	Temperatura	Salinidade	Profundidade
d'água	Referencia	(°C)	(ups)	(m)
AT	Emilson (1961)	>20°	36,0	0-200
ACAS	Miranda (1985)	6° <t<20°< td=""><td>34,6<s<36,0< td=""><td>200-900</td></s<36,0<></td></t<20°<>	34,6 <s<36,0< td=""><td>200-900</td></s<36,0<>	200-900
AIA	Sverdrup <i>et al.</i> (1942)	3° <t<6°< td=""><td>34,2<s<34,6< td=""><td>~1000</td></s<34,6<></td></t<6°<>	34,2 <s<34,6< td=""><td>~1000</td></s<34,6<>	~1000
APAN	Silveira <i>et al.</i> (2000)	3° <t<4°< td=""><td>34,6<s<35,0< td=""><td>1500-3000</td></s<35,0<></td></t<4°<>	34,6 <s<35,0< td=""><td>1500-3000</td></s<35,0<>	1500-3000
AFA	American Meteorological Society	por volta de 0,3°	por volta de 34,7	>4000

Tabela 3.4-III: Identificação dos índices termohalinos de diversas massas d'água encontradas no oceano Atlântico Sul.

Pode-se observar na figura 3.4-5 que a única massa d'água encontrada foi a AIA. A APAN não é observada nessa região devido ao trajeto descrito por ela. De acordo com Stramma & England (1999), a APAN é formada no mar de Labrador, entra no oceano Atlântico Sul com sentido sul e desce até a latitude aproximada de 45ºS onde ganha vorticidade negativa e desloca-se para leste.

Ainda na figura 3.4-5, podemos perceber que a AFA não é encontrada nessa região. Essa ausência pode estar relacionada à topografia da região. De acordo com a literatura, a AFA é encontrada abaixo de 4000 metros de profundidade (GARLOZI; BARINGER, 2007) e o modelo representa a profundidade máxima da Passagem de Drake em aproximadamente 4000 metros. Dessa maneira, é possível que a topografia da região funcione como uma barreira para a passagem da AFA.





Na figura 3.4-6, observa-se a ACAS, a AIA e a APAN. A AT não é encontrada nessa região por se tratar de uma massa d'água típica de regiões tropicais. A AFA também não é observada nessa região, o que pode estar relacionado à misturas com outras massas d'água, o que ocasiona perda da identidade com a região de formação.





A figura 3.4-7 representa a AT, a ACAS, a AIA e a APAN no diagrama T-S. A AFA não é observada, relacionado à localização da seção em uma região tropical.



Figura 3.4-7: Representação do diagrama T-S para o ano 2000 da seção do paralelo 25°S com suas respectivas massas d'água.

# 3.5. Estimativas dos transportes e obtenção das anomalias

Os transportes advectivo de calor e volume, através das seções e camadas de densidade anteriormente definidas, foram estimados em médias anuais com a aplicação das equações 3.5.1 e 3.5.2 respectivamente.

$$T_Q = \rho. c_p \int_0^L \int_{-h(z)}^0 v \theta dz dx \qquad (3.5-1)$$

$$T_{v} = \int_{0}^{L} \int_{-h(z)}^{0} v(x, z, t) dz dx \qquad (3.5-2)$$

Onde:

T<sub>Q</sub> – Transporte de Calor

 $T_v$  - Transporte de volume

v - Representa a componente da velocidade normal à seção

- L Limite da dimensão lateral
- -h(z) Limite da dimensão vertical
- z Dimensão vertical
- x Dimensão lateral
- ρ Densidade da água do mar
- θ Temperatura potencial
- c<sub>p</sub> Calor específico da água do mar.

As anomalias referentes às propriedades dinâmicas e termodinâmicas avaliadas anteriormente também foram estimadas à partir da diferença entre os experimentos A1FI e clima e os experimentos B1 e clima (equação 3.5.3).

$$Anomalia = \phi_{A1FI ou B1} - \phi_{clima} \qquad (3.5-3)$$

Onde  $\phi$  é a propriedade considerada.

Além do cálculo dos transportes citados e da estimativa das anomalias referentes a esses transportes, o calor estocado (equação 3.5-4) e a temperatura – quantificada através da média da temperatura nas dimensões horizontais e vertical – na região delimitada pelas seções anteriormente definidas ao longo do tempo.

$$Q = m. c_p. \Delta \theta \qquad (3.5-4)$$

Onde:

Q – Calor

m – Massa

c<sub>p</sub> – Calor específico

Δθ - Temperatura potencial

Através das informações sobre o balanço do fluxo radiativo que chega à superfície do oceano (equação 3.5-5) e da transferência de calor advectivo entre as seções monitoradas, é possível identificar o armazenamento de calor no volume monitorado e quantificá-lo ao longo do tempo frente a cenários de mudanças climáticas.

 $R = H_a + LW_d + LW_a + SW_d + SW_a \qquad (3.5-5)$ 

Onde:

- R Balanço do fluxo radiativo
- Ha Fluxo de calor sensível superficial ascendente
- LW<sub>d</sub> Fluxo de onda longa descendente no ar
- LW<sub>a</sub> Fluxo de onda longa ascendente no ar
- SW<sub>d</sub> Fluxo de onda curta descendente no ar
- SW<sub>a</sub> Fluxo de onda curta ascendente no ar

#### 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dividos em categorias; serão apresentados os resultados da identificação das massas d'água nas camadas de densidade, o transporte de volume e o transporte advectivo de calor, as anomalias dos transportes e o balanço de radiação na superfície do oceano juntamente com a avaliação do estoque de calor no volume monitorado.

## 4.1. Camadas de densidade

O trabalho procurou identificar as massas d'água características do oceano Atlântico Sul; AT, ACAS, AIA, APAN e AFA, a partir dos intervalos típicos de densidade potencial ( $\sigma_{\theta}$ ) definidas originalmente por Schmitz (1996) apresentados na tabela Tabela 3.4-II. Com base nessa tabela, a camada superior seria representada pela AT e ACAS, a camada intermediária seria representada pela AIA, a camada profunda seria representada pela APAN e a AFA seria representada na camada funda.

Os índices termohalinos das massas d'água supracitadas estão apresentados na tabela 3.4-III. Com base nos trabalhos de Cirano *et al.* (2006) e Silveira *et al.* (2000), os índices termohalinos das massas d'água são indicados na tabela 4.1-I. Nessa tabela ainda constam os intervalos de densidade referentes a cada massa d'água calculados a partir dos índices termohalinos.

Massa d'água	Temperatura (°C)	Salinidade (ups)	<b>Densidade (</b> σ)
AT	> 20°	> 36,0	< 25.5248
ACAS	6° < T < 20°	34,6 < S < 36,0	25.5248 < σ < 27.2366
AIA	3° < T < 6°	34,2 < S < 34,6	27.2366 < σ < 27.2465
APAN	3° < T < 4°	34,6 < S < 35,0	27.2465 < σ < 27.7862

Tabela 4.1-I: Índices termohalinos e densidade das massas d'água descritas por Cirano *et al.* (2006) e Silveira *et al.* (2000).

Com os valores de densidade da tabela 4.1-I, foram geradas figuras (Figs. 4.1-1, 4.1-2 e 4.1-3) das geometrias das seções com as isopicnais monitoradas no trabalho (em preto) e as isopicnais referentes às massas d'água descritas na literatura; em azul está representada a isopicnal referente à base da AT, em vermelho está representada a isopicnal referente à base da ACAS, em verde está representada a isopicnal referente à base da AIA e em rosa está representada a isopicnal referente à base da APAN.

Na figura 4.1-1 não são observadas todas as isopicnais relacionadas na tabela 4.1-1. Não é possível observar a isopicnal referente à base da AT, possivelmente devido à localização da região. Além desse fato, não é possível observar a isopicnal referente à base da APAN, assim como não é possível observar a isopicnal referente à base da camada profunda possivelmente devido à geometria da seção pois o modelo representa a profundidade máxima da Passagem de Drake em aproximadamente 4000 metros.



Figura 4.1-1 Geometria da seção da Passagem de Drake com as isopicnais monitoradas e as isopicnais referentes às massas d'água do oceano Atlântico Sul descritas na literatura; vermelho – base da ACAS e verde – base da AIA.

Pode-se observar nas figuras 4.1-2 e 4.1-3 todas as isopicnais referentes às bases das massas d'água descritas na tabela 4.1-I.



Figura 4.1-2: Geometria da seção da Passagem África-Antártida com as isopicnais monitoradas no presente trabalho e as isopicnais referentes às massas d'água do oceano Atlântico Sul descritas na literatura; azul – base da AT, vermelho – base da ACAS, verde – base da AIA e rosa – base da APAN.



Figura 4.1-3: Geometria da seção do paralelo em 25°S com as isopicnais monitoradas no presente trabalho e as isopicnais referentes às massas d'água do oceano Atlântico Sul descritas na literatura; azul – base da AT, vermelho – base da ACAS, verde – base da AIA e rosa – base da APAN.

Em seu trabalho, Stramma & England (1999) descreveram a circulação no Atlântico Sul em diferentes camadas de profundidade. De acordo com os autores, as massas d'água AT e ACAS ocupam os primeiros 500 metros de coluna d'água, a AIA ocupa a coluna d'água entre 500 e 1200 metros e a APAN ocupa de 1200-3900 metros na coluna d'água próximo ao Equador e de 1700 a 3000 metros na coluna d'água na Zona de Confluência Brasil-Malvinas. Analisando a figura 4.1-3 apresentada anteriormente, observa-se que as profundidades das camadas monitoradas no presente trabalho estão de acordo com as definidas por Stramma & England (*op.cit.*).

Ressalta-se que os trabalhos de Silveira *et al.* (2000) e Stramma & England (1999) realizaram uma compilação sobre as informações existentes na literatura e o trabalho de Cirano *et al.* (2006) empregou a modelagem numérica para apresentar seus resultados. Outra consideração a ser feita é que os

trabalhos de Silveira *et al.* (2000) e Cirano *et al.* (2006) tiveram uma abordagem regional ao contrário do trabalho de Stramma & England (1999) que teve uma abordagem mais ampla, englobando a bacia do Atlântico Sul como um todo. Dessa forma, a comparação das camadas monitoradas com a literatura deve ser feita com cautela, pois a origem dos dados influencia os resultados.

# 4.2. Transporte de volume

## 4.2.1. Seção da Passagem de Drake

A figura 4.2.1-1 representa a série temporal média anual do transporte de volume integrado para os experimentos A1FI e B1. Pode-se observar que o transporte de volume tem sentido leste, o que está de acordo com a literatura científica (ASSAD *et al.,* 2009b; GANACHAUD; WUNSCH, 2000; RINTOUL, 1991).

Apesar de apresentarem diferenças interanuais, as duas séries oscilam em torno do valor de controle do experimento clima até próximo a década de 2060. Após esse período, o transporte de ambos os experimentos declina 3,9% no A1FI e 2,9% no B1. Os valores referentes às mudanças supracitadas dos transportes para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.2.1-I.

Os períodos escolhidos para o cálculo das porcentagens de mudança dos parâmetros analisados foram de cinco anos. Essa critério é aplicada em todas as análises temporais. Apesar do período escolhido ser mantido em todas as análises, o mesmo pode ocupar diferentes instantes a fim de se conseguir capturar comportamentos específicos de cada série como: fortes gradientes e picos.



Figura 4.2.1-1: Transporte de volume integrado na seção da Passagem de Drake para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.2.1-I: Médias do transporte de volume para o período de declínio nos experimentos A1FI e B1.

_	Média dos transportes (Sv)						
	2056-2060 2096-210						
A1FI	130,60	126,89					
B1	130,86	127,48					

A figura 4.2.1-2 representa a análise espectral do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Pode-se observar 3 picos de maior energia; o primeiro possui ciclo de 50 anos, o segundo possui ciclo anual (12 meses) e o terceiro possui ciclo semi-anual (6 meses). A seguir, os ciclos anual e semi-anual serão descritos e discutidos.



Figura 4.2.1-2: Análise espectral do transporte de volume integrado na seção da Passagem de Drake para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde) com a identificação temporal dos picos de maior energia.

A figura 4.2.1-3 representa a análise espectral do ciclo anual do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Para o ciclo anual, pode-se observar que a energia dos experimentos de mudanças climáticas é maior do que a energia do experimento clima. Observase também que a energia é maior para o experimento A1FI, o que pode estar relacionado à sua natureza mais crítica.



Figura 4.2.1-3: Análise espectral do ciclo anual do transporte de volume integrado na seção da Passagem de Drake para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde).

A figura 4.2.1-4 representa a análise espectral do ciclo semi-anual do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Diferentemente do que ocorre com o ciclo anual, o ciclo semi-anual apresenta maior energia para o experimento clima.



Figura 4.2.1-4: Análise espectral do ciclo semi-anual do transporte de volume integrado na seção da Passagem de Drake para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde).

4.2.2. Seção da Passagem África-Antártida

A figura 4.2.2-1 representa a série temporal média anual do transporte de volume integrado para os experimentos A1FI e B1. O transporte de volume tem sentido leste, o que está de acordo com a literatura (ASSAD *et al.,* 2009b; GANACHAUD; WUNSCH, 2000; RINTOUL, 1991).

Assim como para a seção da Passagem de Drake, para a seção da passagem entre a África e a Antártida, os transportes para A1FI e B1, apesar de apresentarem diferenças interanuais, oscilam em torno do valor de controle do experimento clima até próximo à década de 2060. Após esse período, o transporte declina 2,72% no A1FI e 2,34% no B1. Os valores referentes às mudanças dos transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.2.1-IV.

Analisando os transportes da Passagem de Drake e da passagem África-Antártica, podemos observar que os transportes de ambos apresentam comportamento semelhante, ocorrendo conservação de massa.



Figura 4.2.2-1: Transporte de volume integrado na seção da passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.2.2-I: Médias do transporte de volume para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes						
	(Sv)						
	2056-2060	2096-2100					
A1FI	129,70	126,17					
B1	129,76	126,72					

A figura 4.2.2-2 representa a análise espectral do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Pode-se observar 3 picos de maior energia; o primeiro possui ciclo de 50 anos, o segundo possui ciclo anual (12 meses) e o terceiro possui ciclo semi-anual (6 meses). As análises espectrais dos ciclos da seção da Passagem África-Antártida apresentam comportamento semelhante com os ciclos da Passagem de Drake e não serão apresentados nesse documento.



Figura 4.2.2-2: Análise espectral do transporte de volume integrado na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde) com a identificação temporal dos picos de maior energia.

# 4.2.3. Seção no paralelo 25°S

A figura 4.2.3-1 representa a série temporal média anual do transporte de volume integrado para os experimentos A1FI e B1. O transporte de volume integrado em 25°S apresenta flutuações de sentido; no começo e final da série, o transporte integrado desloca-se para sul e na seção mais central da série, o transporte integrado desloca-se para norte. Esse comportamento indica que o escoamento não apresenta o mesmo sentido em toda a coluna d´água como ocorre com a seção da Passagem de Drake e a seção da passagem África-Antártida, o que pode levar à erros de estimativa.



Figura 4.2.3-1: Transporte de volume integrado na seção em 25°S para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

A figura 4.2.3-2 representa a análise espectral do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Podemos observar 4 picos de maior energia: o primeiro possui ciclo de 50 anos, o segundo possui ciclo anual (12 meses), o terceiro possui ciclo semi-anual (6 meses) e o quarto, ausente nas demais seções e com a menor energia, possui ciclo de 3 meses. A seguir, os ciclos anual, semi-anual e de 3 meses serão descritos e discutidos um a um.



Figura 4.2.3-2: Análise espectral do transporte de volume integrado na seção do paralelo 25°S para os experimentos H2 (vermelho), A1FI (azul) e B1 (verde) com a identificação temporal dos picos de maior energia.

A figura 4.2.3-3 representa a análise espectral do ciclo de anual do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Diferentemente das seções anteriores, para o ciclo anual, observa-se maior energia no experimento B1 e clima e menor energia para o experimento A1FI.



Figura 4.2.3-3: Análise espectral do ciclo de 12 meses do transporte de volume integrado na seção do paralelo 25°S para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde).

A figura 4.2.3-4 representa a análise espectral do ciclo de semi-anual do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Diferentemente das seções anteriores, para o ciclo semi-anual, observa-se maior energia para o experimento A1FI e menor energia para o experimento B1. O experimento clima apresenta energia intermediária aos experimentos de mudanças climáticas.



Figura 4.2.3-4: Análise espectral do ciclo de 6 meses do transporte de volume integrado na seção do paralelo 25°S para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde).

A figura 4.2.3-5 representa a análise espectral do ciclo de 3 meses do transporte de volume integrado para os três experimentos (clima, A1FI e B1). Para o ciclo de 3 meses, observa-se que o experimento clima apresenta maior energia e que o experimento B1 apresenta menor energia. O experimento A1FI apresenta valores de energia intermediários aos experimentos anteriormente citados.



Figura 4.2.3-5: Análise espectral do ciclo de 3 meses do transporte de volume integrado na seção do paralelo 25°S para os experimentos H2 (vermelho - clima), A1FI (azul) e B1 (verde).

A tabela 4.2.3-I apresenta as médias e variâncias do transporte de volume por camadas para os experimentos A1FI e B1 divididos em períodos de 20 anos. Observa-se na Seção da Passagem de Drake e da Passagem África-Antártida que os transportes na camada superior aumentam continuamente até o final do período para ambos os experimentos. Na camada intermediária o transporte do Drake para o experimento A1FI declina continuamente. Para o experimento B1, observa-se declínio até a década de 2060, apresentando acréscimo gradual logo depois.

Na África-Antártida, o transporte de volume na camada intermediária para o experimento A1FI oscila em torno do valor médio de 52 Sv. O transporte de volume na camada intermediária para o experimento B1 se comporta de maneira diferenciada, apresentando aumento contínuo até o final do período analisado. O transporte de volume na camada funda para o Drake e África-Antártida declina continuamente até o final do período para ambos os experimentos. Na camada funda o transporte de volume na África-Antártida apresenta diminuição do começo ao final do período analisado.

Na seção do paralelo 25°S, o transporte de volume na camada superior para o experimento A1FI diminui continuamente até o final do período estudado. O transporte nessa camada para o experimento B1 oscila em torno do valor de 12 Sv durante o período de 100 anos. Na camada intermediária, os transportes de volume diminuem continuamente até o final do período considerado para ambos os experimentos. Por outro lado, os transportes de volume nessa seção na camada profunda apresentam aumento contínuo até o final do período para ambos os experimentos, ressaltando-se que o transporte do experimento A1FI diminui nos últimos 20 anos do período analisado. O transporte de volume na camada funda declina continuamente para ambos os experimentos nessa seção.

A tabela 4.2.3-II apresenta as médias e variâncias do transporte de volume integrado na coluna d'água para os experimentos A1FI e B1 divididos em períodos de 20 anos. Observa-se que os transportes de volume integrado na coluna d'água para as três seções monitoradas refletem o comportamento das camadas monitoradas e são formados por uma composição destas.

		SEÇÕES											
PERIODO/ TRANSPORTE (Sv)		DRAKE			AF-AA			25°S					
	CAWADAS	A1	A1FI B1		A1FI		B1		A1FI		B1		
		Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var
	SUP	8,04	0,90	8,32	0,52	3,50	0,45	3,69	0,30	12,80	0,93	12,58	0,39
2004 2020	INT	63,47	0,85	63,10	0,78	52,30	0,72	51,95	0,79	5,11	0,20	4,98	0,08
2001-2020	PROF	62,05	2,42	60,30	2,14	69,78	1,87	68,13	1,65	-5,09	0,16	-5,22	0,09
	FUN	-	-	-	-	7,04	0,40	7,06	0,41	-13,00	0,82	-12,43	0,66
	SUP	10,94	4,50	9,54	2,86	4,96	0,71	4,57	0,77	12,72	0,42	12,58	0,90
2024 2040	INT	61,65	3,75	62,74	3,32	52,64	1,50	53,21	0,66	4,18	0,09	4,18	0,13
2021-2040	PROF	60,49	2,28	60,22	1,89	68,18	4,46	67,54	3,47	-5,60	0,16	-5,51	0,10
	FUN	-	-	-	-	6,30	0,69	6,17	0,27	-11,19	0,76	-11,11	1,23
	SUP	14,83	2,23	11,46	3,80	7,71	2,38	5,84	0,78	12,54	0,83	12,41	1,03
2044 2060	INT	58,88	1,94	62,17	3,14	51,76	1,09	54,24	0,52	3,38	0,16	3,43	0,06
2041-2000	PROF	58,01	3,62	59,13	3,44	67,00	4,40	67,02	5,68	-6,00	0,13	-6,12	0,20
	FUN	-	-	-	-	4,28	0,95	4,64	0,68	-9,69	1,04	-9,34	1,02
	SUP	17,63	3,78	14,34	3,93	10,24	2,01	7,82	0,72	12,49	0,45	12,19	0,72
2061 2090	INT	57,62	2,84	60,75	3,20	52,64	1,78	54,40	1,00	2,53	0,31	2,64	0,12
2001-2000	PROF	52,62	2,43	54,45	1,77	61,92	2,63	63,79	2,33	-6,64	0,07	-6,89	0,11
	FUN	-	-	-	-	2,23	0,43	2,65	1,16	-8,46	0,63	-7,62	0,70
2081-2100	SUP	20,61	3,67	15,67	3,91	13,81	2,13	8,45	2,51	12,46	0,58	12,38	0,71
	INT	57,95	3,38	60,87	2,68	52,67	0,92	56,35	1,52	0,64	0,18	1,98	0,22
	PROF	48,73	4,69	51,05	3,09	59,71	4,70	61,00	2,37	-6,21	0,06	-6,93	0,21
	FUN	-	-	-	-	0,36	0,56	0,97	0,32	-7,15	0,75	-7,44	0,84

Tabela 4.2.3-I: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de volume por camada dos experimentos A1FI e B1.

PERÍODO/ TRANSPORTE (Sv)						SEÇ	ÕES						
		DR	AKE		AF-AA				25°S				
	A1FI		В	B1		A1FI		B1		A1FI		B1	
	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	
2001-2020	133,55	2,21	131,73	1,91	132,61	2,19	130,82	2,07	-0,18	0,03	-0,09	0,03	
2021-2040	133,07	3,40	132,50	2,46	132,07	3,50	131,48	2,48	0,10	0,04	0,14	0,04	
2041-2060	131,71	3,33	132,75	3,42	130,74	3,40	131,75	3,72	0,22	0,04	0,38	0,03	
2061-2080	127,87	1,43	129,53	2,64	127,03	1,53	128,66	2,77	-0,08	0,04	0,33	0,03	
2081-2100	127,28	1,11	127,58	3,55	126,56	1,20	126,78	3,70	-0,26	0,04	-0,01	0,03	

Tabela 4.2.3-II: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de volume integrado dos experimentos A1FI e B1.

## 4.3. Anomalia do transporte de volume

A figura 4.4.1-1 representa a anomalia do transporte de volume integrado do ano 2050 em relação ao ano 2000 para os experimentos A1FI e B1. Em todas as seções observa-se diminuição do transporte no experimento A1FI e aumento no experimento B1.



Figura 4.4.1-1: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de volume integrado para os experimentos A1FI e B1. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima. Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.1-2 será utilizada como base de comparação das anomalias do transporte de volume por camada para os experimentos A1FI e B1.



Figura 4.4.1-2: Transporte de volume por camada para o experimento clima (H2) para o ano 2000.

A figura 4.4.1-3 representa a anomalia do transporte de volume por camada do ano 2050 em relação ao ano 2000 para o experimento A1FI. Nas seções da Passagem de Drake e da África-Antártida observa-se aumento na camada superior e diminuição nas demais camadas. Na seção do paralelo 25°S, as camadas intermediária e funda, apresentam diminuição do transporte enquanto que as camadas superior e profunda apresentam aumento do transporte.

Na seção da Passagem de Drake e da África-Antártida, o transporte integrado diminui devido à diminuição das camadas intermediária e profunda. Na seção do paralelo 25ºS, o transporte integrado diminui devido à diminuição das camadas intermediária e funda apresentam em contrapartida ao aumento das camadas superior e profunda.





Figura 4.4.1-3: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de volume por camada para o experimento A1FI. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.1-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.1-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.1-4 representa a anomalia do transporte de volume por camada do ano 2050 em relação ao ano 2000 para o experimento B1. Nas seções da Passagem de Drake e da África-Antártida, com exceção das camadas superior e intermediária, as demais camadas nessas seções apresentam diminuição no ano 2050 em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25°S, com exceção da camada profunda, as demais camadas nessa seção apresentam diminuição do transporte de volume no ano 2050 em relação ao ano 2000.

Na seção da Passagem de Drake, o aumento do transporte de volume integrado deve-se ao aumento do transporte nas camadas superior e intermediária. Na seção da Passagem África-Antártida, o aumento do transporte de volume integrado deve-se ao maior aumento das camadas superior e intermediária do que a diminuição das camadas profunda e funda. Na seção do paralelo 25°S, a diminuição do transporte de volume integrado

deve-se à diminuição das camadas superior, intermediária e funda nessa seção.



Figura 4.4.1-4: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de volume por camada para o experimento B1. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.1-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.1-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.1-5 representa a anomalia do transporte de volume integrado do ano 2100 em relação ao ano 2000 para os experimentos A1FI e B1. Observa-se diminuição do transporte de volume no experimento B1 em todas as seções. Nas seções da Passagem de Drake e da África-Antártida, os transportes de volume diminuem em igual proporção obedecendo à Lei da Conservação de Massa. Na seção do paralelo 25°S, há aumento do transporte para o experimento A1FI e diminuição para o experimento B1.



Figura 4.4.1-5: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de volume integrado para os experimentos A1FI e B1. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima. Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.1-6 representa a anomalia do transporte de volume por camada do ano 2100 em relação ao ano 2000 para o experimento A1FI. Na seção do Drake, apenas a camada superior apresenta aumento. Já na seção da África-Antártida, as camadas superior e intermediária apresentam aumento enquanto que as camadas profunda e funda apresentam diminuição do transporte no ano 2100 em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25°S há aumento do transporte nas camadas superior e profunda e diminuição nas camadas intermediária e funda.

Na seção da Passagem de Drake, o transporte integrado diminui devido à diminuição das camadas intermediária e profunda. Na seção da Passagem África-Antártida, a diminuição do transporte de volume integrado deve-se à diminuição das camadas profunda e funda em comparação ao aumento das camadas superior e intermediária. Na seção do paralelo 25ºS, a anomalia do transporte integrado intensifica-se. Tal fato parece estar associado ao aumento

observado para as camadas superior e profunda em relação à diminuição observada camadas intermediária е funda. Analisando para as percentualmente, a camada intermediária, que apresentava escoamento para norte, apresentou uma diminuição de mais de 100%. Dessa forma, mesmo a camada funda, que apresenta escoamento para sul, apresentando enfraquecimento aproximado de 50%, há fortalecimento do transporte de volume integrado para sul.



Figura 4.4.1-6: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de volume por camada para o experimento A1FI. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.1-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.1-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.1-7 representa a anomalia do transporte de volume por camada do ano 2100 em relação ao ano 2000 para o experimento B1. Na seção do Drake, apenas a camada superior apresenta aumento. Já na seção da África-Antártida, as camadas superior e intermediária apresentam aumento enquanto que as camadas profunda e funda apresentam diminuição do transporte no ano 2100 em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25°S há aumento do transporte apenas na camada profunda.

Na seção da Passagem de Drake, o transporte integrado diminui devido à diminuição das camadas intermediária e profunda. Na seção da Passagem África-Antártida, a diminuição do transporte de volume integrado deve-se à diminuição das camadas profunda e funda em comparação ao aumento das camadas superior e intermediária. Na seção do paralelo 25ºS, o transporte de volume integrado enfraquece devido à diminuição das camadas superior, intermediária e funda.



Figura 4.4.1-7: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de volume por camada para o experimento B1. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.1-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.1-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

## 4.4. Transporte advectivo de calor

#### 4.4.1. Seção na Passagem de Drake

A figura 4.3.1-1 representa a série temporal média anual do transporte de calor integrado para os experimentos A1FI e B1. O transporte de calor desloca-se para leste em toda a série. Esse resultado está de acordo com a literatura (ASSAD *et al.,* 2009b; GANACHAUD; WUNSCH, 2000; RINTOUL, 1991) e com os resultados do transporte de volume, já que trata-se aqui do transporte advectivo de calor.

Pode-se observar que o transporte de calor aumenta continuamente até o final da série, entretanto a partir de meados da série, os valores do transporte de calor para cada experimento diferem de forma mais pronunciada. Em um primeiro momento, há aumento de 13,57% no experimento A1FI e de 7,42% no experimento B1. A partir da década de 2060, há um aumento de 9,81% no experimento A1FI e de 4,24% no experimento B1.

As diferenças nos valores do transporte de volume entre os experimentos podem ser atribuídas às características intrínsecas aos experimentos, como já dito anteriormente em outros tópicos. Os valores referentes às mudanças dos transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.3.1-I.



Figura 4.3.1-1 – Transporte de calor integrado na seção da Passagem de Drake para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.3.1-I: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes (PW)								
	2001-2005	2056-2060	2096-2100						
A1FI	1,52	1,73	1,90						
B1	1,53	1,64	1,71						
	A1FI B1	Média do 2001-2005 A1FI 1,52 B1 1,53	Média dos transporte2001-20052056-2060A1FI1,521,73B11,531,64						

# 4.4.2. Seção na Passagem África-Antártida

A figura 4.3.2-1 representa a série temporal média anual do transporte de calor integrado para os experimentos A1FI e B1. Assim como na passagem de Drake, na Passagem África-Antártida, o transporte de calor desloca-se para leste em toda a série, o que está de acordo com a literatura e com o transporte de volume estimado.

Pode-se observar que o transporte de calor integrado na seção da Passagem África-Antártida aumenta a partir de 2020 até o final da série. A partir de meados da década de 2070, os experimentos começam a apresentar maior diferença de comportamento entre eles. O experimento A1FI apresenta um aumento mais evidente nessa última etapa da série do que o experimento B1. Como dito anteriormente, essa diferença pode ser atribuída à natureza mais crítica do experimento A1FI em comparação com o experimento B1.

Entre as décadas de 2020 e meados de 2070 o transporte de calor aumenta 15,77% no experimento A1FI e 17,18% no experimento B1. A partir de meados da década de 2070, o transporte aumenta 9,54% no experimento A1FI e 5,45% no experimento B1. Os valores referentes às mudanças dos transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.3.2-I.


Figura 4.3.2-1 – Transporte de calor integrado na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.3.2-I: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes (PW)						
	2016-2020	2071-2075	2096-2100				
A1FI	1,49	1,73	1,89				
B1	1,43	1,68	1,77				

A figura 4.3.2-2 representa a série temporal média anual do transporte de calor da Corrente das Agulhas na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI e B1. Pode-se observar que o transporte aumenta continuamente durante todo o período para ambos os experimentos. Há aumento de 183,26% para o experimento A1FI e de 112,33% para o experimento B1. Os valores referentes às mudanças dos transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.3.2-II.



Figura 4.3.2-2 – Transporte de calor da retroflexão da Corrente das Agulhas na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.3.2-II: Médias do transporte de volume para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes						
	(PW)						
	2001-2005	2096-2100					
A1FI	-0,04	-0,12					
B1	-0,04	-0,09					

O escoamento da Retroflexão da CA também pode ser visualizado na figura 4.3.2-3. Essa figura representa a série temporal média anual do transporte de calor na camada superior para os experimentos A1FI e B1. Há um decréscimo do transporte a partir da década de 2020 até a década de 2070. A partir daí o transporte de calor na camada superior tende a aumentar. O experimento A1FI exibe um aumento maior a partir dessa década em comparação com o experimento B1. Os valores referentes às mudanças dos

transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.3.2-III.

É importante observar que na maior parte da série, o transporte de calor na camada superior desloca-se para oeste. Esse escoamento está associado com a retroflexão da CA (Fig. 4.3.2-4) que injeta água quente e salina no oceano Atlântico Sul. (BIASTOCH *et al.*, 2009; GORDON, 2003; PETERSON; STRAMMA, 1991). Essa injeção é de fundamental importância para a circulação global (GORDON, 1986; GORDON, 1985 *apud* PETERSON; STRAMMA, 1991) e para o *Meridional Overturning Circulation* do Atlântico (*MOC*) (BIASTOCH *et al.*, 2009; GORDON, 2003).



Figura 4.3.2-3 – Transporte de calor na camada superior na seção da Passagem África-Antártida para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.3.2-III: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes (PW)						
	2016-2020	2071-2075	2096-2100				
A1FI	-0,13	0,06	0,15				
B1	-0,15	-0,05	0,03				



Figura 4.3.2-4 – Esquema dos oceanos Atlântico Sul e Índico com a representação da Retroflexão da Corrente das Agulhas (em vermelho) na Passagem África Antártida.

Fonte: Modificado de Gordon (2003).

No final da série, observa-se uma tendência de mudança de sentido do transporte de calor, ou seja, o deslocamento do calor associado ao escape de água proveniente da retroflexão da CA não é mais observado. Isolando-se a região do escape da CA através do perfil vertical de velocidades (Fig. 4.3.2-5), pode-se observar o comportamento desse fenômeno em uma série temporal do transporte de volume dos experimentos A1FI e B1 (Fig. 4.3.2-6).

Através dessa figura, pode-se observar que o transporte de volume na região da retroflexão da CA intensifica-se ao longo dos experimentos de mudanças climáticas e esse aumento é maior para o experimento A1FI em comparação com o B1. Essa intensificação também pode ser observada através dos perfis de velocidade dos experimentos A1FI (Fig. 4.3.2-7) e B1 (Fig. 4.3.2-8) em comparação com o experimento clima (Fig. 4.3.2-5).

Esse resultado está de acordo com o obtido por Biastoch *et al.* (2009) que estimaram, através de um modelo de alta resolução, o aumento do vazamento de água para o oceano Atlântico Sul através da retroflexão da CA. Segundo os autores, esse aumento estaria relacionado ao enfraquecimento da Corrente das Agulhas e ao deslocamento dos ventos de Oeste em direção ao pólo Sul por efeitos antropogênicos. Ainda segundo os autores, esses efeitos

são históricos, o que também está de acordo com os resultados do presente estudo (Fig. 4.3.2-9) e seriam acelerados durante o século XXI. Dessa forma, observa-se, através das informações expostas anteriormente, que os transportes advectivo de calor e de volume, associados ao escape das águas provenientes da retroflexão da CA, estão se intensificando.

A ausência do sinal da retroflexão da CA no final da série do transporte de calor (Fig. 4.3.2-3) está associada ao aumento desse transporte em sentido leste, o que indica fortalecimento da CCA na camada superior.



Figura 4.3.2-5: Média para o ano 2000 do perfil de velocidades na região da retroflexão da Corrente das Agulhas no experimento clima (H2).



Figura 4.3.2-6 – Transporte de volume na região do escape da retroflexão da Corrente das Agulhas para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.



Figura 4.3.2-7: Média para o ano 2100 do perfil de velocidades na região da retroflexão da Corrente das Agulhas no experimento A1FI.



Figura 4.3.2-8: Média para o ano 2100 do perfil de velocidades na região da retroflexão da Corrente das Agulhas no experimento B1.



Figura 4.3.2-9 – Transporte de volume na região do escape da retroflexão da Corrente das Agulhas para o experimento clima (H2).

### 4.4.3. Seção do paralelo 25°S

A figura 4.3.3-1 representa a série temporal média anual do transporte de calor integrado para os experimentos A1FI e B1. O transporte de calor integrado no paralelo 25°S desloca-se para norte em toda série. Esse resultado corrobora os estudos que caracterizam o oceano Atlântico Sul como um transportador de calor para o oceano Atlântico Norte (ASSAD *et al.*, 2009b; BERNEM *et al.*, 2010; CAMPOS *et al.*, 1999; GANACHAUD; WUNSCH, 2000; RINTOUL, 1991).

O transporte de calor integrado apresenta alta variabilidade interanual e decréscimo suave ao longo da série. Pode-se observar do início ao final da série, decréscimo de 11,39% para o experimento A1FI e de 12,66% para o experimento B1. Os valores referentes às mudanças dos transportes citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.3.3-I.



Figura 4.3.3-1 – Transporte de calor integrado na seção do paralelo 25°S para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.3.3-I: Médias do transporte de calor para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Média dos transportes					
	(PV	V)				
	2001-2005	2096-2100				
A1FI	0,68	0,60				
B1	0,67	0,59				

A tabela 4.3.3-III apresenta as médias e variâncias do transporte advectivo de calor por camadas para os experimentos A1FI e B1 divididos em períodos de 20 anos. O transporte advectivo de calor na camada superior da Passagem de Drake aumenta continuamente até o final do período analisado para ambos os experimentos. Na camada intermediária, os transportes advectivos de calor apresentam flutuações de aumento e diminuição dos transportes durante o período analisado para ambos os experimentos. O transporte advectivo de calor na camada funda para o experimento A1FI diminui continuamente até o final do período. Já para o experimento B1, o transporte advectivo de calor aumenta até a década de 2060 e, após esse período, diminui até 2100.

Para a Passagem África-Antártida, o transporte advectivo de calor diminui continuamente até a década de 2060 para ambos os experimentos. Após esse período, para o experimento A1FI, o transporte advectivo de calor muda de sentido e aumenta até 2100. Para o experimento B1, o transporte continua a diminuir até 2100. Na camada intermediária, os transportes advectivo de calor aumentam continuamente até o final do período para ambos os experimentos. O transporte advectivo de calor se comporta de maneira diferenciada na camada profunda para os dois experimentos. Para o experimento A1FI, o transporte aumenta continuamente até a década de 2080 e diminui até 2100. O transporte para o experimento B1 oscila durante todo o período estudado em torno do valor médio de 0,645 PW. Na camada funda, o transporte advectivo de calor diminui continuamente até o final do período estudado para ambos os experimentos.

Para seção do Paralelo 25°S, o transporte advectivo de calor na camada superior, para o experimento A1FI, aumenta continuamente até a década de 2080 e declina em seguida. Para o experimento B1, o transporte oscila durante o período estudado em torno do valor médio de 0,853 PW. Na camada intermediária, o transporte advectivo de calor diminui continuamente até o final do período para ambos os experimentos. O transporte advectivo de calor na camada profunda, para o experimento A1FI, aumenta continuamente até a década de 2080 para ambos os experimentos e declina em seguida para o experimento A1FI, aumenta continuamente até a década de 2080 para ambos os experimentos e declina em seguida para o experimento A1FI. Já na camada funda, o transporte advectivo de calor diminui continuamente até o final do período para ambos os experimentos.

A tabela 4.3.3-IV apresenta as médias e variâncias do transporte advectivo de calor integrado na coluna d'água para os experimentos A1FI e B1 divididos em períodos de 20 anos. Observa-se que os transportes advectivos de calor integrado na coluna d'água para as três seções monitoradas refletem o comportamento das camadas monitoradas e são formados por uma composição destas.

63

Tabela 4.3.3-III: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de calor por camada dos experimentos A1FI e B1.

		SEÇÕES											
			DR	AKE		AF-AA				25°S			
PERIODO/ TRANSPORTE (3V)	CAWADAS	<b>A</b> 1	IFI	B1		<b>A</b> 1	IFI	В	51	A1FI		B1	
		Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var
2001-2020	SUP	0,165183	0,003298	0,169156	0,001857	-0,14973	0,000931	-0,14692	0,000389	0,86304	0,005943	0,853496	0,003385
	INT	0,969802	0,000833	0,963788	0,000739	0,869049	0,000431	0,861495	0,000126	0,177199	0,000221	0,174207	6,57E-05
	PROF	0,427099	0,000129	0,417265	4,6E-05	0,640717	6,74E-05	0,63164	9,08E-05	-0,12301	0,000117	-0,12444	6,74E-05
	FUN	-	-	-	-	0,090868	2,28E-05	0,09075	3,68E-05	-0,22659	0,000155	-0,22365	0,000113
2021-2040	SUP	0,240161	0,002441	0,218328	0,001769	-0,10127	0,00118	-0,09323	0,001033	0,871241	0,003226	0,865675	0,005849
	INT	0,960804	0,000501	0,954714	0,000646	0,909847	0,000279	0,908325	0,000118	0,15101	0,000131	0,152419	0,000127
	PROF	0,424904	0,000108	0,422998	6,76E-05	0,645964	0,000225	0,653792	0,000109	-0,14028	0,000143	-0,13952	0,000116
	FUN	-	-	-	-	0,082091	8,09E-05	0,079804	3,39E-05	-0,20486	0,000121	-0,2038	0,000148
2041-2060	SUP	0,338226	0,004671	0,276977	0,001428	-0,05566	0,001741	-0,06885	0,000512	0,87201	0,00708	0,845873	0,00855
	INT	0,946334	0,00187	0,959727	0,000436	0,971368	0,000736	0,985704	0,00163	0,130551	0,000161	0,13088	6,09E-05
	PROF	0,420016	0,000141	0,429544	9,64E-05	0,648279	0,000122	0,64172	8,95E-05	-0,15786	9,13E-05	-0,15809	0,000133
	FUN	-	-	-	-	0,059271	0,000122	0,065749	3,49E-05	-0,18175	0,000244	-0,18108	0,000181
2061-2080	SUP	0,437631	0,00445	0,314421	0,001371	0,029123	0,006682	-0,04685	0,000636	0,882468	0,003841	0,841813	0,005831
	INT	0,920057	0,001023	0,970069	0,000681	0,986332	0,00072	1,040168	0,000569	0,102677	0,00029	0,109368	0,000102
	PROF	0,397608	0,000121	0,403696	0,000124	0,659511	0,000123	0,642257	9,41E-05	-0,17402	6,02E-05	-0,1796	8,54E-05
	FUN	-	-	-	-	0,032392	2,98E-05	0,040053	0,000119	-0,15178	0,000189	-0,15095	0,000108
	SUP	0,526738	0,002694	0,346414	0,003625	0,139142	0,004148	-0,02247	0,003642	0,875837	0,00524	0,859133	0,005557
2081-2100	INT	0,959593	0,001496	0,975281	0,001536	1,058049	0,003257	1,07063	0,000403	0,045794	0,000363	0,091513	0,00018
	PROF	0,371125	0,00029	0,387779	0,000136	0,652505	0,000191	0,654332	5,73E-05	-0,16969	7,62E-05	-0,18723	0,000143
	FUN	-	-	-	-	0,013252	5,38E-05	0,022655	3,12E-05	-0,12709	0,00013	-0,14107	0,000131

_		SEÇÕES										
PERÍODO/		DRAKE AF-AA						25°S				
IRANSPORTE (PW)	<b>A</b> 1	1FI	E	81	A	IFI	B	81	A	IFI		B1
()	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var	Média	Var
2001-2020	1,56	0,0020	1,55	0,0011	1,45	0,0019	1,44	0,0006	0,69	0,0037	0,68	0,002552
2021-2040	1,63	0,0027	1,60	0,0018	1,54	0,0007	1,55	0,0018	0,68	0,0022	0,67	0,003967
2041-2060	1,70	0,0020	1,67	0,0017	1,62	0,0016	1,62	0,0009	0,66	0,0050	0,64	0,005864
2061-2080	1,76	0,0016	1,69	0,0010	1,71	0,0037	1,68	0,0009	0,66	0,0027	0,62	0,004059
2081-2100	1,86	0,0018	1,71	0,0024	1,86	0,0027	1,73	0,0026	0,62	0,0037	0,62	0,00385

Tabela 4.3.3-VI: Médias e variâncias de 20 em 20 anos do transporte de calor integrado dos experimentos A1FI e B1.

#### 4.5. Anomalia do transporte advectivo de calor

A figura 4.4.2-1 representa a anomalia do transporte de calor integrado do ano 2050 em relação ao ano 2000 para os experimentos A1FI e B1. A anomalia do transporte de calor nas seções da Passagem de Drake e da África-Antártida, diferentemente da anomalia do transporte de volume, apresenta aumento para ambos os experimentos, o que sugere disponibilidade de calor a ser transportado. Na seção do paralelo 25ºS, o experimento A1FI apresenta aumento enquanto que o experimento B1 apresenta diminuição.



Figura 4.4.2-1: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de calor integrado para os experimentos A1FI e B1. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima. Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.2-2 será utilizada como base de comparação das anomalias do transporte de volume por camada para os experimentos A1FI e B1.



Figura 4.4.2-2: Transporte de volume por camada para o experimento clima (H2) para o ano 2000.

A figura 4.4.2-3 representa a anomalia do transporte de calor por camada do ano 2050 em relação ao ano 2000 para o experimento A1FI. Observa-se que na seção da Passagem de Drake as camadas superior e profunda apresentam aumento do transporte em relação ao ano 2000 enquanto que a camada intermediária apresenta redução do transporte de calor. Na seção da Passagem África-Antártida, observa-se que as camadas superior e funda apresentam diminuição e camadas intermediária e profunda apresentam aumento do transporte de calor em relação ao ano 2000.

Na seção do paralelo 25°S, observa-se que as camadas superior e profunda apresentam aumento do transporte de calor em relação ao ano 2000 e as camadas intermediária e funda apresentam diminuição do transporte de calor em relação ao mesmo ano. Com exceção da camada funda, esses resultados estão de acordo com os encontrados para a anomalia do transporte de volume. A diminuição do transporte de calor na camada funda pode estar associado à menor disponibilidade de calor no Atlântico Norte para ser transportado para o Atlântico Sul.

Na seção da Passagem de Drake, o aumento do transporte de calor integrado está associado ao aumento nas camadas superior e profunda. Na seção da Passagem África-Antártida, o aumento do transporte integrado deve-se ao maior aumento das camadas intermediária e profunda em comparação com a diminuição das camadas superior e funda. Na seção do paralelo 25°S, o aumento do transporte de calor integrado pode estar associado ao aumento do transporte advectivo de calor nas camadas superior e profunda em comparação com a diminuição nas camadas intermediária e funda.



Figura 4.4.2-3: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de calor por camada para o experimento A1FI. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.2-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.2-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.2-4 representa a anomalia do transporte de calor por camada do ano 2050 em relação ao ano 2000 para o experimento B1. Observa-se que na seção da Passagem de Drake, as camadas superior e profunda apresentam aumento do transporte em relação ao ano 2000 enquanto que a camada intermediária apresenta redução do transporte de calor.

Na seção da Passagem África-Antártida observa-se que as camadas profunda e funda apresentam diminuição do transporte de calor em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25ºS observa-se também que, com exceção da camada profunda, as demais apresentam diminuição do transporte de calor em relação ao ano 2000.

Na seção da Passagem de Drake, o aumento do transporte de calor integrado está associado ao aumento nas camadas superior e profunda. Na seção da Passagem África-Antártida, o aumento do transporte integrado deve-se ao maior aumento da camada intermediária em comparação com a diminuição das camadas superior, profunda e funda. Na seção do paralelo 25°S, a diminuição do transporte de calor integrado deve-se à maior diminuição das camadas superior, intermediária e funda e funda.



Figura 4.4.2-4: Anomalia (ano 2050-2000) do transporte de calor por camada para o experimento B1. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.2-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.2-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.2-5 representa a anomalia do transporte de calor integrado do ano 2100 em relação ao ano 2000 para os experimentos A1FI e B1. As seções da Passagem de Drake e da passagem África-Antártida apresentam aumento do transporte de calor no ano 2100 em relação ao ano 2000, enquanto que na seção do paralelo 25°S, há diminuição do transporte de calor no ano 2100 em relação ao ano 2000 para ambos os experimentos.



Figura 4.4.2-5: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de calor integrado para os experimentos A1FI e B1. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima. Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.2-6 representa a anomalia do transporte de calor por camada do ano 2100 em relação ao ano 2000 para o experimento A1FI. Observa-se que na seção da Passagem de Drake, as camadas superior e intermediária apresentam aumento do transporte em relação ao ano 2000 enquanto que a camada profunda apresenta redução do transporte de calor.

Na seção da Passagem África-Antártida observa-se que as camadas superior e funda apresentam diminuição e as camadas intermediária e profunda apresentam aumento do transporte de calor em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25ºS observa-se que as camadas intermediária e funda apresentam diminuição e as camadas superior e profunda apresentam aumento do transporte de calor em relação ao ano 2000.

Na seção da Passagem de Drake, o aumento do transporte de calor integrado deve-se ao aumento das camadas superior e intermediária. Na seção da Passagem África-Antártida, o aumento do transporte integrado está associado ao fortalecimento das camadas intermediária e profunda em comparação ao enfraquecimento das

camadas superior e funda. Analisando percentualmente, a camada funda apresenta diminuição de 100%. Dessa forma, o fortalecimento das camadas intermediária e profunda leva ao fortalecimento do transporte advectivo de calor integrado.

Na seção do paralelo 25ºS, a diminuição do transporte de calor integrado está associado à maior diminuição das camadas intermediária e funda em comparação com o aumento das camadas superior e profunda.



Figura 4.4.2-6: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de calor por camada para o experimento A1FI. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.2-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.2-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

A figura 4.4.2-7 representa a anomalia do transporte de calor por camada do ano 2100 em relação ao ano 2000 para o experimento B1. Observa-se que na seção da Passagem de Drake, as camadas superior e intermediária apresentam aumento e a camada profunda apresenta diminuição do transporte de calor em relação ao ano 2000. Na seção da Passagem África-Antártida, as camadas superior e funda apresentam diminuição do transporte e as camadas intermediária e profunda apresentam aumento do transporte em relação ao ano 2000. Na seção do paralelo 25ºS observa-se que, as camadas superior e intermediária apresentam diminuição do transporte e as camadas profunda e funda apresentam aumento do transporte de calor em relação ao ano 2000.

Na seção da Passagem de Drake, o aumento do transporte de calor integrado deve-se ao aumento das camadas superior e intermediária. Na seção da Passagem África-Antártida, o aumento do transporte integrado está associado ao maior aumento das camadas intermediária e profunda em comparação com a diminuição das camadas superior e funda. Na seção do paralelo 25ºS, a diminuição do transporte de calor integrado está associado à diminuição das camadas superior, intermediária e funda.



Figura 4.4.2-7: Anomalia (ano 2100-2000) do transporte de calor por camada para o experimento B1. Aumento do transporte é indicado com a seta no mesmo sentido do clima (Fig. 4.4.2-2) e diminuição do transporte é indicado com seta no sentido contrário do clima (Fig. 4.4.2-2). Os valores quantificam o aumento ou diminuição da anomalia.

## 4.6. Balanço do Fluxo Radiativo e Estimativa do Estoque de calor

#### 4.6.1. Balanço do Fluxo Radiativo

A figura 4.6.1-1 representa a série temporal do balanço de radiação atmosférica na superfície do oceano Atlântico Sul entre as seções monitoradas para o experimento clima (H2). O balanço de radiação na superfície do oceano foi obtida combinando-se os parâmetros de fluxo de calor sensível superficial ascendente, fluxo de onda longa descendente no ar, fluxo de onda longa ascendente no ar, fluxo de onda curta descendente no ar e fluxo de onda curta ascendente no ar.

O sinal negativo indica que o balanço de radiação tem sentido para baixo, ou seja, incide na superfície do oceano. Observa-se um pequeno acréscimo da radiação de 0,49% do começo ao final da série. Os valores referentes às mudanças na radiação citadas anteriormente podem ser observados na tabela 4.6.1-I.

Esse resultado evidencia uma tendência de aumento do balanço de radiação atmosférica incidente na superfície do oceano no século XX. Esse aumento é intensificado nos cenários de mudanças climáticas investigados como será apresentado posteriormente.



Figura 4.6.1-1: Série temporal do balanço de radiação incidente na superfície do oceano para o experimento clima (H2).

Tabela 4.6.1-I: Médias do balanço de radiação atmosférica para o experimento clima (H2).

	Média da radiação				
	(Pvv) 2001-2005 2096-2100				
H2	-26,64	-26,77			

A figura 4.6.1-2 representa a série temporal do balanço de radiação atmosférica para os experimentos A1FI e B1. Assim como no experimento clima, o sinal negativo indica que o balanço de radiação incide na superfície do oceano. Pode-se observar que o balanço de radiação incidente aumenta a partir de meados da década de 2010. Esse acréscimo é maior para o experimento A1FI (2,05%) e mais suave para o experimento B1 (0,71%). Os valores referentes às mudanças no balanço de radiação citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.6.1-II.



Figura 4.6.1-2: Série temporal do balanço de radiação incidente na superfície do oceano para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

O aumento do balanço de radiação pode está associado aos experimentos de mudanças climáticas que simulam cenários onde ocorre aumento de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo. A maior concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera agrava o efeito estufa, permitindo maior retenção de calor do sol pela atmosfera (HOUGHTON, 2009).

Tabela 4.6.1-II: Médias do balanço de radiação atmosférica para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Radiação (PW)					
	2006-2010	2096-2100				
A1FI	-26,80	-27,35				
B1	-26,76	-26,95				

## 4.6.2. Estimativa do Estoque de Calor

A figura 4.6.2-1 representa a série temporal do calor estocado no oceano Atlântico Sul entre as seções monitoradas para os experimentos A1FI e B1. Pode-se observar que o calor aumenta continuamente do começo ao final da série. Observa-se um aumento maior para o experimento A1FI (25,20%) do que para o experimento B1 (12,17%). Como dito anteriormente, esse comportamento pode ser explicado pelas características contrastantes dos experimentos de mudanças climáticas. Os valores referentes às mudanças no estoque de calor citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.6.2-I.



Figura 4.6.2-1: Série temporal do calor estocado no volume do oceano entre as seções monitoradas para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.6.2-I: Médias do calor estocado para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Calor (PW)					
	2001-2005	2096-2100				
A1FI	0,0027	0,0034				
B1	0,0027	0,0030				

## 4.7. Variação da temperatura

A figura 4.7-1 representa a série temporal da temperatura média no oceano Atlântico Sul entre as seções monitoradas para os experimentos A1FI e B1. Observa-se que a temperatura aumenta continuamente até o final do período para ambos os experimentos. O experimento A1FI aumenta 26,06% e o experimento B1 aumenta 16,04%. Os valores referentes às mudanças no estoque de calor citadas anteriormente para ambos nos experimentos podem ser observados na tabela 4.6.2-I.



Figura 4.6.2-1: Série temporal do calor estocado no volume do oceano entre as seções monitoradas para os experimentos A1FI (azul) e B1 (verde). A linha vermelha representa o valor do transporte médio para o ano 2000 do experimento clima.

Tabela 4.7-I: Médias do calor estocado para o período de mudança nos experimentos A1FI e B1.

	Calor (PW)				
	2001-2005	2096-2100			
A1FI	3,034	3,825			
B1	3,024	3,509			

# 5. DISCUSSÕES

### 5.1. Transporte de Volume e advectivo de Calor

O transporte de volume integrado nas seções monitoradas não evidencia particularidades dos transportes que só podem ser observados quando analisados camada a camada. As análises espectrais revelaram os picos mais energéticos associados a fenômenos com períodos interanuais como o deslocamento da piscina de água quente no oceano Pacífico (MACHADO *et al.*, 2004) e o El Niño (SANTOS, 2008).

O aumento de energia do experimento clima para os experimentos de mudanças climáticas pode estar relacionado à aumento da intensidade de fenômenos associados à intervalos de freqüências definidos. Para as seções da Passagem de Drake e da África-Antártida, o experimento que apresentou maior energia para os picos associados a fenômenos interanuais foi o A1FI seguido pelo B1. Já para a seção do paralelo 25°S, o experimento A1FI apresentou a menor energia dentre os três para a mesma freqüência.

O transporte de volume na camada superior da seção da Passagem África-Antártida está associado ao escoamento da CCA e tem sentido leste. Já o transporte de calor nessa camada no início do período analisado, tem sentido oeste, e está associado ao escape de águas da retroflexão da CA. A diferença do sentido do escoamento do transporte de volume e advectivo de calor deve-se ao fato de que a CCA transporta um volume muito maior do que a CA. Em contrapartida, a CA transporta mais calor do que a CCA.

Observa-se que ambos os transportes de volume e advectivo de calor na camada funda da seção da Passagem África-Antártida diminuem drasticamente e atingem valores próximos à zero. Esse comportamento pode estar associado à diminuição da formação de água de fundo na região Antártica devido ao degelo das calotas polares, em função do aquecimento do ar e do oceano.

Apesar do componente de gelo não ser avaliado nesse trabalho, ele possui importância fundamental na formação de massas d'água frias, com o potencial de alterar a circulação profunda. Outro aspecto importante associado à extensão do gelo marinho é a sua potencial relação com a mudança de geoometria das seções zonais consideradas e consequentemente sobre a estimativa dos transportes advectivo de calor e volume.

O aumento do transporte advectivo de calor integrado na Passagem de Drake e na Pasagem África-Antártida evidencia o aumento da disponibilidade de calor a ser transportado. Já a diminuição do transporte advectivo de calor integrado no Paralelo 25ºS evidencia diminuição da transferência de calor para o oceano Atlântico Norte. Essa diminuição pode estar relacionada com mudanças nos padrões da Circulação Profunda em conseqüência de mudanças climáticas como estudado por Chamberlain (1906 *apud* BROECKER, 1991).

### 5.2. Estoque de Calor

As figuras 5.3-1 e 5.3-2 representam a área de estudo com as anomalias, para 2050-2000 (Fig. 5.3-1) e 2100-2000 (Fig. 5.3-2), do transporte advectivo de calor integrado nas seções monitoradas e a anomalia da radiação na superfície do oceano para os experimentos A1FI e B1. Nessas figuras ainda estão representados nos valores dentro do círculo o balanço de calor no volume analisado. Pode-se observar que o balanço de calor é positivo para ambos os experimentos, indicando que há um aumento de calor estocado no oceano.

Comparando esses valores com os resultados obtidos da série temporal do calor estocado, pode-se observar que a anomalia obtida dos resultados do calor estocado é muito menor do que o balanço de calor no volume analisado dessas figuras. Esse fato pode estar associado às incertezas nas parametrizações do MOM e do acoplamento entre os demais componentes. De certa forma, essas dificuldades podem induzir a erros na quantificação de fluxos dentro do componente occeânico e entre os demais componentes do sistema climático. Esse tipo de incerteza pode ser encontrado em trabalhos como o de Ganachaud & Wunsch (2000) que estimaram o transporte advectivo de calor integrado através de diversas seções no globo. Em diversas seções analisadas, os autores obtiveram incerteza maior do que o transporte advectivo de calor (figura 5.3-3), corroborando as informações anteriores.



Figura 5.3-1: Esquema, para o ano 2050-2000, dos transportes de calor através das seções (a representação dos transportes segue a mesma legenda que as anomalias), assim como a radiação incidente no oceano (representado pelos valores ao lado de  $\otimes$ ). Os valores do experimento A1FI estão representados pela cor azul e os valores do experimento B1 estão representados pela cor verde. O resultado do balanço de calor das entradas e saídas no oceano está representado pelos valores dentro do círculo. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000.



Figura 5.3-2: Esquema, para o ano 2100-2000, dos transportes de calor através das seções (a representação dos transportes segue a mesma legenda que as anomalias), assim como a radiação incidente no oceano (representado pelos valores ao lado de  $\bigotimes$ ). Os valores do experimento A1FI estão representados pela cor azul e os valores do experimento B1 estão representados pela cor verde. O resultado do balanço de calor das entradas e saídas no oceano está representado pelos valores dentro do círculo. O experimento clima (H2) indica o sentido e valor do transporte no ano 2000.



Figura 5.3-3: Transporte advectivo de calor para diversas seções. Barras vermelhas significam aquecimento e barras azuis significam resfriamento. A barra branca é a incerteza associada aos transportes advectivos de calor.

Fonte: Retirado de Ganachaud & Wunsch (2000).

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou contribuir para o conhecimento do comportamento dos transportes advectivo de calor e volume na bacia do Atlântico Sul frente à cenários de mudanças climáticas. Dessa forma, através das análises consideradas, buscou-se contribuir para o conhecimento do clima futuro oceânico e de regiões continentais adjacentes.

Apesar dos transportes de volume na Passagem de Drake e na Passagem África-Antártida apresentarem enfraquecimento ao final do período analisado, foi observado um aumento do transporte advectivo de calor. Tal fato pode estar associado ao aumento de temperatura e consequentemente do calor armazenado no oceano. Esse fato é demonstrado nas figuras 5.3-1 e 5.3-2 que evidenciam excesso de calor no volume oceânico através do balanço de transporte de calor analisado.

Observa-se que as anomalias do transporte de calor na Seção da Passagem África-Antártida apresentam valores maiores do que na Seção da Passagem de Drake, associado ao aumento do calor estocado no oceano; o que o torna disponível para ser transportado.

O transporte de calor integrado no paralelo 25°S diminui ao longo da série, significando que menor capacidade de transferência de calor para o Atlântico Norte. Esse comportamento pode indicar enfraquecimento na Circulação Profunda Global. Esse enfraquecimento do transporte advectivo de calor integrado pode estar associado ao enfraquecimento da camada intermediária nessa seção.

O aumento do balanço de radiação na superfície do oceano é função do aumento de gases-estufa na atmosfera, diminuindo o retorno da radiação para o espaço. De acordo com Houghton (2009), o balanço de radiação incidente tende, em média, a aquecer a superfície de um objeto de estudo.

Observa-se um aumento de temperatura média de 0,8 °C para o experimento A1FI e 0,5°C para o experimento B1. Esse resultado está associado ao aumento do estoque de calor no oceano devido ao aumento dos transportes de calor e da radiação.

Observa-se que o transporte advectivo de calor possui o mesmo comportamento em termos de sentido de escoamento que o transporte de volume na seção em 25°S em todas as camadas. Esse comportamento não é observado nas seções da Passagem de Drake e da Passagem entre a África-Antártida. Nessas seções, como já visto anteriormente, o transporte de volume enfraquece no final do período analisado. Em contrapartida, o transporte advectivo de calor é fortalecido, indicando o aumento de calor dentro do volume analisado. De fato, Lee *et al.* (2011) observam um aumento de temperatura para o oceano Atlantico em cenários de mudanças climáticas.

Se analisarmos as camadas, observa-se na seção da Passagem de Drake uma mudança de sentido dos transportes estimados; no transporte de volume a camada intermediária camada enfraquece e no transporte advectivo de calor, essa camada fortalece. Na seção da Passagem África-antártida, essa mudança de sentido dos transportes ocorre na camada profunda; no transporte de volume essa camada sofre diminuição e no transporte advectivo de calor essa camada aumenta.

Observa-se um aumento do transporte advectivo de calor e volume na camada profunda na seção no paralelo 25°S e do calor advectado para o oceano Atlântico associado à retroflexão da CA na seção da Passagem África-Antártida e consequente aumento do transporte advectivo de calor na camada superior em 25°S. De acordo com Gordon (2003), o calor advectado da CA para o Atlântico Sul possui influência na formação da APAN no Atlântico Norte. Dessa forma, de acordo com o autor e com os resultados do presente trabalho, é possível associar o aumento da formação da APAN ao fortalecimento do escape da CA.

O transporte de calor integrado no paralelo 25ºS diminui ao longo da série, significando que menor capacidade de transferência de calor para o Atlântico Norte. Esse comportamento pode indicar enfraquecimento na Circulação Profunda Global.

O aumento do balanço de radiação na superfície do oceano é função do aumento de gases-estufa na atmosfera, diminuindo o retorno da radiação para o espaço. De acordo com Houghton (2009), o balanço de radiação incidente tende, em média, a aquecer a superfície de um objeto de estudo.

Os experimentos de mudanças climáticas A1FI e B1 analisados nesse trabalho são marcadamente distintos (Fig. 3.3-1). Nas maior parte das análises, os experimentos apresentam diferenças na intensidade das mudanças no período investigado e, dentre os experimentos, o A1FI apresenta comportamento mais crítico que o B1, refletindo as características intrínsecas a eles.

84

# 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY Glossary of Meteorology. Disponível em <http://translate.google.com.br/translate?hl=pt-BR&langpair=en%7Cpt&u=http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search %3Fid%3Dantarctic-bottom-water1>. Acessado em 30 de junho de 2011
- ASSAD, L.P. DE F. 2006. Influência Do Campo De Vento Anômalo Tipo Enso Na Dinâmica Do Atlântico Sul. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASSAD, L.P. de F.; MANO, M.F.; DECCO, H.T. de; TORRES JR., A.R.; LANDAU, L.
  Noções Básicas de Modelagem Hidrodinâmica Computacional e de Dispersão de Poluentes. 1ª Ed. 2009a. Disponível em: <a href="http://www.lamce.coppe.ufrj.br/InteR/NucleosDeApoio/NUMA/data/cursos/apostila.pdf">http://www.lamce.coppe.ufrj.br/InteR/NucleosDeApoio/NUMA/data/cursos/apostila.pdf</a>>. Acessado em: 15 de março de 2011.
- ASSAD, L.P. de F.; TORRES JR, A.R.; ARRUDA, W.Z.; MASCARENHAS JR, A. de
  A.; LANDAU, L. Volume And Heat Transports In The World Oceans From An
  Ocean General Circulation Model Revista Brasileira de Geofísica v. 27, n. 2,
  p. 181-194. 2009b.
- BERNEM, C.VAN; BEUSEKOM, J.VAN; BOSCH, T.; COLIJN, F.; EBINGHAUS, R.;
  KÖRTZINGER, A.; LATIF, M.; MATTHIESSEN, B.; MELZNER, F.;
  OSCHLIES, A.; PETERSEN, S.; PROELß, A.; QUAAS, M.; REQUATE, T.;
  REUSCH, T.; ROSENSTIEL, P.; SCHROTTKE, K.; SICHELSCHMIDT, V.H.;
  SIEBERT, U.; SOLTWEDEL, R.; SOMMER, U.; STATTEGGER, K.; STERR,
  H.; STURM, R.; TREUDE, T.; VAFEIDIS, A.; VISBECK, M.; WAHL, M.;
  WALLMANN, K.; WEINBERGER, F. World Ocean Review 1<sup>a</sup> ed. Hamburgo:
  Maribus, 2010.
- BIASTOCH, A.; BÖNING, C.W.; SCHWARZKOPF, F.U.; LUTJEHARMS, J.R.E. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies **Nature**, v. 462, p. 495-499. 2009.

- BROECKER, W.S. The Great Ocean Conveyor **Oceanography** v. 4, n. 2, p. 79-89. 1991.
- CAMPOS, E.; BUSALACCHI, A.; GARZOLI, S.; LUTJEHARMS, J.; MATANO, R.; NOBRE, P.; OLSON, D.; PIOLA, A.; TANAJURA, C.; WAINER, I. The South Atlantic and climate In: THE OCEAN OBSERVING SYSTEM FOR CLIMATE, 1999, St. Raphael, France. OCEANOBS99, 1999.
- 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.
- DELWORTH, T.L.; BROCCOLI, A.J.; ROSATI, A.; STOUFFER, R.J.; BALAJI, V.;
  BEESLEY, J.A.; COOKE, W.F.; DIXON, K.W.; DUNNE, J.; DUNNE, K.A.;
  DURACHTA, J.W.; FINDELL, K.L.; GINOUX, P. GNANADESIKAN, A.;
  GORDON, C.T.; GRIFFIES, S.M.; GUDGEL, R.; HARRISON, M.J.; HELD,
  I.M.; HEMLER, R.S.; HOROWITZ, L.W.; KLEIN, S.A.; KNUTSON, T.R.;
  KUSHNER, P.J.; LANGENHORST, M.R.; LEE, H.; LIN, S.; LU, J.;
  MALYSHEV, S.L.; MILLY, P.C.D.; RAMASWAMY, V.; RUSSELL, J.;
  SCHWARZKOPF, M.D.; SHEVLIAKOVA, E.; SIRUTIS, J.J.; SPELMAN, M.J.;
  STERN, W.F.; WINTON, M.; WITTENBERG, A.T.; WYMAN, B.; ZENG, F.;
  ZHANG, R. GFDL'S CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics American Meteorological Society. 2006.
- DONNERS, J.; DRIJFHOUT, S.S.; HAZELEGER,W. Water mass transformation and subduction in the South Atlantic Journal of Physical Oceanography.
   American Meteorological Society v. 35, p. 1841-1860. 2005.
- EMILSON, I. The Shelf And Coastal Waters Off Southern Brazil **Bol Inst. Oceanogr.** v. 11, n. 2. p. 101-112. 1961.
- GANACHAUD, A.; WUNSCH, C. Improved Estimates Of Global Ocean Circulation,Heat Transportandmixing From Hydrographic Data Nature v. 408, p. 453-457. 2000.

- GARZOLI, S.L.; BARINGER, M.O. Meridional heat transport determined with expandable bathythermographs—Part II: South Atlantic transport **Deep Sea Research I** v. 54, p. 1402-1420. 2007
- GFDL CM2.1 experiments and metadata metadata: CM2.1U\_Control-1860\_D4. 2006. Disponível em <http://nomads.gfdl.noaa.gov/CM2.X/CM2.1/data/metadata/Plcntrl\_run1.html> . Acessado em: 12 de maio de 2011
- GFDL CM2.1 experiments and metadata metadata: CM2.1U-D4\_1860-2000-AllForc\_H2. 2006. Disponível em <http://nomads.gfdl.noaa.gov/CM2.X/CM2.1/data/metadata/20C3M\_run2.html >. Acessado em: 14 de maio de 2011
- GFDL CM2.1 experiments and metadata metadata: CM2.1U-H2\_SresA1FI. 2006. Disponível em: <http://nomads.gfdl.noaa.gov/CM2.X/CM2.1/data/metadata/SRESA1FI\_run1.h tml>. Acessado em: 12 de maio de 2011
- GFDL home page. Disponível em < http://www.gfdl.noaa.gov/>. Acessado em: 18 de maio de 2011
- GIORGI, F. Climate Change Prediction Climatic Change v. 73, p. 239-265. 2005.
- GNANADESIKAN, A.; DIXON, K.W.; GRIFFIES, S.M.; BALAJI, V.; BARREIRO, M.;
  BEESLEY, J.A.; COOKE, W.F.; DELWORTH, T.L.; GERDES, R.; HARRISON,
  M.J.; HELD, I.M.; HURLIN, W.J.; LEE, H.; LIANG, Z.; NONG, G.;
  PACANOWSKI, R.C.; ROSATI, A.; RUSSELL, J.; SAMUELS, B.L.; SONG, Q.;
  SPELMAN, M.J.; STOUFFER, R.J.; SWEENEY, C.O.; VECCHI, G.; WINTON,
  M.; WITTENBERG, A.T.; ZENG, F.; ZHANG, R.; DUNNE, J.P. GFDL's CM2
  Global Coupled Climate Models. Part II: The Baseline Ocean Simulation
  Journal of Climate Special Section. American Meteorological Society. v.
  19, p. 675-697. 2006.
- GORDON, A.L. Interocean Exchange of Termocline Water **Journal of Geophysical Research** v. 91, n. C4, p. 5037-5046. 1986
- GORDON, A.L. The Brawniest retroflection Nature v. 421, p. 904-905. 2003.

- GRIFFIES, S.M.; BÖNING, C.; BRYAN, F.O.; CHASSIGNET, E.P.; GERDES, R.; HASUMI, H.; HIRST, A.; TREGUIER, A.; WEBB, D. Developments in ocean climate modeling Ocean Modelling v. 2, p.123-192. 2000.
- GRIFFIES, S.M.; HARRISON, M.J.; PACANOWSKI, R.C.; ROSATI, A. A Technical
  Guide To Mom4 GFDL Ocean Group Technical Report No. 5.
  NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. 2008. Disponível em:
  <www.gfdl.noaa.gov>. Acessado em 20 de março de 2011.
- HOUGHTON, J.T. **Global Warming** 3<sup>a</sup>ed. New York: Cambrigde University Press, 2004.
- HOUGHTON, J.T. **Global Warming** 4<sup>a</sup>ed. New York: Cambrigde University Press, 2009.
- IPCC, 2001. Climate Change 2001: A Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmmental Panel on Climate Change. 2001. Disponível em: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc\_tar/>. Acessado em 11 de junho de 2011
- KAMPEL, M.; SILVA JR., C.L.da Análise EOF da Confluência Brasil-Malvinas a partir de imagens AVHRR. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1996, Salvador. p. 775-780.
- LEE, S.; PARK, W.; SEBILLE, E.van; BARINGER, M.O.; WANG, C.; ENFIELD, D.B.; YEAGER, S.G.; KIRTMAN, B.P. What caused the significant increase in Atlantic Ocean heat content since the mid-20th century? **Geophysical Research Letters** v. 38, 6p. 2011
- MACHADO, F.V.; SOARES, J.R; D'ÁVILA, V.A. Resultados Preliminares do Estudo da Variabilidade Espacial e Temporal da Piscina de Água Quente do Pacífico.
  In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, FORTALEZA. ANAIS DO XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.
- MIRANDA, L.B. Forma de correlação T-S de massa d'água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP). Bol Inst. Oceanogr. v. 33, n. 2, p. 105-119. 1985.

- PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H. **Physics of Climate.** 3<sup>a</sup> ed. New York: American Institute of Physics, 1992.
- PETERSON, R.G.; STRAMMA, L.. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean **Prog. Oceanog.** v. 26, p. 1-73. 1991.
- PICKARD, G.L. **Oceanografia Física Descritiva** Uma introdução. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, 1974.
- RINTOUL, S.R. South Atlantic Interbasin Exchange Journal of Geophysical Research, v. 96, n. C2, p. 2675-2692. 1991.
- RÖESKE, F. An Atlas of Surface Fluxes based on the ECMWF Re-Analysis a Climatological Dataset to force Global Ocean General Circulation Models. Max
   Planck Institut für Meteorologie, Hamburg. Report no. 323. 2001.
- RUSSEL,J.L. The Southern Hemisphere Westerlies in a Warming World: Propping Open the Door to the Deep Ocean **Journal of Climate**. v.19, p. 6382-6390. 2006.
- SANTOS, A.S. 2008. 153p. Vulnerabilidades socioambientais diante as mudanças climáticas projetadas para o semi-árido da Bahia. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável), Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília.
- SCHMITZ, W.J. The Pacific and Indian Oceans A Global Update **World Ocean Circulation** v. 2, Technical Report, 1996.
- SILVEIRA, I.C.A.; SCHMIDT, A.C.K.; CAMPOS, E.J.D.; GODOI, S.S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao largo da Costa Leste Brasileira Ver. Bras. Oceanogr. v. 48, n. 2, p. 171-183. 2000.
- STOUFFER, R.J.; BROCCOLI, A.J.; DELWORTH, T.L.; DIXON, K.W.; GUDGEL, R.;
  HELD, I.; HEMLER, R.; KNUTSON, T.; LEE, H.; SCHWARZKOPF, M.D.;
  SODEN, B.; SPELMAN, M.J.; WINTON, M.; ZENG, F. GFDL's CM2 Global
  Coupled Climate Models. Part IV: Idealized Climate Response Journal of
  Climate Special Section. American Meteorological Society. v. 19, p. 723-740. 2006.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean **Journal Of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20.863-20.883. 1999.
- SVERDRUP, H.U., JOHNSON, M.W.; FLEMING, R.H. The Oceans: their physics, chemistry and general biology **Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc.** 1087p. 1942.
- WELCH, P.D. The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method based on Time Averaging Over Short, Modified Periodrograms IEEE Trans. Audio Electroacoustics v. AU-15, p. 70-73. 1967.

# **APÊNDICE I**

#### 1. CM 2.1

O modelo, cujos resultados foram utilizados no estudo, será o Modelo Climático Acoplado 2.1 (CM 2.1) desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL). O GFDL é administrado pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e desde 1955 contribui para grande parte da pesquisa mundial sobre as mudanças climáticas, inclusive tem sido grande colaborador em todos os Relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Dessa forma, os resultados dos modelos assim como os cenários de alterações climáticas divulgados nos relatórios do IPCC contribuem para o conhecimento global sobre as mudanças climáticas.

O CM 2.1 é um modelo climático global acoplado que foi utilizado para conduzir simulações para o 4º Relatório do IPCC de 2007 e representa os principais componentes do sistema climático com suas interações; e o balanço de energia no planeta por esses componentes se constitui na peça-chave para uma previsão climática a longo prazo. O modelo considera como componentes formadoras do sistema climático a atmosfera, a litosfera, a hidrosfera e a criosfera, simulando os processos mais importantes de cada componente e as interações entre elas (trocas de calor, massa etc.) (DELWORTH *et al.*, 2006).

O modelo foi desenvolvido para simular a variabilidade do clima atmosférico e oceânico através de alterações climáticas. As interações entre os componentes são realizadas através de interpolações das resoluções espaciais de cada uma, uma vez que essas resoluções possuem valores diferentes. Os componentes atmosférico e litosférico possuem resolução espacial meridional de 2,5° e zonal de 2° e o modelo atmosférico possui 24 níveis na vertical (STOUFFER *et al.*, 2006).

A fração dos experimentos que será utilizada no estudo corresponde à componente oceânica do CM2.1 que será detalhada a seguir.

1.1. MOM 4.0

A circulação oceânica desempenha um papel fundamental e atua como um dos principais componentes reguladores do clima global. Dessa maneira, torna-se essencial o desenvolvimento de um modelo realista de circulação oceânica (GNANADESIKAN, *et al.*, 2006). A componente oceânica do CM2.1 é referenciada na literatura como OM3.1 (DELWORTH *et al.*, 2006) e sua formulação baseia-se no código do *Modular Ocean Model* (MOM4). O MOM foi desenvolvido inicialmente para estudos do sistema climático oceânico. Idealizado e sustentado por pesquisadores do GFDL, recebe contribuições de pesquisadores de todo o mundo (GRIFFIES *et al.*, 2008).

O modelo é a representação numérica das equações hidrostáticas primitivas dos oceanos discretizadas em uma grade numérica Euleriana (ASSAD, 2006; GRIFFIES *et al.*, 2008). O MOM utiliza o sistema de grade numérica alternada B de Arakawa, onde as variáveis vetoriais encontram-se nas arestas enquanto que as variáveis escalares encontram-se no centro da grade (Fig. 3.2.3-1). Esse tipo de grade permite, com razoável acurácia, a representação de correntes geostróficas (ASSAD, 2006; GRIFFIES *et al.*, 2000; GRIFFIES *et al.*, 2008) de ondas de gravidade inerciais (ASSAD, 2006; GRIFFIES *et al.*, 2000; GRIFFIES *et al.*, 2000) e define o arranjamento horizontal dos campos do modelo; ou seja, a grade é fixa no tempo e no espaço (GRIFFIES *et al.*, 2008).



Figura 3.2.3-1: Representação da localização das variáveis horizontais na grade B de Arakawa usada no MOM4, onde *T* representa uma variável escalar, *h* representa a espessura da camada,  $\psi$  representa a função de corrente horizontal ou altura da superfície e *u* e *v* referem-se às componentes horizontais de velocidade.

Fonte: Modificado de Griffies et al. (2000).

O MOM é um modelo discretizado em níveis na vertical com coordenadas z, as quais permitem simplicidade na discretização numérica e facilidade na representação do gradiente de pressão horizontal. Esse tipo de coordenada também possibilita acurácia na representação da equação de estado da água do mar além de representar bem os processos diabáticos. Como desvantagem, esse tipo de coordenada apresenta dificuldade na representação da topografia e da camada limite de fundo (ASSAD, *et al.*, 2009a; GRIFFIES *et al.*, 2000). Outra desvantagem é a complexidade da representação de marcadores advectivos e da difusão ao longo de superfícies de densidade inclinadas no interior oceânico (GRIFFIES *et al.*, 2000). Apesar das desvantagens, a discretização em coordenadas z resolve de forma satisfatória os transportes de calor, pois mantém ao longo do domínio, nas camadas superiores, a mesma resolução. Além desse fato, esse tipo de discretização garante uma melhor representação dos processos de troca de calor, massa e energia entre os oceanos e a atmosfera.

O modelo possui resolução espacial meridional de 1° e zonal de 1/3° entre os paralelos de 10°S e 10°N relaxando para 1° em direção aos pólos. Possui 50 níveis na vertical; 22 deles com espessura de 10 metros nos primeiros 220 metros (ASSAD, 2006; DELWORTH *et al.*, 2006; GNANADESIKAN *et al.*, 2006). Abaixo dessa profundidade, a espessura das camadas vai aumentando gradualmente até atingir uma espessura de aproximadamente 366 metros na região-limite de profundidade do oceano (5500 metros) (DELWORTH *et al.*, 2006; GNANADESIKAN *et al.*, 2006). A figura 3.2.3-2 representa a resolução vertical do modelo com a profundidade máxima e os diversos níveis.





Com o objetivo de minimizar problemas numéricos associados à convergência de meridianos no Pólo Norte, o MOM permite a construção de grades numéricas esféricas globais com deslocamento dos pólos numéricos da mesma para longe dos pólos geográficos. Dessa forma, o modelo utiliza o método da grade tripolar desenvolvida por Murray (1996, *apud* Assad, 2006; DELWORTH *et al.*, 2006; STOUFFER *et al.*, 2006), representada na figura 3.2.3-3, que emprega um sistema de coordenadas esféricas usuais ao sul de 65°N com um pólo na Antártida e uma região bipolar ao norte de 65°N com dois pólos situados sobre domínio terrestre (América do norte e Eurásia) (ASSAD, 2006; GNANADESIKAN *et al.*, 2006).



Figura 3.2.3-3: Representação esquemática da grade tripolar com região bipolar ao redor do oceano Ártico.

Fonte: Retirado de Murray (1996 apud. Assad, 2006).

As condições de contorno do modelo incluem fluxo de água doce (precipitação) e drenagem fluvial nos primeiros 4 níveis (nos primeiros 40 metros) que são pré-determinados a partir de informações disponíveis de redes de drenagem e que acrescentam massa ao oceano (ASSAD, 2006; DELWORTH *et al.*, 2006, STOUFFER *et al.*, 2006).

Diferentemente da versão 4, as versões anteriores do MOM utilizavam a aproximação da tampa rígida na superfície do oceano. O MOM4 possui um método de resolução do modo externo oceânico que demonstrou eficiência na representação da dinâmica oceânica de grande escala em grades de baixa resolução - >1º- e alta resolução -<1º- (ASSAD, 2006).

## APÊNDICE II

#### 1. Experimento clima

As condições iniciais para esse experimento foram obtidas do dia 1º de janeiro do ano 41 da fase de *spin up* do experimento controle-1860 (CM2.1U\_Control-1860\_D4) que caracteriza-se por simular o período pré-industrial. O experimento clima teve duração de 140 anos (do ano 1860 ao ano 2000), porém só foram utilizados os últimos 100 anos desse experimento; do ano 1901 ao ano 2000.

Primeiramente, no experimento controle-1860, os modelos atmosférico e litosférico passaram pela fase de *spin up* com as forçantes do final do século XX. Após essa fase, os modelos foram acoplados com o modelo oceânico e o modelo de gelo marinho cujas condições iniciais também foram obtidas através de observações do final do século XX. Condições de contorno referentes ao ano de 1860, que incluem os gases-estufa CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, ozônio troposférico e estratosférico, sulfatos troposféricos, carbono orgânico e negro, poeira, sal marinho, radiação solar e diferentes coberturas terrestres, foram aplicados ao modelo acoplado que foi integrado por um período de ajustamento de 220 anos.

As condições de contorno do experimento clima variaram durante o período de 140 anos do experimento baseados em observações e reconstruções para o final do século XIX e século XX. Como no experimento controle-1860, as forçantes variáveis no tempo desse experimento foram CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O atmosféricos, ozônio troposférico e estratosférico, sulfatos troposféricos antropogênicos, carbono orgânico e negro, aerossóis vulcânicos (o modelo calcula apenas os efeitos diretos), radiação solar e diferentes coberturas terrestres.

De acordo com Giorgi (2005), cenários iguais obtidos de períodos diferentes do experimento controle, possuem o potencial de evoluir de maneiras diferentes. Dessa forma, para que pudessem ser feitas análises comparativas, os cenários de mudanças climáticas A1FI e B1 utilizados no trabalho foram adquiridos do mesmo momento do experimento clima.

### 2. Experimento A1FI

O experimento A1FI deriva da família A1, desenvolvida pelo IPCC em um Relatório Especial de Emissão de Cenários (*Special Report on Emission Scenarios* -SRES a sigla em inglês). Nesse relatório foram desenvolvidos vários cenários de mudanças climáticas derivadas de quatro famílias, cada uma com a sua "história". Os cenários da família A1 descrevem o futuro em um mundo de rápido crescimento econômico e populacional, que atinge o pico populacional no meio do século e declina em seguida, e a rápida introdução de novas e eficientes tecnologias (HOUGHTON, 2004, 2009).

O experimento teve início em 1º de janeiro de 2001 e duração de 100 anos, dos quais todos foram utilizados. As condições iniciais para esse experimento foram adquiridas a partir de 1º de janeiro de 2001 do experimento clima. Diversas forçantes variáveis no tempo foram baseadas nos resultados do modelo climático global da química atmosférica MOZART (GFDL, 2006) para os cenários do experimento A1FI. Para esse experimento, os aerossóis vulcânicos foram tomados como zero, os tipos de cobertura terrestre não variaram ao longo do tempo e a radiação solar variou sazonalmente com base em médias do final do século XX, mas sem variação interanual.

#### 3. Experimento B1

O experimento B1 descreve um cenário onde a população atinge o crescimento máximo na metade do século e declina seguida, como no na família A1. Porém no cenário da família B1, há uma rápida mudança na estrutura econômica em direção a uma economia de serviço e informação com reduções na produção de material e a introdução de tecnologias eficientes. A ênfase é em soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental (HOUGHTON, 2004, 2009).

O experimento B1 teve início em 1º de janeiro de 2001 e duração de 300 anos, porém apenas os 100 primeiros anos foram analisados. As condições iniciais para esse experimento foram adquiridas a partir de 1º de janeiro de 2001 do experimento clima. Diversas forçantes variáveis no tempo utilizadas durante os 100 primeiros anos desse experimento foram baseadas nos resultados do modelo climático global da química atmosférica MOZART para os cenários B1. Assim como o experimento A1FI, para o experimento B1 os aerossóis vulcânicos foram tomados como zero, os tipos de cobertura terrestre não variaram ao longo do tempo e a radiação solar variou sazonalmente com base em médias do final do século XX, mas sem variação interanual. Após o ano de 2100 os agentes forçantes foram mantidos constantes.