

**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

# **TRANSPORTES ASSOCIADOS E ESTRUTURA VERTICAL DE UM ANEL DAS AGULHAS**

**MARIA ISABEL DOS SANTOS BARROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre.

Orientador: *Prof. Dr.* JOSÉ LUIZ LIMA DE AZEVEDO

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Agosto de 2016

# **TRANSPORTES ASSOCIADOS E ESTRUTURA VERTICAL DE UM ANEL DAS AGULHAS DISSERTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre

por

**MARIA ISABEL DOS SANTOS BARROS**

Rio Grande, RS, Brasil

Agosto de 2016

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.

BARROS, MARIA ISABEL DOS SANTOS

Transportes associados e estrutura vertical de um anel das Agulhas.  
/ Maria Isabel dos Santos Barros. – Rio Grande: FURG, 2016.

76 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande.  
Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica. Área de  
Concentração: Oceanografia Física.

1. Anéis das Agulhas. 2. Argo. 3. Altimetria. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
IO - INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA.  
E-mail: [ccpofqg@furg.br](mailto:ccpofqg@furg.br) – home-page: [www.oceanfisquigeo.furg.br](http://www.oceanfisquigeo.furg.br)



## ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 14/2016

Às 14 horas e trinta minutos do dia 29 de agosto do ano dois mil e dezesseis, no Auditório João Rocha IO –FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** intitulada **"Transportes Associados e Estrutura Vertical de um Vórtice das Agulhas."** da **Acad. Maria Isabel dos Santos Barros**. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo - Orientador/ Presidente (IO-FURG), Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata (IO-FURG) e Prof. Dr. Leopoldo Rota de Oliveira (UNIPAMPA). Dando início à reunião, a Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que a Candidata teria um tempo de 45 a 60 min para explanação do tema, e cada membro da Comissão Examinadora, um tempo máximo de 30 min para perguntas. A seguir, passou à palavra a Candidata que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se em reservado para discussão do conceito a ser atribuído à Candidata. Foi estabelecido que as sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo Orientador/Candidato para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente, a Comissão Examinadora considerou a candidata **APROVADA**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pela Candidata e pela Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo  
Presidente

Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata

Prof. Dr. Leopoldo Rota de Oliveira

Acad. Maria Isabel dos Santos Barros

Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes  
Coordenadora PPGOFQG

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Zé Luiz, que aceitou me orientar, pela paciência e pelos ensinamentos tanto em sala de aula quanto fora dela.

Aos membros da banca Leopoldo Oliveira e Maurício Mata, por aceitar ler e contribuir com minha dissertação.

À Evan Mason, por ceder a rotina em python para identificação dos vórtices, pelo auxílio na sua compreensão, pela paciência e por sempre responder minhas dúvidas.

Aos meus pais, Sueli e Lucas, que mesmo sem fazer ideia do que eu faço me deram total apoio. Obrigada pelo apoio, cobranças, incentivos e por nunca deixarem que eu não acreditasse em mim mesma.

Ao meu companheiro de casa, Wilton, por ouvir cada choramingo, por dividir aquele velho Fabiano/Bauru na caixinha/ pizza/ qualquer comida gordurosa, por me incentivar mesmo quando eu queria só jogar a toalha. Minha estadia em Rio Grande foi muito mais divertida com você e Salem.

Às Megeras, pelo apoio de sempre, mesmo estando cada uma em um estado. Vocês sempre serão minha família fora da família.

Aos amigos baianos perdidos aqui em Rio Grande, Pumba, Raiza, Ana Paula, Talisson. Nós criamos um pedacinho da Bahia aqui e isso tornou minha vida bem mais leve.

Às minhas companheiras e treinador do meu time de rugby, o Atlântico Sul, por me dar uma outra família e uma paixão que nunca tive por praticar esporte. Vocês sempre estiveram no meu apoio e me ensinaram a nunca desistir. E, obrigada principalmente, por me mostrar que melhorar sempre é necessário e que às vezes demora, mas o resultado da persistência chega.

Aos meus amigos que o mestrado meu deu: Fiamma, Cate, Arthur, Átila, Juan, Iarema e Marcus, pelos churrascos, jantares, risadas, grupos de estudo, rodas

de fofoca, ajudas com dados, enfim, por passarem por isso também e estarem sempre lá para descontraír quando necessário e torcendo uns pelos outros.

Por fim, agradeço aos meus companheiros de sala, em especial Natália e Lucas, pelas rotinas cedidas e auxílio no trabalho. Mas, principalmente, pela companhia por estes dois anos e meio, e pelo sempre presente clima de descontração que tornaram os dias no LEOC bem mais divertidos.

# Resumo

Vórtices oceânicos liberados na região da Retroflexão das Agulhas são responsáveis por um grande vazamento de águas centrais mais salinas e quentes do Oceano Índico para o Atlântico. Esse vazamento é a principal fonte de águas de termoclina para o Atlântico Sul. Este trabalho tem como objetivo avaliar a estrutura vertical média da temperatura, salinidade e velocidade bem como o transporte de massa, sal e calor de um anel das Agulhas. Mapas diários de anomalia da superfície do mar foram utilizados para identificar anéis emitidos pela Retroflexão das Agulhas entre os anos de 2008 e 2013. A análise da estrutura vertical utilizou flutuadores Argo que foram capturados ou atravessaram a trajetória do anel escolhido. Foram identificados 26 anéis nesse período com duração maior que 6 meses e desses um foi escolhido para as seções zonais de temperatura, salinidade e velocidade de rotação. Desses foram escolhidos 7 de maior duração e que tiveram no mínimo 20 perfiladores cruzando com suas trajetórias. Foram encontrados em média 80 perfis por vórtice, que tiveram amplitude média de  $22,71 \pm 5,12$  cm e raio médio de  $142,74 \pm 17,98$  km e velocidade média de propagação de  $4,97 \pm 0,30$  cm/s. O tamanho médio do raio está dentro dos valores característicos para os anéis das Agulhas [[Lutjeharms & van Ballegooyen 1988](#)] bem como a amplitude e a velocidade de propagação. O anel selecionado foi observado inicialmente em maio de 2011 e durou 613 dias. Tem amplitude média de 21,8 cm; raio médio de 157,6 km e velocidade de propagação média de 5,5 cm/s. A velocidade radial máxima foi de 42 cm/s. O volume de água anômala foi de  $14 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>. Os transportes de volume, calor e sal foram de 0,41Sv, 0,005PW e  $0,10 \times 10^6$  kg/s, respectivamente.

**Palavras-Chave:** anéis das Agulhas, altimetria, perfiladores Argo, estrutura vertical de um vórtice.

# Abstract

Mesoscale eddies shed at the Agulhas Retroflection zone carry warmer and saltier Indian Ocean Waters to the South Atlantic. That leakage is the Atlantic Ocean main source of thermocline waters. In this study, we reconstruct the Agulhas ring mean vertical structure of salinity, temperature and geostrophic velocities, as well as its volume, heat and salt transports. We used daily sea level anomaly maps from January 2008 to December 2013 to identify Agulhas rings. Data from ARGO floats that were caught or crossed the rings path were used for the reconstruction of the mean vertical structure of the ring. We tracked twenty-six rings with more than six months of time life and we picked one of those for vertical sections reconstruction of temperature, salinity and geostrophic velocities. We chose the seven longer lasted eddies that had at least 20 floats that crossed their path. Each eddy had, on average, 80 profiles for their possible reconstruction. The eddies had averaged surface height anomalies (SHA) of  $22,71 \pm 4,70$  cm, averaged radius of  $142,74 \pm 25,88$  km and averaged translation speed of  $5,20 \pm 0,30$  cm/s. The averaged radius estimated agrees with characteristic values for Agulhas [[Lutjeharms & van Ballegooyen 1988](#)], as well as the SHA and translational speed. The selected ring was identified initially at May 2011 and lasted 613 days. It has averaged SHA of a de  $21,80 \pm 6,27$  cm, averaged radius of  $157,60 \pm 29,15$  km and averaged translational speed of de  $5,50$  cm/s. The maximum radial speed was  $0,41$  m/s. The calculated eddy volume was  $13 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>. The volume, heat and salt transport were  $0,41$  Sv,  $0,005$  PW and  $0,10 \times 10^6$  kg/s, respectively.

**Keywords:** Agulhas rings, altimetry, Argo floats, eddy vertical structure.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	iv
<b>Resumo</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	viii
<b>Lista de Figuras</b> .....	xi
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xiii
<b>Lista de Acrônimos e Abreviações</b> .....	xiv
<b>Prefácio</b> .....	1
<b>Capítulo I: Introdução</b> .....	3
1.1 Vórtices oceânicos: definição e características gerais .....	3
1.2 A Retroflexão e os anéis das Agulhas.....	6
1.3 Translação pelo oceano Atlântico Sul e decaimento dos anéis das Agulhas .....	8
1.4 Influência dos anéis das Agulhas no clima global .....	11
1.5 Identificação de vórtices e estudos de sua estrutura vertical .....	13
<b>Capítulo II: Objetivos</b> .....	17
2.1 Objetivos específicos .....	17
<b>Capítulo III: Material e Métodos</b> .....	19
3.1 Dados de altimetria e identificação dos vórtices.....	19
3.2 Dados hidrográficos.....	26
3.3 Reconstrução da estrutura vertical dos vórtices .....	30
3.4 Cálculos do volume do vórtice médio e dos seus transportes de calor, salinidade e de massa .....	31
<b>Capítulo IV: Resultados</b> .....	34
4.1 Identificação e acompanhamento dos vórtices .....	35
4.2 Reconstrução da estrutura vertical .....	38
4.2.1 Temperatura .....	39
4.2.2 Salinidade .....	40
4.2.3 Velocidade .....	41
4.3 Transportes de volume, calor e sal.....	42
<b>Capítulo V: Discussões</b> .....	46
5.1 Estrutura vertical de um anel das Agulhas .....	46
5.2 Fluxos de calor e sal entre os oceanos Índico e Atlântico através de vórtices....	48
<b>Capítulo VI: Conclusões</b> .....	52
<b>Referências bibliográficas</b> .....	56



# Lista de Figuras

- Figura 1.** Na esquerda: esquema apresentando um vórtice de núcleo frio. Em cores, estão representadas temperaturas crescentes do azul para o verde. Pode-se observar uma ascensão de águas mais frias no centro da feição. Na direita: esquema apresentando um vórtice de núcleo quente. Em cores, estão representadas temperaturas crescentes do azul para o amarelo. Pode-se observar um aprofundamento da camada de água mais quente no centro da feição. Fonte: Buss [2005] .....4
- Figura 2.** Esquema representando vórtice lente (a), vórtice anticiclônico não lente (b) e ciclônico não lente.  $H$  é a profundidade da camada superior exterior ao vórtice;  $\eta$  é o deslocamento da superfície livre do mar;  $\xi$  é o deslocamento da termoclina, e  $h$  a profundidade do vórtice. Fonte: Azevedo & Mata [2010].....5
- Figura 3.** Esquema do sistema da Corrente das Agulhas. As regiões sombreadas representam áreas mais rasas que 3000 metros. Linhas pontilhadas indicam a isóbata de 500 metros. Círculos pretos são vórtices anticiclônicos e círculos brancos, são vórtices ciclônicos. Retirado de Lutjeharms [2006].....7
- Figura 4.** Trajetória de anéis das Agulhas identificados pelo algoritmo automático desenvolvido por Chelton *et al.* [2011] entre os anos de 1992 e 2012. Fonte: Azevedo *et al.* [2012].....10
- Figura 5.** Acima: trajetória de um anel das Agulhas (Lílian) pelo OAS nos pontos em vermelho; em amarelo, os derivadores de superfície capturados por ele. Abaixo: valores de altura da superfície do mar (AAS) de todos os vórtices identificados por Guerra [2011] nos pontos azuis, com a curva média em verde; em vermelho, os valores de AAS para o vórtice Lílian.....11
- Figura 6.** Mapa de contornos da anomalia da superfície do mar para 1º de janeiro de 2008, em cm. Em azul estão os valores negativos e em vermelho os valores positivos.....24
- Figura 7.** Mapa de contornos da anomalia da superfície do mar para 2 de janeiro de 2008, em cm. Os pontos azuis são possíveis vórtices ciclônicos e os pontos vermelhos são possíveis vórtices anticiclônicos.....25
- Figura 8.** Ciclo de atividade de um flutuador Argo. Fonte: <http://www.argo.ucsd.edu/>.....27
- Figura 9.** Vórtice T20 em dois instantes de tempo,  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , da sua trajetória (mostrada pela linha azul cheia) ao longo do oceano Atlântico Sul. A figura mostra, para o instante  $t_i$  apenas, todos os detalhes necessários para um correto entendimento dos procedimentos de consideração dos perfiladores ARGO para a reconstituição da estrutura vertical média (RVM) da feição ao longo de toda a sua trajetória.....29
- Figura 10.** Exemplo de perfis de temperatura (à esquerda) e salinidade (à direita) utilizados no presente trabalho, provenientes de perfiladores Argo.....30
- Figura 11.** Seção vertical de temperatura. A linha azul pontilhada representa o polinômio ajustado para a anomalia de 0,25°C, que foi considerada o limite externo do vórtice médio.....32
- Figura 12.** Esquema representando a divisão da estrutura média em células de 5 metros de altura por 500 metros de largura para o cálculo dos transportes de volume, sal e calor.....33

<b>Figura 13.</b> Trajetória dos anéis de maior duração e com maior número de perfis ARGO identificados no período de 2008 a 2013. Em cores estão as isolinhas de batimetria distribuídas de 1000 em 1000 metros.....	<b>38</b>
<b>Figura 14.</b> Trajetória do vórtice T20 observado inicialmente em 17 de maio de 2011. Os pontos azuis representam a localização dos perfis Argo que foram utilizados na reconstrução da estrutura vertical do referido vórtice. As isóbatas estão apresentadas com intervalos de 1000 metros.....	<b>39</b>
<b>Figura 15.</b> a) Seção vertical de temperatura do vórtice. Os contornos em preto indicam as anomalias de temperatura. b) Seção vertical de salinidade do vórtice. Os contornos em preto indicam as anomalias de salinidade. Em cores, os valores de anomalia.....	<b>42</b>
<b>Figura 16.</b> Seção vertical da velocidade geostrófica do vórtice em m/s. Em cores são os contornos dos valores de velocidade. Em branco está destacada o contorno de velocidade nula.....	<b>43</b>
<b>Figura 17.</b> Seção vertical da temperatura do vórtice. Em pontilhado, o polinômio ajustado para anomalia de 0,25°C.....	<b>46</b>
<b>Figura 18.</b> A) Perfil vertical do transporte de calor, em Watts/m obtido através da seção vertical do vórtice médio. B) Perfil vertical do transporte de sal, em kg/s.m <sup>-1</sup> .....	<b>46</b>
<b>Figura 19.</b> Transporte de volume (a); de calor (b) e de sal (c) no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2013.....	<b>49</b>

# Lista de Tabelas

**Tabela 1.** Características gerais dos anéis das Agulhas selecionados entre os anos de 2008 e 2013.....**34**

**Tabela 2-** Cálculo do volume, transporte de volume, de sal e de calor de vórtices de trabalhos anteriores e do presente trabalho.....**43**

# Lista de Acrônimos e Abreviações

## A

**ASM** – Anomalia da Superfície do Mar

**AVHRR** – Radiômetros Avançados de Muito Alta Resolução (*Advanced Very High Resolution Radiometers*)

**AMOC** – Célula de Revolvimento do Atlântico. (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*)

## C

**CA** – Corrente das Agulhas

**CMEMS** – *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service*

**CNES** – *Centre National d'Études Spatiales*

## D

**DUACS** – *Data Unification and Altimeter Combination System*

## E

**ERM** – *Geosat Exact Repeat Mission*

**ERS** – Sensoriamento Remoto Europeu (*European Remote Sensing*)

**ESA** – Agência Espacial Europeia (*European Space Agency*)

## G

**GDAC** – *Global Data Assembly Center*

## N

**NASA** – *National Aeronautics and Space Administration*

## O

**OAS** – Oceano Atlântico Sul

## R

**RVM** – Reconstrução da Estrutura Vertical Média

## S

**SCA** – Sistema de Corrente as Agulhas

**SSALTO** – *Segment Sol multimissions d'Altimetrie, d'Orbitographie et de localisation précise*

## V

**VA** – Vórtices Anticiclônicos

**VC** – Vórtices ciclônicos

**VHRR** – Radiômetros de Muito Alta Resolução (*Very High Resolution Radiometers*)

## Prefácio

Vórtices oceânicos podem ser definidos como feições oceânicas caracterizadas por linhas de corrente fechadas [Kundu 1990]. Estas feições existem em escalas variáveis de tempo e espaço. Além disso, eles possuem águas de características termohalinas típicas de suas regiões de formação podendo transportá-las por grandes distâncias. Conforme interagem com as águas adjacentes, os vórtices trocam calor, sal e *momentum* realizando então o transporte destas propriedades em seu caminho. Por este motivo eles têm um papel fundamental no balanço termodinâmico e dinâmico dos oceanos, o que pode ser visto no oceano Atlântico Sul (OAS), o qual recebe sal e calor do oceano Índico por intermédio dos vórtices gerados na Retroflexão das Agulhas, os quais alimentam o seu giro subtropical [e.g. Gordon 1986].

Vórtices são importantes também no fluxo vertical de nutrientes, promovendo a produção primária em regiões oligotróficas como o Mar de Sargaço [McGillicuddy Jr et al. 1998]. Isto ocorre, em especial, no caso de

vórtices de núcleo frio (cyclônicos), em que há ressurgência de água em seu centro e transporte de nutrientes para a zona eufótica [e.g. [McGillicuddy Jr et al. 1998](#), [Oschlies & Garçon 1998](#)]. Vórtices anticiclônicos podem modelar a distribuição de organismos marinhos e de nutrientes nos oceanos, bem como sustentar comunidades em seu interior [[Villar et al. 2015](#)]. [Villar et al. \[2015\]](#) analisaram perfis verticais de vórtices das Agulhas obtidos na expedição Tara Oceans. Eles observaram que as altas taxas de mistura convectiva no vórtice, geradas pela forte perda de calor para a atmosfera na superfície, acabaram por disponibilizar nutrientes, que ocasionaram em “blooms” de fitoplâncton.

A região da Retroflexão das Agulhas é uma das mais energéticas do globo [e.g. [Lutjeharms 2006](#)]. Os vórtices liberados nesse local - a um ritmo médio de seis por ano [e.g., [Byrne et al. 1995](#)] - são responsáveis por um grande vazamento de águas do oceano Índico para o oceano Atlântico. Esse vazamento de Água Central do oceano Índico Sul é a principal fonte de águas de termoclina do Atlântico Sul e tem como efeito a geração de águas mais salinas e quentes nessa região [[Gordon 1986](#), [van Balleygooyen et al. 1994](#), [Souza et al. 2011](#)], auxiliando no balanço da termoclina do oceano Atlântico como um todo.



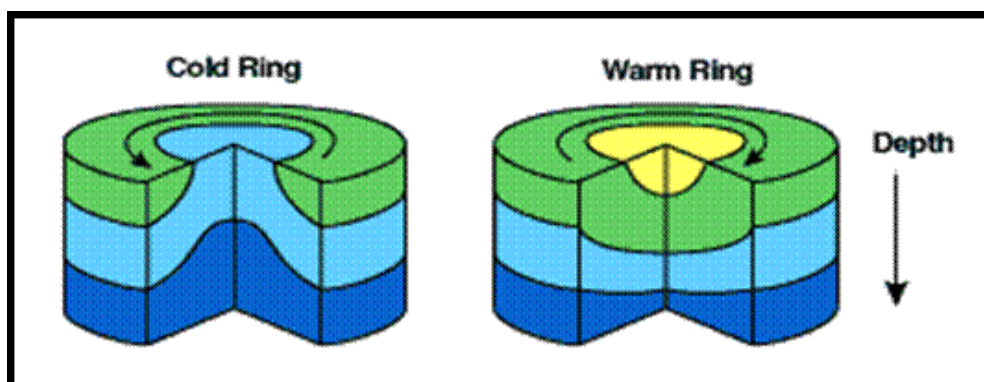
# Capítulo I: Introdução

Serão apresentadas na introdução as seguintes seções: i) uma breve definição de vórtices oceânicos, ii) descrição da Retroflexão das Agulhas e do processo de formação dos anéis das Agulhas, iii) descrição do caminho dos anéis das Agulhas pelo OAS o seu decaimento, iv) a influência dos anéis das Agulhas no clima global e v) estudos sobre identificação de vórtices e análise da sua estrutura vertical.

## 1.1 Vórtices oceânicos: definição e características gerais

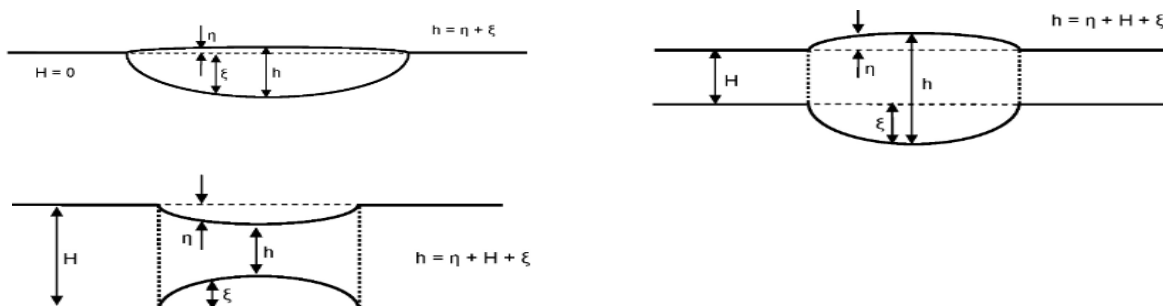
Vórtices oceânicos podem ser definidos como feições de circulação fechada relativamente persistente [[Cushman-Roisin & Beckers 2006](#)] que carregam as propriedades físicas, biológicas e físicas da região de formação [[Olson 1980](#)]. Essas estruturas têm origem na formação de instabilidades na

dinâmica da larga escala, como a formação de meandros em correntes de larga escala e sua eventual oclusão. Vórtices têm grande importância em transportar calor, sal e vortidade potencial e, por consequência, na mistura dos oceanos [Flierl 1979, Olson 1980]. Vórtices são diferenciados, principalmente, a partir da sua polaridade e pela sua estrutura vertical. A polaridade se relaciona com o sentido de rotação, que pode ser ciclônica ou anticiclônica. Vórtices ciclônicos tem uma rotação de mesmo sentido da rotação da Terra, sendo horária no Hemisfério Sul e anti-horária no Hemisfério Norte. Esses vórtices geram ascensão das isopícnais (fig. 1), sendo também nomeados de vórtices de núcleo frio, por terem águas de temperatura menor que o observado ao seu redor. Vórtices anticiclônicos rotacionam no sentido contrário aos vórtices ciclônicos, sendo seu giro então horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul. Ao contrário dos vórtices ciclônicos, os anticiclones geram rebaixamento das isopícnais, sendo denominados de vórtices de núcleo quente, por terem águas de temperatura maior que o observado ao seu redor.



**Figura 1.** Na esquerda: esquema apresentando um vórtice de núcleo frio. Em cores, estão representadas temperaturas crescentes do azul para o verde. Pode-se observar uma ascensão de águas mais frias no centro da feição. Na direita: esquema apresentando um vórtice de núcleo quente. Em cores, estão representadas temperaturas crescentes do azul para o amarelo. Pode-se observar um aprofundamento da camada de água mais quente no centro da feição. Fonte: Buss [2005].

A estrutura vertical de um vórtice pode ser dividida em formato de lente e de não lente. Esta nomenclatura foi desenvolvida a partir de estudos com modelos de duas camadas [Flierl 1979], em que há uma camada superior, de menor densidade e uma camada inferior, de maior movimento. Os vórtices anticiclônicos podem ter os dois formatos. Um vórtice anticiclônico de formato lente possui sua região interna toda contida na camada superior, e a região externa à feição está na camada inferior (fig. 2). Já um vórtice anticiclônico não lente não está isolado na camada superior, havendo água externa ao vórtice nessa camada. Vórtices ciclônicos podem ser apenas não lente, devido ao seu efeito de ascensão das isopícnais.



**Figura 2.** Esquema representando vórtice lente (a), vórtice anticiclônico não lente (b) e ciclônico não lente.  $H$  é a profundidade da camada superior exterior ao vórtice;  $\eta$  é o deslocamento da superfície livre do mar;  $\xi$  é o deslocamento da termoclina, e  $h$  a profundidade do vórtice. Fonte: Azevedo & Mata [2010].

Os anéis das Agulhas são um tipo de vórtice de maior intensidade e de longa duração. Essa expressão foi utilizada pela primeira vez por Fuglister [1972], que nomeou de anéis os círculos de águas da Corrente do Golfo que formavam vórtices através do estrangulamento de meandros de correntes. Anéis são, portanto, parte de uma corrente principal, em especial jatos de correntes, a exemplo das correntes de Contorno Oeste (Corrente do Golfo, Corrente das Agulhas, Corrente de Kuroshio) e da Corrente Circumpolar Antártica. Eles se

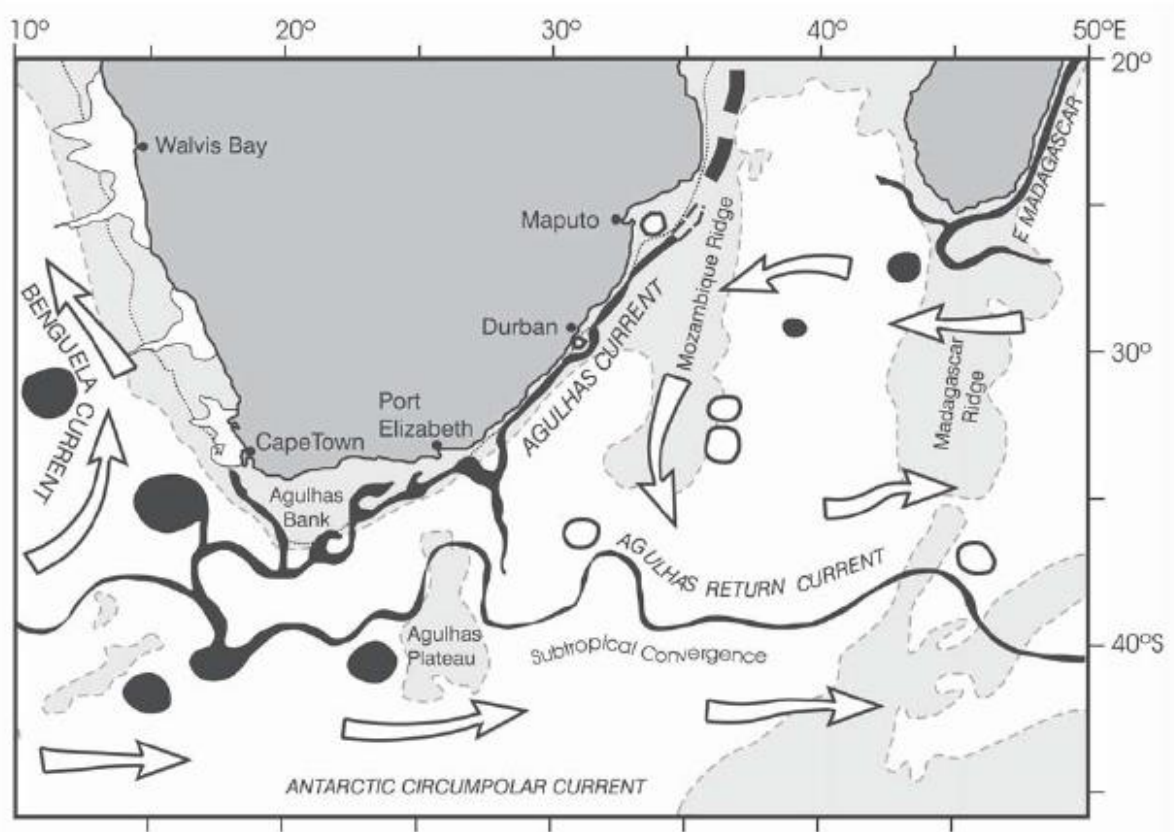
deslocam por centenas a milhares de quilômetros e duram de meses a anos[e.g. [Olson 1980](#), [Olson 1991](#)].

## 1.2 A Retroflexão e os anéis das Agulhas

Anéis anticiclônicos carregando águas superficiais do oceano Índico são formados no Sistema de Corrente das Agulhas (SCA), ilustrado na figura 3. A Corrente das Agulhas (CA) é uma corrente de contorno oeste que faz parte do giro subtropical do oceano Índico, e transporta em torno de 65 Sv. Seu fluxo é para sudoeste, seguindo a costa do sudeste da África e ela sofre uma mudança de direção que é chamada de retroflexão [[Lutjeharms 2006](#)]. Segundo [Ruijter](#) [1982]) e [Ruijter & Boudra](#) [1985], que utilizaram um modelo baroclínico forçado pelo vento, o motivo dessa mudança de direção está fortemente ligado à conservação da vorticidade potencial da corrente das Agulhas. Conforme a CA segue para sudoeste, foi observado um aumento de sua vorticidade relativa anticiclônica e um decréscimo substancial do rotacional do stress do vento local [[De Ruijter 1982](#)]. Sendo assim, quando a corrente segue para o sul da Cidade do Cabo e atinge o oceano aberto, onde o rotacional do estresse do vento chega a próximo de zero, ocorre uma inflexão da corrente e ela passa a seguir de volta pelo oceano Índico (fig. 3) já agora chamada de Corrente de Retorno das Agulhas.

A região de Retroflexão das Agulhas é a região de maior atividade de mesoescala do Atlântico Sul [[Lutjeharms 2006](#)]. No SCA, a Retroflexão é o

componente que apresenta maior variabilidade em diversas escalas espaciais [Lutjeharms 1981], apresentando um dos maiores valores de energia cinética turbulenta do OAS atingindo valores acima de  $500\text{cm}^2/\text{s}^2$  [Patterson 1985]. Essa variabilidade é relacionada tanto quanto à sua posição quanto a ocorrência de eventos em que ocorre estrangulamento da CA e posterior liberação de anéis [Lutjeharms & Ballegooyen 1988].



**Figura 3.** Esquema do sistema da Corrente das Agulhas. As regiões sombreadas representam áreas mais rasas que 3000 metros. Linhas pontilhadas indicam a isóbata de 500 metros. Círculos pretos são vórtices anticiclônicos e círculos brancos, são vórtices ciclônicos. Retirado de Lutjeharms [2006].

Lutjeharms & Ballegooyen [1988], utilizando imagens termais e transectos de batitermógrafos, mediram a extensão, variabilidade espacial e máxima incursão para oeste da retroflexão. Eles observaram que a posição da retroflexão é bastante variável, de  $16^{\circ}\text{L}$  a  $20^{\circ}\text{L}$ . Durante a inflexão da Corrente das Agulhas são formados meandros, que podem ser estrangulados e formarem vórtices

anticiclônicos. Esses vórtices, que são denominados de anéis das Agulhas, possuem principalmente águas de características idênticas às da CA e possuem um diâmetro se assemelha ao tamanho do *loop* formado pela corrente das Agulhas, que pode chegar a 300km.

A liberação de anéis das Agulhas tem uma forte variabilidade temporal e está associada à progradação da retroflexão para oeste no OAS, cuja periodicidade ainda não é clara, mas que alguns autores [e.g. [van Ballegooyen et al. 1994](#), [Byrne et al. 1995](#), [Garzoli et al. 1999](#)], sugerem ser a cada dois meses, resultando em uma liberação de seis anéis por ano. Embora também tenha sido observado por [Goñi et al. \[1997\]](#) que existem períodos do ano em que nenhum anel é liberado, então não há uma regularidade neste evento ao longo dos anos. Anéis das Agulhas mantêm as características hidrográficas e cinemáticas da CA quando são liberados, tendo também uma estrutura vertical similar [[Olson & Evans 1986](#)]. Devido à forte troca de calor entre o oceano e atmosfera na sua região de formação, a assinatura térmica positiva dos anéis desaparece rapidamente, restando apenas sua assinatura de SSH [e.g. [Schouten et al. 2000](#)].

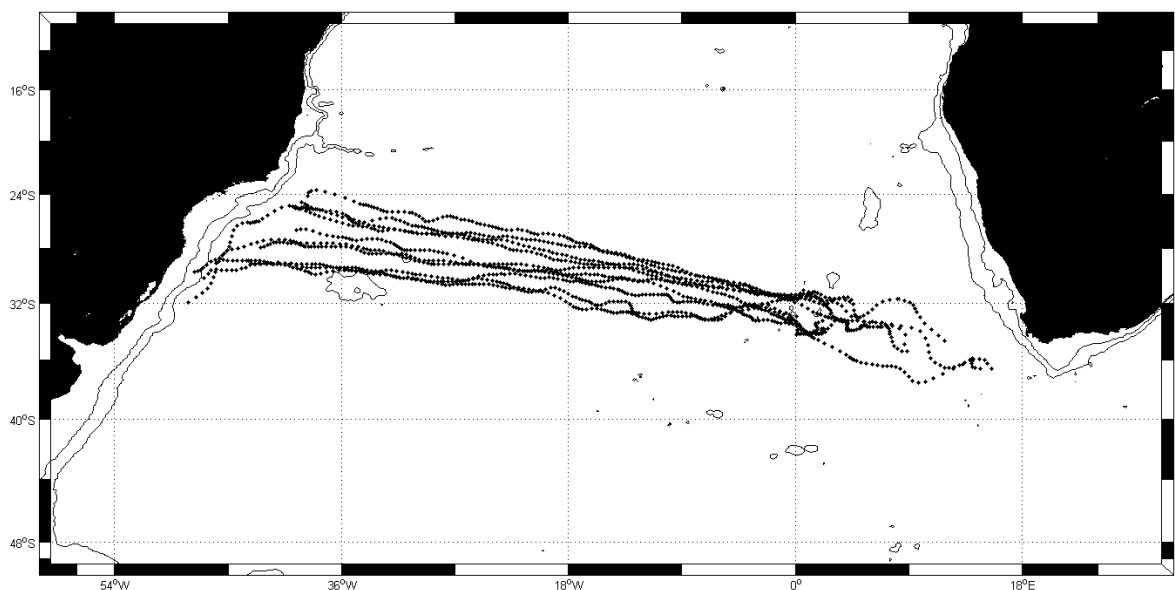
### 1.3 Translação pelo oceano Atlântico Sul e decaimento dos anéis das Agulhas

Após sua liberação, os anéis das Agulhas podem ter dois caminhos principais: carregados pela Corrente de Benguela ou seguir pela direção noroeste no OAS. Os anéis seguem a batimetria na Bacia do Cabo, no sentido noroeste [e.g. [Byrne et al. 1995](#), [Schouten et al. 2000](#)]. Próximo a 35°S o caminho dos anéis das Agulhas se torna mais zonal, e se observa o caminho dos vórtices ser predominantemente para oeste [[Byrne et al. 1995](#)]. [Garzoli & Gordon \[1996\]](#)

propuseram a existência de um caminho preferencial que os anéis das Agulhas seguiriam, chamado de Corredor dos Vórtices das Agulhas, que se encontra entre os paralelos de 20°S e 30°S e pode ser exemplificado na figura 4. Posteriormente, [Goñi et al. \[1997\]](#) sugeriram outro corredor de anéis das Agulhas, que segue as isolinhas de energia cinética turbulenta e que foi confirmado por trabalhos posteriores [e.g. [Schouten et al. 2000](#)]. O caminho que cada anel segue tem influência direta da sua auto-propulsão por efeito beta [[Nof 1981](#)], da topografia de fundo [e.g. [Gordon & Haxby 1990](#), [Byrne et al. 1995](#), [Schouten et al. 2000](#)] e do fluxo de larga escala [e.g. [Olson & Evans 1986](#), [Byrne et al. 1995](#)]. Esses anéis podem levar mais de dois anos e meio para atravessar o OAS, mas menos de 2/3 dos anéis das Agulhas atravessam a Cadeia Walvis. Os anéis seguem com velocidade média de 4,8 km/dia [[Schouten et al. 2000](#)]. Maiores velocidades são observadas durante a travessia dos vórtices da Bacia do Cabo, de 5,2 km/dia para 4,6km/dia após a passagem por batimetrias mais rasas, na Cadeia Walvis [[Schouten et al. 2000](#)].

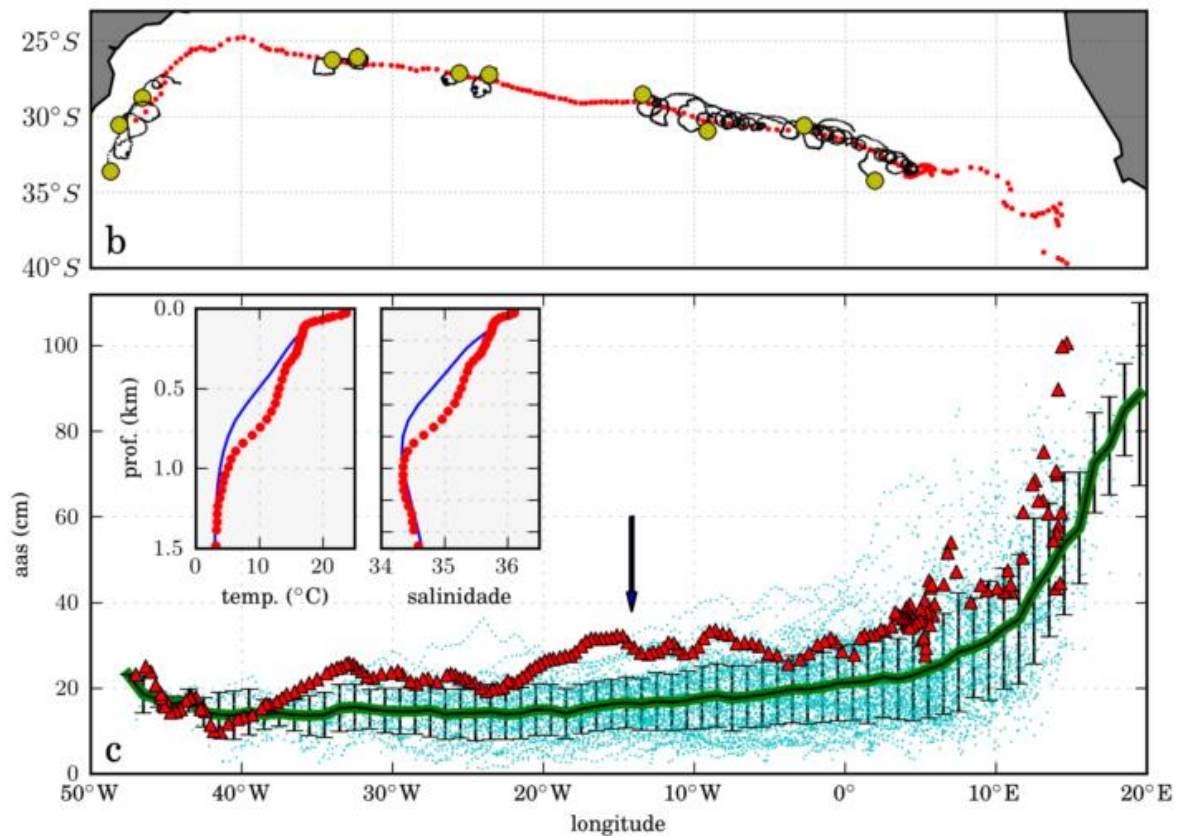
Conforme seguem para longe de sua região de formação, foi observado que a amplitude dos anéis das Agulhas sofre um decréscimo [[Byrne et al. 1995](#), [Schouten et al. 2000](#), [Guerra 2011](#)] (fig. 5). Esse decaimento está associado à perda de calor para a atmosfera, juntamente com uma alta taxa de evaporação na região da Bacia do Cabo e da mistura das águas anômalas do anel com águas adjacentes, causando uma diminuição na energia cinética [[Schouten et al. 2000](#)]. A diminuição de sua energia depende da circulação do anel, do tempo passado desde sua formação, da sua velocidade de translação e da topografia do fundo [[Byrne et al. 1995](#), [Schouten et al. \[2000\]](#) encontraram um decréscimo de 50% na amplitude dos anéis das Agulhas nos primeiros 5 meses de vida. [Byrne et al.](#)

[1995] encontraram uma diminuição de 90% na amplitude de anéis das Agulhas observados em seu trabalho quando chegam a 40°W em relação aos valores do início da sua trajetória. Foi observado que durante sua passagem pela Cadeia Walvis no Atlântico Sul, os anéis têm uma diminuição considerável de sua amplitude e o sinal de parte deles de altura da superfície do mar não é mais captado pelos altímetros, sendo esta região conhecida por “cemitério de vórtices”. Também foi observado por Schouten *et al.* [2000] que a Cadeia Walvis é responsável pela partição de anéis, quando um anel se divide em dois ou mais vórtices menores. Essa divisão é induzida pela topografia de fundo. Após a passagem pela Cadeia Walvis se observa menor decaimento das amplitudes dos anéis, possivelmente pela menor interação dos mesmos com a batimetria de fundo [Byrne *et al.* 1995, Schouten *et al.* [2000].



**Figura 4.** Trajetória de anéis das Agulhas identificados pelo algoritmo automático desenvolvido por Chelton *et al.* [2011] entre os anos de 1992 e 2012. Fonte: Azevedo *et al.* [2012].





**Figura 5.** Acima: trajetória de um anel das Agulhas (Lilian) pelo OAS nos pontos em vermelho; em amarelo, os derivadores de superfície capturados por ele. Abaixo: valores de altura da superfície do mar (AAS) de todos os vórtices identificados por Guerra [2011] nos pontos azuis, com a curva média em verde; em vermelho, os valores de AAS para o vórtice Lilian. Fonte: Guerra [2011].

#### 1.4 Influência dos anéis das Agulhas no clima global

O vazamento (transporte) das águas mais quentes e salinas do oceano Índico para o oceano Atlântico é dominado por estruturas de mesoescala, como os anéis das Agulhas [eg. Gordon 1996]. Portanto, anéis das Agulhas têm um papel importante em determinar a estrutura das massas de água e os fluxos de sal e calor entre os oceanos Atlântico e Índico [e.g. Olson & Evans 1986]. As estimativas de fluxo direto de volume água do oceano Índico para o oceano Atlântico variam entre 4 [Garzoli *et al.* 1997] e 10 Sv [Gordon *et al.* 1987]. O vazamento de águas do OI para o OAS via anéis das Agulhas em um ano foi estimado em 2 Sv, por Gordon & Haxby [1990] e 15 Sv por Gordon [1985],

enquanto [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) e [Byrne et al. \[1995\]](#) estimaram um transporte entre 6,3 e 7 Sv por ano. A alta variabilidade observada na estimativa dos transportes está associada aos diferentes critérios empregados para o cálculo do volume do vórtice, tanto no cômputo da profundidade de referência que será base para o cálculo de transporte quanto na obtenção da região de água aprisionada [[De Ruijter et al. 1999](#)]. Por exemplo, [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) utilizam como referência para o cálculo de transporte a profundidade da isoterma de 10°C, que representa o limite externo dos anéis das Agulhas. Já [Byrne et al. \[1995\]](#) utilizaram como profundidade de referência a isóbata de 1500db. Trabalhos anteriores sobre os anéis das Agulhas também calcularam o transporte de calor e sal para o OAS. [Gordon \[1985\]](#) obteve um fluxo de calor entre 0,023 e 0,47 PW anuais, enquanto [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) encontraram valores de 0,045 PW em cada anel e 0,27 PW anuais. Já o transporte de sal foi observado entre  $0,015 \times 10^6$  kg/s por [Lutjeharms & Cooper \[1996\]](#) até a ordem de  $2,5 \times 10^6$  kg/s por [Ballegooyen et al. \[1994\]](#).

Os anéis das Agulhas são também uma fonte de energia cinética para o OAS, sendo que somente um anel pode contribuir com 7% da energia pelo vento na bacia do oceânico Atlântico [[Olson & Evans 1986](#)]. [Olson & Evans 1986](#) estimaram que anéis das Agulhas contém entre 37 e  $67 \times 10^{15}$  J de energia mecânica, que ultrapassa a energia contida em vórtices de outras regiões, como os anéis da Corrente do Golfo. Eles também encontraram um fluxo de energia induzido por um anel das Agulhas de  $6,7 \times 10^9$  W, indicando que os anéis dominam a energia turbulenta em todo o giro subtropical do Atlântico Sul [[Olson & Evans 1986](#)].

Nos últimos 20 anos foi observado um aumento no vazamento de águas do oceano Índico para o OAS, associado a um aumento no giro subtropical do oceano Índico por forçamento do vento [Bjastoch *et al.* 2009]. Esse aumento no transporte de volume tem sido associado a uma tendência de aquecimento e salinização das águas do OAS [Bjastoch *et al.* 2009, Backenberg *et al.* 2012]. A tendência de mudanças nas propriedades das águas do OAS pode influenciar no balanço termohalino do oceano Atlântico e com aplicações diretas no clima global, através de sua influência na Célula de Revolvimento do Atlântico (AMOC, em inglês) [Weijer *et al.* 2002, Bjastoch *et al.* 2008]. O oceano Atlântico Sul (OAS) tem a característica única de transportar calor para o Equador e posteriormente para o Atlântico Norte por meio do vazamento de água da termoclina do oceano Índico na chamada “rota de água quente” [Gordon 1986]. Essas águas do vazamento das Agulhas participam posteriormente da formação da Água Profunda do Atlântico Norte [Gordon 1986, Beal *et al.* 2011]. Um transporte de volume de 15 Sv é necessário para balancear os fluxos de calor e sal nos oceanos [Gordon 1985]. E só há duas passagens para essa água: a Passagem de Drake, que contribui com águas intermediárias do Pacífico, e tem contribuição menor; e o Sul da África, através do vazamento de Águas do Oceano Índico, que preenchem as camadas centrais do OAS [e.g. Gordon 1986, Beal *et al.* 2011].

### 1.5 Identificação de vórtices e estudos de sua estrutura vertical

O advento dos satélites permitiu observações contínuas e globais para diferentes parâmetros oceanográficos: temperatura da superfície do mar, cor do oceano, distribuição do gelo marinho, marés e ventos e nível do mar (por meio

de altimetria) [e.g. [Le Traon 2001](#)]. Diversos estudos sobre vórtices têm utilizado dados provenientes de sensores radiométricos, tais como temperatura da superfície do mar e cor do oceano [e.g., [Lutjeharms & van Ballegooyen 1988](#), [Souza et al. 2014](#)] e de sensores altimétricos [e.g. [Gordon & Haxby 1990](#), [Byrne et al. 1995](#), [Schouten et al. 2000](#), [Chelton et al. 2007](#), [Siegel et al. 2008](#), [Chelton et al. 2011](#)].

[Lutjeharms & van Ballegooyen 1988](#) utilizaram imagens de infravermelho termal de dezembro de 1984 a dezembro de 1985 de diferentes fontes: sensores radiométricos a bordo dos satélites METOSAT I e II, o sensor *Very High Resolution Radiometers* (VHRR), a bordo dos satélites NOAA 4 e 5, e o *Advanced Very High Resolution Radiometers* (AVHRR) a bordo dos satélites NOAA 6 e 7, TIROS N e Nimbus 7. Com essas imagens de infravermelho estes autores estudaram gradientes horizontais de temperatura superficial para estudar a Corrente das Agulhas e a variabilidade espacial e temporal da posição da Retroflexão das Agulhas, descrita anteriormente e região de formação dos anéis das Agulhas. [Chelton et al. \[2007\]](#) utilizaram 10 anos de campos de altura da superfície do mar (SSH, em inglês) construídos a partir de dados dos altímetros a bordo dos satélites TOPEX/POSEIDON e ERS 1/2 para estudar a variabilidade da mesoescala nos oceanos globais. Eles desenvolveram um método automático para identificar vórtices no globo e observaram que a variabilidade de SSH é dominada por vórtices. [Chelton et al. \[2011\]](#) ampliaram o período de abrangência da pesquisa de [Chelton et al. \[2007\]](#) em 10 anos, fornecendo identificação de vórtices nos oceanos globais de 1992 a 2012. Eles concluíram que há predominância de feições não lineares (nesse caso, vórtices) na mesoescala, principalmente fora da faixa entre 20°S e 20°N. [Pilo et al. \[2015\]](#)

utilizaram o banco de dados desenvolvido por [Chelton et al. \[2011\]](#) e realizaram a estatística de vórtices de três grandes sistemas de corrente de Contorno Oeste, chamadas de CCOs do hemisfério Sul, a Corrente das Agulhas, a Confluência Brasil-Malvinas e a Corrente Leste Australiana. Eles encontraram um total de 1376 vórtices identificados durante 20 anos.

A identificação de vórtices pode ser realizada visualmente, como nos trabalhos de [Schouten et al. \[2000\]](#) e [Guerra \[2011\]](#), mas existem vários tipos de algoritmos automáticos para essa identificação, os quais utilizam mapas de Anomalia da Superfície do Mar (ASM). Eles podem se basear em características físicas, como aqueles que utilizam o método Okubo-Weiss, ou geométricas, neste caso do campo de correntes superficiais. Essas correntes são a componente barotrópica do escoamento e são calculadas por aproximação geostrófica a partir do gradiente de pressão causado por desníveis na superfície livre. [Chaigneau et al. \[2009\]](#) discutiram os dois principais métodos: geométrico e físico. Eles concluíram que o método geométrico era o mais adequado por estimar com melhor acurácia os centros dos vórtices e produzir menos falsas identificações. [Souza et al. \[2011\]](#) compararam a eficácia do uso dos métodos automáticos para identificação de vórtices pelo parâmetro Okubo-Weiss, pelo critério de ondeletas e por critérios geométricos, e também concluíram que o método geométrico apresenta a melhor performance em questões de identificação e rastreamento de vórtices, em especial os de longa duração.

O estudo da estrutura vertical e análise de perfis de temperatura, salinidade e velocidade de corrente dos vórtices pode ser realizado através de diferentes métodos: utilizando-se derivadores de superfície, o uso de perfiladores Argo [[Chaigneau et al. 2011](#), [Souza et al. 2011](#)], a utilização de

correntômetros em estações fixas ou cruzeiros [van Ballegooyen *et al.* 1994, Garzoli *et al.* 1999, van Aken *et al.* 2003] e modelagem numérica [McWilliams & Flierl 1979, Guerra 2011]. Estudando o sistema de correntes Peru-Chile, Chaigneau *et al.* [2011] utilizaram mapas de anomalia da superfície do mar (ASM) para a identificação de vórtices por meio de um método geométrico e perfiladores Argo para analisar a estrutura vertical de vórtices ciclônicos e anticiclônicos da região. Foram feitas comparações entre os vórtices presentes nas regiões norte e sul do domínio e foi calculado o transporte de calor e de sal pelos vórtices do sistema de correntes Peru-Chile, obtidos através das anomalias de temperatura e salinidade, respectivamente. Souza *et al.* [2011] realizaram um procedimento parecido, mas desta vez estudando os anéis das Agulhas. A identificação dos vórtices foi realizada pelos autores com a utilização de um algoritmo automático a partir de mapas de ASM do período de 2005 a 2008. Para o estudo da estrutura vertical e cálculo de transportes de calor e volume dos vórtices foram utilizados perfiladores Argo. O trabalho apresentou uma estrutura vertical média de temperatura e velocidade geostrófica para um vórtice selecionado. Foram observados valores de transporte de volume de 1,7 a 3Sv, e um transporte meridional de calor de 0,027PW, com uma média anual de 0,062 PW. McWilliams & Flierl [1979] estudaram a evolução de vórtices não lineares por meio de um modelo de duas camadas e Guerra [2011] um modelo de gravidade reduzida para avaliar a estrutura e evolução dos anéis das Agulhas ao longo do seu caminho pelo OAS).

## Capítulo II: Objetivos

**A**valiar a contribuição anual dos anéis das Agulhas no transporte de volume, calor e sal entre as bacias oceânicas dos oceanos Índico e Atlântico.

### 2.1 Objetivos específicos

- Obter uma estrutura vertical média de um vórtice identificado;
- Analisar os transportes de sal, calor e volume de um anel liberado

pela região de Retroflexão das Agulhas a partir da estrutura média.

Um algoritmo automático a partir de mapas anomalia da superfície do mar (ASM) foi utilizado para identificar os anéis das Agulhas. Uma vez identificados, foram selecionados apenas os anéis que tiveram mais de seis meses de duração. Apenas um anel foi selecionado para reconstrução da estrutura vertical, que foi realizada a partir de perfiladores Argo que foram capturados ou cruzaram a trajetória desse vórtice.

Os resultados estão divididos em três partes: a identificação dos vórtices, descrição de suas características gerais e trajetórias; a reconstrução de seções verticais de temperatura, salinidade e velocidade de um vórtice selecionado e os cálculos de transporte de volume, calor e sal a partir das seções verticais do vórtice.



## Capítulo III: Material e Métodos

O presente trabalho consistiu de duas etapas principais: (i) a identificação de anéis das Agulhas com a utilização de altimetria de satélite e (ii) a obtenção de uma estrutura vertical média de um anel selecionado a partir de uma trajetória previamente definida e de dados de temperatura e salinidade provenientes de perfiladores Argo que entraram em contato com o vórtice durante a sua trajetória no oceano Atlântico Sul. Posteriormente, foram calculados o volume do vórtice e os seus transportes de calor e sal, baseando-se para tal na sua estrutura vertical reconstruída.

### 3.1 Dados de altimetria e identificação dos vórtices

A identificação e acompanhamento de anéis das Agulhas baseado na altura da superfície do mar tornou-se possível desde o lançamento do satélite *Geosat Exact Repeat Mission* (ERM) em 1985. Os primeiros trabalhos sobre a dinâmica de vórtices utilizando altimetria faziam uma identificação visual de anomalias da superfície do mar positivas, que representam vórtices

anticiclônicos [e.g., [Gordon & Haxby 1990](#), [Byrne et al. 1995](#)]. No início da década de 90, a Agência Espacial Europeia (ESA) lançou o satélite da série *European Remote Sensing*, o ERS1 e posteriormente o ERS2, tornando-se então possível a obtenção de valores de altura da superfície do mar com precisão de até 5 cm. O lançamento da missão TOPEX/POSEIDON em 1992 pelas agências francesa *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), e americana *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) possibilitou a disponibilização de dados mais precisos e de maior resolução espacial que o dos antigos satélites. A precisão da ASM passou para 2 cm com uma repetição de leitura a cada 10 dias. Uma série de outros trabalhos resultou da utilização dos dados desta missão [eg. [Grundlingh 1995](#), [Goñi et al. 1997](#), [Oschlies & Garçon 1998](#), [Arhan et al. 1999](#), [Siegel et al. 1999](#); [Schouten et al. 2000](#)]. As órbitas dos satélites anteriores complementam as desta missão, tendo sido criados dados combinados multisatelitais que possibilitaram aos pesquisadores um melhor mapeamento da superfície do mar, e por consequência, a mesoescala. Outros satélites foram lançados (JASON-1 em dezembro de 2001, ENVISAT em 2002) em substituição dos anteriores, que não estão mais em funcionamento, e a combinação com esses novos dados tem possibilitado a inferência de propriedades dinâmicas de feições de mesoescala. Hoje se tem um banco de dados de altura da superfície do mar, dentre outros produtos de altimetria, de mais de 20 anos.

Com o passar do tempo e o aprimoramento dos computadores, algoritmos automáticos começaram a ser desenvolvidos para a identificação e acompanhamento de vórtices a partir de dados altimétricos. Diferentes são os algoritmos de identificação de vórtices e eles utilizam mapas de anomalia da

superfície do mar (ASM). Eles podem se basear em características físicas, como o método Okubo-Weiss, ou geométricas do campo de correntes superficiais. Essas correntes são a componente barotrópica do escoamento e são calculadas por aproximação geostrófica a partir do gradiente de pressão causado por desníveis na superfície livre. [Chaigneau et al. \[2008\]](#) discutiram os dois principais métodos: geométrico e físico. Eles concluíram que o método geométrico era mais adequado por estimar com melhor acurácia os centros dos vórtices e produzir menos falsas identificações. [Souza et al. \[2011\]](#) compararam o método Okubo-Weiss, por uma análise de ondeletas, e por critérios geométricos, e também concluíram que o método geométrico apresenta a melhor performance em questões de identificação e rastreamento de vórtices, em especial os de longa duração. Sendo assim, o método escolhido para este trabalho utiliza critérios geométricos, como os contornos de ASM e linhas de correntes geostróficas e será descrito posteriormente.

Embora os artigos citados anteriormente tenham inferido o método de critérios geométricos como o mais adequado, estudos recentes fazem uso do método Okubo-Weiss na identificação de vórtices [eg. [Chelton et al. 2007](#), [Zhang et al. 2014](#), [Guerra 2011](#)]. Mas o uso de métodos geométricos tem sido amplamente utilizado em diversos trabalhos [e.g [Chaigneau et al. 2008](#), [Chaigneau et al. 2011](#), [Souza et al. 2011](#), [Chelton et al. 2011](#)].

Mapas de anomalia da superfície do mar (ASM) que cobriram o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2013 foram utilizados na região do oceano Atlântico Sul: de 20°L a 50°W e de 50°S a 10°S. Os dados são multisatelitais e produzidos pelo *Segment Sol multimissions d' ALTimétrie, d'Obitographie et de localisation précise* (Ssalto) e pelo *Data Unification and Altimeter Combination*

*System* (Duacs), e são distribuídos pelo *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service* (CMEMS). A ASM é calculada com referência a uma média de 20 anos (1992-2012) numa grade Mercator de  $1/3^\circ$  que é então interpolada para uma grade regular com resolução espacial de  $1/4^\circ$  e temporal de um dia.

A identificação dos vórtices foi realizada através de um algoritmo desenvolvido em linguagem Python por Evan Mason, Ananda Pascual e James McWilliams e que é descrito em [Mason et al. \[2014\]](#). O algoritmo tem como *input* uma sequência de mapas diários de ASM globais, no período descrito anteriormente, e que posteriormente são recortados para a região de interesse. Os campos de anomalia são filtrados espacialmente por um filtro gaussiano passa alta com raio zonal de  $10^\circ$  e raio meridional de  $5^\circ$ , resultando em campos suavizados de ASM. Então contornos são computados em intervalos de 1 cm. A figura 6 apresenta um exemplo de um *snapshot* de contornos de ASM gerado pelo algoritmo citado acima. Em verde estão marcadas regiões de alta variabilidade de anomalia da superfície do mar, como o Caldeirão do Cabo. A identificação de vórtices ciclônicos (VC) e anticiclônicos (VA) ocorre através da procura por contornos fechados de ASM em ordem crescente e decrescente, respectivamente. A seleção de um conjunto de contornos fechados sequenciais como sendo um vórtice segue os seguintes critérios propostos por [Chelton et al. \[2011\]](#) e por [Mason et al. \[2014\]](#):

- O contorno fechado mais externo é ajustado a uma circunferência, que representa a forma ideal de um vórtice. Se a área desse contorno fechado tiver uma semelhança de no mínimo 55% da área dessa circunferência, o primeiro critério é atingido;
- O conjunto de contornos fechados deve conter entre 8 e 1000

pixels;

- O conjunto de contornos fechados deve possuir um único máximo ou mínimo local para vórtices anticiclônicos e ciclônicos;
- Os contornos de anomalia devem ser decrescentes em caso de um vórtice anticiclônico e crescente no caso de um vórtice ciclônico
- A amplitude desse possível vórtice deve encontrar-se entre 1 e 150 cm

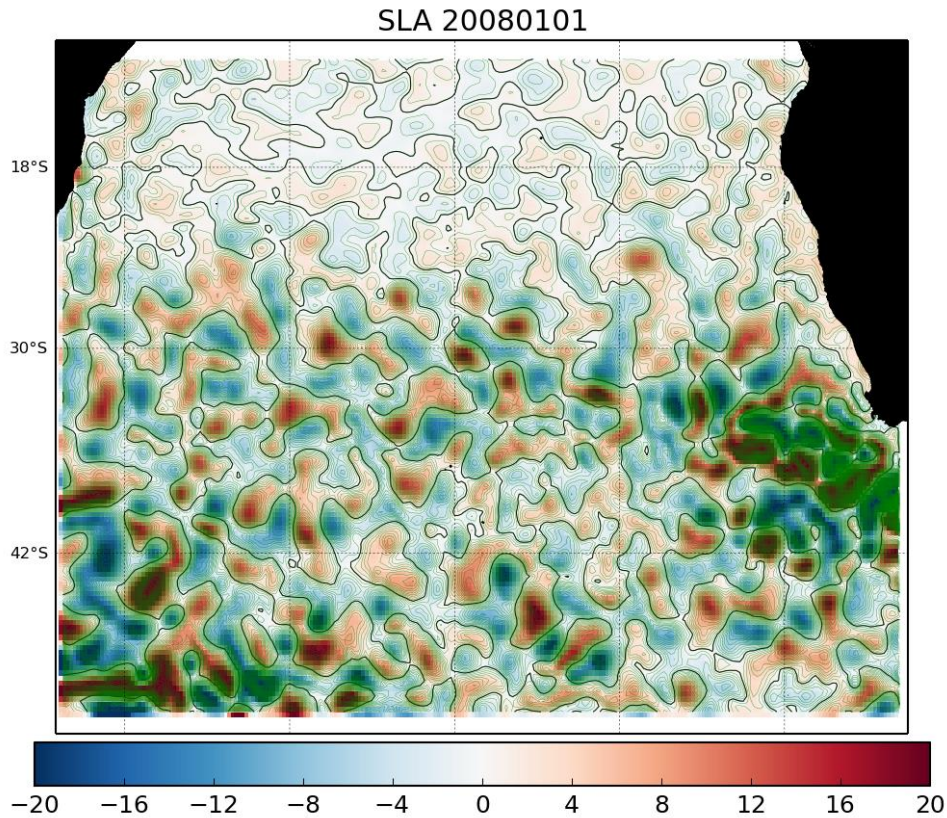
Um contorno fechado que passe nos critérios anteriores é considerado um vórtice. A figura 7 apresenta vórtices identificados no dia 2 de janeiro de 2008 com os pontos vermelhos representando VA e pontos azuis VC. O valor de raio que será computado a este vórtice é o de um círculo que tem a mesma área deste contorno. Esse valor é chamado de raio efetivo. Posteriormente, as correntes superficiais são calculadas utilizando a aproximação geostrófica e a partir delas, é possível obter a velocidade de giro do vórtice. Essas correntes são utilizadas para calcular o raio de velocidade, que é a distância do centro ao círculo da maior velocidade de rotação do vórtice.

O acompanhamento da trajetória dos vórtices acontece pela posição dos centros dos vórtices, que é dada por um par de longitude e latitude. Os objetos identificados em um dia  $t$  e no dia  $t+1$  têm a distância entre si computadas. Os vórtices identificados em  $t+1$  que estiverem dentro de uma elipse com eixo menor de 150 km são selecionados como candidatos a serem o mesmo vórtice do dia  $t$  em uma nova posição [Chelton *et al.* 2011]. Caso mais de um se encontre nessa elipse, um parâmetro de similaridade  $S$  é calculado, para comparar as características gerais de cada candidato com o vórtice do dia  $t$ . Ele foi desenvolvido por Penven *et al.* [2005] e adaptado por Mason *et al.* [2014] e é

apresentado abaixo:

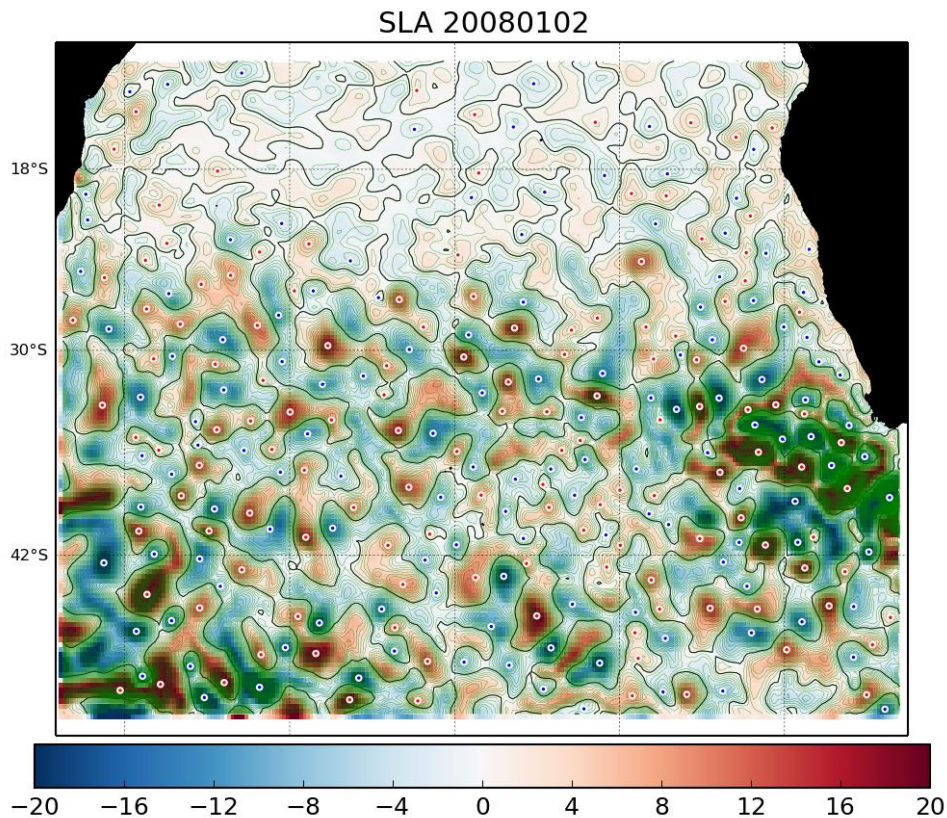
$$S_{k,k+1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A_0}\right)^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo  $\Delta d$  a distância entre os centros dos vórtices;  $\Delta a$  a diferença entre as áreas;  $\Delta A$  a diferença entre as amplitudes; e  $d_0$ ,  $a_0$  e  $A_0$  sendo os valores característicos de distância (25 km), de área ( $\pi 60^2 \text{ km}^2$ ) e amplitude (2 cm). O vórtice com S mínimo em t+1 é escolhido como sequência do vórtice de t e os outros são computados como novas feições. O produto final do algoritmo é um registro de cada feição identificada por um número sequencial, com seus raios calculados, amplitude, localização, duração, dia em que foi observado, o que permite a reconstrução da sua trajetória desde o primeiro dia em que a feição foi detectada. Esses dados são diários.



**Figura 6.** Mapa de contornos da anomalia da superfície do mar para 1º de janeiro de 2008, em cm. Em azul estão os valores negativos e em vermelho os valores positivos.





**Figura 7.** Mapa de contornos da anomalia da superfície do mar para 2 de janeiro de 2008, em cm. Os pontos azuis são possíveis vórtices ciclônicos e os pontos vermelhos são possíveis vórtices anticiclônicos.

Uma vez identificados, os vórtices cuja trajetória possuiu uma duração maior que 180 dias foram escolhidos para análise. Este é o tempo mínimo observado para que atravessem a Bacia do Cabo e cheguem à Cadeia Walvis. Foram, portanto, escolhidos os de maior duração. Desses, foram escolhidos os que tinham a origem mais próxima à região de Retroflexão das Agulhas (entre 0° e 10°L), de modo a escolher os vórtices que realmente fossem formados nela. Foram identificados vinte e seis vórtices com trajetórias de duração maior que seis meses. Desse total, foram selecionados os sete de maior trajetória e mais adequados para reconstrução da estrutura vertical- vórtices que cruzaram maior quantidade de perfiladores em seu caminho. Foram calculadas médias das características gerais de cada vórtice dos sete, como amplitude e raio. Esse

cálculo se baseou em dados de todo o período de vida dos vórtices na forma de uma média aritmética simples. Foram também calculados seus respectivos desvios padrões.

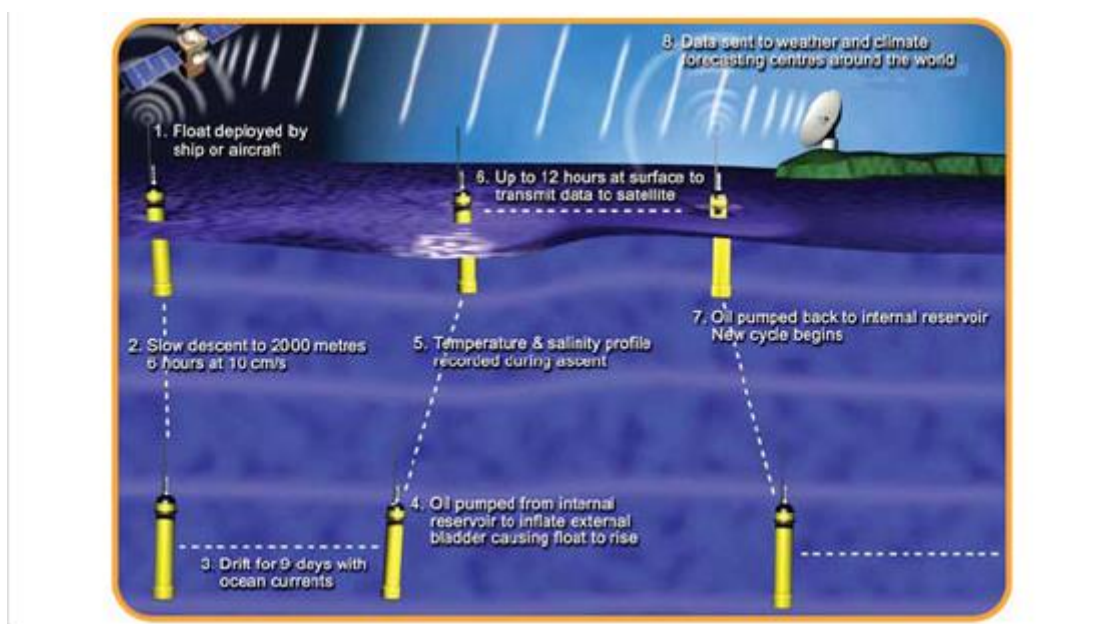
### 3.2 Dados hidrográficos

Os dados de temperatura, salinidade e pressão do interior dos vórtices selecionados são provenientes de CTDs presentes em perfiladores Argo que atravessaram ou foram capturados pelos vórtices previamente escolhidos na região do OAS. Os dados são coletados e distribuídos livremente pelo Programa Internacional Argo e os centros de distribuição de dados - *Global Data Assembly Centers* ou GDAC- no caso do presente trabalho, o grupo CORIOLIS. Foram coletados dados de perfiladores em atividade no período de estudo dos vórtices, de 2008 a 2013 e apenas foram mantidos os dados considerados muito bons pelo GDAC.

Os flutuadores são equipamentos autônomos que contêm um CTD, e que a cada 10 dias produzem perfis de temperatura, salinidade e pressão da superfície até profundidades que podem chegar a 2000 m. O ciclo de funcionamento deste equipamento está ilustrado na figura 8. Inicialmente o flutuador está na superfície e começa a submergir lentamente a 10 cm/s até atingir a profundidade de 1000 metros. Ele então deriva com as correntes oceânicas por 9 dias. Depois desse período, óleo é utilizado para aumentar a flutuabilidade em um sistema de lastro, então o perfilador sobe à superfície perfilando a temperatura e salinidade no trajeto. Uma vez em superfície, os dados são transmitidos via satélite para os centros de processamento de dados (GDACs) e o ciclo recomeça. Cada equipamento pode realizar diversos perfis



durante sua vida útil, podendo ser carregados por feições de mesoescala, como vórtices ou meandros.



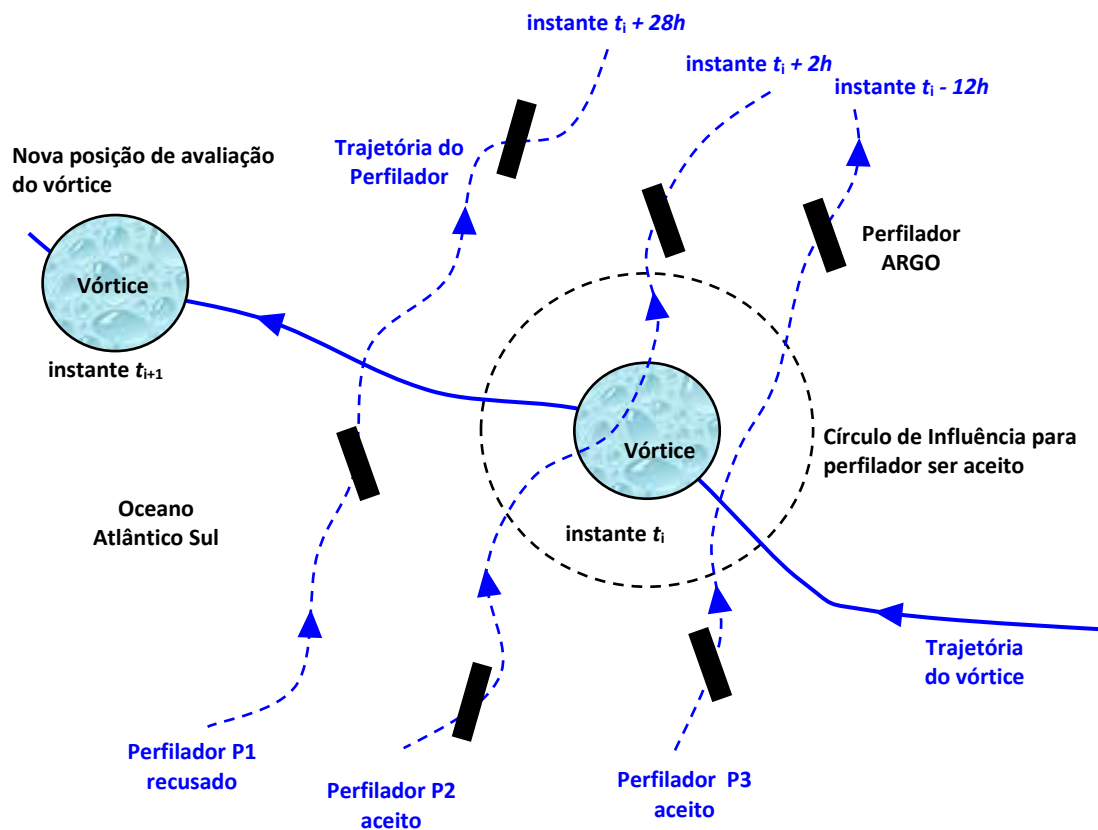
**Figura 8.** Ciclo de atividade de um flutuador Argo. Fonte: <http://www.argo.ucsd.edu/>

Os perfis de interesse foram selecionados por um algoritmo automático desenvolvido a partir da metodologia descrita por Souza *et al.* [2011], com algumas adaptações: a posição de cada vórtice foi dada diariamente e então só foram escolhidos perfis que se encontravam em até um dia de diferença da observação e que se encontravam a uma distância de até de até 2 raios do centro de cada vórtice (fig. 9). A análise foi repetida para cada dia de observação da feição. Posteriormente os perfis foram interpolados para intervalos regulares de 5 metros.

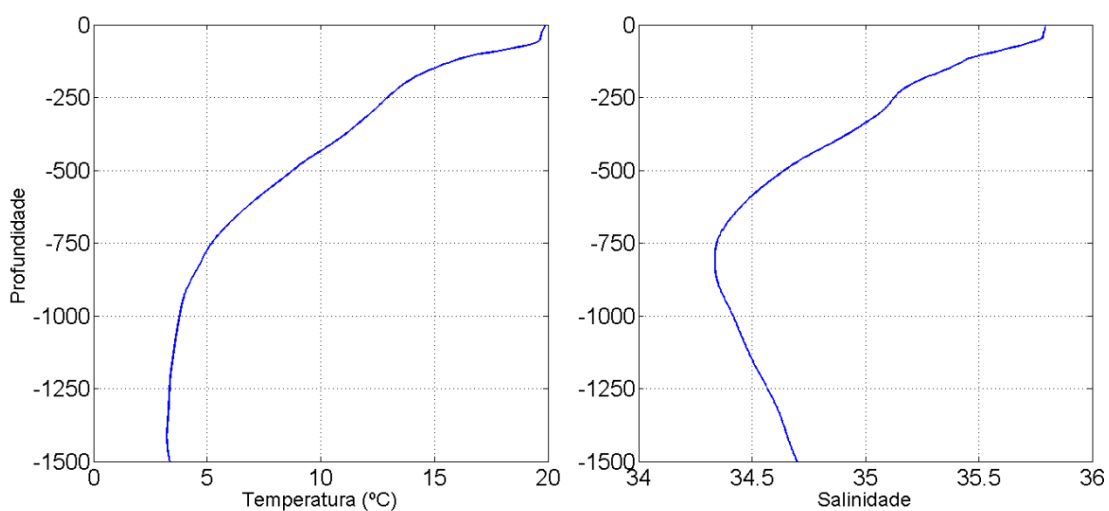
A figura apresenta uma trajetória de apenas um vórtice e é destacada a seleção de perfis Argo em um estante qualquer, chamado de  $t_i$ . O círculo de influência (demarcado pela linha tracejada em preto) mostra a região na qual o perfilador ARGO teria que ter gerado perfis TS para que os seus dados fossem aceitos para a RVM do vórtice. Este círculo possui um raio igual a duas vezes o

raio do vórtice no instante  $t$  de sua trajetória. Além disso, os perfis aceitos devem ter sido gerados em um intervalo temporal de  $t \pm 1$  dias. As linhas tracejadas azuis mostram trajetórias de perfiladores ARGO. Os perfis TS gerados pelos perfiladores P2 (que passou dentro do vórtice) e P3 (que passou dentro do círculo de influência) serão aceitos por cumprirem as exigências acima, enquanto o perfilador P1 será descartado. Para a RVM do vórtice T20 serão considerados vários instantes de tempo  $t$  ao longo da sua trajetória (separados de 1 dia um do outro) onde, em cada um deles, vários perfis serão considerados. Na operação de RVM da feição os dados TS serão normalizados em função: (i) da distância espacial do respectivo perfil ao centro do vórtice em cada instante de tempo  $t$  considerado, e (ii) da defasagem temporal com que o perfil foi gerado, ou seja, em função da diferença de tempo entre a perfilagem e o instante de tempo  $t$  considerado. Quanto menor esta diferença temporal e quanto mais próximo do centro do vórtice tiver sido feita a perfilagem, maior peso terá o respectivo perfil na RVM do vórtice. Maiores detalhes sobre a RVM serão apresentados na próxima seção.

Apesar de terem sido obtidos apenas dados considerados como bons pelo *data center*, uma análise de qualidade também foi empregada, seguindo [Chaigneau et al. \[2011\]](#), onde foram observados os seguintes critérios: apenas perfis com dado mais superficial a uma profundidade de menos de 10 metros foram considerados válidos; todos os perfis deveriam chegar até pelo menos 1000 metros; a maior diferença entre a profundidade de dois dados consecutivos não deveria ser maior que 10 metros nos primeiros 100 m, 25 para a camada de 100 a 300 m, e 100 m de 300 a 1000 m. Dos perfis restantes, cada um foi plotado separadamente e uma avaliação visual foi feita (fig. 10).



**Figura 9.** Vórtice T20 em dois instantes de tempo,  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , da sua trajetória (mostrada pela linha azul cheia) ao longo do oceano Atlântico Sul. A figura mostra, para o instante  $t_i$  apenas, todos os detalhes necessários para um correto entendimento dos procedimentos de consideração dos perfiladores ARGO para a reconstituição da estrutura vertical média (RVM) da feição ao longo de toda a sua trajetória.



**Figura 10.** Exemplo de perfis de temperatura (à esquerda) e salinidade (à direita) utilizados no presente trabalho, provenientes de perfiladores Argo.

### 3.3 Reconstrução da estrutura vertical dos vórtices

A reconstrução da estrutura vertical dos vórtices não utilizou os dados de temperatura e salinidade brutos. Primeiramente, foram calculadas a partir dos perfis Argo previamente selecionados. O cálculo das anomalias teve como referência as climatologias ISAS-13, campos mensais de T e S para o período de 2008 a 2013 [Gaillard 2015], que foram interpoladas para a posição e para os níveis de profundidade dos perfis Argo. Perfis de diferentes estágios de vida do vórtice e em diferentes localidades foram incorporados para compor uma seção vertical média. Os perfis de anomalia foram normalizados segundo proposto em Souza *et al.* [2011], como uma forma de corrigir as diferenças espaciais e temporais entre eles. Os valores de anomalia de temperatura e salinidade foram normalizados pela diferença entre amplitude do vórtice médio e a amplitude instantânea, e a distância de cada perfil ao centro foi normalizada pela diferença entre o diâmetro médio e o instantâneo. Cada perfil foi normalizado em função da sua distância ao centro e as fórmulas utilizadas se encontram abaixo:

$$T_e, S_e = \frac{T_p, S_p}{A} \bar{A} \quad (\text{Equação 2})$$

$$D_e = \frac{D_p}{\phi} \bar{\phi} \quad (\text{Equação 3})$$

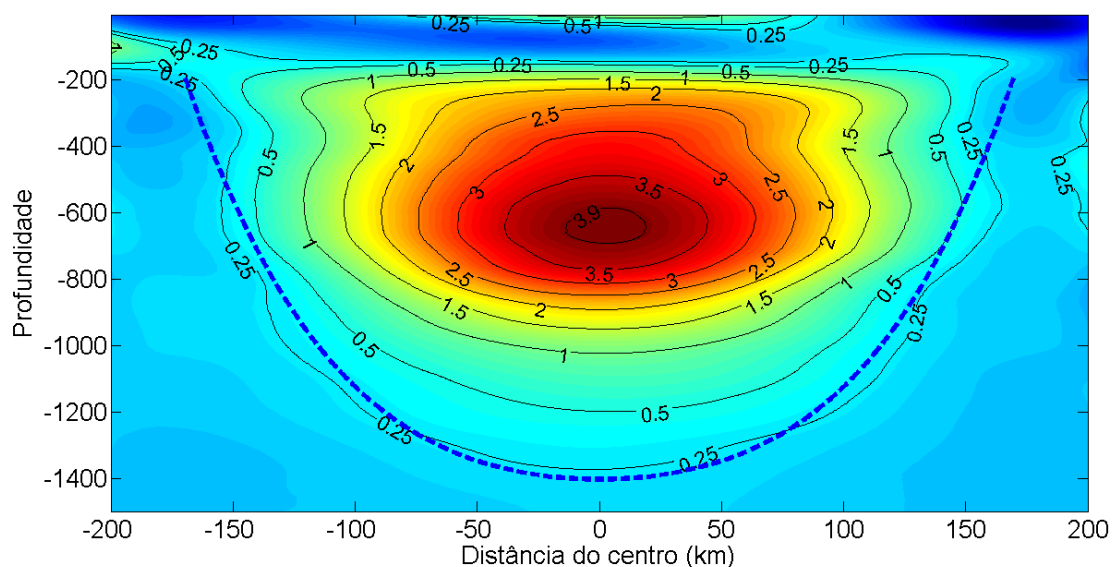
Na equação 2 os termos  $T_e$  e  $S_e$  são as anomalias efetivas, e  $T_p$ ,  $S_p$  e  $A$  são valores instantâneos de anomalia de temperatura e salinidade e a amplitude observada. O termo  $\bar{A}$  é a média de amplitude para todo o período de vida do vórtice. Já na equação 3 tem o termo  $D_e$  como a distância efetiva ao centro e os

termos  $D_p$  a distância entre o perfil e o centro do vórtice. O termo  $\phi$  é o diâmetro instantâneo do vórtice e  $\bar{\phi}$  a média para todo o período.

Em seguida, os perfis normalizados são dispostos em função de sua distância zonal do centro do vórtice. Eles foram interpolados em intervalos regulares de 500 metros. De modo a minimizar ruídos gerados pela utilização de diferentes perfis, os dados foram ajustados por um polinômio de 6º grau.

### 3.4 Cálculos do volume do vórtice médio e dos seus transportes de calor, salinidade e de massa

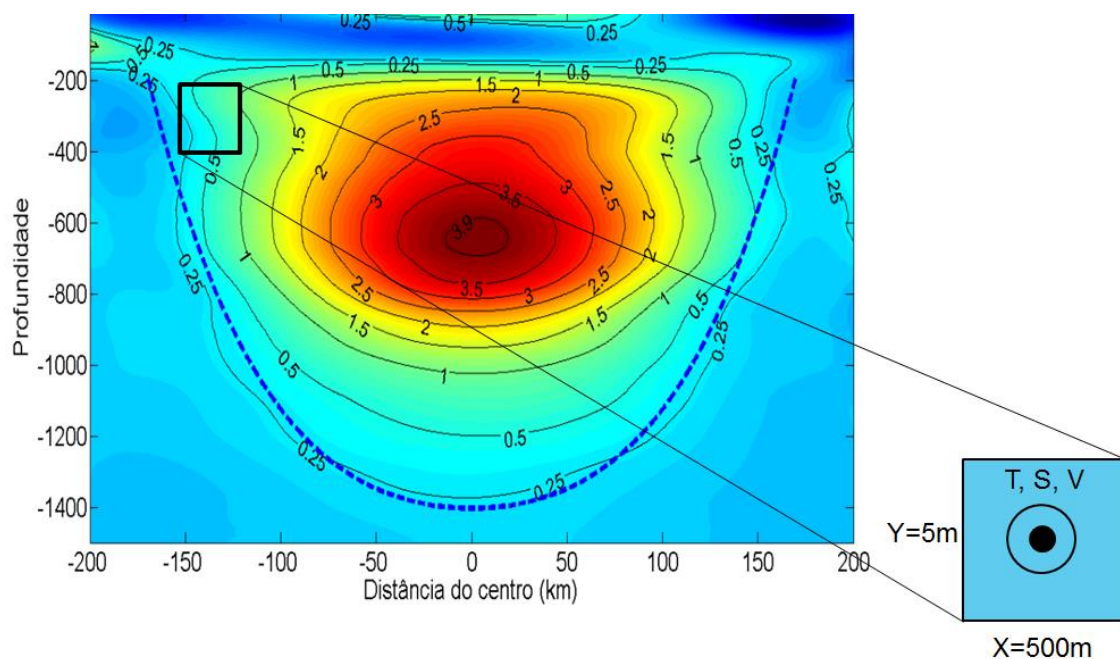
Inicialmente foi calculado o volume do vórtice. Um polinômio de 5º grau foi ajustado à isoterma da anomalia de temperatura de 0.25°C, representando o limite externo do vórtice (Fig. 11). Depois esse polinômio foi integrado e se obteve o volume do vórtice médio [Guidorizzi 2001].



**Figura 11.** Seção vertical de temperatura. A linha azul pontilhada representa o polinômio ajustado para a anomalia de 0,25°C, que foi considerada o limite externo do vórtice médio.

O cálculo de transportes de calor, sal e volume foi realizado a partir do campo de anomalias de temperatura e de sal e o campo de velocidades

geostróficas. O limite externo do vórtice médio foi o polinômio utilizado para cálculo do volume e esse limite será utilizado tanto para delimitar a estrutura média na seção de temperatura quanto na estrutura média de salinidade. Utilizando o programa MatLab, foi criado um polígono para separar a área interna do vórtice da região adjacente. Este polígono foi dividido em células de cinco metros de altura (a profundidade) e 500 metros de largura (a distância zonal), conforme pode-se observar na figura abaixo.



**Figura 12.** Esquema representando a divisão da estrutura média em células de 5 metros de altura por 500 metros de largura para o cálculo dos transportes de volume, sal e calor.

No centro de cada célula há um valor de anomalia de temperatura, de salinidade e de velocidade geostrófica. Os transportes de volume, calor e sal foram calculados segundo as equações abaixo:

$$T_v = \Delta x \Delta y V \quad (\text{Equação 4})$$

$$T_c = \Delta x \Delta y V C_p \rho \Delta T \quad (\text{Equação 5})$$

$$T_s = \Delta x \Delta y V \rho \Delta S \quad (\text{Equação 6})$$

A equação 4 é referente ao transporte de volume. Em cada célula, foram multiplicadas a altura  $\Delta y$  e a largura  $\Delta x$  ao valor de velocidade  $V$  no centro da célula. Ao final as células foram somadas e o resultado foi apresentado em Sv. A equação 5 é referente ao cálculo de transporte de calor, que em cada célula multiplica as dimensões da célula  $\Delta y$  e  $\Delta x$  à velocidade  $V$  e à anomalia de temperatura  $\Delta T$ . De modo a apresentar o resultado em PW e poder compará-lo com resultados de trabalhos anteriores, o resultado foi multiplicado pelo calor específico da água do mar ( $C_p$ ) e à densidade da água do mar ( $\rho$ ). Ao final, novamente as todas as células foram somadas, de modo a se obter o transporte total de calor. A equação 6 se refere ao transporte de sal. O procedimento é o mesmo do transporte de calor, excetuando-se que não há o calor específico e a anomalia utilizada é a de salinidade. Os valores foram expressos em Kg/s.

## Capítulo IV: Resultados

**A**qui serão apresentados os principais resultados do presente trabalho, que foram separados em três seções principais: (i) a identificação e acompanhamento dos vórtices, (ii) a reconstrução da estrutura vertical e (iii) os cálculos de transporte de volume, calor e sal. Na primeira seção são apresentadas as características principais dos sete vórtices identificados neste trabalho de maior duração, bem como suas trajetórias. A segunda seção apresenta as seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades geostróficas do vórtice selecionado para investigação, T20. A terceira seção apresenta os valores de transporte de volume, calor e sal de T20 em Sv, PW e Kg/s, respectivamente. Também foram estimados os transportes anuais das propriedades citadas anteriormente.



#### 4.1 Identificação e acompanhamento dos vórtices

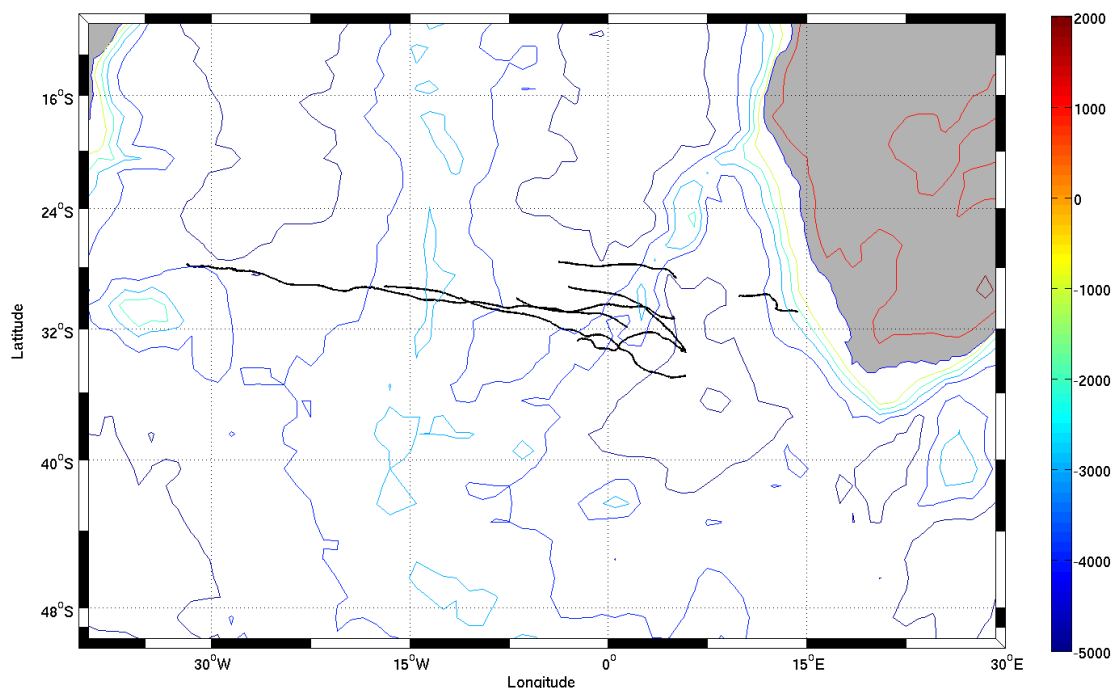
Vinte e seis anéis liberados na zona de retroflexão da Corrente das Agulhas, com duração maior que 180 dias, foram identificados entre os anos de 2008 e 2013, o que se encontra próximo a média de seis anéis liberados por ano pela retroflexão das Agulhas no oceano Atlântico Sul encontrada em trabalhos anteriores [Byrne *et al.* 1995, van Aken *et al.* 2003, Souza *et al.* 2011]. Desses vórtices foram escolhidos os sete de maior duração e que tiveram no mínimo 20 perfiladores Argo cruzando com a sua trajetória ou sendo “capturados” por eles. As características gerais desses sete vórtices estão na Tabela 1. Foram encontrados em média  $79,57 \pm 53,84$  perfis Argo por vórtice, sendo que estas feições tiveram uma amplitude média de  $22,71 \pm 4,70$  cm e uma velocidade média de propagação (translacional) de  $5,20 \pm 0,30$  cm/s. O tamanho médio do raio destes vórtices está dentro dos valores característicos para os anéis das Agulhas [Lutjeharms & van Ballegooyen 1988, Garzoli *et al.* 1999], com  $142,74 \pm 25,88$  km, bem como a amplitude e a velocidade de propagação. Suas trajetórias pelo OAS são apresentadas na figura 13. A trajetória dos vórtices observados é preponderantemente zonal, sentido oeste, com uma leve inclinação para noroeste. Não foi observada nenhuma região preferencial quando da passagem dos vórtices pela Cadeia Walvis.

A identificação de anéis das Agulhas resultou em trajetórias que tinham início próximo a  $10^{\circ}\text{W}$ , região que se encontra fora da retroflexão das Agulhas. Essa limitação está associada ao tipo de identificação escolhida, pelo uso da ASM para determinar as formas dos vórtices no OAS. Chelton *et al.* [2011] e Pilo [2013] observaram que áreas de alta atividade de mesoescala e energia vórtices, como a região de Retroflexão das Agulhas e o chamado Caldeirão do Cabo,

podem ter sua forma distorcida ou terem seu sinal perdido pelos altímetros, podendo ocorrer uma superestimação do número de vórtices. É possível que um anel das Agulhas tenha sido observado próximo à sua origem, mas pode ter se fundido a outro vórtice ou ter o seu sinal perdido e reencontrado mais à frente, sendo identificado erroneamente como “novo vórtice”. Portanto, embora se afirme que os vórtices identificados sejam anéis das Agulhas, essa inferência se baseia nas características encontradas de tamanho de raio, amplitude média e velocidade de propagação, que se assemelham aos encontrados na literatura.

Tabela 1. Características gerais dos anéis das Agulhas selecionados entre os anos de 2008 e 2013.

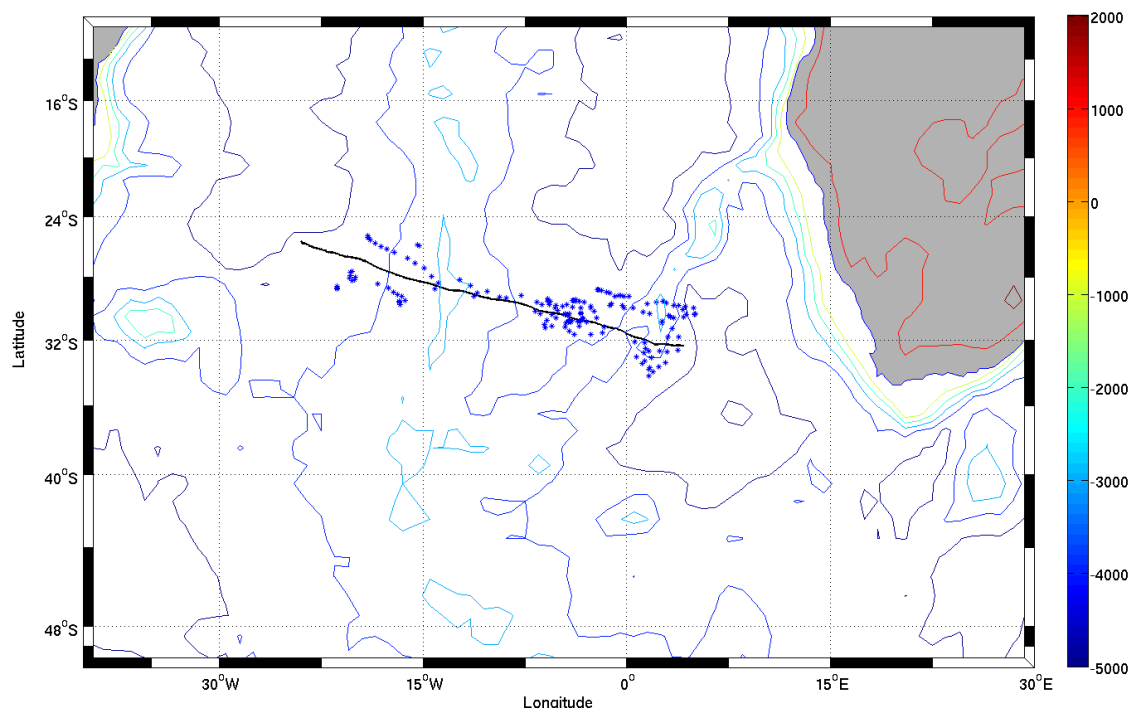
Nº da trajetória	2	6	11	12	18	20	21	Média
Nº de perfis	25	151	81	33	47	156	64	79,57
Amplitude média (cm)	21,60	33,10	18,80	24,30	22,20	21,80	17,20	22,71
Desv. Pad. Amplitude	3,48	6,59	3,46	3,15	5,23	6,27	4,71	4,70
Raio médio (km)	112,84	164,49	147,56	142,07	125,70	157,60	148,90	142,74
Desv. Pad. Raio (km)	13,20	35,81	33,03	27,13	14,61	29,15	28,26	25,88
Duração (dias)	248	538	279	238	180	613	725	403
Velocidade média (cm/s)	4,80	5,50	5,70	4,60	4,90	5,50	5,40	5,20



**Figura 13.** Trajetória dos anéis de maior duração e com maior número de perfis ARGO identificados no período de 2008 a 2013. Em cores estão as isolinhas de batimetria distribuídas de 1000 em 1000 metros.

O vórtice representado pela trajetória 20, que será chamado de T20, foi o escolhido para ter a sua estrutura vertical média reconstruída no presente estudo. A escolha dessa trajetória se deve ao tamanho do anel (é o anel de segundo maior raio), por este praticamente atravessar o oceano Atlântico Sul e, principalmente, pelo maior número de perfiladores Argo que cruzaram com a sua trajetória, permitindo que seja feita uma reconstrução mais realista do seu perfil vertical. Ele foi observado inicialmente no dia 17 de maio de 2011 e apresentou uma assinatura altimétrica clara até o dia 19 de janeiro de 2013, com uma duração total de 613 dias. A Figura 14 apresenta a sua trajetória juntamente com a localização dos 156 perfis Argo que foram utilizados na reconstrução das suas seções zonais médias de temperatura e salinidade. A amplitude média observada para o T20 foi de  $21,80 \pm 6,27$  cm sendo o seu raio médio de

$157,60 \pm 29,15$  km. Ele se movimentou com uma velocidade de translação acima da média dos sete anéis, de  $5,50$  cm/s (a média foi de  $5,20 \pm 0,42$  cm/s).



**Figura 14.** Trajetória do vórtice T20 observado inicialmente em 17 de maio de 2011. Os pontos azuis representam a localização dos perfis Argo que foram utilizados na reconstrução da estrutura vertical do referido vórtice. As isóbatas estão apresentadas com intervalos de 1000 metros.

## 4.2 Reconstrução da estrutura vertical

Aqui serão apresentadas as seções verticais de temperatura, salinidade e velocidade geostrófica do vórtice T20. Os perfis de anomalia de temperatura e salinidade foram utilizados na reconstrução da estrutura vertical média do vórtice selecionado T20. Eles foram distribuídos em um eixo zonal de acordo com a distância do perfilador ao centro do vórtice. Essa distância foi calculada a partir das coordenadas do perfilador e do centro do vórtice no dia em que o perfil foi realizado. Foram observadas seções verticais de formato similar, com maiores diferenças na profundidade em que se observou o limite externo do vórtice, determinado pelo contorno de anomalia mais próximo de zero. A seção de temperatura apresentou limites mais profundos que a seção de salinidade.

#### 4.2.1 Temperatura

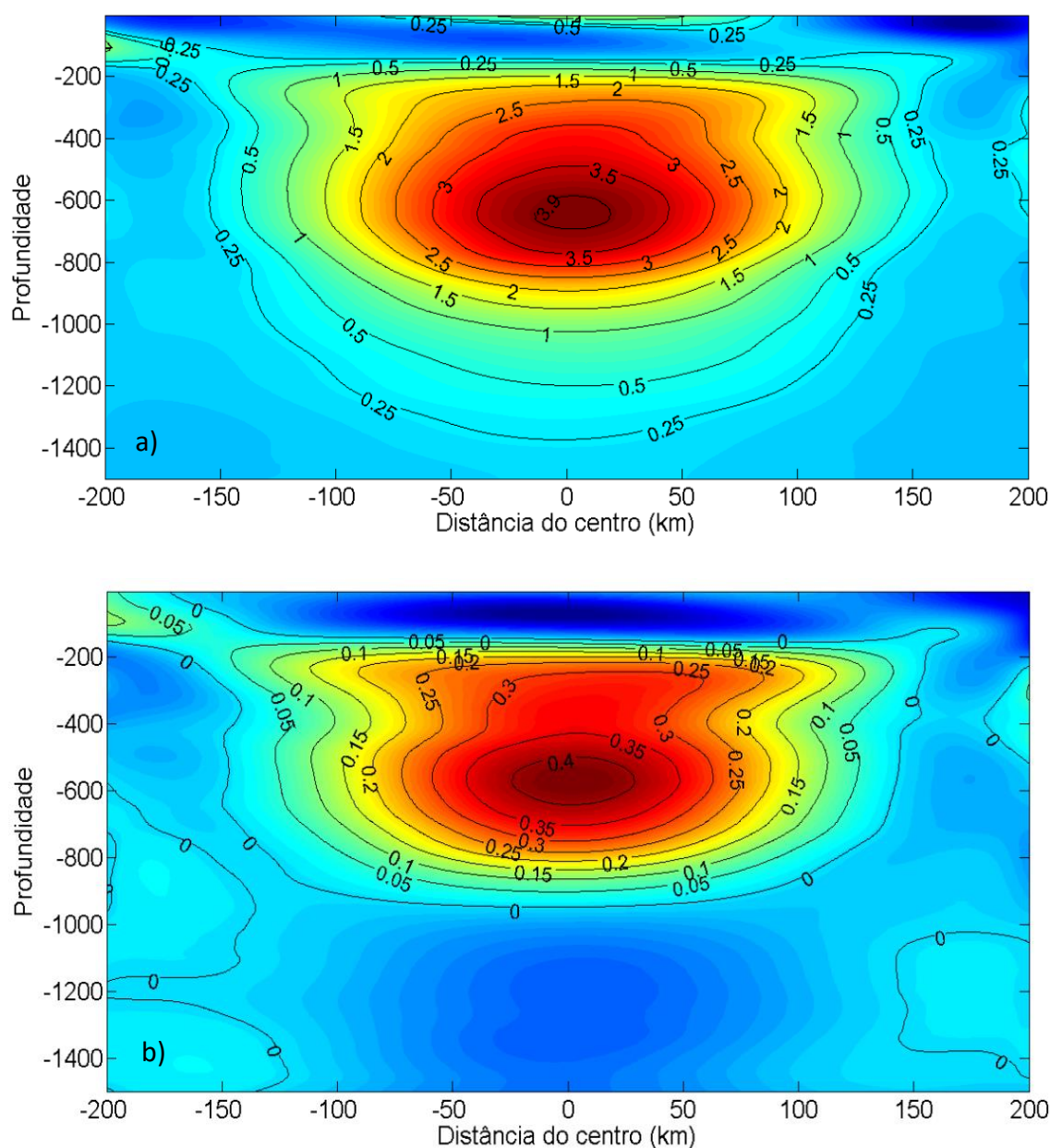
Os dados oriundos dos perfiladores não eram suficientes para a reconstrução da estrutura 3-D da feição, logo, foi reconstruída apenas a sua seção vertical zonal (fig. 15a). Conforme explicado em [Souza et al. \[2011\]](#), o uso de dados de perfiladores Argo em diferentes estágios do vórtice T20 para a reconstrução da sua seção vertical ocasionou inúmeros ruídos. Por isso, os dados de anomalia foram ajustados por um polinômio de 6º grau (para intervalos de profundidade de 5 metros), de modo a reduzir os ruídos e permanecer a forma de uma curva gaussiana invertida, que é esperada. O valor máximo obtido para a anomalia de temperatura do T20 foi de 3,90°C e o valor mínimo, na zona ainda considerada com parte do vórtice, foi de 0,25°C.

Embora tenha-se encontrado valores maiores de anomalia que o esperado, a estrutura vertical média obtida se assemelha àquela encontrada por trabalhos anteriores [[Garzoli et al. 1999](#), [Souza et al. 2011](#)], com núcleo (i.e., posição da maior anomalia) próximo aos 700 metros de profundidade. Isso se deve possivelmente à escolha da climatologia do OAS, que, por ser uma média para os anos de 2008 a 2013, possivelmente tenha amenizado as diferenças sazonais e as temperaturas indicadas pelos perfiladores Argo acabaram por parecerem maiores do que deveriam, principalmente naquelas relacionadas com os perfis obtidos no período de inverno. A estrutura média da anomalia de temperatura se encontra a partir de 150 metros de profundidade, diferentemente de [Souza et al. \[2011\]](#), que observaram uma estrutura definida mais próxima à superfície. Embora sejam vórtices diferentes e, portanto, com diferentes tempos de vida e trajetórias diferentes, é possível que isso se deva à maior quantidade

de perfis utilizados que cruzaram o T20 da metade para o final da sua trajetória. Não foi possível desenhar o contorno de anomalias menores que  $0,25^{\circ}\text{C}$  porque a partir daí a distribuição dessa propriedade não se assemelhava mais com a forma de um vórtice.

#### 4.2.2 Salinidade

O resultado da reconstrução da seção vertical média de salinidade foi um formato do vórtice muito parecido com aquele obtido a partir da distribuição das anomalias de temperatura, mas com a parte externa mais rasa que a anterior (fig. 15b). O valor máximo da anomalia de salinidade foi de 0,40. A partir de 1000 metros de profundidade se observa que as águas do interior e região adjacente da feição têm salinidade muito próxima, e próximo ao centro da feição as anomalias chegam a ser negativas. Isso pode ser explicado pelo fato de que as diferenças de salinidade entre os vórtices e as águas adjacentes são menores que a temperatura, logo, em maiores profundidades (abaixo da haloclina), onde a salinidade varia pouco, espera-se que não haja tanta discrepância. As águas do interior do vórtice, provenientes do oceano Índico, têm uma salinidade muito próxima das águas do OAS se observando, portanto, anomalias mais próximas de zero. Diferentemente da seção vertical de anomalia de temperatura, foi possível encontrar os limites do vórtice, representados pela anomalia de zero.

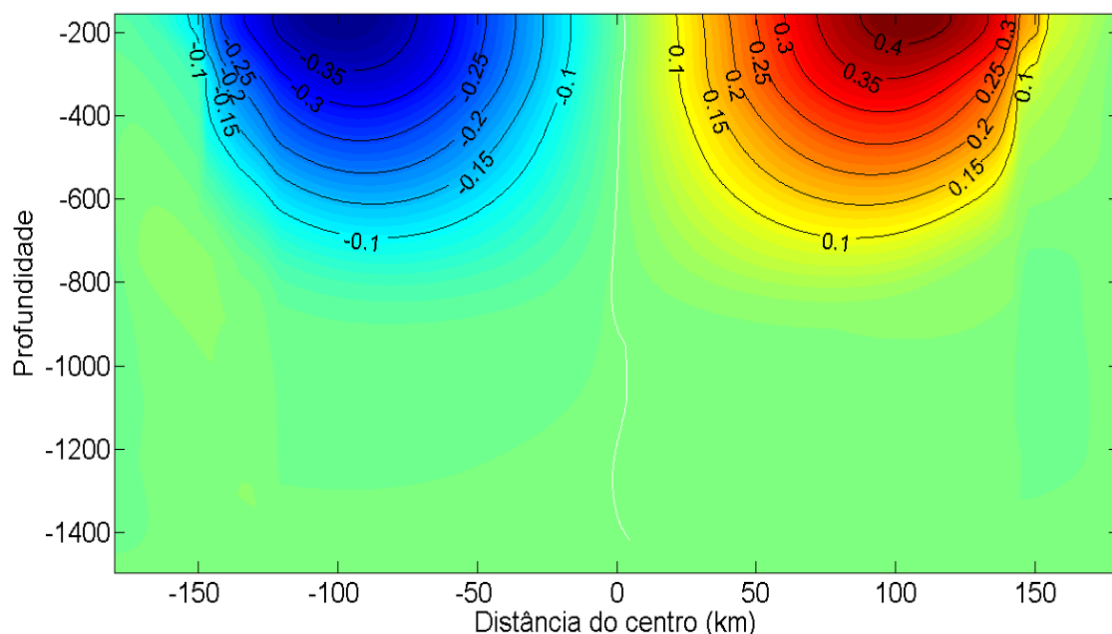


**Figura 15.** a) Seção vertical de temperatura do vórtice. Os contornos em preto indicam as anomalias de temperatura. b) Seção vertical de salinidade do vórtice. Os contornos em preto indicam as anomalias de salinidade. Em cores, os valores de anomalia.

#### 4.2.3 Velocidade

A partir das seções de temperatura e salinidade foram calculadas as velocidades geostróficas baroclínicas do interior do vórtice. Foram descartados os primeiros 150 metros da coluna d'água de modo a calcular apenas a região do vórtice. As velocidades ficaram em um intervalo de -0,40 a 0,42 m/s. Esses valores se assemelham ao encontrados em trabalhos anteriores, como [Souza et al. \[2011\]](#).

O padrão também está de acordo com o esperado, com a velocidade meridional sendo positiva na metade direita da seção e negativa na sua esquerda, conferindo um giro anti-horário (anticiclônico) à feição. A estrutura de giro se mantém até aproximadamente 1000 metros de profundidade, quando as velocidades diminuem e se aproximam a zero. A partir das velocidades pode-se inferir o raio do vórtice com a velocidade máxima, que resulta em 104 km. O raio efetivo do vórtice T20, ou seja, o raio do círculo cuja área é igual ao contorno fechado mais externo de ASM, está em torno de 154 km.



**Figura 16.** Seção vertical da velocidade geostrófica do vórtice em m/s. Em cores são os contornos dos valores de velocidade. Em branco está destacada o contorno de velocidade nula.

#### 4.3 Transportes de volume, calor e sal

Foram calculados os transportes de volume, sal e calor para o vórtice T20. Os valores foram comparados com trabalhos anteriores na Tabela 3.

Na seção 3.4 foi explicado que o vórtice seria ajustado por um polinômio de maior ordem possível que tivesse uma forma próxima a uma gaussiana. O resultado é apresentado na figura 17. A anomalia escolhida para o cálculo foi a

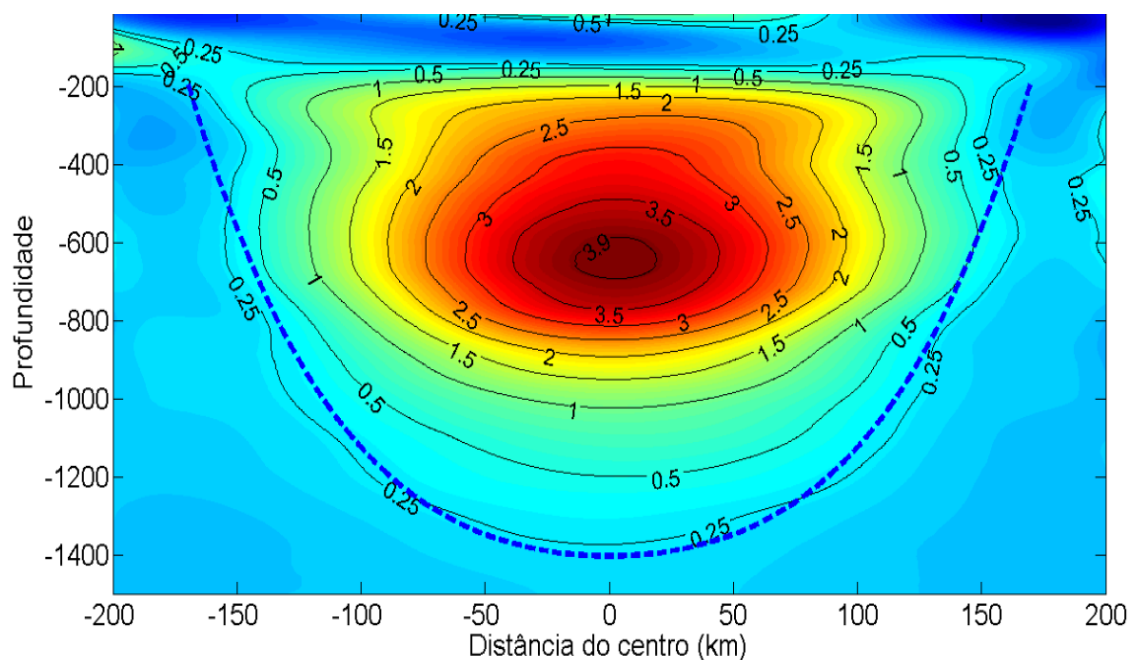


de  $0,25^{\circ}\text{C}$ , que representa a camada mais externa do vórtice. Esse valor foi escolhido por ser a anomalia mais externa que ainda mantinha a forma gaussiana. O polinômio representa a camada mais externa tanto da seção vertical de temperatura quanto da seção de salinidade. A partir desse polinômio foi calculada a integral de volume para se obter o volume do vórtice (o supondo de seção circular), que foi de  $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ . Esse valor se aproxima de cálculos anteriores, que aparecem na Tabela 3. [Garzoli et al. \[1999\]](#) encontraram valores maiores, mas na mesma ordem de grandeza, a partir de observações hidrográficas e valores mais próximos através de cálculos baseados em altímetros. Embora não conste no artigo de [Souza et al. \[2011\]](#), pelo transporte de volume se infere um volume aproximado de  $10 \times 10^{13} \text{ m}^3$ , o que pode ser explicado pelo método que os autores utilizaram, i.e., de incluir a região de área aprisionada pelo vórtice [[Flierl 1981](#)], e não só a região de água anômala, como foi o caso deste trabalho. O transporte total de volume do vórtice T20 foi de 0,4 Sv, estando próximo ao encontrado por [Garzoli et al. \[1999\]](#) e uma ordem de grandeza abaixo dos outros trabalhos que constam na Tabela 2. Se considerarmos a razão previamente mencionada de seis vórtices das Agulhas por ano, teremos um transporte anual do OI para o OAS de 2,4 Sv.

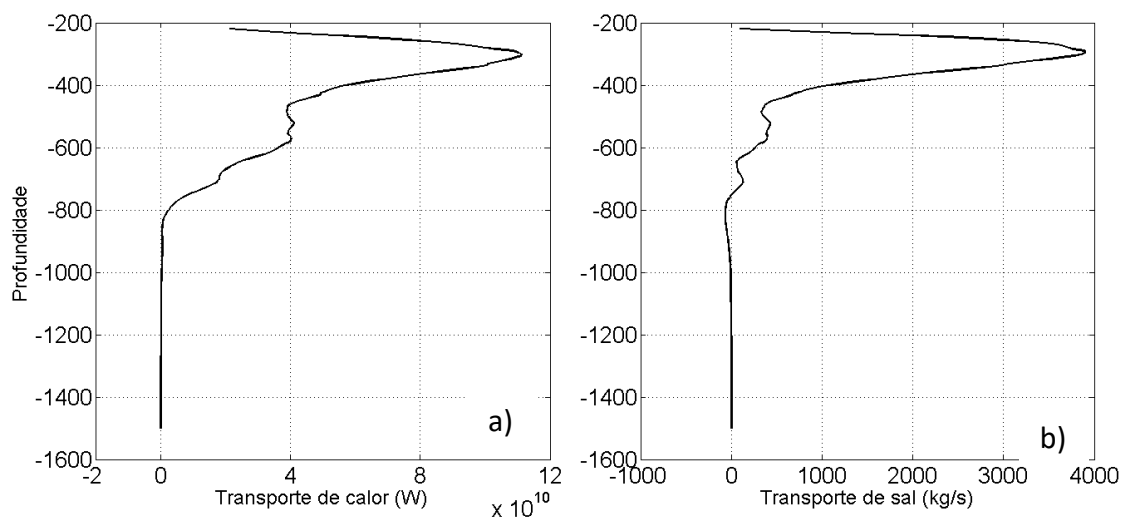
O transporte de calor foi calculado para o volume total do vórtice e para intervalos de 5 metros, fornecendo um perfil vertical do transporte (fig. 18a). Pode-se observar que o transporte começa negativo em profundidades próximas a 200 metros e aumenta com a profundidade. O máximo se localiza em torno de 300 metros, com valor de 0,0001 PW para norte. Após esse máximo se observa um decaimento até chegar em valores estáveis em 450 metros, quando a contribuição de calor do vórtice para águas adjacentes diminui, quando as

anomalias de temperatura diminuem vertiginosamente. O perfil se aproxima do apresentado por [Souza et al. \[2011\]](#). Embora com valores menores, devido às diferenças observadas pelas anomalias, o padrão é o mesmo: valores próximos a zero nas camadas mais superficiais, aumento até a proximidade de 300 metros, onde se observa o núcleo do vórtice e decaimento até valores próximos a zero nos mil metros. Somados os valores para cada camada resulta-se em 0,005PW, com transporte de calor anual de 0,03 PW.

O transporte de sal foi calculado da mesma forma do transporte de calor, com um valor para todo o vórtice e em intervalos de 5 em 5 metros (fig. 18b). O perfil vertical é semelhante ao perfil de transporte de calor, com o transporte aumentando em profundidade até aproximadamente 300 metros, e diminuindo para próximo de zero em profundidades maiores. A diferença é que o transporte se aproxima de zero em profundidades menores. O que pode ser explicado pela seção vertical de anomalia de salinidade da figura 6b, em que se observa o contorno de anomalia de salinidade de zero (que é a camada mais externa do vórtice) em profundidades de 800 metros, diferente da anomalia de temperatura, que chega até próximo de 1400 metros. O transporte total foi de  $0,10 \times 10^6 \text{ kg/s}$  e um transporte de  $0,60 \times 10^6 \text{ kg/s}$ , considerando-se a média de seis vórtices/ano. [Van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) encontraram para o vórtice A4 um fluxo de sal de  $0,42 \times 10^6 \text{ kg/s}$ , e com a média de seis vórtices/ ano seriam  $2,52 \times 10^6 \text{ kg/s}$ .



**Figura 17.** Seção vertical da temperatura do vórtice. Em pontilhado, o polinômio ajustado para anomalia de 0,25°C.



**Figura 18.** A) Perfil vertical do transporte meridional de calor, em Watts/m obtido através da seção vertical do vórtice médio. B) Perfil vertical do transporte meridional de sal, em kg/s.m<sup>-1</sup>.

**Tabela 2-** Cálculo do volume, transporte de volume, de sal e de calor de vórtices de trabalhos anteriores e do presente trabalho

Trabalhos	V ( × 10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	T. de Volume (Sv)	T. de sal ( × 10 <sup>6</sup> kg/s)	T. de calor (PW)
Gordon & Haxby (1990)	46	1-1,50	Não calculou	0,001
van Ballegooyen et al. (1994)	11,00-34,00	1,05-1,21	0,42	0,045
Byrne et al. (1995)	53	1,70	Não calculou	0,006
Garzoli et al. (1999)	18,80-41,80	0,05-1	Não calculou	0,002-0,005
Van Aken et al. (2003)	38	1,21	0,13	0,003
Souza et al. (2011)	53-104	1,70- 3,30	Não calculou	0,027
Presente trabalho	13	0,41	0,10	0,005

## Capítulo V: Discussões

**N**esta seção serão discutidos os resultados principais deste trabalho. Inicialmente fez-se uma avaliação do método empregado para reconstrução da estrutura vertical do vórtice T20. Posteriormente, é avaliada a contribuição dos anéis das Agulhas no transporte de calor e sal do oceano Índico para o OAS no período do estudo, de 2008 a 2013. Será feita ainda uma análise da contribuição dos vórtices em cada ano.

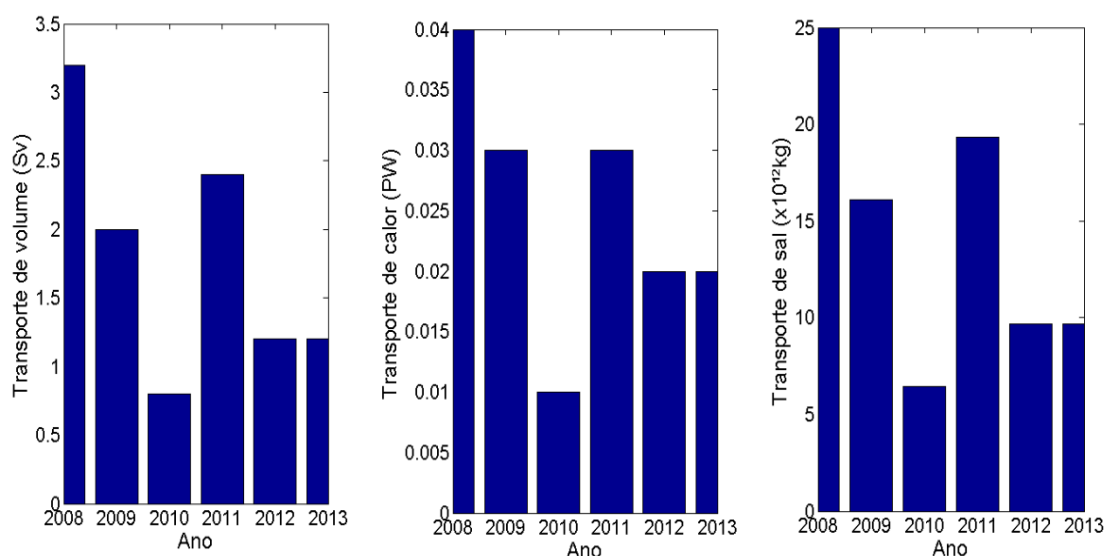
### 5.1 Estrutura vertical de um anel das Agulhas

O estudo da estrutura vertical de um vórtice é um trabalho complexo, pois exige uma grande quantidade de dados numa distância regular, de modo a representar corretamente toda região de água anômala. A implementação do uso de perfiladores Argo possibilitou que houvesse medições contínuas de salinidade

e temperatura em nível de extensão global dos oceanos [Roemmich *et al.* 2004]. A utilização deste equipamento para avaliar a estrutura interna de estruturas de mesoescala, como vórtices, é possível, embora se observe maior aplicação desse recurso em regiões mais fortemente estudadas, como o Pacífico Sul e a corrente de Kuroshio. Chaigneau *et al.* [2011] utilizaram perfiladores Argo, bem como altimetria de satélite, para investigar a estrutura vertical de vórtices no Sistema de Correntes Peru-Chile. Eles encontraram 420 perfis Argo dentro de vórtices ciclônicos e 526 perfis dentro de vórtices anticiclônicos para o período de dezembro de 2003 a outubro de 2009. Diferente deste trabalho, que analisou separadamente os vórtices de diferentes trajetórias, estes autores construíram uma estrutura média utilizando todos os perfis, fazendo um *composite* de diferentes vórtices. Zhang *et al.* [2013] fizeram uma reconstrução da estrutura 3D universal de vórtices de diferentes regiões do globo. Eles apresentaram campos de pressão calculados a partir de perfis de temperatura e salinidade. Em outro trabalho, Zhang *et al.* [2014] utilizaram perfis Argo de temperatura e salinidade de 1996 a 2010 para calcular a densidade potencial de vórtices de diferentes regiões do globo. A reconstrução da estrutura interna foi aplicada para vórtices individuais, mas a composição considerou um retângulo de 30° de latitude X 30° de longitude em que perfis Argo eram incorporados na estrutura média. Souza *et al.* [2011] optaram por utilizar apenas perfis pertencentes ao mesmo vórtice e conseguiram compor seções verticais de temperatura e salinidade, mas não obtiveram perfis o suficiente para uma reconstrução de uma estrutura 3D.

## 5.2 Fluxos de calor e sal entre os oceanos Índico e Atlântico através de vórtices

Vinte e seis anéis com trajetória de duração maior que seis meses foram identificados no período de 2008 a 2013. Do total, oito anéis foram identificados em 2008; cinco anéis em 2009; dois em 2010; seis em 2011 e três no ano de 2012 e três em 2013. A partir da estrutura vertical média de temperatura e salinidade do vórtice T20 foram calculados os transportes de volume, calor e sal que constam na Tabela 3. Esses valores de transporte irão ser utilizados como padrão para todos os anos, embora se saiba que há uma certa variabilidade na estrutura interna dos anéis das Agulhas, que podem possuir um conteúdo de água diferente entre si [Lujeharms 2006]. A contribuição de volume, calor e sal do oceano Índico para o OAS via anéis das Agulhas em cada ano do período de estudo é apresentada na Figura 19.



**Figura 19.** Transporte de volume (a); de calor (b) e de sal (c) no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2013.

O ano de 2008 foi aquele em que mais anéis foram identificados. Possivelmente, os anéis identificados em janeiro foram liberados no ano anterior, mas serão considerados como pertencentes a este ano. O ano de 2008 teve uma contribuição de 0,04PW de calor e  $25,76 \times 10^{12}$ kg de sal e um transporte de volume de 3,20 Sv. Os transportes de calor e sal se assemelham a trabalhos anteriores. [Ballegooyen et al. \[1994\]](#) estimaram um transporte de 6,20 Sv de água de temperatura acima de 10°C, um fluxo de calor de 0,94PW e um fluxo de  $72 \times 10^{12}$ kg de sal em um ano. Já [Duncombe Rae et al. \[1996\]](#) estimaram um fluxo menor, de 0,034 a 0,051PW e 28,40 a  $42,60 \times 10^{12}$ kg. [Souza et al. \[2011\]](#) estimaram uma média de  $9 \pm 8$ Sv de transporte de volume e transporte de calor médio de  $0,062 \pm 0,014$  PW. O ano de menor contribuição dos anéis das Agulhas no transporte de sal e calor entre as bacias oceânicas foi 2010, quando foram identificados apenas dois anéis, abaixo da média de anéis liberados por ano encontrada por diferentes autores [[Lutjeharms & van Ballegooyen 1988](#), [Gordon & Haxby 1990](#), [Byrne et al. 1995](#), [Goñi et al. 1997](#)]. Esse ano é atípico, e os transportes de volume, calor e sal foram de 0,8 Sv; 0,01PW e  $6,22 \times 10^{12}$ kg de sal. Pode-se observar que há uma alta variabilidade interanual no fluxo de propriedades oceanográficas. Deve-se ressaltar que a utilização de uma estrutura média para anéis de todos os anos pode mascarar a variabilidade entre eles, mas essa estimativa média ainda está na mesma ordem de grandeza dos demais trabalhos citados.

Existe um aumento no transporte de águas do oceano Índico para o Atlântico [[Biastoch et al. 2009](#), [Backenberg et al. 2012](#)]. [Catellanos et al. \[2016\]](#) utilizaram simulações numéricas oriundas do modelo HYCOM para estudar a dinâmica do oceano Atlântico Sul e sua relação com o fluxo entre os oceanos

Atlântico e Índico. Eles encontraram uma tendência de aumento no vazamento das Agulhas nas duas últimas décadas, que os autores sugerem estar relacionado a uma tendência de aquecimento e salinização das águas de termoclina do OAS, em acordo com outros trabalhos [[Biastoch et al. 2009](#), [Backenberg et al. 2012](#)]. Tendências positivas no transporte da Corrente Norte do Brasil e da Corrente Sul Equatorial também foram observados como consequência dessa tendência no aumento do transporte de volume entre bacias oceanográficas.

O oceano Austral, bem como o vazamento das Agulhas, podem ser vistos como modeladores da Célula de Revolvimento do Atlântico (AMOC, em inglês) [[Beal et al. 2011](#)]. Em destaque, o vazamento das Agulhas pode influenciar pelo forçamento na flutuabilidade de massas d'água, mudanças no *stress* do vento associadas ao fator anterior e perturbações por ondas planetárias. A forçante de flutuabilidade está associada com o transporte de águas mais quentes e salinas do oceano Índico, majoritariamente por vórtices. Utilizando simulações numéricas, [Weijer et al. \[2002\]](#) observaram que o transporte de sal e calor para o OAS provocam mudanças em seu gradiente de pressão meridional, que está intimamente ligado ao fortalecimento ou enfraquecimento da célula de revolvimento. [Haarsma et al. \[2008\]](#) simularam com o modelo MICOM uma possível interrupção do vazamento das Agulhas para avaliar seu efeito na AMOC. Eles observaram que essa interrupção diminuiria a presença da “rota de água quente” por vazamento de água de termoclina do oceano Índico, que por sua vez iria afetar a formação de águas profundas no Atlântico Norte. Logo, os vórtices das Agulhas têm importante papel na dinâmica global, em especial do oceano



Atlântico, e o transporte de volume, calor e sal deve ser investigado com maior detalhamento.

## Capítulo VI: Conclusões

**E**ste trabalho utilizou mapas de anomalia da superfície do mar de 2008 a 2013 como base para identificação automática de anéis emitidos pela Retroflexão das Agulhas e avaliou o transporte de volume, calor e sal. Foram identificados 26 anéis neste período de janeiro de 2008 a dezembro de 2013, com duração maior que seis meses. Desses 26, um anel foi escolhido para a reconstrução de seções zonais de temperatura e salinidade. Ele foi observado inicialmente em 17 de maio de 2011 e durou 613 dias e foi nomeado T20.

A reconstrução da estrutura vertical do vórtice T20 foi realizada a partir de perfis de temperatura e salinidade, provenientes de perfiladores Argo que cruzaram ou foram "capturados" pelo vórtice T20 em sua trajetória. Esses perfis não foram utilizados diretamente, sendo calculadas as anomalias de temperatura e salinidade, mediante a comparação dos perfis Argo com a climatologia ISAS-13 no OAS. Logo, neste trabalho, são apresentadas as distribuições verticais das

anomalias das propriedades. Essas anomalias foram utilizadas para calcular as velocidades geostróficas baroclínicas através do método dinâmico. Embora tenha-se observado valores de anomalia de temperatura maiores que o observado por [Souza et al. \[2011\]](#), a distribuição das anomalias possui a estrutura média esperada, seja comparada a seções hidrográficas de trabalhos como [Garzoli et al. \[1999\]](#) e [van Aken et al. \[2003\]](#), ou por [Souza et al. \[2011\]](#), que utilizou o mesmo método. Foi observado que o T20 sendo de núcleo quente, é responsável pelo aprofundamento das isothermas -no caso do presente trabalho, das isolinhas de anomalia de temperatura. A seção vertical de salinidade apresentou o mesmo formato a seção de temperatura, mas observou-se que esta feição é mais rasa que a feição de temperatura, se estendendo a aproximadamente 1000 metros. A partir das seções de salinidade e temperatura foi construída a seção vertical de velocidade, que se encontrou no intervalo de - 0,40 m/s a 0,40 m/s.

A reconstrução da estrutura vertical do vórtice foi bem-sucedida, embora não tenha sido possível estudar a evolução dessa estrutura ao longo da trajetória de T20 pelo OAS. Seriam necessários mais perfis para que essa análise pudesse apresentar resultados robustos. Talvez, futuramente, seja possível avaliar a possibilidade do uso de *composites* de mais anéis das Agulhas de modo a ter maior base de dados.

Foi observada uma alta variabilidade tanto na quantidade de vórtices liberados entre os anos de 2008 a 2013 – que variou de 2 anéis liberados no ano 2010 a 8 anéis liberados em 2008. Esse resultado se refletiu nos transportes, que variaram entre 0,8 em 2010 a 3,2Sv em 2008 de transporte de volume, 0,01 em 2010 a 0,04PW em 2008 de transporte de calor e  $6,44 \times 10^{12}$ kg em 2010 a

$25 \times 10^{12} \text{kg}$  em 2008 em transporte de sal. Os transportes anuais médios de volume, calor e sal foram 1,80Sv, 0,03PW e  $14,36 \times 10^{12} \text{kg}$ . Esses valores se assemelham em ordem de grandeza a trabalhos anteriores como van Ballegooyen *et al.* [1994], Duncombe Rae *et al.* [1996], Garzoli *et al.* [1999] e Souza *et al.* [2011].

Embora tenha sido observado um aumento no transporte de massa, calor e sal entre os oceanos Índico e Atlântico, na última década [Biastoch *et al.* 2009, Backenberg *et al.* 2012, Castellanos *et al.* 2016], não foi observado neste trabalho um aumento na liberação de anéis das Agulhas. Trabalhos anteriores indicam uma forte relação entre o vazamento das Agulhas via vórtices e a manutenção da AMOC [Weijer *et al.* 2002, Haarsma *et al.* 2008, Beal *et al.* 2009]. Logo é de extrema importância o estudo do transporte de propriedades como calor e sal entre bacias oceânicas.

## 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Identificação dos anéis das Agulhas o mais próximo da sua origem, nas Retroflexão, de modo a investigar melhor a tendência de maior transporte de águas do Oceano Índico para o OAS.
- Utilização de modelagem numérica para a investigação das mudanças na estrutura interna dos anéis das Agulhas ao longo da sua trajetória pelo OAS devido à falta de *in situ*.
- Utilização de perfis Argo de mais vórtices para criação de uma estrutura média mais robusta, como realizado por Chaigneau *et al.* [2011].

- Aumento de esforços internacionais no intuito da obtenção de dados *in situ* de temperatura, salinidade e velocidade na região interna dos vórtices. Seria interessante também a instalação de mais transectos com correntômetros e sensores de temperatura instalados ao menos pela Bacia do Cabo, de modo a obtenção de dados contínuos e em grades regulares de transporte de calor, volume e sal.

## Referências bibliográficas

- Arhan, M., Mercier, H., & Lutjeharms, J. R. E. (1999). The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104(C9), 20987–21005. <http://doi.org/10.1029/1998jc900047>
- Azevedo, J. L. L., & Mata, M. M. (2010). O mecanismo de autopropulsão de vórtices oceânicos: uma revisão. *Rev. Bras. Geof.*, 28(3), 331–347. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300002>
- Azevedo, J. L. L., Nof, D & Mata, M. M. (2012). Eddy-Train Encounters with a Continental Boundary: A South Atlantic Case Study. *J. Phys. Oceanogr.*, 42 (9): 1548–65. doi:10.1175/JPO-D-11-027.1.
- Backeberg, B. C., Penven, P. & Rouault, M. (2012). Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system. *Nat. Clim. Chang.* 2, 608–612.
- Ballegooyen, R. C. van, Grundlingh, M. L., & Lutjeharms, J. R. E. (1994). Eddy fluxes of heat and salt from the southwest Indian Ocean into the southeast Atlantic Ocean: A case study. *J. of Geophys. Res.*, 99(94), 14,053–14,070.
- Beal, L. M., De Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., & Zahn, R. (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. *Nature*, 472(7344), 429–36. <http://doi.org/10.1038/nature09983>
- Biastoch, A., Böning, C. W., & Lutjeharms, J. R. E. (2008). Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*, 456(7221), 489–492. <http://doi.org/10.1038/nature07426>

Biastoch, A., Boning, C. W., Schwarzkopf, F. U., & Lutjeharms, J. R. E. (2009). Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, 462(26), 495–499.

Bôas, a B. V., Sato, O. T., Chaigneau, A., & Castelão, G. P. (2015). The impact of mesoscale eddies on the air-sea turbulent heat fluxes in the South Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, (ii), 1–7. <http://doi.org/10.1002/2015GL063105.1>.

Boebel, O., Lutjeharms, J., Schmid, C., Zenk, W., Rossby, T., & Barron, C. (2003). The Cape Cauldron: A regime of turbulent inter-ocean exchange. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 50(1), 57–86. [http://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00379-X](http://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00379-X)

Bryden, H. L., Beal, L. M., & Duncan, L. M. (2005). Structure and Transport of the Agulhas Current and Its Temporal Variability. *J. Oceanogr.*, 61, 479–492.

Castellanos, P., Campos, E. J. D., Giddy, I., & Santis, W. (2016). Inter-comparison studies between high-resolution HYCOM simulation and observational data: The South Atlantic and the Agulhas leakage system. *J. Mar.Sys.*, 159(August), 76–88. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.02.010>

Chaigneau, A., Gizolme, A., & Grados, C. (2008). Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Prog. Oceanogr.*, 79(2-4), 106–119. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.013>

Chaigneau, A., Le Texier, M., Eldin, G., Grados, C., & Pizarro, O. (2011). Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *J. Geophys. Res.-Ocean.*, 116(11), 1–16. <http://doi.org/10.1029/2011JC007134>

Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.*, 91(2), 167–216. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>

Cheng, Y.-H., Ho, C.-R., Zheng, Q., & Kuo, N.-J. (2014). Statistical Characteristics of Mesoscale Eddies in the North Pacific Derived from Satellite Altimetry. *Remote Sens.*, 6(6), 5164–5183. <http://doi.org/10.3390/rs6065164>

Flierl, G. R. (1979). A simple model for the Structure of Warm and Cold Core Rings. *J. Geophys. Res.*, 84 (C2), 781-785.

Flierl, G. R. (1981). Particle motions in large-amplitude wave fields. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 18(November 2014), 39–74. <http://doi.org/10.1080/03091928108208773>

Gaillard, F. (2015). ISAS-13-CLIM temperature and salinity gridded climatology. Simer. <http://doi.org/10.12770/e23e19d4-dc4d-40d1-8cfd-4e9f70746dd7>.

Garzoli, S. L., & Gordon, A. L. (1996). Origins and variability of the Bengela Current. *J. Geophys. Res.*, 101(95), 897–906.

Garzoli, S. L., Gordon, A. L., Kamenkovich, V., Pillsbury, D., & Duncombe-Rae, C. (1996). Variability and sources of the southeastern Atlantic circulation. *J. Mar. Res.*, 54(6), 1039–1071. <http://doi.org/10.1357/0022240963213763>

Garzoli, S. L., Richardson, P. L., Rae, C. M. D., Fratantoni, D. M., Gon, G. J., & Roubicek, A. J. (1999). Three Agulhas rings observed during the Benguela Current Experiment. *J. Geophys. Res.*, 104(C9), 20971–20986. <http://doi.org/10.1029/1999JC900060>

Goni, G. J., Garzoli, S. L., Roubicek, A. J., Olson, D. B., & Brown, O. B. (1997). Agulhas ring dynamics from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data. *J. Mar. Res.*, 55(5), 861–883. <http://doi.org/10.1357/0022240973224175>

Gordon, A. L. (1986). Interocean exchange of thermocline water. *J. Geophys. Res.*, 91(6), 5037–5046. <http://doi.org/10.1029/JC091iC04p05037>



Gordon, A. L., & Haxby, W. F. (1990). Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey. *J. Geophys. Res.*, 95(C3), 3117. <http://doi.org/10.1029/JC095iC03p03117>

Guerra, L. A. A. (2011). VORTICES DAS AGULHAS COLIDEM COM A CORRENTE DO BRASIL? 73p. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Guidorizzi, H. L. (2001). Um curso de cálculo. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Ltce, 327 p.

Haarsma, R. J., Campos, E., Hazeleger, W. & Severijns, C. (2008). Influence of the meridional overturning circulation on tropical atlantic climate and variability. *J. Clim.* 21, 1403–1416.

Lutjeharms, J. R. E., & van Ballegooyen, R. C. (1988). The Agulhas Current retroflection. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1570–1583.

Lutjeharms, J. R. E. (2006). The Agulhas Current, 37(1980), 342p. <http://doi.org/10.1007/3-540-37212-1>

Mason, E., Pascual, A., & McWilliams, J. C. (2014). A new sea surface height-based code for oceanic mesoscale eddy tracking. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 31(5), 1181–1188. <http://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00019.1>

McGillicuddy, D. J., Robinson, R. A., Siegel, D. A., Jannasch, H. W., Johnson, R., Dickey, T. D., Knap, A. H. (1998). Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Lett. to Nat.*, 285(1977), 263–266. <http://doi.org/10.1038/28367>

McWilliams, J. C., & Flierl, G. R. (1979). On the evolution of isolated, nonlinear vortices(numerical models of ocean circulation). *J. Phys. Oceanogr.* [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1979\)009<1155:OTEOIN>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1979)009<1155:OTEOIN>2.0.CO;2)

Olson, D. B. (1980). The physical oceanography of two rings observed by the Cyclonic Rings Experiment. Part II: Dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 514–528.

Olson, D. B. (1991). Rings in the ocean. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 19, 283–311.

Olson, D. B., & Evans, R. H. (1986). Rings of the Agulhas Current. *Deep Sea Res. Part A, Oceanogr. Res. Pap.*, 33(1), 27–42.

Patterson, S. L. (1985). Surface Circulation and Kinetic Energy Distributions in the Southern Hemisphere Oceans from FGGE Drifting Buoys. *Am. Meteorological Soc.*, 15, 865–884. [papers3://publication/uuid/4E02ACBA-A5BE-4635-996F-12D634A26794](https://doi.org/10.1175/1520-0478(1985)015<0865:SCKEID>2.0.CO;2)

Penven, P., Echevin, V., Pasapera, J., Colas, F., & Tam, J. (2005). Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *J. Geophys. Res. C Ocean.*, 110(10), 1–21. <http://doi.org/10.1029/2005JC002945>

Pilo, G S, M M Mata, and J L L Azevedo. (2015). “Eddy Surface Properties and Propagation at Southern Hemisphere Western Boundary Current Systems.” *Ocean Sci. Discuss* 12 (1): 135–60. doi:10.5194/osd-12-135-2015.

Pilo, G. S. (2013). Demografia de vórtices oceânicos em três sistemas associados a correntes de contorno oeste no Hemisfério Sul. 80 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul.

Rae, C. M. Duncombe, Garzoli, S. & Gordon, A. L. (1996). The Eddy Field of the Southeast Atlantic Ocean: A Statistical Census from the Benguela Sources and Transpots Project. *J. of Geophys. Res.* 101 (5): 949–64.

Roemmich, D. H., Davis, R. E., & Riser, S. C. (2006). A National Oceanographic Partnership Program Award.

Ruijter, W. P. M. De, Biastoch, A., Drijfhout, S. S., Lutjeharms, J. R. E., Matano, R. P., Pichevin, T., ... Weijer, W. (1999). Indian-Atlantic interocean exchange: Dynamics, estimation and impact. *J. of Geophys. Res.*, 104.

Schmid, C., Boebel, O., Zenk, W., Lutjeharms, J. R. E., Garzoli, S. L., Richardson, P. L., & Barron, C. (2003). Early evolution of an Agulhas Ring. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 50(1), 141–166. [http://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00382-X](http://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00382-X)

Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J., & Lutjeharms, J. R. E. (2000). Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 105(C9), 21913. <http://doi.org/10.1029/1999JC000046>

Siegel, D. a., McGillicuddy, D. J., & Fields, E. a. (1999). Mesoscale eddies, satellite altimetry, and new production in the Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.*, 104(C6), 13359. <http://doi.org/10.1029/1999JC900051>

Souza, J. F. A., Oliveira, L. R., Azevedo, J. L. L., Soares, I. D., & Magalhães, M. M. (2011). Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Rev. Bras. Geofísica*, 29(1), 21–41.

Souza, J. M. A. C., De Boyer Montégut, C., Cabanes, C., & Klein, P. (2011). Estimation of the Agulhas ring impacts on meridional heat fluxes and transport using ARGO floats and satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 38(21). <http://doi.org/10.1029/2011GL049359>

Souza, J. M. A. C., De Boyer Montegut, C., & Le Traon, P. Y. (2011). Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean. *Ocean Sci.*, 7(3), 317–334. <http://doi.org/10.5194/os-7-317-2011>

Souza, R. B. (2005). *Oceanografia por Satélites*. São Paulo: Oficina de Textos, 382.

Van Aken, H. M., Van Veldhoven, A. K., Veth, C., De Ruijter, W. P. M., Van Leeuwen, P. J., Drijfhout, S. S., ... Rouault, M. (2003). Observations of a young Agulhas ring, Astrid, during MARE in March 2000. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 50(1), 167–195. [http://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00383-1](http://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00383-1)

Van Sebille, E., Van Leeuwen, P. J., Biastoch, A., & De Ruijter, W. P. M. (2010). On the fast decay of Agulhas rings. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 115(3), 1–15. <http://doi.org/10.1029/2009JC005585>

Villar, E., Farrant, G. K., Follows, M., Garczarek, L., Speich, S., Audic, S., ... Iudicone, D. (n.d.). (1999). Environmental characteristics of Agulhas rings affect interocean plankton transport. *J. Geophys. Res.*, 104(9), 885-910.

Weijer, W., De Ruijter, W. P. M., Sterl, A., & Drijfhout, S. S. (2002). Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy. *Glob. Planet. Change*, 34(3-4), 293–311. [http://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00121-2](http://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00121-2)

Zhang, Z., Wang, W., & Qiu, B. (2014). Supplementary Materials for Oceanic Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 345(6194), 322–324. <http://doi.org/10.1126/science.1252418>

Zhang, Z., Tian, J., Qiu, B., Zhao, W., Chang, P., Wu, D., & Wan, X. (2016). Observed 3D Structure, Generation, and Dissipation of Oceanic Mesoscale Eddies in the South China Sea. *Sci. Rep.*, 6(October 2015), 24349. <http://doi.org/10.1038/srep24349>