

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto de Oceanografia

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

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE VÓRTICES DAS
AGULHAS E EVIDÊNCIAS DA PRESENÇA DE ÁGUAS
MODAIS DO OCEANO ÍNDICO NO SEU INTERIOR**

ANA CAROLINA TRINDADE DE FREITAS

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.

Co-orientador: *Prof. Dr.* RODRIGO KERR DUARTE PEREIRA

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Março 2018

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE VÓRTICES DAS AGULHAS E EVIDÊNCIAS DA PRESENÇA DE ÁGUAS MODAIS DO OCEANO ÍNDICO NO SEU INTERIOR

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

ANA CAROLINA TRINDADE DE FREITAS

Rio Grande, RS, Brasil

Março 2018

© 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.

FREITAS, ANA CAROLINA TRINDADE DE

Caracterização Física de Vórtices das Agulhas e Evidências da Presença de Águas Modais do Oceano Índico no seu Interior / Ana Carolina Trindade de Freitas. – Rio Grande: FURG, 2018.

88 p.

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

1. Vórtices das Agulhas. 2. Transportes de sal e calor. 3. Massas de Água. I. Caracterização Física de Vórtices das Agulhas e Evidências da Presença de Águas Modais do Oceano Índico no seu Interior.

Agradecimentos

Ao universo, por todos os acasos e surpresas que surgiram no meu caminho nesse período de intenso aprendizado. Obrigada por me cercar de tanta gente incrível, inspiradora e amável ao longo dessa minha jornada.

À minha família nada convencional que com muita sabedoria me ensinou a buscar sempre o caminho do amor: papai, Macaco, Tiquéia, tia Maria obrigada por existirem exatamente assim como são. Um agradecimento maior do mundo ao Macaco, por acreditar em mim e confiar que posso tudo (te amo, irmão <3).

Aos meus orientadores: Zé Luiz e Rodrigo Kerr, por prestarem toda a orientação e esclarecimentos necessários para desenvolvimento dessa dissertação. Sou muito grata por todo incentivo, apoio e dedicação nesse nosso trabalho.

Ao povo da Sala simpatia: Ella, Marília, Will, Camila, Mariah, Malu, Thiago, Ciro e demais amigos do LEOC: Consolinha, Cacá, Cíntia, Lolô, Eliana, Fujita, Maurinho, Iolinha, Natália, Jônatas, Rubens, Mariane, Bruno, Júlia, Chico: pelas discussões filosóficas na cozinha, pelas gordices compartilhadas, pelas piadas de mau gosto, pelas risadas, pelas idas ao RU em bando, e por tudo mais. Vocês fizeram meus dias muito mais leves.

À família que o sul me deu, Mariah, Camila, Iolinha e Gis, eu poderia escrever um livro de gratidão por ter conhecido vocês. Obrigada por toda e qualquer coisa que vivemos juntas. Eu amo vocês pra sempre!!!

À Will, Ricardo e Salém, por serem os melhores parceiros de casa que eu poderia ter. Por amenizarem, com todo o carinho do mundo, a falta que a família faz pra gente que resolveu morar tão distante e por serem como meus irmãozinhos nesses quase dois anos de Cassino.

Ao Doug, por ser a melhor companhia para rolês saudáveis. Obrigada pelas melhores aulas de circo, pela overdose de museus pelo centro, e por me dar o melhor presente de despedida, a Gata.

À Namy, por ser o ombrinho que tanto precisei, por me fazer rir de qualquer coisa, por toda a leveza do nosso encontro, por todo amor e carinho.

Ao Deninho, pelo melhor bolinho de cenoura que o Cassino já viu, pelas sessões mais animadas de GoT, por todo o carinho do mundo, pelas conversas e por todo amor.

Àquele grupo seleta de amigos que mesmo de longe, nunca me deixaram esquecer que alguns laços são pra vida toda: Luma, Paulinha e Dito, eu me inspirei em vocês em cada um dos meus dias que estive longe.

Aos melhores amigos que um trabalho poderia render: Danen, Badrício, Larinha, Mayarinha, Lelê e Pratick, meu muitíssimo obrigada por terem continuado sendo o mesmo grupo que me fazia rir mesmo de longe das coisas mais bestas da vida.

Ao Dudinho: por todo apoio, carinho e amizade desde sempre e pra sempre.

À Nise, pela amizade, carinho, cuidado e por me ensinar um pouquinho mais a me permitir. Pelos momentos de diversão, pelas conversas profundas e, principalmente, pelos papos de ET.

Por fim, não poderia deixar de mencionar que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Os vórtices das Agulhas são feições anticiclônicas originadas a partir da Retroflexão da Corrente das Agulhas. Esses vórtices têm ganhado destaque entre a comunidade científica por atuarem no transporte de sal e calor do oceano Índico para o oceano Atlântico Sul. Acredita-se que esse fluxo interoceânico compõe um dos elementos chave que alimenta a Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation - AMOC*), célula de circulação oceânica intimamente conectada ao sistema climático global. Este trabalho visou caracterizar e investigar a composição de massas de água no interior de três vórtices das Agulhas amostrados pelo cruzeiro FORSA (da sigla em inglês, *Following Ocean rings in the South Atlantic*), entre 27 de junho e 15 julho de 2015 no Atlântico Sul. Os vórtices foram caracterizados quanto a distribuição de salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido em seu interior; volume, transportes meridionais de sal e de calor; padrão de trajetórias e velocidades de translação. O comportamento e características (velocidade de translação, direção de trajetória, tamanho, propriedades termohalinas) desses três vórtices foram similares a outros vórtices das Agulhas previamente observados. Os resultados de transporte obtidos para os vórtices V1, V3 e V5 corroboram com o fato de que os vórtices das Agulhas são importantes transportadores de sal e calor do oceano Índico para o oceano Atlântico Sul, com potencial para influenciar na AMOC. Para a identificação e quantificação das massas de água presentes no interior dos três vórtices, foi utilizada a análise OMP (*Optimum Multiparameter Analysis*). Foi identificada a presença da *South Atlantic Central Water* (SACW) na porção mais superficial dos vórtices, da *Antarctic Intermediate Water* (AAIW) com possível contribuição da *Red Sea Water* (RSW) e na camada profunda foi possível identificar a presença da *North Atlantic Deep Water* (NADW) ou da *Upper Circumpolar Deep Water* (UCDW).

Palavras-Chave: 1. Vórtices das Agulhas. 2. Transportes de sal e calor. 3. Massas de Água.

Abstract

The Agulhas eddies are anticyclonic features shed from the Agulhas Current Retroflection. These eddies may be an important contributor to the salt and heat transports from the Indian Ocean to the South Atlantic Ocean. It is believed that this interoceanic flow is one of the key elements supporting the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), an important component of the Earth's climate system. This work aimed to characterize and investigate the composition of water masses within three Agulhas eddies surveyed during the FORSA (Following Ocean rings in the South Atlantic) cruise from 27 June to 15 July 2015, in the South Atlantic Ocean. The eddies were characterized by the distribution of salinity, temperature and oxygen dissolved in their interior; volume, salt and heat meridional transports; pattern of trajectories and translation speeds. The behavior and characteristics (translation velocity, path direction, size, thermohaline properties) of these three vortices were similar to other previously observed Agulhas eddies. The transport results obtained for vortices V1, V3 and V5 have shown that Agulhas eddies are especially effective in transporting heat and salt from the Indian Ocean to the South Atlantic Ocean, with potential to influence the AMOC. For the identification and quantification of the water mass present inside the three eddies, OMP (Optimum Multiparameter Analysis) method was used. The South Atlantic Central Water (SACW) was identified in the thermocline layer of the eddies, which overlies Antarctic Intermediate Water (AAIW) with possible contribution of Red Sea Water (RSW) at intermediate depths. In the deep layer it was possible to identify the presence of North Atlantic Deep Water (NADW) or Upper Circumpolar Deep Water (UCDW).

Keywords: Agulhas Eddies. 2. Heat and Salt Transport. 3. Water Masses.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIações	XI
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1.1 VÓRTICES OCEÂNICOS.....	1
1.2 VÓRTICES DAS AGULHAS.....	6
1.3 AS MASSAS DE ÁGUA DO OCEANO ÍNDICO.....	10
CAPÍTULO II: OBJETIVOS	13
CAPÍTULO III: METODOLOGIA	14
3.1 A COMISSÃO FORSA.....	14
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS VÓRTICES	20
3.3 ANÁLISE DE MASSAS DE ÁGUA	25
3.3.1 <i>A análise OMP</i>	25
3.3.2 <i>A definição dos índices das águas-tipo</i>	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS VÓRTICES	31
4.2 ANÁLISE DE MASSAS DE ÁGUA.....	44
4.3 QUANTIFICAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA	46
CAPÍTULO V: DISCUSSÃO	51
CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES	62
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

Lista de Figuras

Figura 1. Desenho esquemático da estrutura vertical de vórtices ciclônicos e anticiclônicos no hemisfério sul	2
Figura 2. Desenho esquemático da evolução de um processo de liberação de vórtices por meandramento na Corrente do Golfo	3
Figura 3. Desenho esquemático da liberação de vórtices a partir da Retroflexão da Corrente das Agulhas.....	4
Figura 4. Trajetórias de vórtices das Agulhas, sobre mapa batimétrico, ao longo do oceano Atlântico Sul.....	7
Figura 5. Vazamento das Agulhas influenciado pelos ventos de oeste e pela posição da Frente Subtropical.....	8
Figura 6. Desenho esquemático das regiões de origem e trajetórias das massas de água associadas com a Corrente de Agulhas	10
Figura 7. Diagrama-TS de uma seção do Canal de Moçambique	11
Figura 8. Foto do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39)	15
Figura 9. Trajetória do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39) sobre mapa altimétrico	16
Figura 10. Plano amostral do vórtice V1	17
Figura 11. Estrutura térmica vertical obtida ao longo do transecto que corresponde à derrota do navio durante a Comissão FORSA	18
Figura 12. Exemplo da determinação do diâmetro e da profundidade do vórtice V3 baseado na isoterma de 10°C	22
Figura 13. Áreas-fonte utilizadas para a definição dos índices das águas-tipo.....	29
Figura 14. Mapas de SLA dos vórtices V1, V3 e V5 durante o cruzeiro FORSA.	32
Figura 15. Resultados de velocidade geostrófica obtida pela altimetria ao longo do transecto de amostragem do cruzeiro FORSA.	32
Figura 16. Seção vertical de temperatura dos vórtices V1, V3 e V5 obtida através de medições de XBT durante o cruzeiro FORSA	34
Figura 17. Seções de salinidade referentes ao hemisfério leste dos vórtices V1, V3 e V5 obtidas através de medições de CTD durante o cruzeiro FORSA.	35
Figura 18. Seções de oxigênio dissolvido referentes ao hemisfério leste dos vórtices V1, V3 e V5 obtidas através de medições de CTD durante o cruzeiro FORSA.	36
Figura 19. Coeficiente de determinação (R^2) das regressões lineares entre SLA e as diferentes isotermas testadas para a determinação do limite inferior dos vórtices V1, V3 e V5.....	38
Figura 20. Anomalias de temperatura nos vórtices V1, V3 e V5.	39
Figura 21. Trajetórias dos vórtices V1, V3 e V5 sobrepostas a um mapa batimétrico..	40
Figura 22. Velocidade média de translação dos vórtices V1, V3 e V5 ao longo de suas trajetórias sobrepondo o contorno batimétrico.....	41

Figura 23. Trajetórias do vórtice V5 e de outro vórtice das Agulhas (Vx) ao atravessarem a CMO sobre mapa de SLA.....	43
Figura 24. Diagramas-TS com isolinhas de anomalia de densidade com dados dos vórtices V1, V3 e V5; e das áreas de referência no oceano Atlântico Sul; área da Retroflexão das Agulhas e área da Corrente das Agulhas	44
Figura 25. Contribuição das massas de água do vórtice V1 resultante do teste 2 e do teste 5, referente às combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7.	48
Figura 26. Contribuição das massas de água do vórtice V3 resultante do teste 9 e do teste 10, referente às combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7.	49
Figura 27. Contribuição das massas de água do vórtice V5 resultante do teste 12 e do teste 14, referente às combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7.	50

Lista de Tabelas

Tabela 1. Profundidades mínima e máxima dos perfis de CTD	17
Tabela 2. Critérios de definição dos índices das águas-tipo e acrônimo das massas de águas para cada área fonte.	30
Tabela 3. Profundidade e temperatura das termostatas	33
Tabela 4. Estimativas de diâmetro, volume e transporte de calor referentes aos dados obtidos por XBT e CTD	38
Tabela 5. Características das trajetórias dos vórtices V1, V3 e V5.....	40
Tabela 6. Índices dos parâmetros das águas-tipo. ac = Corrente das Agulhas; ar = Retroflexão das Agulhas; SW = Água Superficial; CW = Água Central; AAIW = Água Intermediária Antártica; RSW = Água do Mar Vermelho; UCDW = Água Profunda Circumpolar Superior; NADW = Água Profunda do Atlântico Norte	46
Tabela 7. Combinações de águas-tipo dos testes no OMP cujos resíduos foram inferiores a 5%. Em negrito, os testes escolhidos para exemplificar (nas figuras 25, 26 e 27) o padrão observado.	47
Tabela 8. Parâmetros de vórtices das Agulhas observados em outros trabalhos	56

Lista de Acrônimos e Abreviações

A

AAIW – Água Intermediária Antártica (*Antarctic Intermediate Water*)

AMOC – Circulação Meridional de Revolvimento no Atlântico (*Atlantic Overturning Circulation*)

ADCP – Perfilador de Correntes Acústico Doppler (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

ASTSW – Água Superficial Subtropical do Atlântico (*Atlantic Subtropical Surface Water*)

C

CLS – *Collecte Localisation Satellite*

CMO – Cordilheira Meso-Oceânica

CNES – Centro Nacional Francês de Estudos Espaciais (*Centre National d'Études Spatiales*)

CTD – Sistema Condutividade-Temperatura-Profundidade (*Conductivity-Temperature-Depth*)

CVT – Cadeia Vitória-Trindade

F

FORSA – Seguindo Vórtices Oceânicos no Atlântico Sul (*Following Ocean Rings in the South Atlantic*)

FURG – Universidade Federal do Rio Grande

H

HPLC – Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (*High Performance Liquid Chromatography*)

I

ITFW – Água de Fluxo Contínuo da Indonésia (*Indonesian Through-Flow Water*)

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

iSTMW – Água Modal Subtropical do Índico (*Indian Subtropical Mode Water*)

L

LOPC – Contador de Plâncton Ótico à Laser (*Laser-Optical Plankton Counter*)

M

MVP – Perfiladores de Velocidade de Propagação do Som ao Longo da Coluna de Água (*Moving Vessel Profiler*)

N

NPqHo – Navio de Pesquisa Hidroceanográfico

NADW – Água Profunda do Atlântico Norte (*North Atlantic Deep Water*)

nm – Milhas náuticas

O

OMP – Análise Otimizada com Parâmetros Múltiplos (*Optimum Multiparameter Analysis*)

P

PGW – Água do Golfo-Pérsico (*Persian-Gulf Water – PGW*)

Q

B&A – Mares de Bellingshausen e Amundsen

R

ROV – Veículo Operado Remotamente (*Remotely Operated Vehicle*)

RSW – Água do Mar Vermelho (*Red Sea Water*)

S

SACW – Água Central do Atlântico Sul (*South Atlantic Central Water*)

SAMW – Água Modal Subantártica (*Subantarctic Modal Water*)

SEISAMW – Água Modal Subantártica do Índico Sudeste (*Southeast Indian Sub-Antarctic Mode Water*)

SICW – Água Central do Índico Sul (*South Indian Central Water*)

SLA – Anomalia do Nível do Mar (*Sea Level Anomaly*)

STSW – Água de Superfície Subtropical (*Subtropical Surface Water*)

T

TSW – Água de Superfície Tropical (*Tropical Surface Water*)

TLW – Água do Vazamento da Tasmânia (*Tasman Leakage Water*)

U

UCDW – Água Profunda Circumpolar Superior (*Upper Circumpolar Deep Water*)

UERJ – Universidade Estadual do Rio de Janeiro

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

U-CTD – Sistema Condutividade-Temperatura-Profundidade (*Underway Conductivity-Temperature-Depth*)

V

VP – Vorticidade Potencial

W

WOA13 – Atlas Oceanográfico Global (*World Ocean Atlas 2013*)

WR – Cordilheira Walvis (*Walvis Ridge*)

X

XBT – Batitermógrafo Descartável (*eXpendable BathyThermograph*)

Capítulo I: Introdução

Na introdução serão apresentadas as seguintes seções: i) uma breve definição de vórtices oceânicos, ii) a descrição das principais características dos vórtices das Agulhas e iii) a caracterização de massas de água do oceano Índico.

1.1 Vórtices Oceânicos

Vórtices oceânicos são feições bem definidas e de forma quase circular ou elíptica, sendo caracterizadas por linhas de corrente fechadas, que apresentam forte gradiente de propriedades em relação às águas adjacentes. Vórtices são definidos como uma parte ou volume de uma corrente oceânica que desenvolve uma circulação fechada com certa persistência ao redor de seu eixo vertical [Cushman-Roisin, 1994]. Os vórtices são comumente associados ao fluxo das correntes oceânicas, em especial as de fluxo mais intenso, como as correntes de contorno oeste, suas extensões e recirculação (e.g. Corrente das Agulhas, Corrente do Brasil, Corrente do Golfo, Corrente de Kuroshio). As correntes de contorno oeste fecham a circulação dos giros subtropicais e são descritas na literatura como estreitas, de fluxo intenso e definido. Essas características dinâmicas fazem das correntes de contorno oeste sítios favoráveis para o desenvolvimento de instabilidades no fluido, que posteriormente podem desencadear a formação de vórtices.

Os vórtices oceânicos podem ser classificados em dois tipos: ciclônicos e anticiclônicos. No hemisfério Sul (Norte), os vórtices ciclônicos apresentam sentido de giro horário (anti-horário) enquanto os anticiclônicos apresentam sentido anti-horário (horário). Vórtices anticiclônicos (ciclônicos) são ainda caracterizados por suas águas interiores serem mais quentes (frias) do que aquelas que circunvizinham a feição, ou seja, estes vórtices são também reconhecidos por possuírem núcleo quente (frio), o que os tornam passíveis de identificação radiométrica por sensores embarcados em satélites. Seus centros são de alta (baixa) pressão, possuindo anomalias positivas (negativas) da superfície livre do mar, o que os torna passíveis de serem identificados por sensores altimétricos também embarcados em satélites (ver Figura 1). Em termos de estrutura vertical, os vórtices anticiclônicos são também caracterizados por um afundamento das isotermas em seu interior, enquanto nos vórtices ciclônicos as isotermas são elevadas, tendo-se então águas frias profundas mais próximas da superfície.

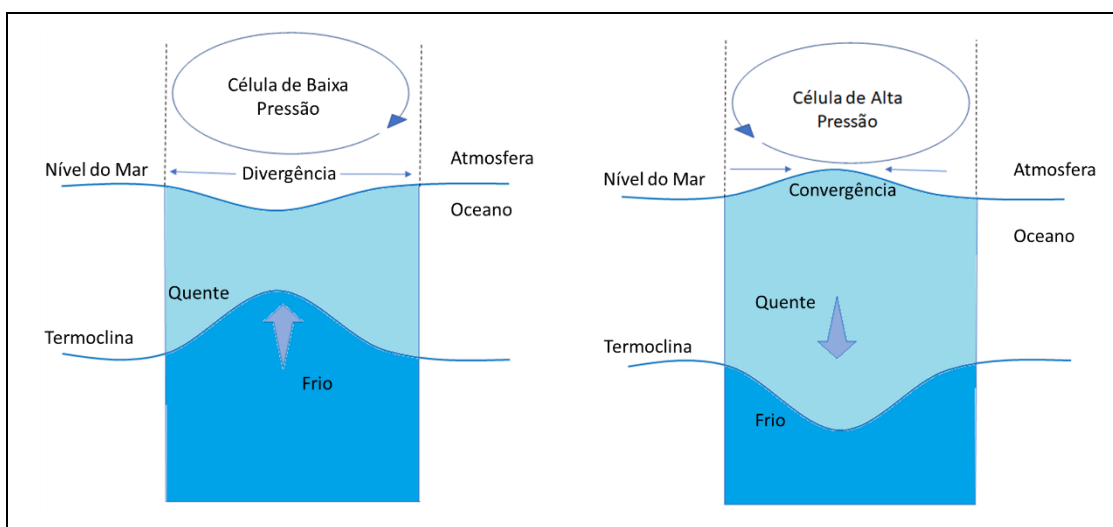


Figura 1: Desenho esquemático da estrutura vertical de vórtices ciclônicos (esquerda) e anticiclônicos (direita) no hemisfério sul.

Além disso, os vórtices são observados quase em todo o oceano global, com as notáveis exceções dos "desertos de vórtices" encontrados no nordeste e sudeste do oceano Pacífico e em algumas outras regiões localizadas [Chelton *et al.*, 2011]. Os vórtices oceânicos podem ser gerados por interações de uma corrente oceânica com a topografia de fundo (principalmente montes submarinos) ou com ilhas. Estes também podem ser formados como resultado da interação de uma corrente com a costa, com outras correntes ou vórtices, ou como resultado do

cisalhamento horizontal do vento na superfície livre do mar [Colling & Open University Oceanography Course Team, 2001]. Existem vários mecanismos de formação de vórtices no oceano oriundos destas interações, sendo que os principais ocorrem através do meandramento e/ou retroflexão de correntes oceânicas. Na figura 2 é apresentada a sequência de etapas da típica formação de um vórtice por meandramento. Nela se observa que, inicialmente, o campo médio da corrente sofre uma perturbação, o que origina o meandro propriamente dito. À medida que essa atividade meandrante se intensifica, no caso de estar ocorrendo um processo de instabilidade, há uma tendência que parte desse fluido se feche sobre si e se desprenda da corrente formando um vórtice. Vórtices formados por meandramento são observados na Corrente do Golfo [e.g. Lee *et al.*, 1981; Richardson *et al.*, 1973], Corrente do Brasil [e.g. Campos *et al.*, 2000; Silveira *et al.*, 2008], Corrente de Kuroshio [e.g. Mitsudera *et al.*, 2001] dentre outras.

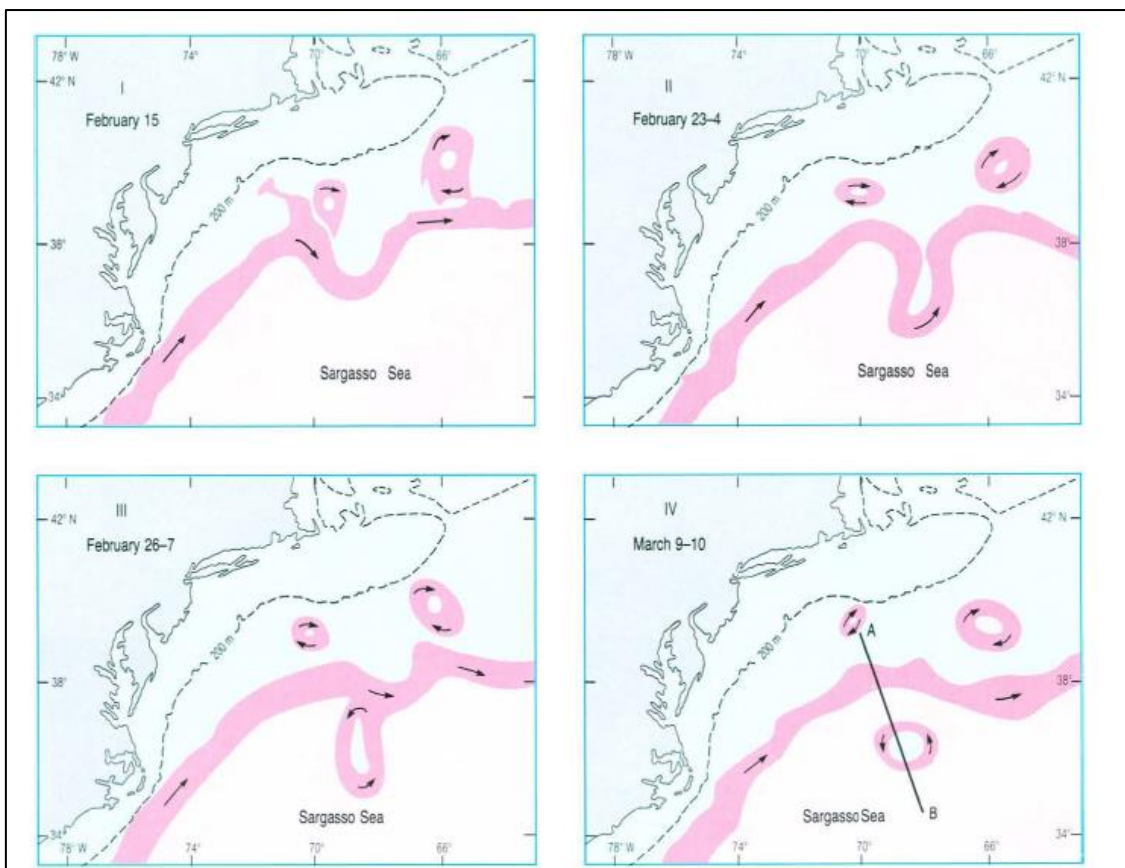


Figura 2: Desenho esquemático da evolução de um processo de liberação de vórtices por meandramento na Corrente do Golfo. A água quente do Mar de Sargasso é mostrada como rosa claro, a água da plataforma continental menos salina como azul e o Jato da Corrente do Golfo em um rosa escuro. Linha tracejada indica a isóbata de 200 m. Fonte: Colling & Open University Oceanography Course Team [2001].

A retroflexão de uma corrente consiste na mudança de orientação do seu fluxo causada pelo rotacional da tensão de cisalhamento do vento. Podemos citar como exemplo as retroflexões da Corrente das Agulhas, da Corrente do Brasil, da Corrente Norte do Brasil [e.g. Richardson *et al.*, 1994], dentre outras. Os vórtices formados por retroflexão estão entre os maiores vórtices do oceano global, podendo alcançar 400 km de diâmetro. O mecanismo de formação de vórtices por retroflexão é similar ao de meandramento, mas as retroflexões são feições necessariamente permanentes nos giros subtropicais. Na figura 3 é exemplificado este processo para a retroflexão da Corrente das Agulhas, que flui pela costa leste do continente africano. A formação de um vórtice por retroflexão de uma corrente ocorre periodicamente, quando os lados do *loop* se juntam, ocorrendo a ejeção de um vórtice isolado. À medida que o vórtice se separa, a retroflexão se restabelece novamente.

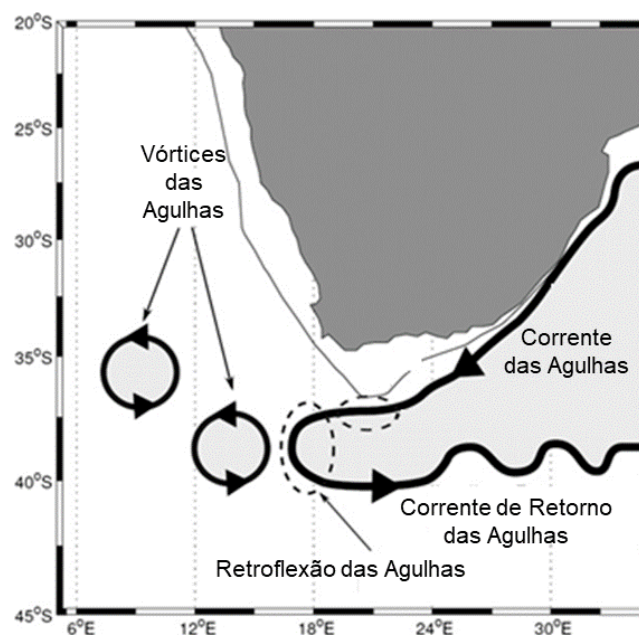


Figura 3: Desenho esquemático da liberação de vórtices a partir da Retroflexão da Corrente das Agulhas. Fonte: adaptado de Arruda *et al.* [2014].

Após sua formação, os vórtices podem ser propulsionados para longe de sua área de formação ou serem reincorporados ao fluxo da corrente que os originou. O movimento dos vórtices pelos oceanos é influenciado basicamente por três fatores: advecção por correntes externas, a influência de vórtices próximos e a autopropulsão intrínseca à feição [e.g. Azevedo & Mata, 2010]. A autopropulsão dos vórtices obedece ao balanço de forças meridionais que agem sobre estas

feições, a saber: (i) a força β , devida à diferença do parâmetro de Coriolis entre os hemisférios norte e sul do vórtice; (ii) a força de Coriolis e (iii) a força ambiente, devida à ação do ambiente externo sobre o vórtice [e.g. [Azevedo & Mata, 2010](#)]. Este balanço meridional de forças tem como resultado que vórtices isolados são autopropulsionados sempre no sentido oeste, independentemente do hemisfério considerado [e.g. [Nof, 1981](#); [Killworth, 1983](#); [Azevedo & Mata, 2010](#)].

Outros processos podem desviar os vórtices de sua trajetória zonal devida à autopropulsão. Desvios meridionais na trajetória dos vórtices podem ocorrer devido ao efeito conhecido como “segregação de vorticidade” [[Firing & Beardsley, 1976](#)]. Como resultado deste efeito, os vórtices ciclônicos (anticiclônicos) são defletidos meridionalmente em direção ao polo (equador) [[Morrow et al., 2004](#); [Chelton et al., 2007](#); [Chelton et al., 2011](#)].

Em qualquer estágio da sua vida, os vórtices carregam um núcleo interno que contém apenas águas do seu local de formação, enquanto que um anel externo circundante contém uma mistura de águas do ambiente externo ao vórtice que entram nessas feições ao longo de seu tempo de vida [[Early et al., 2011](#)]. Nesse contexto, o núcleo do vórtice é um agente transportador de propriedades características da sua área de formação e carrega essas parcelas de fluido para além da área onde se originou, podendo percorrer até milhares de quilômetros. Ao longo do seu tempo de vida esse conteúdo tende a ir diminuindo devido a interações com o ambiente externo durante o seu decaimento.

Devido as velocidades rotacionais presentes nessas feições, os vórtices comportam-se como feições parcialmente isoladas do seu entorno com características físicas e químicas próprias da sua área de origem que possibilitam sustentar e transportar comunidades planctônicas e nectônicas inteiras por longas distâncias [e.g. [Bakun, 2006, 2010](#); [Condie et al., 2011](#); [Sarhou et al., 2005](#); [Laws, 2013](#)]. Ao sustentar o desenvolvimento de comunidades biológicas, os vórtices oceânicos podem potencialmente atuar como cápsulas ambientais capazes de transportar populações viáveis em habitats oceânicos considerados inóspitos [[Condie & Condie, 2016](#)]. Além disso, as anomalias de temperatura e salinidade no interior de vórtices tendem a se mover com eles, de modo que os vórtices atuam como importantes transportadores de calor e sal em escala global.

1.2 Vórtices das Agulhas

Os vórtices das Agulhas estão entre as maiores feições de mesoescala do oceano global, com diâmetros que variam entre 80 e 400 km e com uma extensão vertical que alcança profundidades de até 4500 m [e.g. [van Ballegooyen et al., 1994](#); [Garzoli et al., 1999](#); [van Aken et al., 2003](#); [van Sebille et al., 2010](#); [Souza et al., 2011](#); [Barros, 2016](#); [Casanova-Masjoan et al., 2017](#)]. Estes vórtices são originados a partir da Retroflexão da Corrente das Agulhas, a corrente de contorno oeste do giro Subtropical do oceano Índico. Esta corrente flui para sul acompanhando o continente africano, até atingir aproximadamente 35°S de latitude [e.g. [Lutjeharms & van Ballegooyen, 1988](#)], onde alcança o limite sul do continente, a partir de onde ela segue como um jato livre na direção oeste-sudoeste. Em cerca de 45°S, com o rotacional do stress do vento sendo anulado, a Corrente das Agulhas retroflete em sentido anti-horário e retorna para o oceano Índico, dando origem a Corrente de Retorno das Agulhas, que flui para leste. Eventualmente, a retroflexão da Corrente das Agulhas, sofre uma oclusão, liberando vórtices anticiclônicos para o oceano Atlântico Sul (Figura 3) [e.g. [van Ballegooyen et al., 1994](#)].

Uma vez liberados da Retroflexão das Agulhas, os vórtices das Agulhas transladam numa trajetória preferencialmente para noroeste [[Gordon & Haxby, 1990](#); [Byrne et al., 1995](#); [Dencausse et al., 2010](#); [Pilo et al., 2015](#)]. A região do oceano Atlântico Sul por onde transladam os vórtices das Agulhas foi denominada por [Garzoli & Gordon \[1996\]](#) de Corredor das Agulhas (Figura 4). Localizado aproximadamente entre 20°S e 30°S, esse corredor é consistente com o máximo de energia cinética turbulenta encontrada nesta área do oceano Atlântico Sul [[Goni et al., 1997](#)].

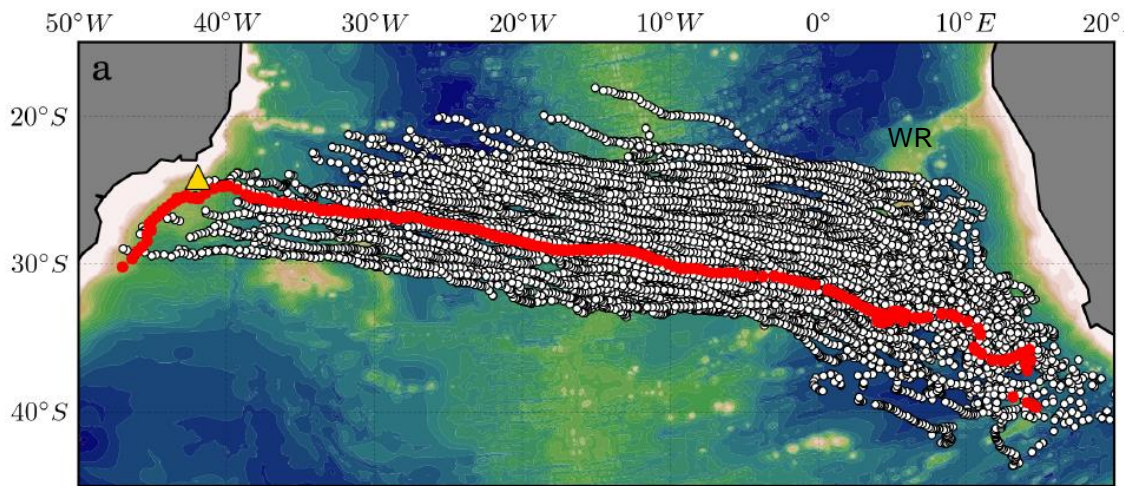


Figura 4: Trajetórias de vórtices das Agulhas, sobre mapa batimétrico, ao longo do oceano Atlântico Sul de 1992 a 2009 baseadas em dados altimétricos. Círculos vermelhos mostram o caminho de um vórtice das Agulhas, desde sua origem até contatar com a Corrente do Brasil [Guerra, 2011]. O triângulo amarelo mostra a posição de um fundeio que amostrou este vórtice. WR: indica a posição da Cordilheira Walvis. Fonte: figura adaptada de Guerra [2011].

Quando liberados da Retroflexão das Agulhas, os vórtices das Agulhas podem permanecer como estruturas coerentes no oceano desde poucos meses [e.g. Dencausse *et al.*, 2010] até cerca de 3 a 4 anos [e.g. Byrne *et al.*, 1995; Schouten *et al.*, 2000; Guerra *et al.*, 2011; Pilo *et al.*, 2015]. Os vórtices com menor tempo de vida são geralmente reincorporados ao fluxo da Corrente das Agulhas [e.g. Gordon *et al.*, 1987]. Outros podem sofrer divisões, processos de *splitting*¹, ou ainda se dissipar na Bacia do Cabo devido a interações com feições batimétricas como a Cordilheira de Walvis ou o monte submarino Vema [e.g. Schouten *et al.*, 2000]. Estima-se que apenas dois terços dos vórtices das Agulhas consigam efetuar uma trajetória mais longa, cruzando o oceano Atlântico Sul, para além da Cordilheira Walvis [Schouten *et al.*, 2000]. Esta trajetória noroeste dos vórtices das Agulhas é resultado da sua auto-propulsão para oeste, intrínseca aos vórtices livres nos oceanos [Nof, 1981; Cushman-Roisin *et al.*, 1990], e a sua auto-advecação de vorticidade que faz com que vórtices anticiclônicos sejam desviados em direção ao equador [Smith & O'Brien, 1983]. Os vórtices das Agulhas também podem seguir uma trajetória mais para norte, ao serem

¹*Splitting*: termo adotado na bibliografia para referir-se ao processo ou efeito do vórtice dividir-se em duas ou mais partes, dando origem a novos vórtices. Este processo pode ocorrer, sob certas condições, durante a interação do vórtice com feições batimétricas [e.g. Arhan *et al.*, 1999; Schouten *et al.*, 2000; Boebel *et al.*, 2003].

advectados pela Corrente de Benguela, a corrente de contorno leste do giro subtropical do oceano Atlântico Sul.

A frequência com que esses vórtices são liberados da Corrente das Agulhas é incerta e variável [Feron *et al.*, 1992]. Estima-se que entre 4 e 9 destes vórtices sejam emitidos do núcleo da Corrente das Agulhas anualmente [Lutjeharms & van Ballegooyeen, 1988; Gordon & Haxby, 1990; Feron *et al.*, 1992; van Sebille *et al.*, 2010]. Esta variabilidade na emissão de vórtices está associada com a posição do cinturão de ventos de oeste do hemisfério sul. Quanto mais ao sul estiver esta posição, maior será o canal de conexão entre os oceanos Índico e Atlântico, limitado ao sul pela Frente Subtropical e ao norte pela borda sul do continente africano (Figura 5) [de Ruijter *et al.*, 1999; Beal *et al.*, 2011]. Simulações recentes de modelos de circulação global de alta resolução apontam que, nas últimas décadas, o deslocamento para sul deste cinturão de ventos pode causar o aumento do transporte de águas do oceano Índico para o Atlântico Sul, via um consequente aumento no vazamento das Agulhas [Bjastoch *et al.*, 2009; Beal *et al.*, 2011].

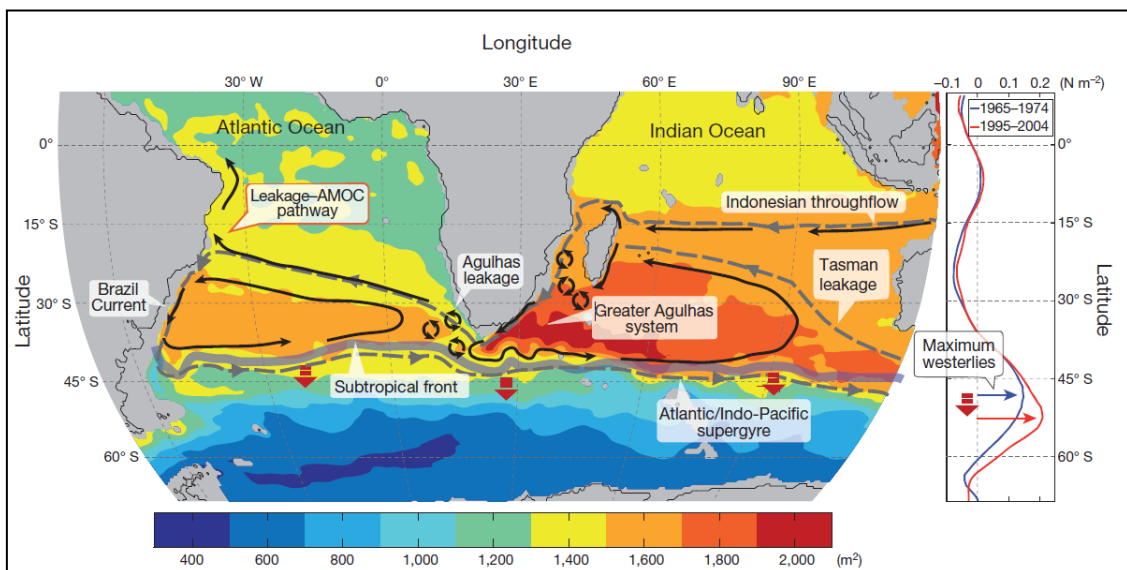


Figura 5: Vazamento das Agulhas influenciado pelos ventos de oeste e pela posição da Frente Subtropical. Esquema do Sistema das Agulhas inserido nos giros subtropicais do hemisfério sul. As cores de fundo mostram a circulação média dos giros subtropicais, representada pela altura dinâmica climatológica integrada entre a superfície e 2040 m. Setas pretas e caixas de texto ilustram as feições da circulação oceânica. Um esboço do supergiro do hemisfério sul é dado pela linha tracejada cinza. O gráfico à direita comprova a expansão para sul dos ventos de oeste no hemisfério sul. O deslocamento para sul correspondente da Frente Subtropical é ilustrado por setas vermelhas e afeta o Vazamento de Agulhas (mostrado como vórtices, representados por círculos pretos). A via entre o vazamento e a Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation - AMOC*), que é destacada com uma caixa de texto vermelha (*Leakage-AMOC Pathway*). Fonte: Beal *et al.* [2011].

Devido às características das massas de água que os vórtices das Agulhas carregam em seus núcleos e ao grande tamanho dessas feições (até 400 km de diâmetro), estes vórtices atuam como importantes agentes de transportes de sal e de calor entre o oceano Índico e o Atlântico Sul. Os núcleos dos vórtices das Agulhas carregam as propriedades termohalinas da Corrente das Agulhas, advectando-as rumo ao oceano Atlântico Sul. Desde a superfície até a camada intermediária, as águas desses vórtices chegam a ser até 5°C mais quentes e mais salinas (até 1 unidade) do que as águas que os circundam no oceano Atlântico Sul [e.g. [Biaostoch & Krauss, 1999](#); [Garzoli et al, 1999](#); [Gordon & Haxby, 1990](#); [Gordon et al., 1992](#); [Guerra, 2011](#); [Casanova-Masjoan et al., 2017](#)].

Acredita-se que o transporte para norte envolvido com a Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation* - AMOC) subtropical é suscetível à variabilidade deste vazamento de águas quentes e salinas da Corrente das Agulhas para o oceano Atlântico Sul [[Biaostoch et al., 2008](#); [2009](#)], o que teria potencial de afetar o clima global [[Lutjeharms & Bornman, 2010](#)]. A contribuição direta dos vórtices das Agulhas para a AMOC ocorre quando eles se dissipam na Bacia do Cabo, diluindo seu conteúdo de sal e calor nas águas locais, que é incorporado à Corrente de Benguela [[Schouten et al., 2000](#)]. Desta forma, esses vórtices são inseridos no giro subtropical do oceano Atlântico Sul, advectados pela Corrente Equatorial e, em seguida, pela Corrente Norte do Brasil, rumo ao hemisfério norte.

Em contrapartida, [Casanova-Masjoan et al. \[2017\]](#) propõem que os vórtices das Agulhas não contribuem substancialmente para o transporte latitudinal de calor e sal pelo ramo superior da AMOC. Essa afirmação se baseou na contribuição fracionária das propriedades dos vórtices em relação à área do Corredor das Agulhas, o que resultou em valores inferiores a 2% do obtido para essa região. Repetindo o procedimento para a salinidade levou a valores ainda menores. As conclusões desses autores revelam que a contribuição dos vórtices das Agulhas para a AMOC ainda não é consenso na literatura, contudo, os transportes de propriedades pelos quais essas feições são responsáveis possuem grande relevância regional.

1.3 As Massas de Água do Oceano Índico

As massas de água da Corrente das Agulhas, que origina os vórtices das Agulhas, são provenientes de todo o oceano Índico e até mesmo dos oceanos Atlântico e Austral [Beal *et al.*, 2006; Durgadoo *et al.*, 2017]. A figura 6 sintetiza as principais massas de água e a sua distribuição pelo oceano Índico.

Próxima à superfície, a Água Tropical de Superfície (*Tropical Surface Water* - TSW) e a Água Subtropical de Superfície (*Subtropical Surface Water* - STSW), se distribuem ao norte e ao sul de Madagascar, respectivamente, mas ambas ainda podem ser observadas no Canal de Moçambique [e.g. Duncan 1970; Gründlingh *et al.* 1991; de Ruijter *et al.* 2002]. Abaixo destas, a massa de água predominante na termoclina permanente do sudoeste do oceano Índico é a Água Central do Índico Sul (*South Indian Central Water* - SICW), composta de água de superfície que sofre um processo de subsucção [You, 1997]. Caracterizada por uma relação quase linear entre temperatura e salinidade, a SICW é definida para um intervalo de temperatura entre 7 - 18°C [Emery & Meincke, 1986]. As águas modais da Corrente de Agulhas parecem ser uma mistura da Água Modal Subantártica do Índico Sudeste (*Southeast Indian Sub-Antarctic Mode Water* - SEISAMW) [Hanawa & Talley, 2001] com a Água Modal Subantártica (*Sub-Antarctic Mode Water* - SAMW) que é menos densa [Fine, 1993; Beal *et al.*, 2006].

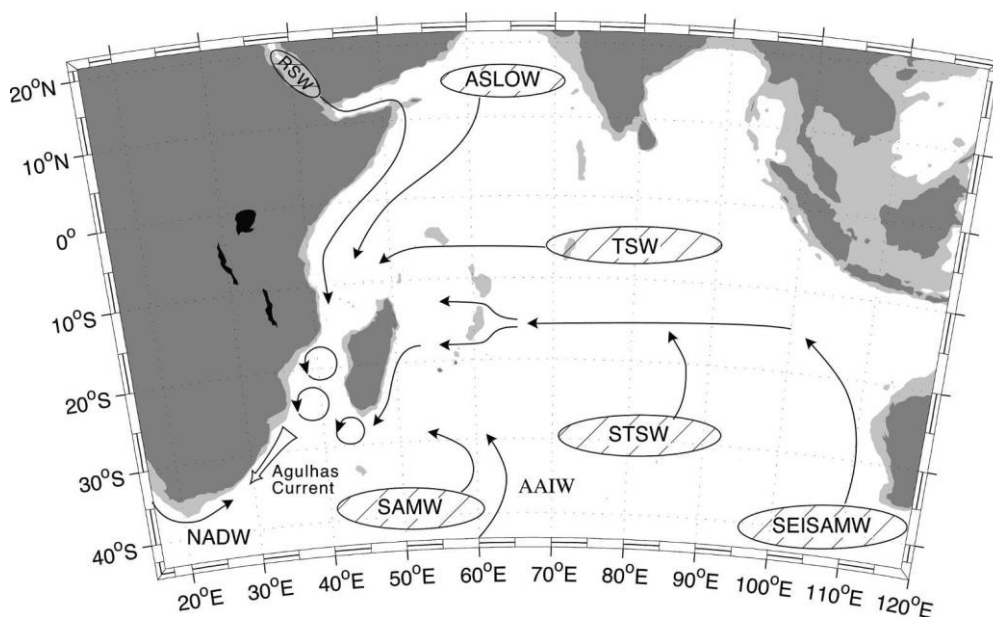


Figura 6: Desenho esquemático das regiões de origem e trajetórias das massas de água associadas com a Corrente de Agulhas. As águas que se formam no oceano Índico são mostradas em elipses. As águas importadas de fora do oceano Índico não são circundadas. Fonte: Beal *et al.* [2006].

Em níveis intermediários, a Água Intermediária Antártica (*Antartic Intermediate Water* - AAIW) e a Água do Mar Vermelho (*Red Sea Water* - RSW) são observadas. A AAIW, caracterizada por um mínimo de salinidade (<34,5) e por um máximo de oxigênio dissolvido, é formada na Frente Subantártica e é advectada para norte até o Canal de Moçambique pela Contra-Corrente de Moçambique. A RSW, por sua vez, é caracterizada por um mínimo de oxigênio dissolvido, alta salinidade (34,7 – 34,8) e alta temperatura em profundidades intermediárias, se distribuindo em ‘manchas/lentes’ pelo oceano Índico até a Corrente das Agulhas [Shapiro & Meschanov, 1991], inclusive sendo observada em seus vórtices [e.g. Roman & Lutjeharms, 2007]. Em um diagrama-TS do oceano Índico, a RSW é claramente identificada por modificar o mínimo de salinidade da AAIW com a intercalação de camadas relativamente salinas, conforme exemplificado na Figura 7. No Canal de Moçambique, a camada profunda contém a *North Atlantic Deep Water* (NADW), formada no norte do Atlântico Norte e distribuída por todo o oceano global pela circulação termohalina [van Aken, 2007]. A NADW, caracterizada pela alta salinidade e alto teor de oxigênio em cerca de 2500 m de profundidade, entra no oceano Índico fluindo ao sul da África [Mantyla & Reid, 1995].

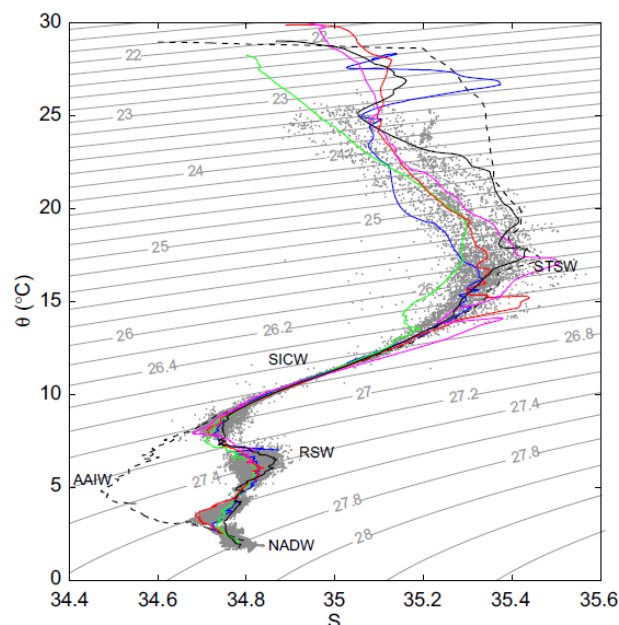


Figura 7: Diagrama-TS de uma seção do Canal de Moçambique. Pontos cinzentos e linhas coloridas referem-se aos dados obtidos em 17°S. Em preto tracejado os dados obtidos em um transecto em 24°S, para demonstrar propriedades AAIW na porção sul do Canal de Moçambique e a contribuição da AAIW. Fonte: Ullgren *et al.* [2011].

Considerando o papel do vazamento das Agulhas na AMOC, é importante compreender quanto os vórtices das Agulhas contribuem na interconexão dos oceanos Índico e Atlântico Sul. Alguns estudos [e.g. [Olson et al., 1992](#); [Garzoli et al., 1999](#); [Guerra, 2011](#)] têm evidenciado que, ao longo de suas trajetórias pelo oceano Atlântico Sul, os vórtices das Agulhas mantêm preservadas em seu interior águas modais do oceano Índico. Porém, nenhum destes trabalhos apresentou resultados quantitativos a respeito da contribuição de cada massa d'água no interior dos vórtices. Neste contexto, o presente trabalho buscou determinar o conteúdo de águas do oceano Índico no interior de três vórtices das Agulhas amostrados no oceano Atlântico Sul durante o cruzeiro FORSA (da sigla em inglês, *Following Ocean rings in the South Atlantic*). Além disso, esse trabalho visou contribuir com estimativas de transportes de sal e calor nesses três vórtices das Agulhas, a partir de sua caracterização baseada em dados hidrográficos inéditos obtidos nesse cruzeiro.

Essa dissertação foi dividida em seis capítulos, sendo este primeiro uma introdução geral onde é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os vórtices das Agulhas e as possíveis massas de águas por eles advectadas em seu interior. No capítulo II são definidos os objetivos do trabalho. No terceiro capítulo, é detalhada a metodologia utilizada nessa dissertação e inclui uma descrição do cruzeiro FORSA, que constitui a principal fonte de dados para a realização deste trabalho. No capítulo IV são apresentados e descritos os resultados obtidos. No quinto capítulo, segue-se uma discussão dos resultados alcançados nas diversas análises em que se buscou interpretar o comportamento dos vórtices ao longo de suas trajetórias, caracterizar suas propriedades físicas e físico-químicas e ainda relacionar esses parâmetros com as massas de água identificadas no interior das feições. Por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo II: Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consistiu em verificar o papel dos vórtices das Agulhas na interconexão entre os oceanos Atlântico e Índico, a partir de dados inéditos obtidos no cruzeiro FORSA. Neste contexto, foram definidas duas frentes de investigação, conforme os objetivos específicos a seguir:

- Caracterizar três vórtices das Agulhas amostrados no cruzeiro, quanto as suas propriedades físicas e transportes associados;
- Quantificar a contribuição de massas de água do oceano Índico que são aportadas por estes vórtices para o oceano Atlântico Sul.

Capítulo III: Metodologia

A descrição da metodologia foi segmentada em três partes. Na primeira parte é apresentada a Comissão FORSA, que reuniu o principal banco de dados utilizado neste trabalho. Na segunda parte são apresentados os métodos de caracterização dos vórtices das Agulhas, visando alcançar o Objetivo Específico 1. A terceira parte, por sua vez, descreve os métodos utilizados para a identificação e quantificação de massas de água no interior dos vórtices, já com referência ao Objetivo Específico 2.

3.1 A Comissão FORSA

A comissão FORSA foi o Cruzeiro Científico inaugural do Navio de Pesquisa Hidroceanográfico (NPqHo.) Vital de Oliveira (H-39; Figura 8). O NPqHo. Vital de Oliveira (H-39) é o primeiro navio brasileiro de pesquisa oceânica concebido e construído para esta finalidade. Desta forma, o H-39 possui os mais modernos equipamentos de pesquisa oceanográfica e sobressalentes que incluem: Ecobatímetros Multifeixe (águas rasas e profundas); Ecobatímetro Monofeixe; Perfilador de Subfundo; Sonares de Varredura Lateral; Perfiladores de Corrente (*Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP*, de 75 e 150 KHz); CTD/Rossette, U-CTD, XBT, Perfilador contínuo de propagação da Velocidade do Som na água; Veículo Operado Remotamente (ROV) até 4.000m; Amostradores e testemunhador geológico; Estação Meteorológica Automática; Medidores de

Ondas e Correntes; Gravímetro e Magnetômetro; PCO₂, Plâncton e Salinômetro; e Lanchas Hidrográficas com ecobatímetro multifeixe [MCTI, 2015].

Além dos equipamentos já existentes no navio, para a comissão FORSA foi embarcado equipamentos complementares, tais como redes de plâncton, *Moving Vessel Profiler* (MVP) contendo *Laser-Optical Plankton Counter* (LOPC) + miniCTD + fluorímetro, radiômetro, u-pCO₂, sensores de fluxo atmosférico, dataloggers, radiossondas, e 03 (três) flutuadores Argo. Também foi instalada na proa do H-39 um sistema de coleta de dados micrometeorológicos, para a estimativa dos fluxos de CO₂, *momentum*, calor latente e sensível.



Figura 8: Foto do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39). Fonte: [Portos e Navios \[2016\]](#).

A Comissão FORSA foi um cruzeiro de oportunidade da Marinha do Brasil que possibilitou a realização de medições e amostragens meteoceanográficas de vórtices oceânicos na região conhecida como Corredor das Agulhas, que se estende do sul da África para oeste, em direção ao interior do oceano Atlântico Sul. O cruzeiro ocorreu entre a Cidade do Cabo (África do Sul) e Arraial do Cabo (RJ, Brasil) entre os dias 27 de junho e 15 de julho de 2015. Pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) participaram da Comissão FORSA.

A derrota do navio foi planejada, na medida do possível, dentro da janela temporal que não modificasse a data de chegada do navio ao Brasil, definida pela Marinha do Brasil, no intuito de se amostrar o maior número possível de vórtices das Agulhas.

A trajetória do cruzeiro FORSA foi montada visando a amostragem de seis vórtices anticiclônicos, previamente identificados. Conforme planejado, a derrota do navio foi sendo atualizada dia-a-dia, ao longo da navegação, mediante a atualização de mapas altimétricos, considerando-se a evolução espacial dos vórtices e o tempo disponível para realização das observações. Na Figura 9 é apresentada a trajetória final do navio Vital de Oliveira e são indicados os seis vórtices das Agulhas amostrados pelo cruzeiro FORSA, denominados conforme a ordem de amostragem, de leste para oeste: V1, V2, V3, V4, V5 e V6.

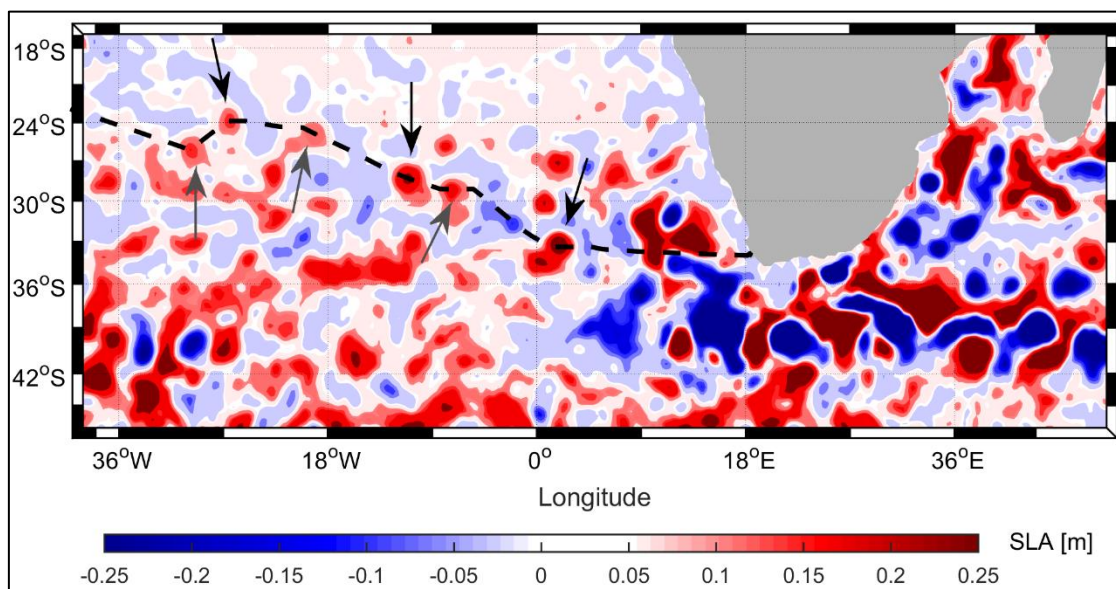


Figura 9: Trajetória do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39), em linha tracejada, sobre mapa altimétrico do dia 05/07/2015. Setas indicam os seis vórtices amostrados. Setas pretas indicam os vórtices V1 (mais à leste), V3 e V5 (mais à oeste) cujos dados foram utilizados nesse trabalho.

Dentre as feições observadas foram identificados três vórtices principais (V1, V3 e V5), representativos da evolução zonal destas feições ao longo da bacia, que foram amostrados com maior rigor. Entretanto, para que o tempo de cruzeiro fosse respeitado, essas amostragens mais detalhadas se restringiram a somente uma metade desses vórtices. Nestas regiões foram definidas estações de amostragem no exterior e no interior dos vórtices com perfilagens de CTD e u-CTD e amostragem de água ao longo da profundidade. As medições de CTD

A localização das estações era definida por meio do monitoramento da profundidade das isothermas ao longo da derrota do navio a partir do lançamento contínuo de XBTs. Quando se observava que as isothermas apresentavam um declínio, sabia-se que o navio estava adentrando em um vórtice, onde era realizada a estação da borda. A estação central era identificada quando a inclinação das isothermas se invertia. Desta forma, havia um pequeno atraso na realização das estações e, com isso, os perfis de borda e centrais foram realizados um pouco depois da passagem do navio sobre a borda e o centro dos vórtices. A estação controle, realizada fora do vórtice, era definida com base em mapas diários de Anomalia do Nível do Mar (*Sea Level Anomaly – SLA*), conforme a localização dos vórtices. A estação de área média era estimada a partir do tamanho do vórtice, pelos mapas altimétricos. Na figura 11 é possível observar a inclinação das isothermas ao longo de toda a derrota do H-39. Os vórtices anticiclônicos são identificados pelo aprofundamento dessas isothermas, indicados pelas setas.

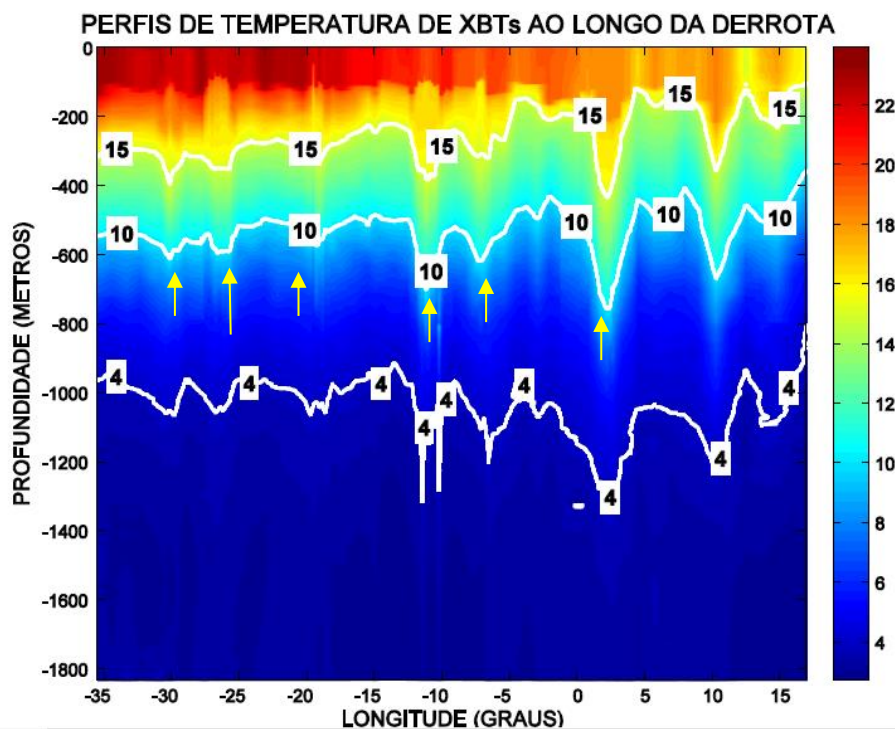


Figura 11: Estrutura térmica vertical obtida ao longo do transecto que corresponde à derrota do navio durante a Comissão FORSA (dados brutos), construída a partir dos dados (perfilagens) de XBT. Fonte: [Comissão FORSA \[2015\]](#).

Medições de diversas variáveis físicas, químicas e biológicas da água do mar foram obtidas ao longo da derrota e principalmente nas regiões oceânicas onde

se localizavam os vórtices. Do lado atmosférico foram obtidas estimativas dos fluxos de CO₂, quantidade de movimento, calor sensível, calor latente, além da realização de radiossondagens para observação dos perfis termodinâmicos. Cabe destacar que a frequência de lançamento de XBTs e sensores (LOPC+miniCTD+fluorímetro) com a utilização do MVP foi aumentada sempre que o navio se deslocava sobre os vórtices.

Amostragem de água para o estudo da caracterização e composição do fitoplâncton oceânicos nas regiões dos vórtices foi realizada nas 12 estações distribuídas nos vórtices V1, V3 e V5. Dentre as amostragens foram preparados material para posterior análise de pigmentos por HPLC; diversidade de pico e nanoplâncton por citometria de fluxo (composição e número de células por volume), diversidade e abundância do micropoplâncton (composição e número de células por volume) e diversidade genética. As amostragens para análise de zooplâncton foram realizadas através de perfilagem vertical de rede e com a perfilagem *underway* de LOPC.

Durante a Comissão FORSA foram lançados 03 (três) perfiladores Argo, no centro dos vórtices V4, V5 e V6, respectivamente. Nos vórtices V2, V4 e V6, em virtude da necessidade de adequação do tempo com atividades de pesquisa com o tempo total de navegação, não houve perfilagem de CTD e amostragens de água ao longo da profundidade. Estes vórtices foram amostrados *underway*, com a utilização de XBTs, u-CTD e do MVP (LOPC+miniCTD+fluorímetro), e com a coleta de água de superfície para determinação de pH *in situ* (navio) e de alcalinidade total (laboratório terra), possibilitando inferir posteriormente os valores de pCO₂ na água. Houve ainda a atenção de se garantir pelo menos 1 (um) lançamento de LOPC (580m; 5nós; 23min) no interior destes vórtices e na região oceânica adjacente, adequando-se a programação de medidas *underway* para tal fim.

Ao final da Comissão FORSA, todos os dados coletados com os equipamentos do navio e com aqueles trazidos pela equipe científica foram armazenados no servidor do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39) e disponibilizados para os pesquisadores [Comissão FORSA, 2015]. Posteriormente, todos os dados obtidos no cruzeiro FORSA passaram por pré-processamento seguindo

procedimentos rigorosos de Controle de Qualidade, conforme definido em [Castelão \[2011\]](#).

3.2 Caracterização dos vórtices

Esse trabalho foi realizado com os dados obtidos no cruzeiro FORSA, produtos de satélites altimétricos (*Collecte Localisation Satellite - CLS, Centre National d'Études Spatiales - CNES*), dados *in situ* do *World Ocean Atlas 2013 (WOA13)* [[Locarnini et al.](#); [Zweng et al.](#); [Garcia et al. 2013](#)] e o banco climatológico ISAS-13 [[Gaillard, 2015](#)].

A caracterização dos vórtices V1, V3 e V5 foi realizada conforme três segmentos. A primeira parte consiste na distribuição dos parâmetros físicos e físico-químicos internos das feições (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, velocidade rotacional e SLA). Na segunda parte constam as características onde a feição é vista como um corpo rígido (velocidade de translação, volume, transportes de sal e de calor). Na terceira parte, os vórtices são caracterizados quanto ao seu comportamento ao longo de seu tempo de vida quanto ao seu padrão de trajetória, velocidade de translação e as possíveis interações com seu entorno.

Produtos de satélites altimétricos (SLA e velocidades geostróficas) foram utilizadas para a caracterização superficial dos vórtices, referentes as datas de amostragem de cada um deles. Os mapas de SLA também foram úteis para reconstruir a trajetória dos vórtices pelo oceano Atlântico Sul. Tomando como partida as datas de amostragem pelo cruzeiro FORSA, cada vórtice foi rastreado retroativamente com mapas semanais de SLA até a sua área de origem, na zona de Retroflexão das Agulhas, para o reconhecimento do momento mais próximo possível daquele em que o vórtice foi liberado pela Corrente das Agulhas para o oceano Atlântico Sul. Em seguida, cada vórtice foi rastreado acompanhando-se o seu sinal de SLA desde a amostragem do FORSA até a perda do seu sinal de SLA. Nos trechos da zona de Retroflexão das Agulhas, do estágio final dos vórtices, ou quando se observou alguma forma de comportamento peculiar dos vórtices (tais como mudança no padrão de translação, interação com a batimetria ou com outros vórtices), estes eram inspecionados em mapas diários de SLA.

A velocidade média de translação dos vórtices foi calculada trecho a trecho, utilizando-se mapas altimétricos semanais. Primeiramente, foi identificada a posição do vórtice em cada mapa altimétrico. Em seguida, foi medida a distância percorrida pelo vórtice no intervalo de sete dias, dada pela diferença da localização do seu centro em dois mapas de SLA consecutivos. A velocidade média de translação dos vórtices foi então calculada dividindo-se a distância percorrida por essas feições pelo tempo decorrido entre estes mapas. Com isso, foi obtida a velocidade média dos vórtices (por trecho) para intervalos semanais. Por fim, foi feito o somatório da distância total percorrida por cada vórtice e com o tempo de translação da feição pode-se calcular a sua velocidade média total.

Os parâmetros da coluna d'água foram analisados com base no uso de dados obtidos no cruzeiro FORSA. São apresentadas seções de salinidade e oxigênio dissolvido, obtidas por medições de CTD realizadas no hemisfério leste de cada um dos três vórtices (V1, V3 e V5). Também é apresentada a seção de temperatura dos três vórtices (V1, V3 e V5) nos dois hemisférios de cada vórtice, obtida utilizando-se dos dados das medições de XBTs.

Para a caracterização dos vórtices, cálculo de volume e estimativas do transporte de propriedades foi necessário determinar o diâmetro e a profundidade dos mesmos. O diâmetro do vórtice foi definido pela faixa horizontal onde se identificou a depressão das isotermas [e.g. [Gordon, 1985](#); [McCartney & Woodgate-Jones; 1991](#) [Garzoli et al., 1999](#)]. Para tal, foram utilizadas as seções de temperatura obtidas por XBT. Na figura 12, é exemplificado como foi determinado o diâmetro do vórtice (entre as linhas verticais pontilhadas) em uma seção de temperatura.

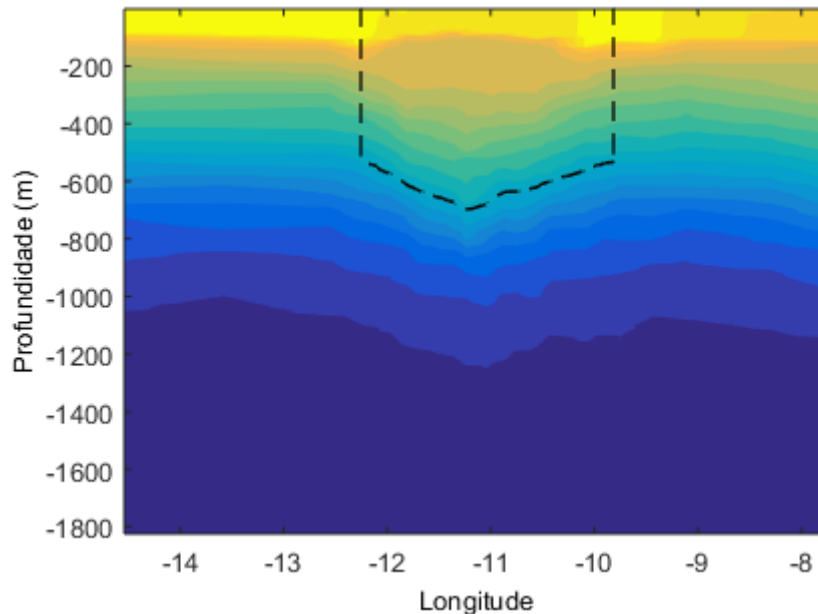


Figura 12: Exemplo da determinação do diâmetro e da profundidade do vórtice V3 baseado na isoterma de 10°C. As linhas pontilhadas vermelhas indicam a área interna do vórtice.

Para se estimar a estrutura vertical de vórtices pode ser utilizado em um modelo simplificado que represente o oceano dividido em duas camadas, uma camada superior aquecida sobrejacente a uma camada mais fria e densa [Olson, 1991]. Neste tipo de modelo, os desvios da termoclina são compensados por variações opostas na altura da superfície do mar, conforme exemplificado na Figura 1.

Desta forma, o limite inferior dos vórtices é então determinado pela profundidade da isoterma que apresenta melhor correlação com a SLA. A isoterma de 10°C é comumente adotada na bibliografia [e.g. Garzoli *et al.*, 1999; van Aken, 2003; Guerra, 2011] como a isoterma que delimita inferiormente os vórtices das Agulhas, por ter sido a isoterma de melhor correlação com a SLA na região da Retroflexão das Agulhas [e.g. Gordon, 1985; Olson & Evans, 1986; van Ballegooyen *et al.*, 1994]. No entanto, visto que muitos vórtices das Agulhas alcançam profundidades muito além da isoterma de 10°C [e.g. Casanova-Masjoan *et al.*, 2017], delimitá-los a essa profundidade exclui a contribuição de águas da camada intermediária e abaixo dela.

Por esse motivo, buscando encontrar uma isoterma de referência que melhor representasse o limite inferior dos vórtices, neste trabalho, a profundidade dos vórtices determinada, com base nesse modelo de duas camadas [Olson, 1991], pela isoterma de melhor correlação com a SLA, que foi definida para cada vórtice

individualmente. Para tal, foram utilizados os dados de temperatura obtidos no cruzeiro FORSA e os dados altimétricos. Foram testadas correlações da SLA com a profundidade das isotermas de 3°C a 16°C.

É válido ressaltar que, além da isoterma de melhor correlação com a SLA, optou-se por também realizar os cálculos de volume e transporte de calor utilizando-se a isoterma de 10°C. Visto que a maioria dos artigos sobre vórtices das Agulhas utiliza essa isoterma de 10°C como referência, essas duas abordagens permitem uma melhor comparação com outros vórtices das Agulhas, além de possibilitar avaliar comparativamente a importância das águas abaixo dessa isoterma para o transporte de calor.

Definidas as dimensões vertical e horizontal de cada vórtice, seu volume (*Vol*) foi então calculado, em m³, pela equação 1, através da integração vertical da área circular correspondente ao seu diâmetro (*L*), ao longo da profundidade do vórtice (*H*). Duas estimativas de volume foram realizadas para cada vórtice, sendo uma utilizando-se a isoterma de 10°C como limite inferior e outra utilizando-se a isoterma de melhor correlação com a SLA.

$$Vol = \int_{-H}^0 \pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 dH$$

Equação 1

Consideraremos aqui cada vórtice como uma estrutura isolada no oceano, que translada como um corpo sólido ao longo de sua trajetória, transportando suas propriedades. Diante disso, para as estimativas de transportes de calor e de sal foram utilizadas as velocidades médias de translação do trecho em que cada um dos vórtices foi amostrado.

Para o cálculo de transporte de calor, a seção de temperatura obtida por XBTs foi interpolada de modo a ter um valor de temperatura com resolução vertical de 0,1 m e resolução horizontal de 0,01° de longitude (1110 m). Desta seção de temperatura, foi subtraído o valor da climatologia ISAS-13 [Gaillard, 2015] referente a julho de 2015 para as áreas em que foram amostrados os respectivos vórtices V1 (33,0°S / 2,5°E), V3 (28,3°S / 11,0°W) e V5 (24,2°S / 26,5°W), resultando no campo anômalo de temperatura (ΔT) em cada vórtice. Estes valores da anomalia de temperatura foram então convertidos em conteúdo de

calor ($Q = \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$) por meio da multiplicação da anomalia de temperatura pela capacidade calorífica ($C_p = 3,93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) e pela densidade da água do mar ($\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$). Os valores de conteúdo de calor foram integrados em toda a seção de amostragem do vórtice, multiplicando-se pela área de cada pixel da seção de temperatura interpolada ($A = 0,1 \text{ m} \times 1110 \text{ m} = 111 \text{ m}^2$). Por fim, o transporte de calor (t_{calor} , em PW) no interior de cada vórtice foi obtido pelo produto entre componente da velocidade média de translação (\vec{v} , em m/s) transversal à seção de amostragem de cada vórtice e o conteúdo total de calor obtido, conforme a equação 2. Essa velocidade média é referente ao trecho em que cada vórtice foi amostrado pelo FORSA.

$$t_{calor} = \int_{-H}^0 (\rho C_p \Delta T) \vec{v} dA$$

Equação 2

A equação 3 se refere ao transporte de sal (t , em kg/s). 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, obtida considerando-se o conteúdo anômalo de sal da seção de salinidade, oriunda das perfilagens de CTD no cruzeiro FORSA. Os dados de CTD foram interpolados a cada 0,1 m de profundidade e a cada 10 m horizontalmente. Como as perfilagens de CTD ocorreram apenas em uma metade do vórtice, assumindo-se que essas feições são aproximadamente simétricas, o conteúdo de sal foi multiplicado por dois. Por fim, o conteúdo de sal foi multiplicado pela velocidade média do trecho em que cada vórtice foi amostrado, resultando no transporte de sal.

$$t_{sal} = \int_{-H}^0 [sal] \rho \vec{v} dA$$

Equação 3

É importante mencionar que o transporte de calor foi calculado utilizando-se a isoterma de 10°C e a isoterma de melhor correlação com a SLA, devido as perfilagens de XBT terem sido realizadas até estações mais profundas. Como as estações de CTD se restringirem a camada mais superficial nas estações fora do centro dos vórtices, as estimativas de transporte de sal se limitaram a profundidade da isoterma de 10°C. Visto que as seções de temperatura e

salinidade foram obtidas zonalmente pelo cruzeiro FORSA, aqui foram calculados os transportes meridionais, onde utilizou-se apenas a componente meridional da velocidade de translação dos vórtices para esses cálculos.

3.3 Análise de massas de água

A identificação das massas de água contidas nos vórtices foi realizada com base em diagramas-TS, elaborados com os dados de temperatura potencial e salinidade absoluta, obtidos por perfilagens de CTD no cruzeiro FORSA. Em seguida, esses diagramas-TS serviram de base para uma análise quantitativa dessas massas de água através da utilização da Análise Otimizada com Parâmetros Múltiplos (OMP).

3.3.1 A análise OMP

A análise OMP (versão estendida) foi utilizada com o intuito de quantificar as massas de água presentes no interior dos vórtices das Agulhas amostrados pelo cruzeiro FORSA (V1, V3 e V5). Proposta por [Tomczak \[1981\]](#) e desenvolvido por [Mackas *et al.* \[1987\]](#) e [Tomczak & Large \[1989\]](#), a análise OMP é uma ferramenta que calcula o percentual de contribuição de distintas massas de água para uma determinada amostra de água com parâmetros conhecidos. A análise OMP versão estendida foi utilizada por se tratar de um estudo relacionado a contribuição de massas de água cuja origem é distante da região sob investigação. Nesse caso, as mudanças biogeoquímicas que ocorrem nas massas de água não podem ser desconsideradas e são incluídas na análise como parâmetros semi-conservativos. Nessa versão do método é adicionado um termo que representa a alteração biogeoquímica [[Karsten & Tomczack, 1998](#)] nos cálculos, permitindo contabilizar os processos biogeoquímicos que ocorreram na massa de água.

A análise OMP parte do princípio de que todas as massas de água podem ser descritas como a mistura entre um número finito de águas-tipo². A partir de

²Água-tipo: conjunto de valores de determinados parâmetros que representam as características de uma dada massa de água (Tomczak, 1981). Em um diagrama-TS são representadas por um ponto, ou um par TS.

observações das propriedades da massa de água (como temperatura, salinidade, oxigênio, nutrientes, vorticidade potencial e outros), a análise OMP busca determinar as contribuições de águas-tipo através da solução de um sistema linear de equações de mistura, assumindo-se então que todas as relações de propriedade entre as águas-tipo devem ser lineares. Na equação 4 é exemplificado um sistema de equações lineares da forma estendida da análise OMP (e logo abaixo a sua forma matricial).

$$Gx = d + R$$

$$\begin{bmatrix} T_1 + T_2 + T_3 + 0 \\ S_1 + S_2 + S_3 + 0 \\ OD_1 + OD_2 + OD_3 - r_{O/P}\Delta P \\ VP_1 + VP_2 + VP_3 + 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{obs} \\ S_{obs} \\ OD_{obs} \\ VP_{obs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_T \\ R_S \\ R_{OD} \\ R_{VP} \end{bmatrix}$$

Equação 4

Onde G é uma matriz contendo os valores dos parâmetros que definem as águas-tipos, d é um vetor que contém os dados (valores de parâmetros observados que descrevem uma amostra de água) e x é um vetor que contém as contribuições relativas, ou as taxas de mistura das águas-tipo para uma determinada amostra. O termo R dessa equação identifica o vetor de erro residual em cada ponto de aplicação do método. A forma matricial da equação 4 refere-se a uma análise contendo os parâmetros temperatura (T), salinidade (S), oxigênio dissolvido (OD) e vorticidade potencial (VP), conforme utilizado neste trabalho. A razão de Redfield ($r_{O/P}\Delta P$) representa as alterações biogeoquímicas em relação ao fosfato [Anderson & Sarimento, 1994; Redfield et al., 1963].

Os parâmetros temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido foram obtidos a partir de medições *in situ*. Os dados observados no interior dos vórtices V1, V3 e V5 são oriundos das perfilagens de CTD do cruzeiro FORSA. Já os parâmetros necessários para a definição dos índices das águas-tipo, foram adquiridos no WOA13 [Locarnini et al.; Zweng et al.; Garcia et al. 2013]. Valores de vorticidade potencial também foram calculados com estes dados a partir de:

$$VP = \frac{f}{\rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial z}$$

Equação 5

Onde VP ($s^{-1}m^{-1}$) é a vorticidade potencial, f (s^{-1}) é a vorticidade planetária, ρ_0 (kg/m^3) é a densidade média da água do mar e $\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial z}$ (kg/m^4) é o gradiente vertical da densidade potencial.

Na versão estendida da análise OMP, o grau da matriz, em comparação com a análise clássica de OMP, é reduzido em um, porque uma nova incógnita (ΔP) é adicionada às equações para solucionar as mudanças biogeoquímicas. Portanto, o número de águas-tipo solucionadas será sempre uma unidade a menos que o número de parâmetros disponíveis. Neste estudo foram utilizados quatro parâmetros: temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e vorticidade potencial. Deste modo, um limite de três águas-tipo poderá ser considerado em uma situação de mistura [Karstensen e Tomczak, 1999].

A equação 4 é resolvida minimizando o valor de R pelo método de mínimos-quadrados, visto que quanto mais baixo este valor, melhor é a qualidade da análise. Segundo recomendações de Tomczak e Large [1989], os resíduos de massa precisam ser menores do que 10% para que a análise seja válida. A solução do método estabelece duas restrições: (i) a soma das contribuições de todas as águas-tipo não pode exceder 100% e (ii) a contribuição de águas-tipo não pode ser negativa, visto que esse resultado não possui significado físico.

A análise OMP pressupõe que a informação obtida de cada parâmetro é de qualidade idêntica. Em uma aplicação oceanográfica isso raramente é o caso [Tomczak, 1981], já que dependem da variabilidade ambiental e da acurácia das medições. Com o intuito de minimizar os erros associados, a matriz G é ponderada por uma matriz de peso diagonal W que posteriormente é incorporada ao modelo. Assim, a equação linear se torna:

$$(Gx - d)W = r$$

Equação 6

Existem vários métodos para a determinação do peso dos parâmetros [e.g. Thompson & Edwards, 1981; Mackas *et al.*, 1987; Tomczak & Large, 1989]. A metodologia mais comumente utilizada é descrita por Tomczak & Large [1989], cujos pesos são obtidos pela equação 7:

$$W_i = \frac{\sigma_i^2}{\delta_{i\max}}$$

Equação 7

Onde i refere-se a cada um dos parâmetros, σ_i é o desvio-padrão de cada parâmetro considerando-se a matriz G ; σ_i^2 é a variância e $\delta_{i\ max}$ é a variância máxima associada com o mesmo parâmetro na região de formação da massa de água.

No presente trabalho optou-se por utilizar os pesos obtidos por [Souza et al. \[2017\]](#) que, seguindo a metodologia de [Tomczak & Large \[1989\]](#), utilizaram os mesmos parâmetros (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e conservação da vorticidade potencial) que os aqui utilizados, também para o oceano Atlântico Sul.

Cabe destacar que as propriedades termohalinas dos oceanos Índico e Atlântico, mais especificamente na camada central, são muito similares [[Gordon, 1985](#); [Gordon & Haxby, 1990](#); [Olson et al., 1992](#)], dificultando fazer uma diferenciação entre as massas de água desses dois oceanos. Visando contornar essa dificuldade, no presente trabalho, foi atribuído ao oxigênio dissolvido o mesmo peso W da temperatura e salinidade. Essa escolha se justifica pelos baixos valores da concentração de oxigênio dissolvido presentes nas massas de água no oceano Índico [e.g. [Chapman et al., 1987](#); [You et al., 2003](#); [Lutjeharms, 2006](#)] favorecendo uma melhor diferenciação das águas-tipo desses dois oceanos.

3.3.2 A definição dos índices das águas-tipo

A identificação das massas de água no interior dos vórtices foi realizada a partir de diagramas-TS utilizando-se os dados obtidos no cruzeiro FORSA juntamente com dados do WOA13, para comparação com as massas de água presentes em cinco áreas nos oceanos, conforme apresentado na figura 13.

No oceano Índico foi escolhida a área 1, no canal de Moçambique, por onde flui a Corrente das Agulhas, que dá origem aos vórtices das Agulhas.

A área 2 foi selecionada por se tratar da zona de Retroflexão das Agulhas, área de formação dos vórtices das Agulhas, onde águas subantárticas são incorporadas aos vórtices quando estes são emitidos do núcleo da Corrente [e.g. [Arhan et al., 1999](#); [Lutjeharms & van Ballegooyen, 1988](#); [Guerra, 2011](#)]. Essa região é extremamente dinâmica, com alta atividade de mesoescala, além de ser uma zona de transição, próxima a frente subtropical, que conecta os três oceanos: Índico, Atlântico e Austral, recebendo a contribuição de suas distintas

massas de água. A presença de termostatas³ de 13°C em vórtices das Agulhas sugere que estas sejam águas subantárticas que são incorporadas aos vórtices na Retroflexão das agulhas, quando são emitidos do núcleo da Corrente [Arhan *et al.*, 1999; Lutjeharms & van Ballegooyen, 1988; Guerra, 2011]. Essas características da região da Retroflexão das Agulhas resultam na contribuição relativamente baixa de águas superficiais quentes e salinas da Corrente de Agulhas para o volume dos 1500 m superiores da região da Retroflexão (Lutjeharms, 2006).

As áreas 3, 4 e 5 correspondem as áreas onde foram amostrados os vórtices V1, V3 e V5, respectivamente, e foram selecionadas para caracterização das massas de água do oceano Atlântico Sul.

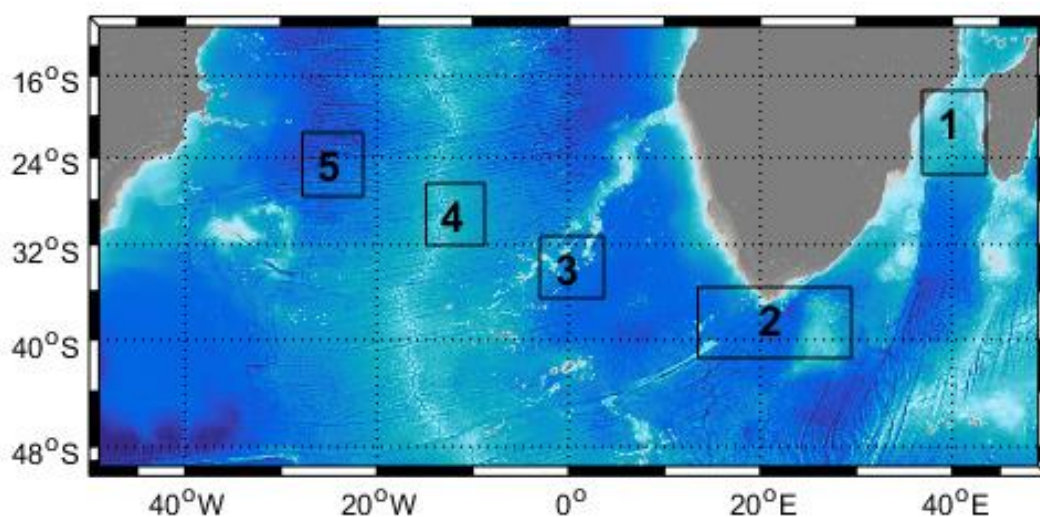


Figura 13: Áreas-fonte utilizadas para a definição dos índices das águas-tipo. 1) Trecho norte da Corrente das Agulhas; 2) Retroflexão das Agulhas; 3) oceano Atlântico Sul, na área de amostragem do V1; 4) oceano Atlântico Sul, na área de amostragem do V3 e 5) oceano Atlântico Sul, na área de amostragem do V5. Cores de fundo representam a batimetria.

Para cada área-fonte (Figura 13) foram definidos índices para caracterizar as massas de água das camadas de superfície, central, intermediária e profunda. O procedimento de determinação dos índices leva em conta as características de cada massa de água identificada. Na camada superficial, as águas-tipo são definidas pelo máximo de temperatura. No caso das águas centrais, a água-tipo² foi definida pelo melhor ajuste linear da relação entre duas propriedades através

³ Termostata: camada da coluna d'água que apresenta um mínimo no gradiente vertical de temperatura e, assim como as halostatas (mínimo gradiente vertical de salinidade) e picnostatas (mínimo gradiente vertical de densidade), são características da presença de águas modais (McCartney 1982).

da termoclina [Karstensen & Tomczak, 1999]. As águas centrais são definidas por duas águas-tipo, sendo uma delas referente ao limite superior (máximo de temperatura e salinidade) e uma referente ao limite inferior (delimitada pela água intermediária) de uma relação linear entre temperatura e salinidade. Nesse trabalho, usou-se como índice das águas centrais o limite superior. Já para a AAIW, a definição de água-tipo é obtida identificando-se o mínimo de salinidade e determinando-se todos os outros parâmetros para essa salinidade [Karstensen & Tomczak, 1999]. A RSW é caracterizada por um máximo de salinidade na profundidade da AAIW, enquanto as águas profundas Água Profunda Circumpolar Superior (*Upper Circumpolar Deep Water* – UCDW) e NADW são marcadas por um mínimo de temperatura. A tabela 2 resume os critérios de definição de cada água-tipo e os acrônimos das águas-tipo utilizadas neste trabalho.

Definidas as águas-tipo, as combinações dessas massas de água presentes nos vórtices foram testadas e sendo destacados os resultados do OMP cujo resíduo esteve abaixo de 5% e cuja distribuição das massas de água mostrou-se coerente com o esperado para a coluna d'água (i.e. as contribuições de massas de água devem respeitar a seguinte ordem da superfície em direção ao fundo: água subtropical, água central, água intermediária e, por último, uma água profunda).

Tabela 2: Critérios de definição dos índices das águas-tipo e acrônimo das massas de águas para cada área fonte. ac = Corrente das Agulhas; ar = Retroflexão das Agulhas; SW = Água Superficial; CW = Água Central

Massa de Água	Característica	Área-Fonte				
		Corrente das Agulhas	Retroflexão das Agulhas	Oceano Atlântico Sul		
				V1	V3	V5
Água de Superfície	máximo de temperatura	acSW	arSW	v1SW	v3SW	v5SW
Água Central	relação linear de TS	acCW	arCW	v1CW	v3CW	v5CW
Água Intermediária	mínimo de salinidade	AAIW	AAIW	AAIW	AAIW	AAIW
	máximo de salinidade no nível da AAIW	RSW	-	-	-	-
Água Profunda	mínimo de temperatura	UCDW	UCDW	NADW	NADW	NADW

Capítulo IV: Resultados

A seção de resultados foi dividida conforme os objetivos específicos, isto é, em: i) caracterização dos vórtices e ii) quantificação de massas de água no interior dos vórtices.

4.1 Caracterização dos vórtices

A identificação da posição dos vórtices para amostragem do cruzeiro FORSA foi realizada com base mapas de SLA coletadas no período entre 27 de junho e 15 de julho de 2015. O mapa de SLA dos três vórtices (V1, V3 e V5) mostra feições anticiclônicas aproximadamente circulares, bem definidas, com valores positivos de SLA no centro de cada feição diminuindo em direção as bordas (Figura 14). A amplitude do vórtice, assim como as velocidades geostróficas, são marcadamente mais intensas nos vórtices mais jovens, com sinal mais forte no V1 (0,40 m) e diminuindo no V3 (0,29 m) e já bem fraco no V5 (0,17 m), evidenciando o decaimento da amplitude dos vórtices em função da sua idade.

O vórtice V1 foi amostrado quando interagiu com um outro vórtice anticiclônico localizado a sudoeste da feição (Figura 14). O padrão de menores velocidades na borda sudoeste deste vórtice (o V1) mostra a interação desse vórtice com outra feição anticiclônica onde as velocidades opostas ocasionam o cisalhamento da velocidade na região de contato dos dois.

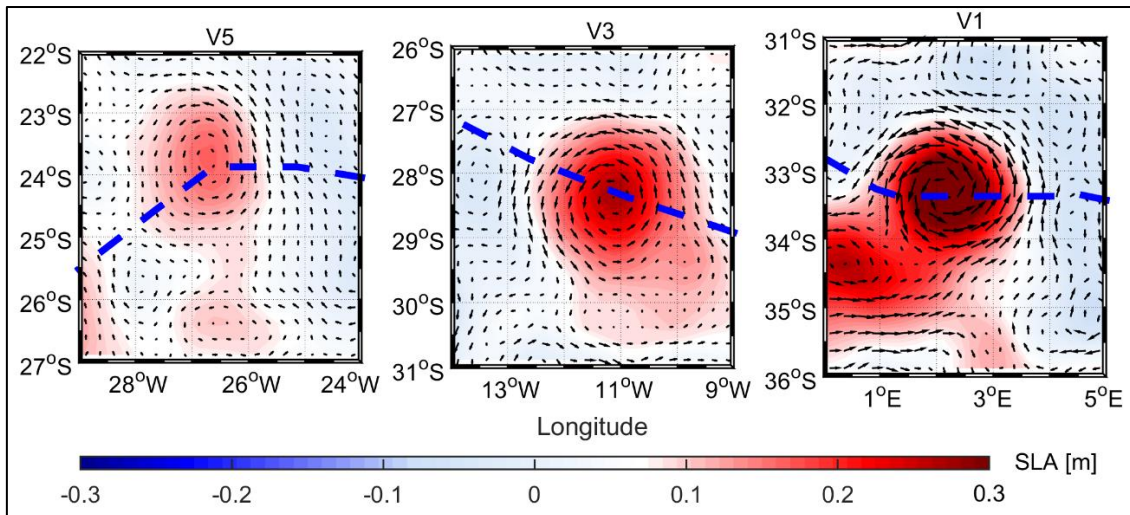


Figura 14: Mapas de SLA dos vórtices V1 (datado de 01 de julho de 2015), V3 (datado de 05 de julho de 2015) e V5 (datado de 10 de julho de 2015) em escala de cores. Vetores indicam direção e intensidade da velocidade geostrófica na superfície do oceano. Linha azul pontilhada indica a trajetória do NPqHo. Vital de Oliveira (H-39) durante o cruzeiro FORSA.

Dos mapas de velocidade geostrófica, foram extraídos os valores de velocidades referentes à seção por onde passou o cruzeiro FORSA, gerando uma seção de velocidade tangencial ao longo do diâmetro dos vórtices. Os três vórtices mostraram um padrão de velocidades coerente com um vórtice de *Rankine* [Aboelkassem *et al.*, 2005]. Isto é, as velocidades tangenciais são mínimas no centro da feição, aumentando em direção às bordas, onde o vórtice funciona aproximadamente como um corpo rígido, e de onde começam a diminuir com o aumento do raio da feição devido ao efeito de fricção com seu entorno (Figura 15). Aqui também se observa que o V1 é muito mais intenso, por ser um vórtice mais recente que os demais, com maiores valores de velocidade tangencial (45 cm/s) em relação aos vórtices V3 (26 cm/s) e V5 (25 cm/s).

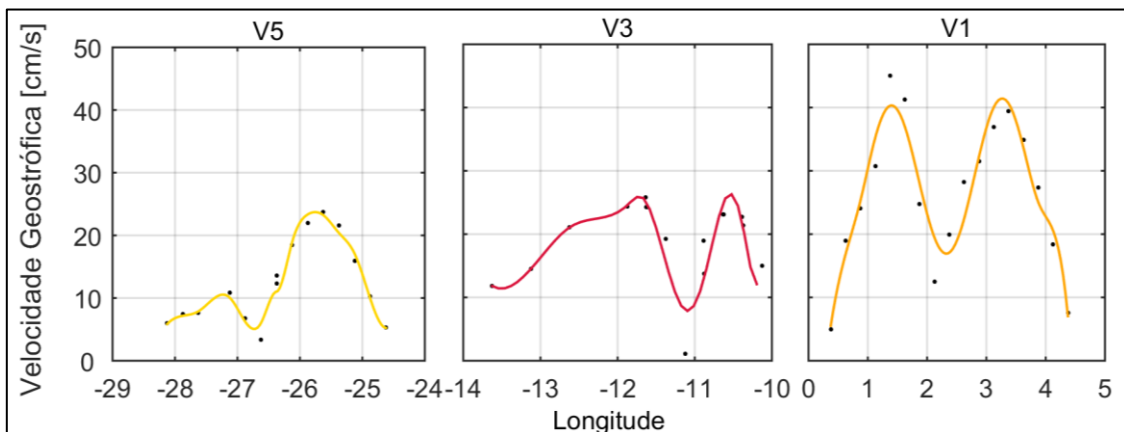


Figura 15: Dados de velocidade geostrófica obtida pela altimetria (pontos pretos) e respectivas interpolações (linhas coloridas) ao longo do transecto de amostragem do cruzeiro FORSA.

Seções verticais de temperatura obtidas por medições de XBT foram utilizadas para identificar a estrutura vertical dos vórtices V1, V3 e V5 durante o cruzeiro FORSA. O afundamento das isotermas no interior dos vórtices revela que a estrutura anticiclônica dessas feições é mais intensa quanto mais jovem o vórtice (Figura 16). Isto se observa, por exemplo, pela profundidade de uma mesma isoterma dentro o fora do vórtice. A isoterma de 16°C encontra-se em 345 (128) m de profundidade dentro (fora) a do vórtice no V1. No V3, a mesma isoterma está a 307 (192) m de profundidade no centro (fora) do vórtice. No vórtice V5, esta isoterma encontra-se em 285 (222) m de profundidade no interior (fora) do vórtice. Resumindo, isso consiste num deslocamento da isoterma para baixo equivalente a 217, 115 e 63 m, respectivo aos vórtices V1, V3 e V5.

É evidente a presença de uma termostata na camada subsuperficial dos três vórtices com temperaturas em torno de 16°C. Ressalta-se aqui que essa termostata está presente apenas no interior dos vórtices. Essa camada homogênea em temperatura apresentou, no núcleo dos vórtices, espessuras de três (V1 e V5) a cinco (V3) vezes a espessura da mesma camada fora do vórtice. Na Tabela 3 são apresentados os limites de temperatura e profundidade dessa termostata para os três vórtices e a respectiva espessura dessa camada fora dos vórtices.

Tabela 3: Profundidade e temperatura das termostatas

	Temperatura [°C]	Profundidade [m]	
		Fora do vórtice	Dentro do vórtice
V1	15,6 - 16,3	104 - 137	265 – 385
V3	16,0 - 17,0	141 - 177	105 – 288
V5	15,7 - 16,5	256 - 292	199 – 311

A distribuição de salinidade (figura 17) no interior dos vórtices apresenta maiores valores na superfície, diminuindo em direção as estações mais profundas, até cerca de 1000 m de profundidade, a partir de onde a salinidade volta a aumentar. A camada superficial é mais salina sobre o V5 que sobre o V3 e o V1, que apresenta a menor salinidade superficial. É válido ressaltar que na faixa de profundidade da termostata de ~16°C identificou-se também a presença de halostatas nos três vórtices. O V1 apresentou uma halostata com salinidades de

35,52 a 35,86 entre 2 e 415 m de profundidade. O vórtice V3 apresentou uma halostata com salinidade de 35,88 - 35,50 entre as profundidades de 95 a 379 m. No vórtice V5, a halostata de 36,03 a 35,63 foi observada entre 148 e 339 m de profundidade.

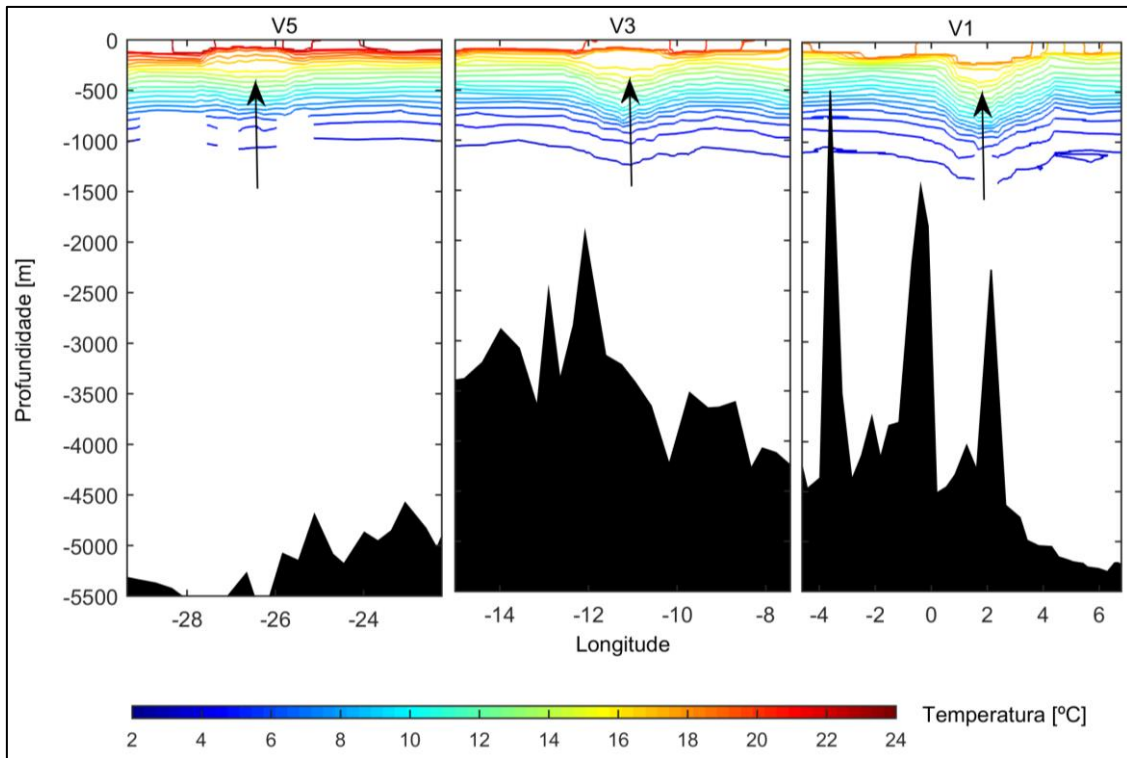


Figura 16: Seção vertical de temperatura (°C) dos vórtices V1 (direita), V3 (centro) e V5 (esquerda) obtida através de medições de XBT durante o cruzeiro FORSA. Setas pretas indicam a presença de termostatas. Em preto são apresentadas as feições batimétricas sob os vórtices obtidas com os dados ETOPO1.

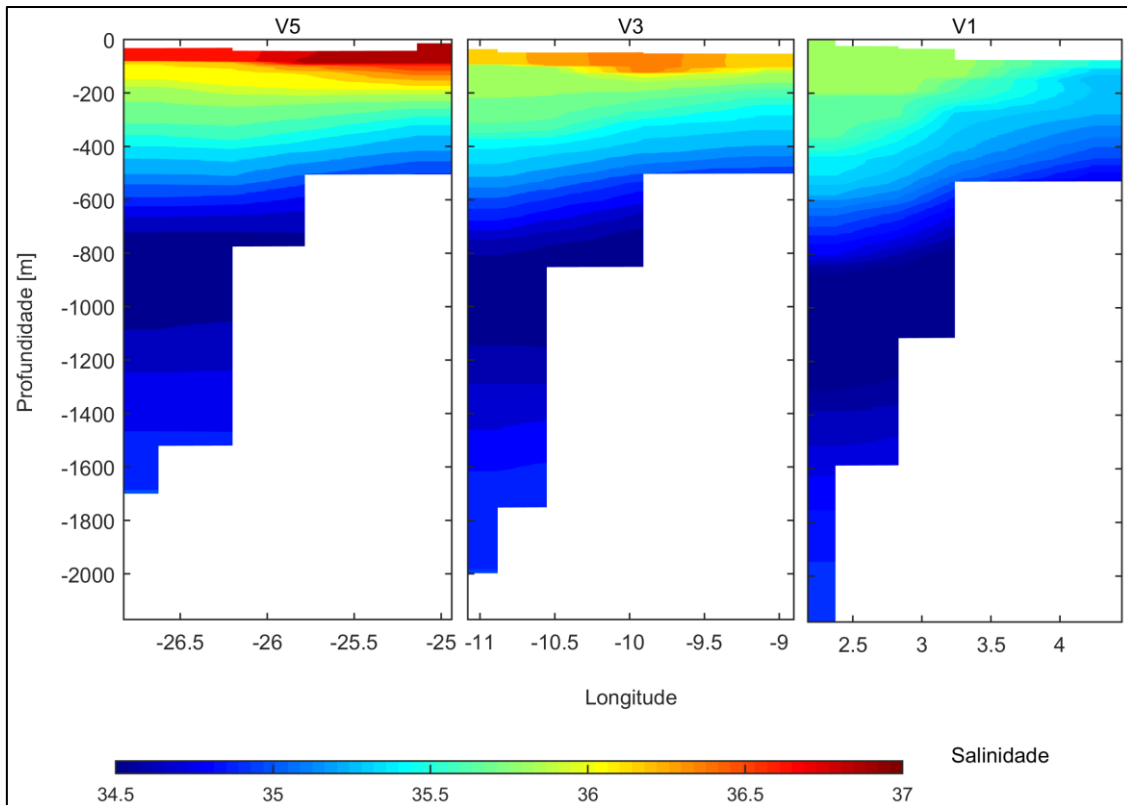


Figura 17: Seções de salinidade referentes ao hemisfério leste dos vórtices V1 (esquerda), V3 (centro) e V5 (direita) obtidas através de medições de CTD durante o cruzeiro FORSA.

A concentração de oxigênio dissolvido no V1 (Figura 18) apresentou padrões não regulares na camada superficial. Nota-se que as concentrações de oxigênio dissolvido no centro do vórtice foram diferentes das observadas nos perfis mais externos. No centro do vórtice V1, em superfície, as concentrações de oxigênio dissolvido são altas ($\sim 223 \mu\text{mol/kg}$) até a base da camada de mistura (calculada por Carvalho (comunicação pessoal⁴) na profundidade de 200 m. No perfil externo ao vórtice, as concentrações são ainda maiores, onde alcançam $237 \mu\text{mol/kg}$ na profundidade de 90 m. Abaixo da camada de mistura, uma distribuição subsuperficial de oxigênio dissolvido com baixas concentrações ($232 \mu\text{mol/kg}$) é observada no centro do vórtice. Sob esse mínimo, há uma distribuição com concentrações de oxigênio dissolvido similares às da camada de mistura, a partir de onde as concentrações diminuem em direção ao fundo, alcançando um

⁴ Comunicação pessoal da doutoranda Andréa da Consolação Oliveira Carvalho, do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física Química e Geológica (PPGOFQG) da FURG, Rio Grande (RS) para Ana Carolina Trindade de Freitas, mestranda do PPGOFQG, em 11/11/2017. Resultados referentes ao artigo, também realizado com dados do cruzeiro FORSA, em fase de elaboração: Carvalho ACO, Kerr R, Mendes CR, Tavano VM, Azevedo ZLL, Silva FG. Phytoplankton pigment as biomarkers of process associated with mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean.

mínimo em 800 m de profundidade (200 $\mu\text{mol/kg}$). Na porção central, onde as temperaturas variam de 9-14°C (entre 430 e 760 m), a contribuição de oxigênio dissolvido esteve entre 200 e 205 $\mu\text{mol/kg}$. Um núcleo com altas concentrações de oxigênio dissolvido (215 $\mu\text{mol/kg}$) é observado em 970m. O mínimo de salinidade, que marca a presença da AAIW, foi identificado em 1200 m de profundidade, onde as concentrações de oxigênio dissolvido são consideradas baixas (197 $\mu\text{mol/kg}$). Mais abaixo, em 1500 m de profundidade, observam-se concentrações muito baixas de oxigênio dissolvido (173 $\mu\text{mol/kg}$). A partir desse nível, as concentrações de oxigênio dissolvido aumentam até a máxima profundidade de amostragem (2170 m) onde alcançam 202 $\mu\text{mol/kg}$.

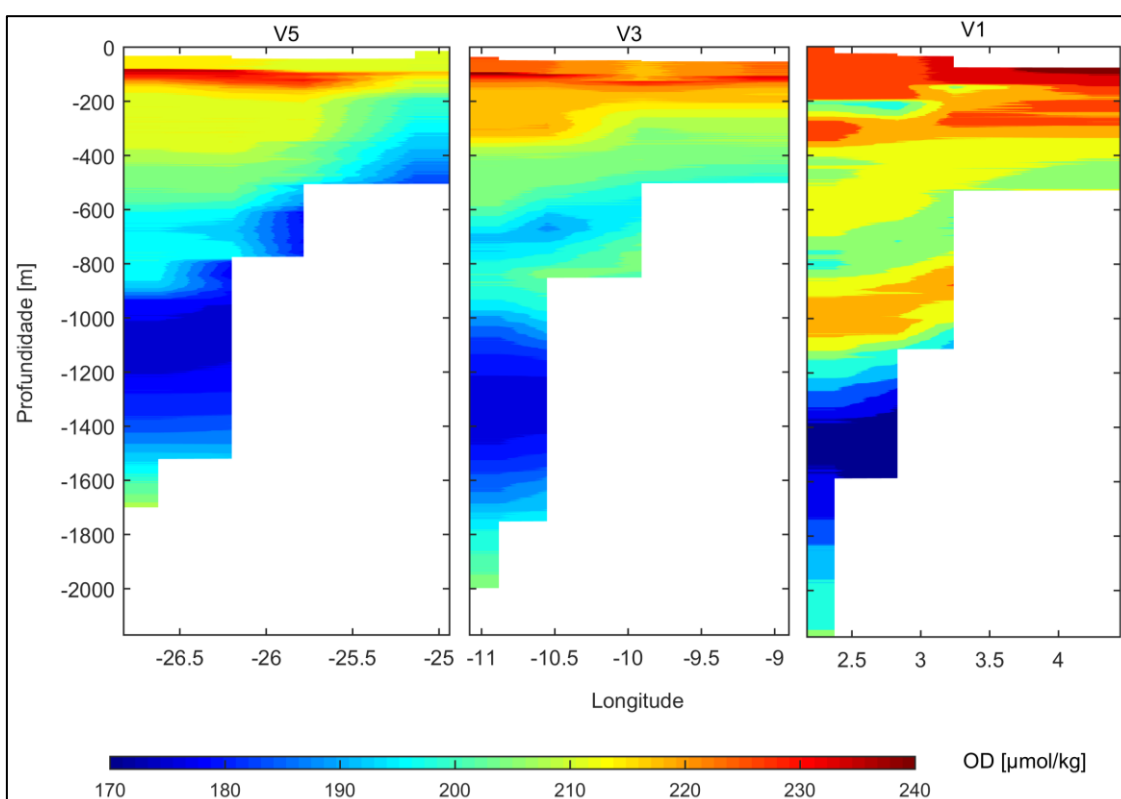


Figura 18: Seções de oxigênio dissolvido referentes ao hemisfério leste dos vórtices V1 (esquerda), V3 (centro) e V5 (direita) obtidas através de medições de CTD durante o cruzeiro FORSA.

Em superfície, o vórtice V3 (Figura 18) apresentou concentrações de oxigênio dissolvido de 228 $\mu\text{mol/kg}$. Na profundidade de 100 m destacam-se elevadas concentrações de 240 $\mu\text{mol/kg}$ no centro do vórtice e um pouco menores, de 235 $\mu\text{mol/kg}$, na borda do vórtice. Este máximo subsuperficial é coincidente com o pico de fluorescência deste vórtice observado por Carvalho (comunicação pessoal), sendo justificado por uma alta atividade fotossintética fitoplanctônica

nessa camada. Abaixo disso, a concentração se mantém aproximadamente constante em 220 $\mu\text{mol/kg}$ até a profundidade de 325 m. A partir daí a concentração diminui, alcançando um mínimo em 720 m de profundidade com 193 $\mu\text{mol/kg}$ de oxigênio dissolvido. Abaixo deste, a concentração aumenta para 202 $\mu\text{mol/kg}$ em 880 m de profundidade. No núcleo da AAIW, identificado pelo mínimo de salinidade (34,4), observado em 1027 m, a concentração de oxigênio dissolvido foi de 189 $\mu\text{mol/kg}$. Na camada entre 1248 e 1405 m de profundidade, a concentração de oxigênio dissolvido mantém-se aproximadamente constante em 176 $\mu\text{mol/kg}$, aumentando em direção ao fundo e alcançando 205 $\mu\text{mol/kg}$ em 1980 m de profundidade.

Em superfície, o vórtice V5 (Figura 18) apresentou concentrações de oxigênio dissolvido de 216 $\mu\text{mol/kg}$. Assim como no V3, um máximo subsuperficial com concentrações máximas de 238 $\mu\text{mol/kg}$ foi observado na camada entre 80 e 120 m de profundidade, também associado ao pico de fluorescência desse vórtice (Carvalho, em comunicação pessoal). Sob esse máximo, as concentrações de oxigênio dissolvido caem até a profundidade de 1046 m onde alcançam 175 $\mu\text{mol/kg}$. Essa concentração se mantém até 1144 m, a partir de onde volta a aumentar em direção ao fundo. Na máxima profundidade amostrada (1700 m) a concentração de oxigênio é de 209 $\mu\text{mol/kg}$. Entre 387 e 625 m de profundidade, são observadas as temperaturas de 14 a 9°C, onde as concentrações de oxigênio dissolvido estiveram entre 198 e 210 $\mu\text{mol/kg}$.

Para o cálculo de volume e estimativas de transportes de sal e calor dos vórtices foi necessário definir o limite inferior de cada feição. O gráfico da figura 19 apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear entre a SLA e a profundidade das diferentes isotermas testadas, onde as correlações mais fortes obtidas foram com a isoterma de 8°C para os vórtices V1 ($R^2 = 0,857$) e V5 ($R^2 = 0,964$) e a isoterma de 5°C para o vórtice V3 ($R^2 = 0,800$).

Definidos os limites inferiores dos vórtices, foram calculados o volume e os transportes de sal e calor acima das isotermas de 5°C para o vórtice V3 e de 8°C para os vórtices V1 e V5. Também foram calculados os transportes de propriedades e o volume utilizando-se a isoterma de 10°C como limite inferior, para permitir comparações com a literatura. Na tabela 4 são apresentados os

resultados obtidos para o raio, volume e transportes de sal e de calor para os três vórtices.

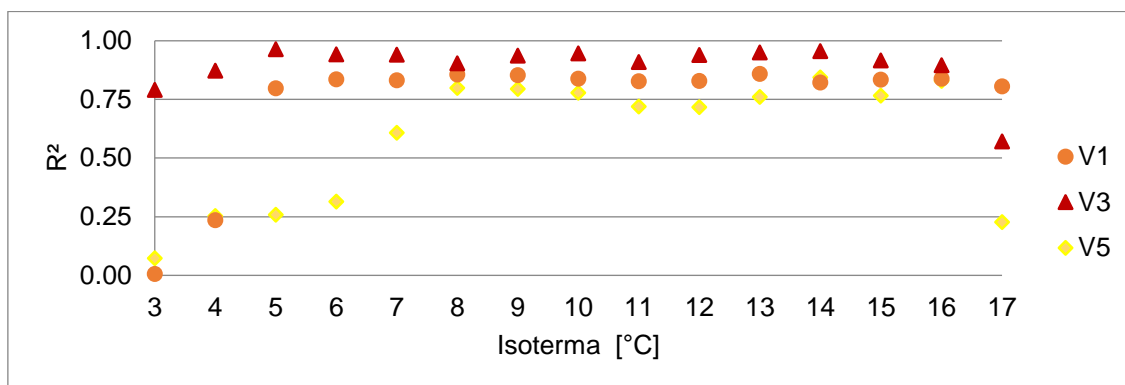


Figura 19: Valores do coeficiente de determinação (R^2) das regressões lineares entre SLA e as diferentes isotermas testadas para a determinação do limite inferior dos vórtices V1, V3 e V5.

Tabela 4: Estimativas de diâmetro, volume e transporte de calor referentes aos dados obtidos por XBT e CTD

	Diâmetro (km)		Volume (10^{12} m^3)			Transporte de Calor (PW)			Transporte de sal (10^6 kg/s)
V1	444 ^x	416 ^c	91 ^{#, x}	109 ^{*, x}	85 ^{#, c}	0,052 ^{#, x}	0,059 ^{*, x}	0,023 ^{#, c}	1,50 ^{#, c}
V3	350 ^x	394 ^c	53 ^{#, x}	83 ^{*, x}	64 ^{#, c}	0,020 ^{#, x}	0,030 ^{*, x}	0,013 ^{#, c}	1,12 ^{#, c}
V5	244 ^x	340 ^c	26 ^{#, x}	30 ^{*, x}	48 ^{#, c}	0,004 ^{#, x}	0,006 ^{*, x}	0,003 ^{#, c}	0,34 ^{#, c}

* Estimativas utilizando como limite inferior do vórtice a isoterma de 5°C para o vórtice V3 e a de 8°C para os vórtices V1 e V5.

Estimativas utilizando como limite inferior do vórtice a isoterma 10°C.

^c Estimativas obtidas com os dados de CTD.

^x Estimativas obtidas com dados de XBT.

Os volumes dos vórtices obtidos pela isoterma de 10°C foram equivalentes a 83%, 64% e 87%, respectivos aos vórtices V1, V3 e V5, dos volumes calculados utilizando a isoterma de 8°C (V1 e V5) ou a de 5°C (V3). Padrão semelhante foi observado nos transportes de calor: V1 (88%), V3 (68%), V5 (58%).

Os cálculos de anomalias de sal resultaram em anomalias máximas de sal de 0,61; 0,61 e 0,58, respectivas aos vórtices V1, V3 e V5 (Figura 20). Com os dados de XBTs, as anomalias de temperatura alcançaram valores de até 4,51°C; 4,31°C e 2,75°C. Esses resultados são coerentes com os valores anômalos de +4,1°C a + 5°C e de +0,6 a +0,8 de salinidade observados em outros vórtices das Agulhas [Olson & Evans, 1986; Guerra, 2011; van Ballegooyen *et al.*, 1994; van Aken *et al.*, 2003].

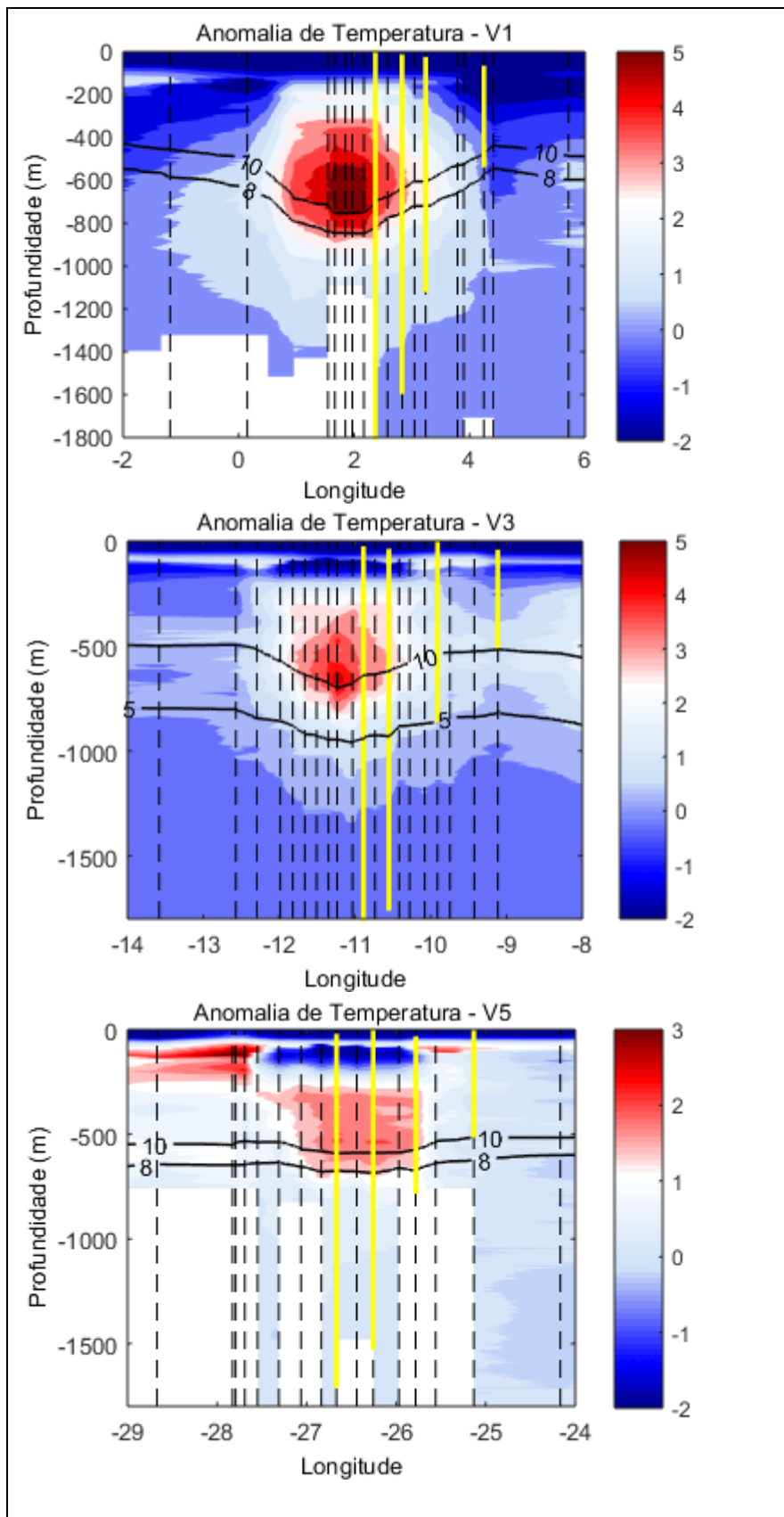


Figura 20: Anomalias de temperatura (T') nos vórtices V1 (cima), V3 (meio) e V5 (baixo). Linhas pretas indicam a posição da isoterma de 10°C e de 8°C (para V1 e V5) e de 5°C (para V3). Linhas pretas pontilhadas indicam a localização das estações de XBT e linhas amarelas indicam as estações de CTD do cruzeiro FORSA.

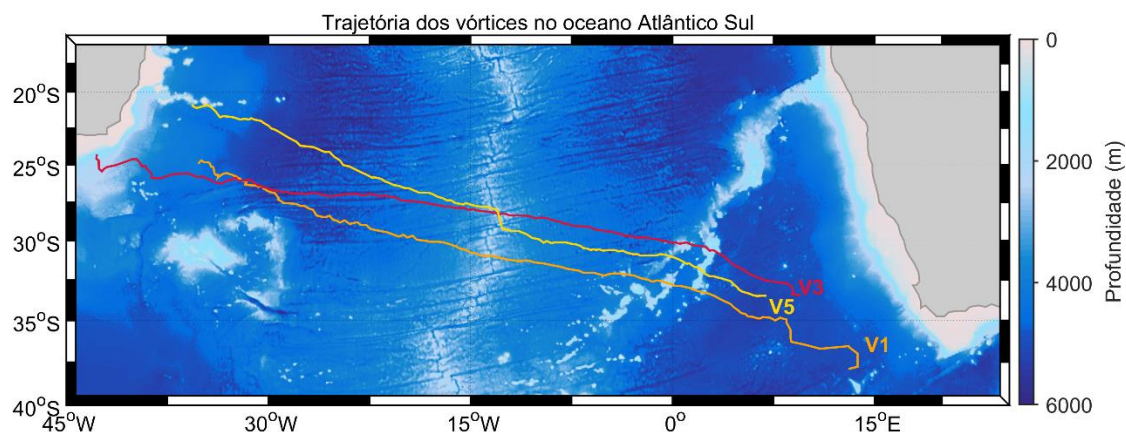


Figura 21: Trajetórias dos vórtices V1 (laranja), V3 (vermelha) e V5 (amarela) sobrepostas a um mapa batimétrico. Os acrônimos indicam feições batimétricas, onde: WR - Cordilheira Walvis, CMO - Cordilheira Meso-Oceânica e CVT - Cadeia-Vitória-Trindade.

A partir da recomposição da trajetória dos vórtices foram calculadas as suas velocidades médias de translação (Figura 22), conforme os parâmetros apresentados na Tabela 5. Observa-se que no instante em que ocorre a liberação dos três vórtices na zona de Retroflexão das Agulhas, estes possuem uma alta velocidade de translação (V1: 22 km/d; V3: 16 km/d e V5: 16 km/d) e, posteriormente, passam a se deslocar com velocidades que oscilam em torno de 5 km/dia (Figura 22). Não foram observadas diferenças na velocidade média de translação de cada vórtice antes e após a Cordilheira Walvis, com exceção da região de Retroflexão das Agulhas quando os vórtices são liberados (Figura 22). Nota-se também que no trecho final de suas trajetórias, a partir de 30°W, todos os três vórtices (V1, V3 e V5) tiveram um aumento nos valores de sua velocidade de translação.

Tabela 5: Características das trajetórias dos vórtices V1, V3 e V5

Vórtice	V5	V3	V1
Data de Início da Trajetória	23/07/2013	26/06/2014	19/11/2014
Data de Final da Trajetória	16/01/2016	28/04/2017	11/10/2017
Tempo (d)	907	1037	1057
Deslocamento Total (km)	4.682	5.658	5.485
Velocidade Média Total (km/d)	5,2	5,5	5,2

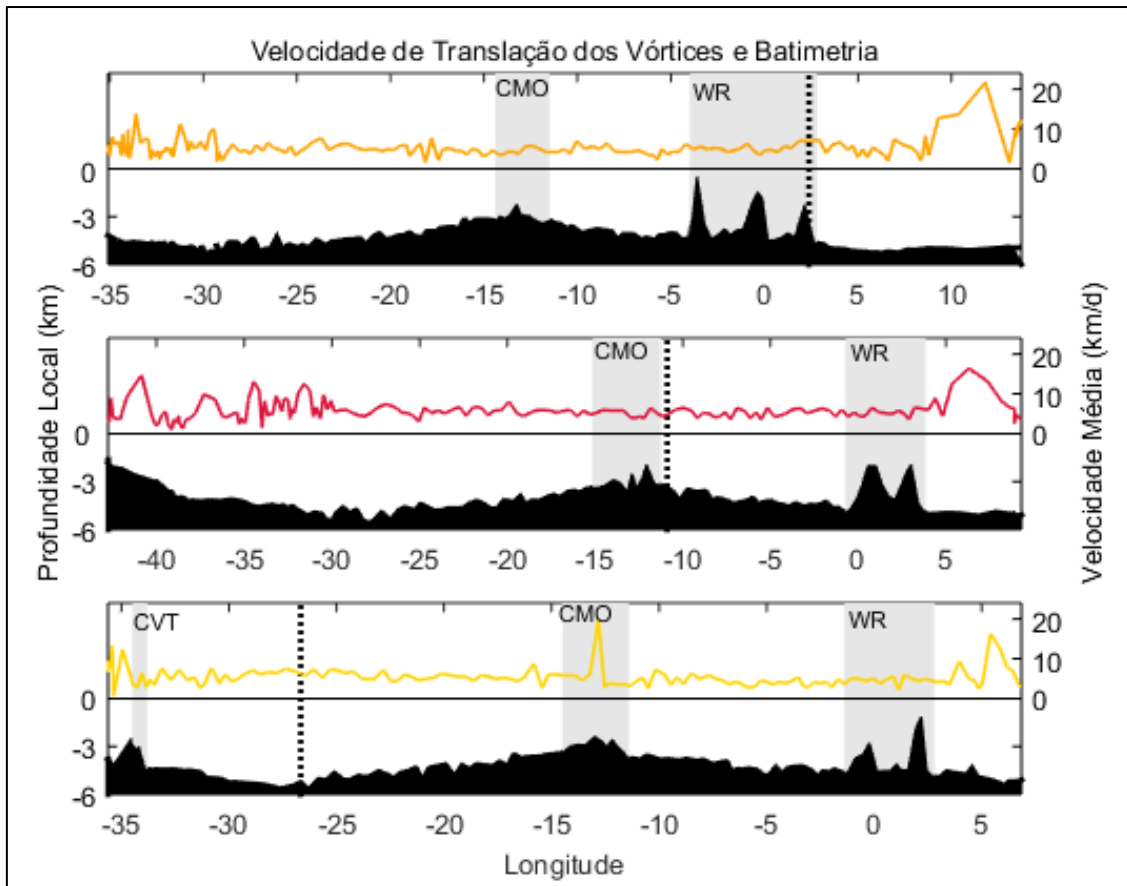


Figura 22: Velocidade média de translação dos vórtices V1 (em cima), V3 (meio) e V5 (em baixo) ao longo de suas trajetórias sobrepondo o contorno batimétrico (preto). Faixas cinza destacam as áreas de influência das feições batimétricas: Cordilheira Walvis (WR), Cordilheira Meso-Oceânica (CMO) e Cadeia Vitória-Trindade (CVT). Linhas tracejadas indicam a localização da amostragem dos vórtices pelo cruzeiro FORSA.

É curioso notar que, embora não tenha sido identificado comportamento que indique que o vórtice V5 estivesse transladando sob efeito beta-topográfico⁵ nas imediações da Cordilheira Walvis (2190 m de profundidade), este vórtice tem sua trajetória fortemente desviada para norte ao passar sobre a Cordilheira Meso-Oceânica (CMO), que alcança 2370 m de profundidade em aproximadamente 27°S/13°W, acompanhando o contorno batimétrico. Simultaneamente, neste trecho de sua trajetória, o vórtice V5 apresentou um pico de velocidade média de translação (20 km/d), em 12,8°E (Figura 22).

⁵ Efeito beta-topográfico: efeito batimétrico, similar ao efeito beta-planetário (causado pela variação planetária do parâmetro de Coriolis com a latitude), responsável por alterações na direção e velocidade de translação de vórtices isolados, atua de modo que no HS (HN) um vórtice sob esse efeito tende a transladar mantendo a região mais rasa à sua esquerda (direta) [Smith & O'Brien, 1983].

Esse comportamento foi investigado através de mapas diários de SLA do V5, apresentadas na figura 23. Na assinatura de SLA identifica-se que o V5 translada para noroeste acompanhado de outro vórtice anticiclônico (Figura 23, 10/08/2014 e 30/08/2014). Ao longo desse trecho, os dois vórtices se aproximam e o outro vórtice das Agulhas inicia um processo de *splitting* (Figura 23, 23/09/2014). Na sequência, o *splitting* desse outro vórtice é concluído enquanto que se inicia um processo de fusão (*merging*⁶) do V5 com um desses vórtices recém-formado (Figura 23, 29/09/2014), que resulta na formação de um único vórtice anticiclônico de maior diâmetro que o V5 (Figura 23, 03/10/2014). Para confirmar esse aumento de tamanho, o diâmetro do V5 antes e depois desse *merging* medido pela isolinha de SLA de 10 cm: no dia 14 de agosto de 2014 era de 136 km e no dia 15 de novembro de 2015 era de 190 km. Sobre a CMO, esse grande vórtice passa a se deslocar acompanhando o contorno batimétrico em direção ao norte (Figura 23, 11 e 21/10/2014), durante aproximadamente 20 dias. Na sequência, esse grande vórtice sofre um *splitting* novamente, deixando para trás um vórtice bem menor, e continua a sua trajetória para noroeste (Figura 23, 29/11/2014).

⁶ *Merge*: do inglês, fundir, misturar. Termo adotado na bibliografia para referir-se a fusão de dois ou mais vórtices [e.g. Pavia e Cushman-Roisin, 1990].

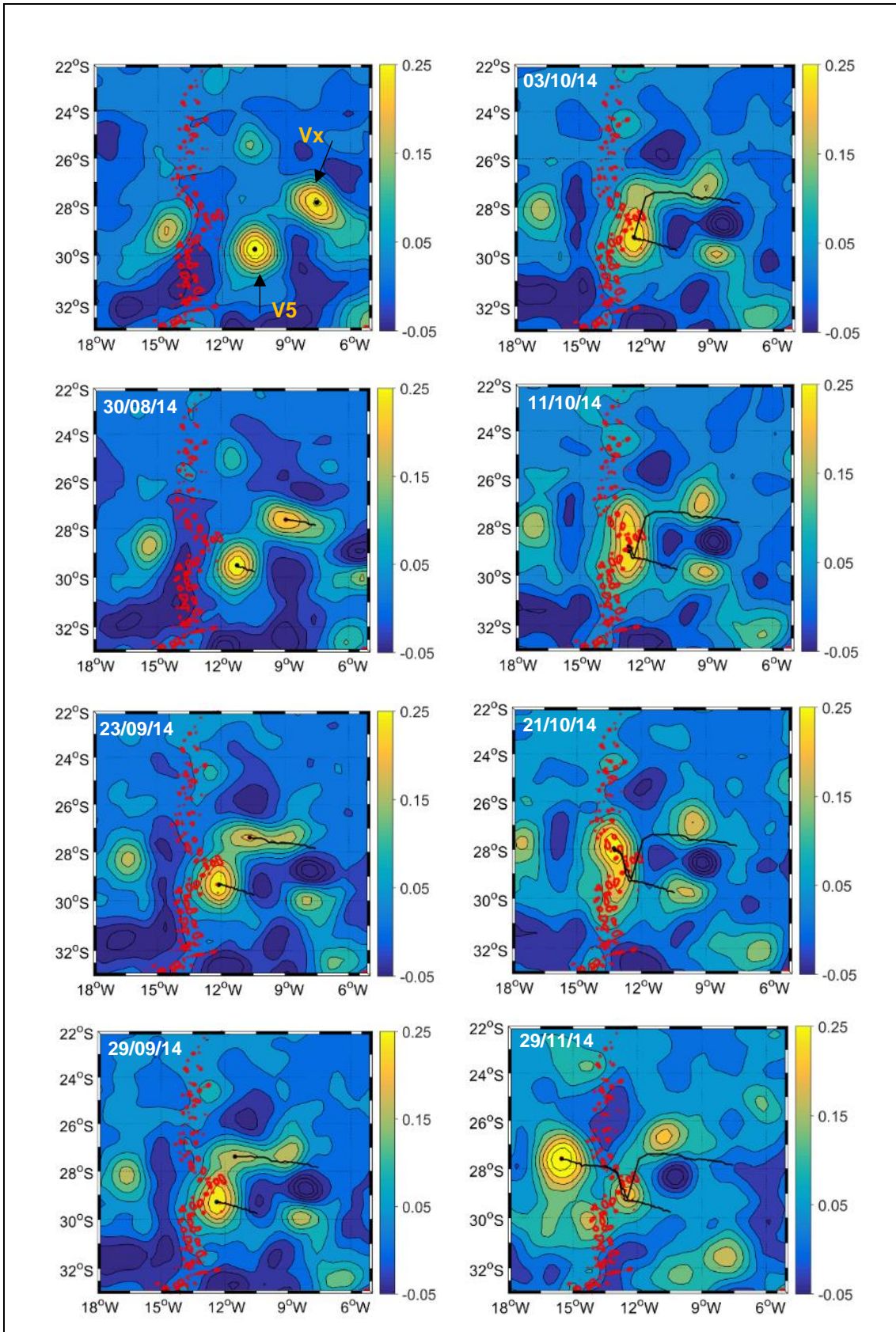


Figura 23: Trajetórias do vórtice V5 e de outro vórtice das Agulhas (Vx) ao atravessarem a CMO. Mapa de cores de SLA (em metros). Trajetórias dos vórtices desde o mapa de SLA inicial (10/08/2014) até a data do respectivo mapa de SLA (linhas pretas mais espessas). Datas referentes a cada mapa de SLA (branco). Isóbatas de 2500 m (vermelho) indicam a localização das áreas mais rasas da CMO.

4.2 Análise de Massas de Água

A identificação das massas de água contidas nos vórtices foi realizada inicialmente com base em diagramas-TS (Figura 24), que foram elaborados utilizando-se também dados de cinco áreas de referência (Atlântico Sul, Canal de Moçambique e Retroflexão das Agulhas), conforme explicado anteriormente. Nos três diagramas-TS, os vórtices concentram a distribuição dos pontos no extremo direito da nuvem de pontos que caracterizam as áreas de amostragem definidas na tabela 2. Esse resultado evidencia um padrão típico das águas do Atlântico no interior dos vórtices.

Nos três vórtices (V1, V3 e V5), as águas da camada superficial (densidades de ~25,5 a 26,0 kg/m³) caracterizadas por altos valores de temperatura e salinidade (17,5 – 22,5°C; 35,8 – 37,0 de salinidade), foram identificadas como *Atlantic Subtropical Surface Water* (ASTSW) [Lutjeharms & Valentine, 1987]. É evidente nos diagramas-TS que essas águas mais superficiais apresentam as características termohalinas mais similares às da área onde os vórtices foram amostrados (Figura 24a), no oceano Atlântico Sul, do que com relação à área da Retroflexão das Agulhas ou à área do Corrente das Agulhas (Figuras 24b e 24c).

Na camada central (26,0 - 27,0 kg/m³), os três vórtices apresentaram características termohalinas praticamente idênticas, marcados por valores de temperatura variando de 6,4 a 22,4°C e salinidades entre 34,6 e 36,9. Esta faixa de valores é característica da *South Atlantic Central Water* (SACW) (5,0 - 18,0°C, 34,3 - 35,8) [Emery & Meincke, 1986].

A presença da AAIW foi reconhecida entre as densidades de 27,0 a 27,9 kg/m³, evidenciada pelo mínimo de salinidade e pelo aumento das concentrações de oxigênio dissolvido. Nessa camada também a salinidade mostra-se maior que a observada no oceano Atlântico Sul (Figura 24a) e em um ponto mediano do *range* observado no oceano Índico (Figura 24c).

A camada profunda (com densidades de 27,5 - 27,8 kg/m³) dos vórtices é marcada por um máximo de salinidade (35,0), possuindo características da NADW também semelhante à UCDW. Nesse nível de profundidade, a salinidade dos vórtices mais uma vez se mostra mais elevada que os dados da Corrente

das Agulhas e mais próximos ao observado na zona de Retroflexão das Agulhas e no oceano Atlântico Sul.

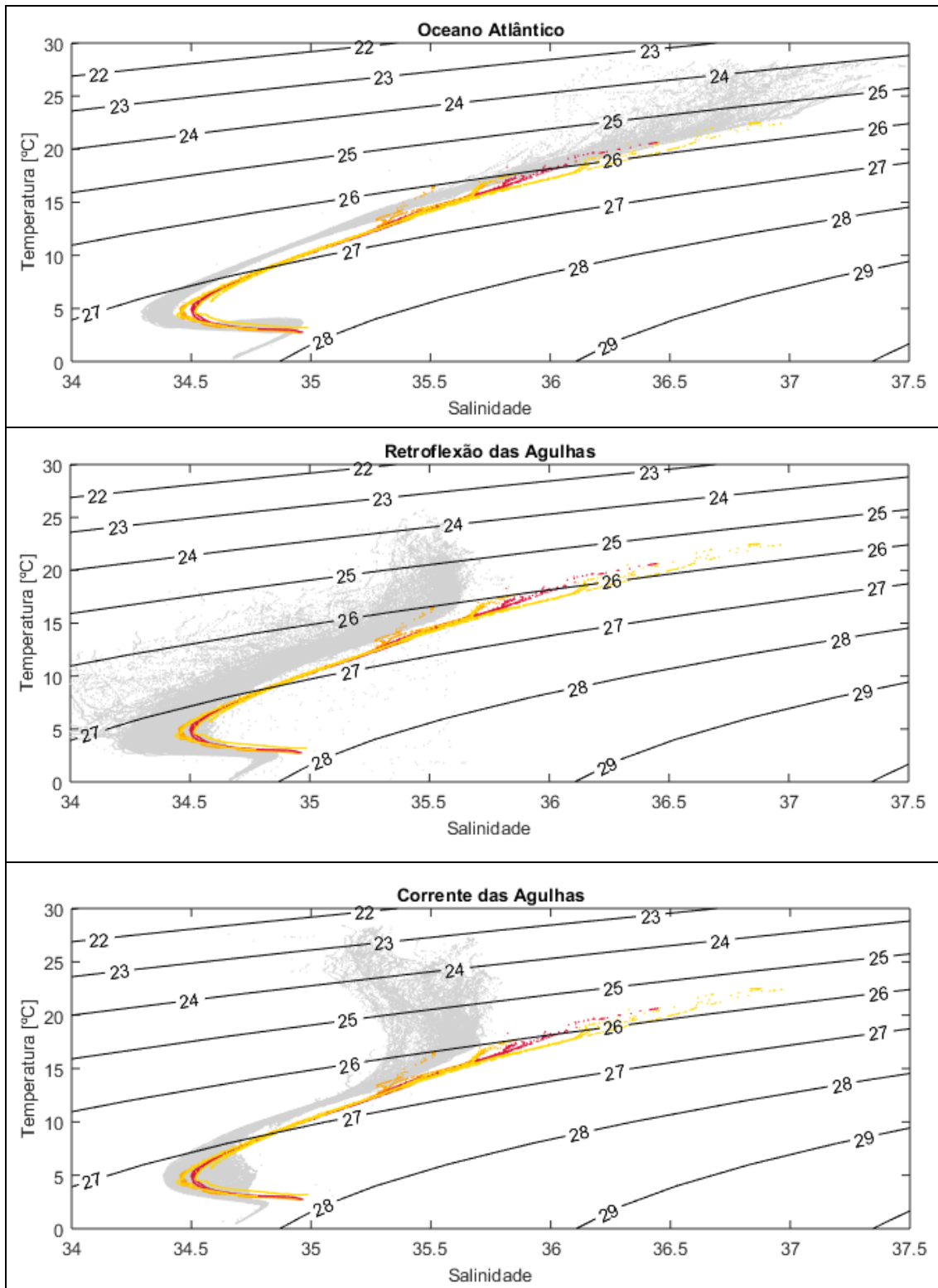


Figura 24: Diagramas-TS com isolinhas de anomalia de densidade. Em cores, os dados dos vórtices V1 (laranja), V3 (vermelho) e V5 (amarelo), obtidos no cruzeiro FORSA. Em cinza, os dados do WOA13 separados por áreas de amostragem (figura 13): oceano Atlântico Sul nas áreas de amostragem dos três vórtices (cima); área da Retroflexão das Agulhas (meio) e área da Corrente das Agulhas (baixo).

4.3 Quantificação das Massas de Água

Os índices dos parâmetros de cada água-tipo utilizadas na análise OMP do presente trabalho são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Índices dos parâmetros das águas-tipo. ac = Corrente das Agulhas; ar = Retroflexão das Agulhas; as = Atlântico Sul; SACW = Água Central do Atlântico Sul; AAIW = Água Intermediária Antártica; RSW = Água do Mar Vermelho; UCDW = Água Profunda Circumpolar Superior; NADW = Água Profunda do Atlântico Norte

	Acrônimo	Temperatura (°C)	Salinidade	Oxigênio Dissolvido (μmol/kg)	Vorticidade Potencial (s⁻¹)
Águas Centrais	acCW	17,50	35,66	219,2	-0,019
	arCW	17,50	35,52	229,0	-0,034
	SACW (V1)	18,50	35,82	229,0	-0,028
	SACW (V3)	23,00	36,41	235,8	-0,047
	SACW (V5)	23,00	36,55	222,6	-0,042
Águas Intermediárias	acAAIW	5,11	34,38	152,5	-0,031
	arAAIW	3,13	34,19	252,6	-0,005
	saAAIW (V1)	3,74	34,17	223,9	-0,005
	saAAIW (V3)	4,38	34,27	228,4	-0,001
	saAAIW (V5)	4,64	34,29	226,9	-0,004
	RSW	5,41	34,78	106,2	-0,002
Águas Profundas	acUCDW	2,36	34,82	218,7	-0,002
	arUCDW	2,72	34,86	220,0	-0,003
	v1NADW	2,39	34,89	239,2	-0,001
	v3NADW	2,86	34,93	240,1	-0,001
	v5NADW	3,63	34,97	245,4	-0,001

Os resultados das combinações selecionadas das águas-tipo, apresentadas na tabela 6, são apresentados na Tabela 7. Os resultados das combinações de massas de água foram bastantes semelhantes. Em todos eles a água central foi bem representada na porção superior da coluna d'água com contribuição acima de 20% nas profundidades acima de 700 m e aumentando em direção à superfície. Como o índice de água-tipo representativo da camada central foi definida como sendo o limite superior da relação linear temperatura-salinidade, ela foi melhor representada nos três vórtices pela SACW, referente às áreas de amostragem de cada vórtice (V1, V3 e V5).

Tabela 7: Combinações de águas-tipo dos testes no OMP. Em negrito, os testes que apresentaram baixo resíduo e distribuição de massas de água coerente. ac = Corrente das Agulhas; ar = Retroflexão das Agulhas; as = Atlântico Sul; SACW = Água Central do Atlântico Sul; AAIW = Água Intermediária Antártica; RSW = Água do Mar Vermelho; UCDW = Água Profunda Circumpolar Superior; NADW = Água Profunda do Atlântico Norte

Teste	Combinação de Águas-tipo			Resíduo (V1)	Resíduo (V3)	Resíduo (V5)
1	SACW	arAAIW	RSW	<0,9	<1,4%	<0,1%
2	SACW	arAAIW	acAAIW	<0,3%	<1,2%	<0,3%
3	SACW	arAAIW	saAAIW	<1,3%	<4,5%	<0,6%
4	SACW	arAAIW	NADW	<1,6%	<3,0%	<2,3%
5	SACW	arAAIW	UCDW	<2,5%	<3,0%	<0,9%
6	SACW	acAAIW	RSW	<25,0%	<16,0%	<17,0%
7	SACW	acAAIW	saAAIW	<0,4%	<0,1%	<1,8%
8	SACW	acAAIW	NADW	<7,0%	<3,5%	<3,5%
9	SACW	acAAIW	UCDW	<7,0%	<3,0%	<3,5%
10	SACW	saAAIW	RSW	<1,0%	<4,5%	<0,4%
11	SACW	saAAIW	NADW	<1,6%	<3,0%	<3,0%
12	SACW	saAAIW	UCDW	<2,6%	<2,6%	<4,0%

A camada intermediária também foi bem representada, com contribuição acima de 20% das variedades da AAIW, distribuída entre 500 e 1200 m de profundidade, com núcleo em 700m. Esse padrão foi observado nos três vórtices. Quando testadas uma água intermediária e uma água profunda, abaixo da AAIW, os resultados mostraram que não houve muita diferença entre os testes utilizando a UDCW ou a NADW (testes 5 e 5, 8 e 9, 11 e 12). Isso porque essas duas massas de água possuem características muito similares e ambas representaram a camada mais profunda, com máxima contribuição nas estações mais profundas, em cerca de 2000 m de profundidade.

O padrão de distribuição das massas de água foi semelhante nos três vórtices: V1, V3 e V5. Na camada intermediária, os melhores resultados foram obtidos com a variedade da AAIW presente na área da Retroflexão das Agulhas (arAAIW; testes 1 a 5) ou quando combinadas uma água intermediária com características do oceano Índico (acAAIW ou RSW) com uma água intermediária do oceano Atlântico (saAAIW ou arAAIW; testes 7 e 10). Os resíduos obtidos

aumentavam nos níveis de maior densidade sempre que testadas uma água intermediária e uma profunda.

Nas figuras 25, 26 e 27 são apresentados os resultados da distribuição de massas de água no interior dos vórtices V1, V3 e V5, respectivamente. Foram escolhidos sempre um teste considerando-se uma água central e duas águas intermediárias (uma do Índico e outra do Atlântico - coluna esquerda) e um teste contendo uma água central, uma intermediária e uma profunda (coluna direita). Dos 24 testes cujo os resíduos foram considerados bons e a distribuição de massas de água foi considerada coerente (em negrito na tabela 7), foram escolhidos 6 deles para representar a distribuição de massas de água no interior dos vórtices: testes 1 e 12 do V1, testes 7 e 12 do V3 e testes 1 e 11 do V5.

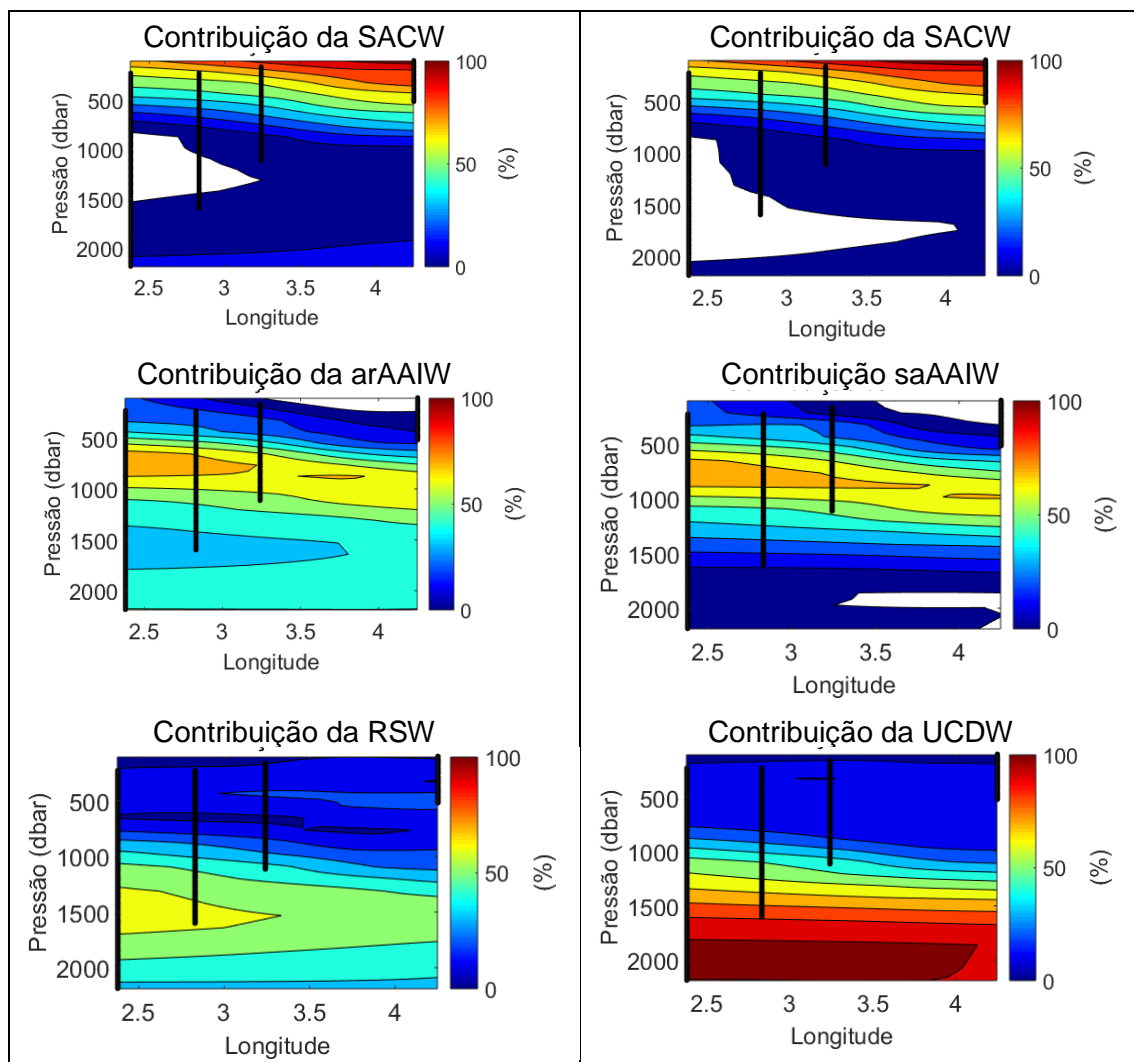


Figura 25: Contribuição das massas de água do vórtice V1 resultante do teste 1 (esquerda) e do teste 12 (direita), referente às combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7. Linhas pretas espessas indicam a posição dos perfis de CTD do cruzeiro FORSA

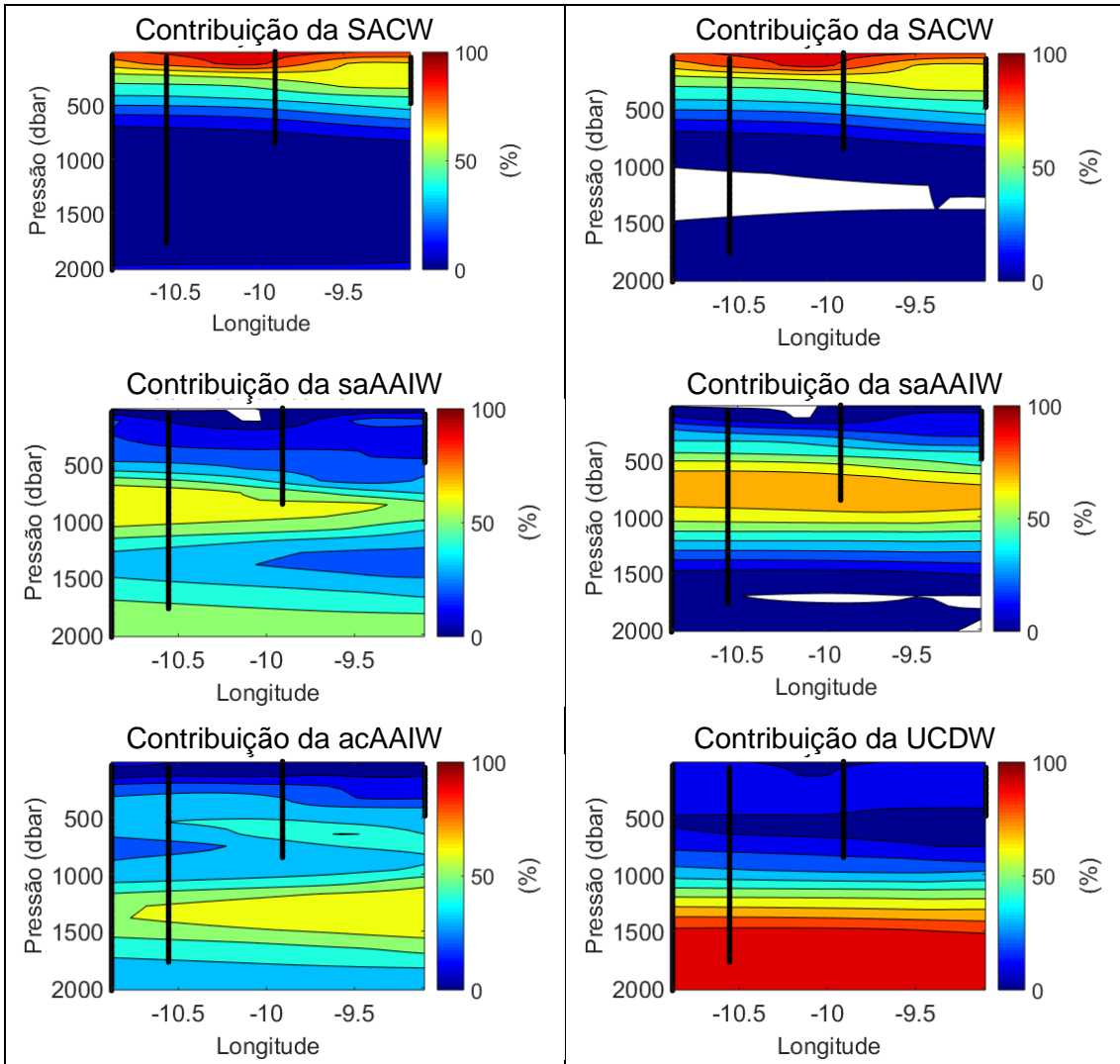


Figura 26: Contribuição das massas de água do vórtice V3 resultante do teste 7 (esquerda) e do teste 12 (direita), referente as combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7. Linhas pretas espessas indicam a posição dos perfis de CTD do cruzeiro FORSA.

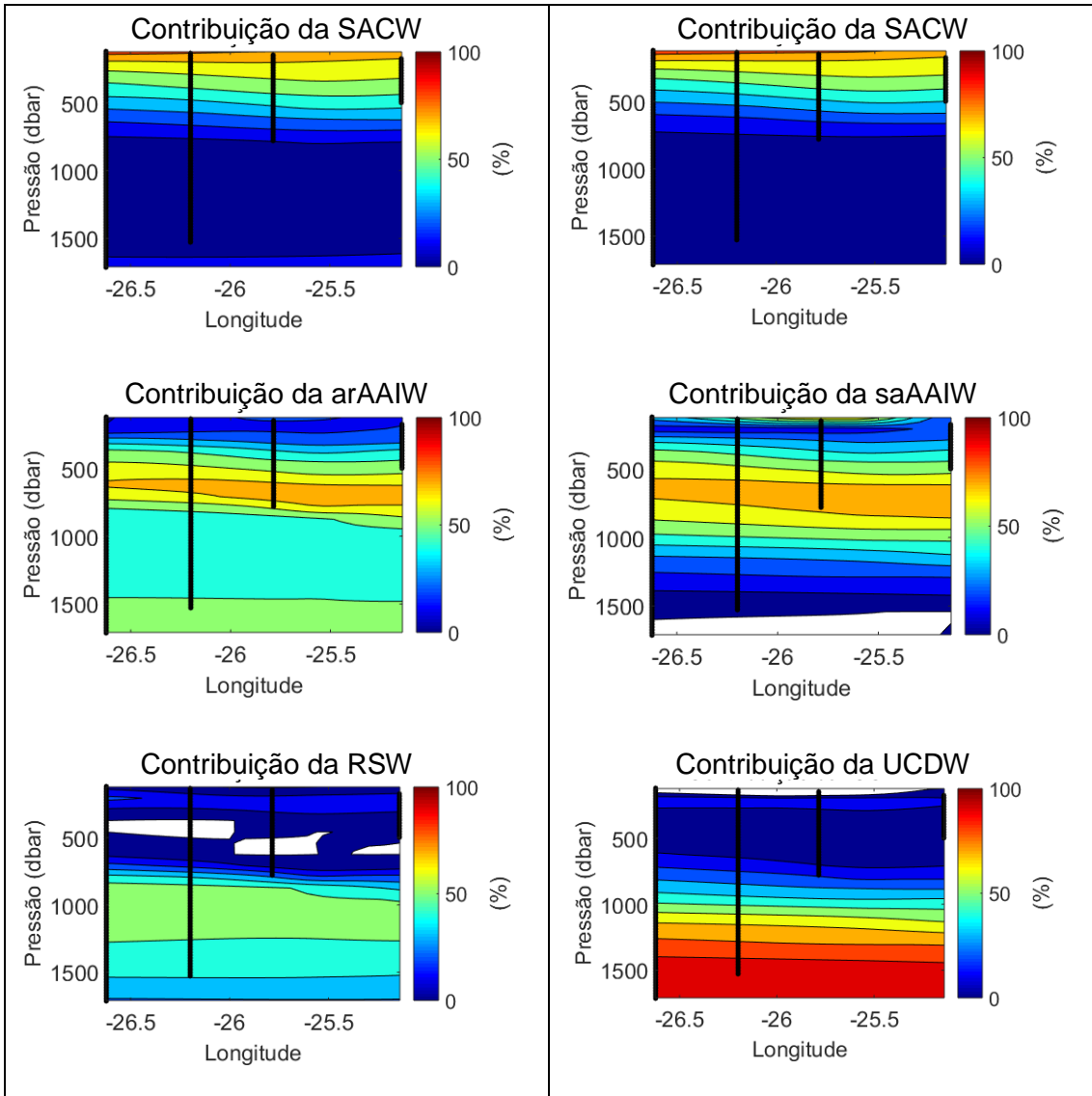


Figura 27: Contribuição das massas de água do vórtice V5 resultante do teste 1 (esquerda) e do teste 11 (direita), referente as combinações das águas-tipo apresentadas na tabela 7. Linhas pretas espessas indicam a posição dos perfis de CTD do cruzeiro FORSA.

Capítulo V: Discussão

Muitos dos trabalhos sobre vórtices das Agulhas se concentram naquelas feições que são observadas mais próximas à Retroflexão das Agulhas [e.g. [van Ballegooyen et al., 1994](#); [Arhan et al., 1999](#); [Garzoli et al., 1999](#); [van Aken et al., 2003](#); [Decausse et al., 2010](#); [Casanova-Masjoan et al., 2017](#)]. Essa preferência se dá, pois, espera-se que sua contribuição direta para o ramo superior da AMOC resulte predominantemente de seu decaimento na região da Bacia do Cabo, entre o continente africano e a Cordilheira Walvis, e consequente advecção pela Corrente de Benguela. Por outro lado, é válido mencionar que os vórtices das Agulhas que atravessam o oceano Atlântico Sul numa trajetória mais para oeste são muito energéticos, com potencial para atingir a região da Corrente do Brasil com energia suficiente para influenciar a circulação local [[Guerra, 2011](#); [Azevedo et al., 2012](#); [Pilo et al., 2015](#)]. Além disso, essas feições têm grande importância no transporte de propriedades entre os oceanos Índico e Atlântico [[Gordon et al., 1992](#)]. Quando jovens, os vórtices apresentam massas de água bem características da sua área de formação. No caso dos vórtices das Agulhas, comumente são observadas massas de água quentes, salinas e com baixas concentrações de oxigênio dissolvido típicas do oceano Índico, com contribuições de águas mais frias e enriquecidas em oxigênio dissolvido originadas ao sul da zona de Retroflexão das Agulhas [e.g. [Gordon, 1985](#); [McCartney & Woodgate-Jones, 1991](#)]. As trajetórias dos vórtices V1, V3 e V5 (Figura 21) mostram que estes, embora não se insiram diretamente

na AMOC, fazem parte daqueles que contribuem para a modificação de massas de água no oceano Atlântico Sul, ao longo do Corredor das Agulhas.

A direção e velocidade da trajetória que um vórtice segue no oceano dependem de quatro fatores: (i) da autopropulsão do vórtice, (ii) do fluxo no qual está embebido, (iii) da sua interação com a topografia e (iv) de segregações internas de vorticidade [Cushman-Roisin *et al.*, 1990]. Os três vórtices amostrados apresentaram uma trajetória preferencialmente para noroeste (Figura 21) ao longo de todo o seu tempo de vida em que foram rastreados. Esse padrão de trajetória tem sido observado em diversos anéis das Agulhas [e.g. Byrne *et al.*, 1995; Garzoli & Gordon, 1996; Schouten *et al.*, 2000; Pilo *et al.*, 2015]. A direção noroeste de translação dos vórtices V1, V3 e V5 resulta principalmente da autopropulsão para oeste, intrínseca aos vórtices isolados no oceano [Nof, 1982; Killworth, 1983], somada ao desvio para norte (i.e., em direção ao equador), devido a segregação de vorticidade no interior dos vórtices [McWilliams & Flierl, 1979]. A mudança de orientação da trajetória dos vórtices ao atravessarem a Cordilheira Walvis também foi observada por Matano & Beier [2003]. Segundo esses autores, a compensação profunda gerada na interação desses vórtices com feições topográficas (que depende da barotropicidade dos mesmos) dessa cordilheira gera uma perda de energia de aproximadamente 30%, e uma mudança da trajetória dos vórtices para uma direção mais a oeste.

Os valores da velocidade média de translação entre 5,2 e 5,5 km/d calculados para os vórtices V1, V3 e V5 são coerentes com o intervalo entre 3 e 8 km/d [Gordon & Haxby, 1990; Byrne *et al.*, 1995; Schouten *et al.*, 2000] observados em outros vórtices das Agulhas. O pico de velocidade com que os vórtices V1, V3 e V5 deixam a Retroflexão das Agulhas indica que sua translação possui, no início das trajetórias, uma acentuada componente advectiva. Na sequência, a manutenção de velocidades médias de 5 a 6 km/d sugere que suas velocidades são majoritariamente beta-induzidas [Nof, 1981], movimento intrínseco a essas feições, até o fim das suas trajetórias.

Acompanhando a trajetória dos três vórtices (V1, V3 e V5), não foi identificado um padrão de translação coerente com o efeito beta-topográfico quando eles se encontravam sobre a Cordilheira Walvis (Figura 21). Uma vez que essa Cordilheira se estende aproximadamente na direção nordeste-sudoeste (Figura

21), é esperado que, sobre a cordilheira, os vórtices apresentassem uma trajetória desviada para nordeste, sobre a influência do efeito beta-topográfico. É bastante comum que essas feições se desviem para nordeste, acompanhando o contorno batimétrico sobre essa cordilheira [e.g. [Beisman et al., 1999](#)]. [Beisman et al. \[1999\]](#) explicam que os vórtices das Agulhas que permanecem por mais tempo na Bacia do Cabo antes de cruzar a Cordilheira Walvis tendem a não mostrar o efeito da translação desviado para norte ao passar pela cordilheira, devido a perda da estrutura barotrópica dessas feições que ocorre com a idade [[Schouten et al., 2000](#)].

Na Figura 23 foi detalhada a trajetória do vórtice V5, pois este demonstrou uma trajetória coincidente com a atuação do efeito beta-topográfico ao interagir com outro vórtice anticiclônico e atravessar a Cordilheira Meso-Atlântica. Nesse trajeto, foram identificados processos de *merging* e *splitting*. Vórtices das Agulhas sofrem processo de *splitting* frequentemente desde quando recém-formados na Retroflexão das Agulhas [e.g. [Arhan et al., 1999](#); [Schouten et al., 2000](#)], até ao longo de sua trajetória cruzando o oceano Atlântico Sul, como aqui observado. O processo de *splitting* é frequentemente induzido pela topografia do fundo [e.g. [Arhan et al., 1999](#); [Schouten et al., 2000](#); [Boebel et al., 2003](#)], quando um vórtice ao encontrar um monte submarino se divide em duas ou três partes que podem seguir em diferentes direções [[Schouten et al., 2000](#)]. [Pavia & Cushman-Roisin \[1990\]](#) demonstraram que o processo de *merging* entre dois vórtices anticiclônicos leva à formação de um único vórtice mais alongado, no estágio anterior a estabilização do novo vórtice formado. Segundo estes autores, o último estágio de um processo de *merging* consiste na estabilização do vórtice recém-formado, que busca alcançar uma forma simétrica e promove rejeição de fluido para o ambiente, através da liberação de vórtices-satélite, essenciais para a conservação da vorticidade potencial, energia e momento angular.

Possivelmente, a aceleração do vórtice V5 sobre a CMO (Figura 22) se deve ao aumento de seu diâmetro, visto que a velocidade de propagação é proporcional ao raio do vórtice [[Nof, 1981](#)]. O padrão de trajetória para norte e o pico de velocidade apresentado sobre a CMO sugerem que a translação do V5 foi fortemente influenciada pelo efeito beta-topográfico nesse trecho. Possivelmente, essa mudança de comportamento está relacionada ao processo

de *merging* que ocorreu neste período que culminou na formação de uma feição anticiclônica maior que o V5. Ademais, esses processos de *splitting* e *merging* pelos quais os vórtices das Agulhas passam ao longo do seu tempo de vida, certamente propiciam condições favoráveis para a mistura de massas de água advectadas pelo vórtice contribuindo para modificações de propriedades no ambiente.

Guerra [2011] constatou que a maioria dos vórtices das Agulhas que atravessam o oceano Atlântico Sul desaparece nos mapas altimétricos no interior do giro subtropical entre 30°W e 40°W. Como observado por este autor, aqui também foi constatado que essa é uma região muito turbulenta onde ocorre uma forte interação com a mesoescala. Possivelmente, esse comportamento explica a maior variabilidade das velocidades de translação apresentada pelos vórtices V1, V3 e V5 a partir de 30°W (Figura 22), onde esses vórtices passam por processos de *merging*, *splitting* e advecção mais acentuados pela proximidade com outros vórtices presentes nessa região.

Ao longo de sua trajetória, os vórtices sofrem processos de cisalhamento de velocidades por ação do seu entorno, promovendo a intrusão de água exterior e facilitando processos de mistura e trocas com as águas externas à feição. Isso promove a diluição de seu conteúdo com as águas do ambiente e favorece o decaimento dos vórtices ao longo de sua trajetória. O decaimento dos vórtices V1, V3 e V5 ficou muito evidente ao se comparar a estrutura térmica (Figura 16) dos três vórtices com idades diferentes, apesar de não se tratar do mesmo vórtice em estágios diferentes da sua vida. O vórtice V1 (7 meses) foi amostrado mais jovem dos que os vórtices V3 (11 meses) e V5 (24 meses). O que se destaca é a manutenção de uma estrutura anticiclônica muito bem definida nas três feições, identificada pelo afundamento das isothermas, mesmo após os dois anos de translação do V5 pelo oceano Atlântico Sul, quando este foi amostrado.

O vórtice V1 mostrou-se marcadamente mais intenso que os demais, e isso ficou evidente tanto em superfície, nas suas velocidades geostróficas e na sua SLA, bem como na depressão das isothermas ao longo de sua profundidade que são expressivamente mais inclinadas que as dos demais, V3 e V5. Possivelmente, a estrutura mais pronunciada do V1 se deve ao fato deste ser o único vórtice que foi amostrado antes da Cordilheira Walvis. A interação com a Cordilheira Walvis

pode resultar em modificações na estrutura dos vórtices. Após atravessarem a Cordilheira Walvis, a velocidade média de translação dos vórtices das Agulhas diminui [Gordon & Haxby, 1990; Wakker *et al.*, 1990; Gründlingh, 1995] e sua taxa de decaimento aumenta consideravelmente [Schouten *et al.*, 2000], refletindo nas suavizações da SLA concomitante à da inclinação das isothermas, conforme observado quando se compara os três vórtices.

A estimativa das propriedades dinâmicas do vórtice exige a determinação dos limites da feição. Os critérios adotados para a definição de um raio típico e de profundidade limítrofe adotados no presente trabalho foram escolhidos no intuito de evitar subestimativas de volume e, conseqüentemente, de transportes, pois deste modo reproduziremos a estrutura dinâmica do vórtice de forma mais fidedigna. O raio do vórtice é o parâmetro de maior peso nos cálculos para as estimativas de volume e, conseqüentemente, dos seus transportes. Guerra [2011] testou quatro critérios de definição de raios em um vórtice das Agulhas: (1) o raio do anel de máxima velocidade em torno do vórtice; (2) o raio da isolinha fechada de altura da superfície do mar (10 cm e 14 cm); (3) o raio obtido a partir do ajuste de curva gaussiana e (4) o raio da camada de água modal de 17°C. Esse autor obteve raios até 2,7 vezes maior quando medido pela camada de água modal em comparação com o ajuste da curva gaussiana.

Comumente é adotado na bibliografia [e.g. Garzoli *et al.*, 1997; van Aken, 2003; Guerra, 2011] a profundidade da isoterma de 10°C como que limite inferior dos vórtices das Agulhas. A isoterma de 10°C é um bom *proxy* das variações na altura dinâmica na região da Retroflexão das Agulhas [e.g. Gordon, 1985; Olson & Evans, 1986; van Ballegooyen *et al.*, 1994] e, por esse motivo, é utilizada como interface em modelos de 2 camadas [cf. Olson *et al.*, 1985] para diagnosticar os parâmetros de vórtices das Agulhas [van Ballegooyen *et al.*, 1994]. Entretanto, os vórtices das Agulhas podem alcançar profundidades além dos 2000 m [e.g. van Aken *et al.*, 2003; Casanova-Masjoan *et al.*, 2017] enquanto que a isoterma de 10°C limita-se, geralmente a cerca de 700 m de profundidade no interior de vórtices (ver Figura 16). Segundo McDonagh *et al.* [1999], as águas associadas aos anéis das Agulhas mais frias que 10°C potencialmente contribuem com um maior fluxo de volume para o ramo superior da AMOC do que as águas superficiais e superior de termoclina correspondentes. Esses autores

demonstraram que as integrações utilizando a isoterma de 10°C como base subestima os cálculos de fluxo de volume em 1/2 e os fluxos anômalos de temperatura potencial e salinidade em 1/3 e 1/2.

As escolhas de definição do diâmetro e da profundidade limite dos vórtices refletiram nos resultados de volume e transportes aqui demonstrados. Na tabela 8 foram compiladas as informações de diâmetro, volume, transportes de sal e de calor obtidos em vórtices das Agulhas a partir observações hidrográficas para comparação com os resultados do presente trabalho.

Tabela 8: Parâmetros de vórtices das Agulhas observados em outros trabalhos

Trabalhos	H (m)	L (km)	V (10 ¹² m ³)	Ts (10 ⁶ kg/s)	Tc (PW)
Olson & Evans [1986]	- ^e	220 - 260 ^c	15 - 19	-	-
Gordon & Haxby [1990]	1000 ^e	380 ^d	46	-	-
McCartney & Woodgate-Jones [1991]	1100 ^h	300 - 400 ^a	13 - 36	-	-
van Ballegooyen <i>et al.</i> [1994]	710 ^e	280 ^a	33	0,42	0,0075
Garzoli <i>et al.</i> [1999]	950 ^g	200 - 350 ^a	19-42	-	0,002 - 0,004
McDonagh <i>et al.</i> [1999]	- ^e	- ^{a (j)}	15 - 24 (47)	-	-
van Aken <i>et al.</i> [2003]	-	280 ^a	38	-	-
Souza <i>et al.</i> [2011]	1500 ^f	165 ± 69 ^b	53 - 104 ^k	-	0,027 ± 0,014
Barros [2016]	-	315	13	0,1	0,005
Presente trabalho	V1 755 ^e (846 ⁱ)	444 ^a	91 (109)	1,50	0,052 (0,059)
	V3 700 ^e (925 ⁱ)	350 ^a	53 (83)	1,12	0,020 (0,030)
	V5 580 ^e (690 ⁱ)	244 ^a	26 (30)	0,34	0,004 (0,006)

H: profundidade do vórtice; L: diâmetro; V: volume; Ts: transporte de sal; Tc: transporte de calor. Critérios de diâmetro: a) depressão das isotermas; b) contorno de SLA; c) contorno de máxima velocidade; d) arbitrariamente definido. Critérios de profundidade: e) isoterma de 10°C; f) amostragem Argo; g) profundidade máxima com velocidades; h) teoria de Flierl [1981]; i) isoterma de melhor correlação com SLA; j) isoterma de 3,5°C. k) volume inferido por Barros [2016] a partir do transporte de volume.

O diâmetro do vórtice V1 (444 km) encontra-se ligeiramente acima dos valores relatados nos trabalhos (157 – 400 km) mencionados na tabela 8. É importante destacar que foi considerada a depressão das isotermas para definir o diâmetro dos vórtices e essa medida superestima as dimensões da feição quando comparada a outros critérios de escolha, como investigado por Guerra [2011]. Isso se refletiu nos grandes volumes calculados para esses vórtices quando

comparados a outros vórtices das Agulhas. Em suma, os resultados de volume dos vórtices V1, V3 e V5 foram coerentes com os relatados na bibliografia para outros vórtices das Agulhas, na faixa de 13.10^{12} – 104.10^{12} m³, conforme apresentado na tabela 8.

As estimativas de volume e de transporte de calor de [Souza et al. \[2011\]](#) foram as maiores relatadas na bibliografia e se referem a um vórtice cujos cálculos incluíram a coluna d'água até maiores profundidades (1500 m). Esse resultado aponta para a importância da camada intermediária na contribuição de sal e calor no interior desses vórtices e reforça a escolha da nossa metodologia de adotar isotermas de 5°C e 8°C como limite inferior do vórtice.

Os transportes de calor calculados com os dados de XBT foram maiores que aqueles obtidos com os dados de CTD. Essa diferença foi mais significativa no vórtice V1 (0,052 e 0,023 PW), mas também observada nos vórtices V3 (0,020 e 0,013) e V5 (0,004 e 0,003 PW) e se justifica pela localização das estações de CTD. Nos vórtices V1 e V3, o perfil central de amostragem foi realizado mais a leste do centro do vórtice, não amostrando, portanto, o núcleo de maior anomalia de temperatura no vórtice (Figura 20). Esse resultado indica que, ainda que nossas estimativas de transporte estejam bem maiores que a literatura, estas foram subestimadas devido a malha amostral de CTD.

Na revisão bibliográfica, apresentada na tabela 8, encontrou-se apenas dois trabalhos com estimativas de transporte de sal em vórtices das Agulhas. Nossos resultados ($0,34.10^6$ - $1,50.10^6$ kg de sal/s) são considerados elevados quando comparados às estimativas obtidas nesses trabalhos ($0,1.10^6$ - $0,42.10^6$ kg de sal/s) [[van Ballegooyen et al., 1994](#); [Barros, 2016](#)]. O vórtice V5, apresentou um volume e transporte de sal similares ao vórtice de [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#). Como os vórtices V3 e V5 tiveram volumes muito maiores que os vórtices de [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) e [Barros \[2016\]](#), isso também se refletiu nos maiores transportes de sal desses vórtices.

Quanto à diferença de volume utilizando isotermas de 10°C em relação a isoterma de melhor correlação com a SLA, nossos resultados (58% a 86 % de diferença) foram semelhantes aos obtidos por [van Ballegooyen et al. \[1994\]](#) que variaram de 67% a 84% de diferença. Resultados similares aos de [McDonagh et](#)

al. [1999] foram obtidos em nossas estimativas, onde observou-se a redução para 86%, 68% e 58% dos transportes de calor, respectivos aos vórtices V1, V3 e V5 quando comparadas as estimativas utilizando-se isoterma de 10°C em relação à isoterma de 5°C (V3) ou 8°C (V1 e V5). Esses resultados indicam a importância da contribuição das águas intermediárias no transporte de sal e calor do oceano Índico para o oceano Atlântico Sul.

Águas modais têm sido observada em vórtices das Agulhas em diversos trabalhos com dados hidrográficos, geralmente, se observa uma água modal com temperaturas próximas a 17°C e outra mais profunda com cerca de 13°C [e.g. [Garzoli et al., 1999](#); [Guerra, 2011](#); [Casanova-Masjoan et al., 2017](#)]. Nos vórtices V1, V3 e V5, apenas a primeira delas foi evidenciada pela termostata de ~16°C (Figura 16) e respectivas halostatas (~35,7; Figura 17). Essa água modal presente em vórtices das Agulhas consiste numa variedade da *Indian Subtropical Mode Water* (iSTMW). A iSTMW se distribui na região adjacente à Corrente das Agulhas, em 25-50°E / 27-38°S, com características médias de aproximadamente 16,54 ± 0,49°C de temperatura, 35,51 ± 0,04 psu para a salinidade e 26,0 ± 0,1 para densidade potencial [[Tsubouchi et al., 2010](#)]. Em alguns trabalhos esta mesma água modal é descrita como sendo um pouco mais quente, referenciada pela termostata de 17-18°C [e.g. [Olson et al., 1992](#); [van Aken, 2003](#)]. A formação de águas modais subtropicais geralmente está associada à mistura convectiva no inverno devido à perda de fluatibilidade da superfície do oceano, em uma região limitada [[Hanawa e Talley, 2001](#)]. No caso da iSTMW, esse processo é causado pelo intenso resfriamento superficial das águas subtropicais quentes, advectadas pela Corrente das Agulhas, que na Retroflexão das Agulhas são expostas a ventos frios subpolares [[Olson et al., 1992](#)].

A ausência da termostata de 13°C nos três vórtices das Agulhas aqui apresentados (V1, V3 e V5) sugere que essa água modal não estivesse disponível no momento de sua formação. Assim como explicado por [Guerra \[2011\]](#), não parece razoável que toda a camada de 13°C dessa água modal tenha sido erodida. Nos vórtices V1, V3 e V5, a camada central entre 9-14°C, onde comumente é observada a presença da SAMW em vórtices das Agulhas [e.g. [Guerra, 2011](#); [Garzoli et al., 1999](#)], foram obtidas concentrações de oxigênio

dissolvido (196 – 210 $\mu\text{mol/kg}$) abaixo dos 212 – 223 $\mu\text{mol/kg}$ observados para essa massa de água na região da retroflexão das Agulhas [Bennett, 1988; McCartney & Woodgate-Jones, 1991; Arhan *et al.*, 1999]. Esse resultado reforça o argumento de que essa água modal não esteve presente nesses vórtices, e por esse motivo a termostata de 13°C, referenciada por esses autores supracitados como SAMW, não foi observada em nenhum dos três vórtices aqui descritos.

Os primeiros testes no OMP incluíram as massas de água de superfície (TSW e STSW), mas os resultados obtidos (não mostrados) exibiram contribuições baixas para as combinações propostas, onde se constatou que adotar o limite superior das águas centrais seria mais adequado, visto a nossa limitação de três águas-tipo. A camada mais superficial dos três vórtices apresentou características mais similares a da área em que estes foram amostrados no oceano Atlântico Sul, onde se observa que os melhores resultados das combinações de águas-tipo (tabela 7) continham as SACW, respectivas aos vórtices V1, V3 e V5. Isso ocorre, pois, a camada superficial é mais suscetível a sofrer processos de mistura como resultado da atuação de forçantes atmosféricas (i.e. evaporação/precipitação, aquecimento/resfriamento e mistura turbulenta pelo vento), perdendo mais rapidamente as características da sua área fonte. Esses processos que ocorrem na camada mais superficial colaboram para que a porção superior seja mais semelhante ao oceano Atlântico Sul, conforme constatado nos resultados do OMP.

As propriedades da camada central dos três vórtices não apresentaram distinções em relação ao perfil controle. Isso se observa entre as densidades de 26,5 a 27,0 kg/m^3 , onde as curvas TS dos quatro perfis de CTD se sobrepõem em cada um dos três vórtices. Como pode-se observar nas figuras 16 e 17, a estrutura térmica segue o mesmo padrão da estrutura salina no interior de cada um dos três, evidenciando o afundamento de águas no interior da feição. Dada a similaridade entre as águas de termoclina originárias dos oceanos Índico e Atlântico Sul [Gordon & Haxby, 1990], essa camada é de difícil distinção entre esses dois oceanos. Em nossos resultados, as águas do oceano Atlântico Sul representam melhor essa camada, pois foi adotado o limite superior dela como água-tipo aplicado ao método OMP. No vórtice V1, essa massa de água

representou bem a camada superficial, alcançando quase 100% de contribuição na superfície. Nos outros dois vórtices, a representação da camada superficial não foi tão boa. Ao que tudo indica, a inclusão da STSW e da TSW seria necessária para uma melhor representação dessa camada, apesar dos baixos resíduos obtidos em todos os testes. Nos diagramas-TS observa-se que no interior dos vórtices, especificamente nas suas camadas centrais, as águas se mostram mais salinas que o observado na Corrente das Agulhas (Figura 24). Em contrapartida, quando compara-se com os resultados da Retroflexão das Agulhas, observa-se que a camada central dessa região possui uma faixa mais ampla de variação de sal, podendo ser a fonte dos maiores valores de salinidade nessa camada central. Essa característica (maior salinidade nos TS) é mais marcante na camada central e também pode ser devida ao afundamento de águas da camada mais rasa e mais salina em direção ao fundo como resultado da dinâmica interna de vórtices anticiclônicos.

A camada intermediária, tanto no oceano Índico como no Atlântico Sul, é ocupada pela AAIW. A AAIW do giro subtropical do sudoeste do oceano Índico é mais salina e menos oxigenada do que no sudeste do oceano Atlântico Sul [McCartney & Woodgate-Jones, 1991]. No oceano Índico, a AAIW se mistura às Águas do Mar Arábico, que recebe contribuição de águas quentes e salinas devido à alta taxa de evaporação do Mar Vermelho e Golfo Pérsico [Beal *et al.*, 2000]. A distribuição da RSW desde o fluxo da Corrente das Agulhas até a sua retroflexão se dá na forma de filamentos descontínuos, e esta intermitência se reflete na sua presença em vórtices das Agulhas, com contribuições que variam de 0 a 20% [Roman & Lutjeharms, 2007]. Os diagramas-TS não foram suficientes para identificar a presença da RSW no interior dos vórtices V1, V3 e V5, porém, os índices de oxigênio dissolvido observados na profundidade intermediária sugerem a contribuição de uma água mais salina e menos oxigenada do que a AAIW do oceano Atlântico Sul. No núcleo da AAIW, identificado pelo mínimo de salinidade, as concentrações de oxigênio obtidas (197 – 189 $\mu\text{mol/kg}$; Figura 18b) são consideradas baixas para essa massa de água ($> 200 \mu\text{mol/kg}$) [McCartney & Woodgate-Jones., 1991; Arhan *et al.*, 1999]. Esse resultado sugere contribuições das águas subequatoriais do oceano Índico, cujas concentrações de oxigênio dissolvido situam-se abaixo dos 200 $\mu\text{mol/kg}$

[[McCartney & Woodgate-Jones, 1991](#)]. Os resultados do OMP também sugerem a possível presença dessa água com contribuições abaixo da AAIW.

A camada profunda (27,5 - 27,8 kg/m³) dos vórtices é marcada por um máximo de salinidade (35,0), possuindo características da NADW também semelhante à UCDW. Os resultados do OMP não mostraram fortes distinções quando utilizadas a NADW ou a UCDW da Retroflexão das Agulhas ou da Corrente das Agulhas, devido à grande similaridade dos índices das águas-tipo para elas definidas nessa análise. No entanto, a análise do diagrama-TS mostra que, nesse nível de profundidade, a salinidade dos vórtices mais uma vez se mostra mais elevada que os dados da região da Corrente das Agulhas e mais próxima ao observado na zona de Retroflexão das Agulhas e no oceano Atlântico Sul (Figura 24). Esses resultados sugerem a contribuição de massas de água com características do oceano Atlântico Sul nesse nível isopicnal.

Infelizmente, a análise OMP não obteve resultados conclusivos sobre a composição de massas de água no interior dos vórtices. Era esperado obter-se resultados quantitativos da intrusão de massas de água do oceano Atlântico no interior dos vórtices o que permitiria analisar a diluição e decaimento dessas feições em diferentes estágios de vida. Devido à limitação a três águas-tipo, nossas escolhas de possíveis contribuições ficaram muito restritas. Ainda assim, a forte semelhança dos parâmetros aqui utilizados entre as águas centrais dos oceanos Índico e Atlântico para as camadas da coluna d'água dificultaram a distinção das massas de água nessa análise. O que se observou nos vários testes apresentados na tabela 7 foi que, independentemente da combinação realizada, os três estratos da coluna d'água (camada central, intermediária e profunda) foram bem representados no método. Com essa análise, ficou claro que esse método é eficiente na distinção das diferentes águas-tipo em relação a estrutura vertical da coluna d'água, mas não foi suficiente para conseguir distinguir menores diferenças entre as águas dos oceanos Índico e Atlântico Sul que ocupam uma mesma faixa de densidade.

Capítulo VI: Conclusões

Esse trabalho visou avaliar a contribuição de vórtices das Agulhas para o oceano Atlântico Sul por meio de duas abordagens. A primeira consiste na caracterização das propriedades dos vórtices V1, V3 e V5, amostrados no cruzeiro FORSA. A segunda, baseou-se na identificação e quantificação das massas de água transportadas por essas feições.

O comportamento e características (velocidade de translação, direção de trajetória, tamanho, propriedades termohalinas) desses três vórtices foram similares a outros vórtices das Agulhas previamente observados. Embora se tratassem de três vórtices distintos, o decaimento dos três vórtices ficou bem evidente ao se comparar a estrutura térmica das feições, onde as isotermas se mostraram mais inclinadas, quanto mais jovem o vórtice. O vórtice V1 possui um diâmetro muito maior e isotermas muito mais inclinadas que os vórtices V3 e V5, possivelmente, por ter sido o único vórtice amostrado antes de atravessar a Cordilheira Walvis, que tem potencial para alterar a estrutura barotrópica dessas feições devido a sua profundidade. O acompanhamento das trajetórias dos vórtices V1, V3 e V5 permitiu concluir que essas três feições anticiclônicas se tratavam de vórtices das Agulhas. Ao transladarem pelo oceano Atlântico Sul, esses vórtices demonstraram interação com o ambiente externo onde foram observados processos de *merging* e *splitting* que, certamente, propiciam condições muito favoráveis para a mistura de massas de água advectadas pelo

vórtice aquelas do seu entorno, contribuindo para modificações de propriedades no ambiente.

Os resultados de transporte obtidos para os vórtices V1, V3 e V5 corroboram com o fato de que os vórtices das Agulhas são importantes transportadores de sal e calor do oceano Índico para o oceano Atlântico Sul, com potencial para influenciar na AMOC. Os valores de volume e de transporte de calor consideravelmente maiores quando se utilizou a isoterma a isoterma de 8°C (V1 e V5) e 5°C (V3) em relação à isoterma de a isoterma de 10°C, como limite inferior dos vórtices, revelando a importância de se incluir as camadas intermediárias dos vórtices nessas análises.

A análise das propriedades internas permitiu identificar a presença de termostatas e halostatas nos três vórtices com índices termohalinos da iSTMW. Quanto às massas de água identificadas no interior vórtices, as águas de termoclina mostraram-se claramente mais similares às do oceano Atlântico Sul. Na camada intermediária, as baixas concentrações de oxigênio observadas, além da salinidade relativamente elevada nessa profundidade sugerem contribuições das variedades da AAIW modificadas no oceano Índico e no oceano Atlântico Sul. A alta salinidade observada na NADW ou UCDP sugere que nessa profundidade, a camada de água é advinda do oceano Atlântico Sul, dada a maior similaridade com as águas desse oceano quando comparada às áreas de Retroflexão das Agulhas e da Corrente das Agulhas.

De maneira geral, a análise OMP se mostrou muito eficiente na quantificação de massas de água e diferenciação entre elas quando se trata da estrutura vertical da coluna d'água. Isto é, quando se analisa diferentes estratos da coluna d'água (camadas superficial, central e profunda) onde a variabilidade dos parâmetros é mais evidente. No entanto, para cumprir o objetivo desse trabalho, de quantificar a presença de massas de água do oceano Índico, este método se mostrou pouco adequado para o conjunto de dados proposto. Isso ficou evidente ao se realizar diversos testes com águas-tipo do oceano Índico e do oceano Atlântico Sul, onde os resultados apresentaram resíduos bem baixos, independente das combinações de massas de água. Essa constatação reflete a sensibilidade da análise OMP relativo à escolha das águas-tipo escolhidas.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Averiguação mais aprofundada dos vários critérios que podem ser utilizados para a determinação do raio e do volume dos vórtices.
- Investigação de outros parâmetros traçadores de massas de água (por exemplo, nutrientes, metais-traço ou isótopos) que propiciem uma melhor distinção das massas de água dos oceanos Índico e Atlântico Sul.
- A presença de dados em perfis mais profundos em áreas controle fora dos vórtices poderia ser uma boa forma de verificar se a análise OMP seria capaz de distinguir bem as massas de água presentes dentro e fora do vórtice. Além disso, o uso de um número maior de parâmetros poderia permitir a combinação de mais águas-tipo podendo-se realizar os testes com combinações de águas dos dois oceanos para cada estrato da coluna d'água e, talvez, assim seria possível alcançar o segundo objetivo específico proposto neste trabalho.

Referências Bibliográficas

Aboelkassem Y, Vatistas GH & Esmail N (2005) Viscous dissipation of Rankine vortex profile in zero meridional flow, *Acta Mech. Sinica.*, 21, 550–556, doi: 10.1007/s10409-005-0073-3.

Anderson LA & Sarimento JL (1994) Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis. *Global Biogeochem. Cy.* 8: 65-80.

Arhan M, Mercier H & Lutjeharms JRE (1999) The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 104 (C9), 20,987–21,005.

Arruda W, Zharkov V, Deremble B, Nof D & Chassignet E (2014) A New Model of Current Retroflexion Applied to the Westward Protrusion of the Agulhas Current. *J. Phys. Oceanogr.* 44 (12), 3118-3138.

Azevedo JLL & Mata MM (2010) O Mecanismo de Autopropulsão de Vórtices Oceânicos: Uma Revisão. *Rev. Bras. Geofis.* 28(3): 331-347. 2010 Sociedade Brasileira de Geofísica ISSN 0102-261X

Azevedo JLL, Nof D & Mata MM (2012) Encounters of eddy trains with a continental boundary: a South Atlantic case study", *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 42. pp. 1548 – 1564. DOI: 10.1175/JPO-D-11-027.1

Bakun A (2006) Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Sci. Mar.* 70, 105–122.

Bakun A (2010) Linking climate to population variability in marine ecosystems characterized by non-simple dynamics: conceptual templates and schematic constructs. *J. Marine Syst.* 79, 361–373.

Beal LM, Chereskin TK, Lenn YD & Elipot S (2006) The Sources and Mixing Characteristics of the Agulhas Current. *J. Phys. Oceanogr.* v. 36.

Beal LM, Field A & Gordon AL (2000) Spreading of Red Sea overflow waters in the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 105, 8549–8564.

Beal LM, De Ruijter WPM, Biastoch A, Zahn R & SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136 (2011) On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. *Nature*, v. 472, n. 7344, pp. 429-36. doi: 10.1038/nature09983.

Beismann JO, Käse RH & Lutjeharms JRE (1999) On the influence of submarine ridges on translation and stability of Agulhas rings, *J. Geophys. Res.*, 104, 7897–7906.

Bennett SL (1988) Where three oceans meet: the Agulhas Retroflexion region. Ph.D. Dissertation, WHOI/MIT Joint Program in Oceanography. WHOI Report No, WHOI-88-51, 367 pp.

Biastoch A & Krauss W (1999) The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas current, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2303–2317.

Biastoch A, Böning CW & Lutjeharms JRE (2008) Agulhas Leakage Dynamics Affects Decadal Variability in Atlantic Overturning Circulation. *Nature*, Vol. 456, No. 7221.

Biastoch A, Böning CW, Schwarzkopf FU & Lutjeharms JRE (2009) Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, 462, 495–499.

Boebel O, Lutjeharms JRE, Schmid C, Zenk W, Rossby T & Barron CN (2003) The Cape Cauldron, a regime of turbulent inter-ocean exchange, *Deep Sea Res. Part II*, 50, 57–86.

Byrne DA, Gordon AL & Haxby WF (1995) Agulhas eddies: A synoptic view using Geosat ERM data, *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 902–917.

Campos EJD, Velhote D & Silveira ICA (2000) Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 27, No. 6, pp. 751-754, March 15.

Casanova_Masjoan M, Pelegrí JL, Sangrà P, Martínez A, Grisolia-Santos D, Pérez-Hernández MD & Hernández-Guerra A (2017) Characteristics and

evolution of an Agulhas Ring. *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2017JC012969 (in press).

Castelão (2011) Quality Control for PIRATA Hydrography.V1.1. CPTEC/INPE.

Chapman P, Duncombe Rae CM & Allanson BR (1981) Nutrients and chlorophyll relationships in the surface layers of the Agulhas retroflection region. *Deep-Sea Res.* 34(8A): 1399-1416.

Chelton DB, Schlax MG, Samelson RM & Szoeké RA (2007) Global Observations of Large Oceanic Eddies. *Geophys. Res. Lett.* 34, L15606, doi: 10.1029/2007GL030812.

Chelton DB, Schlax MG & Samelson RM (2011) Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.* 91 (2011) 167–216.

Comissão FORSA (2015) Following Ocean Rings in the South Atlantic: Cidade do Cabo (África do Sul) – Arraial do Cabo-RJ (Brasil). Relatório. 27/06/2015 - 15/07/2015.

Colling A & Open University Oceanography Course Team (2001) *Ocean Circulation*. 2nd ed., Boston: Butterworth Heinemann, in association with the Open University.

Condie SA, Mansbridge JV & Cahill ML (2011) Contrasting local retention and cross-shore transports of the East Australian Current and the Leeuwin Current and their relative influences on the life histories of small pelagic fishes. *Deep-Sea Res. Pt II.* 58, 606–615.

Condie S & Condie R (2016) Retention of plankton within ocean eddies. *Global Ecol. Biogeogr.* 25,1264–1277.

Cushman-Roisin B, Chassignet EP & Tang B (1990) Westward Motion of Mesoscale Eddies. *J. Phys. Oceanogr.* 20: 758–768.

Cushman-Roisin B (1994) *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 07458,USA.

De Ruijter WPM, Biastoch A, Drijfhout SS, Lutjeharms JRE, Matano RP, Pichevin T, van Leeuwen PJ & Weijer W (1999) Indian-Atlantic interocean exchange: Dynamics, estimation and impact. *J. Geophys. Res.* v. 104, n. C9, pp. 20885-20910.

De Ruijter WPM, Ridderinkhof H, Lutjeharms JRE, Schouten MW & Veth C (2002) Observations of the flow in the Mozambique Channel. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1502, doi:10.1029/2001GL013714.

Dencausse G, Arhan M & Speich S (2010) Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin. *Deep-Sea Res. I.* 57(2010)1406–1421.

Duncan CP (1970) The Agulhas Current. Ph.D. dissertation, University of Hawaii, 76 pp.

Durgadoo JV, Rühls S, Biastoch A & Claus WB (2017) Indian Ocean sources of Agulhas leakage. *J. Geophys. Res.- Oceans.* doi 10.1002/2016JC012676.

Emery WJ & Meincke J (1986) Global water masses: summary and review. *Oceanol. Acta.* 9,383–391.

Early JJ, Samelson RM & Chelton DB (2011) The Evolution and Propagation of Quasigeostrophic Ocean Eddies. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 41. DOI: 10.1175/2011JPO4601.1.

Fine RA (1993) Circulation of Antarctic intermediate water in the South Indian Ocean. *Deep-Sea Res. I.* 40, 2021–2042.

Firing E & Beardsley RC (1976) The behavior of a barotropic eddy on a beta-plane. *J. Phys. Oceanogr.* 6: 57 - 65.

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

Garcia HE, Locarnini RA, Boyer TP, Antonov JI, Baranova OK, Zweng MM, Reagan JR, Johnson DR (2014) World Ocean Atlas 2013, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 75, 27 pp.

Garzoli SL, Richardson PL, Rae CMD, Fratantoni DM, Gon GJ & Roubicek AJ (1999) Three Agulhas rings observed during the Benguela Current Experiment. *J. Geophys. Res.* 104(C9), 20971–20986. <http://doi.org/10.1029/1999JC900060>

Garzoli SL & Gordon AL (1996) Origins and variability of the Benguela Current", *J. Geophys Res.* v. 101, n. 95, pp. 897-906.

Goni GJ, Garzoli SL, Roubicek, AJ, Olson DB & Brown OB (1997) Agulhas ring dynamics from TOPEX/Poseidon satellite altimeter data", *J. Mar. Res.* v. 55, pp. 861-883.

Gordon AL (1985) Indian-Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas retroflection. *Science*, 227, 1030-1033.

Gordon AL, Lutjeharms JRE & Gründlingh ML (1987) Stratification and Circulation at the Agulhas Retroflection. *Deep-Sea Res.* 34 (4). 565-599.

Gordon AL & Haxby WF (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>.

Gordon AL, Weiss RF, Smethie Jr. WM & Warner MJ (1992) Thermocline and Intermediate Water Communication Between the South Atlantic and Indian Oceans. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 97, no. C5, 7223-7240p.

Guerra LA (2011) Vórtices das Agulhas colidem com a Corrente do Brasil? Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 73 p.

Gründlingh ML (1995) Tracking eddies in the southeast Atlantic and southwest Indian oceans with TOPEX/Poseidon, *J. Geophys. Res.* 100, 24977- 24986.

Gründlingh ML, Carter RA & Stanton RC (1991) Circulation and water properties of the southwest Indian Ocean, Spring 1987. *Progr. Oceanogr.* Vol. 28, Pergamon, 305–342.

Hanawa K & Talley LD (2001) Mode Waters in: Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean. Ed. Gerold Siedler, John Church, John Gould.

Karstensen J & Tomczak M (1998) Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *J Geophys. Res.* 103: 18,599-18,610.

Karstensen J & Tomczak M (1999) OMP Analysis Package for MATLAB Version 2.0. Disponível em: < <http://omp.geomar.de/README.html>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

Killworth PD (1983) On the Motion of Isolated Lenses on a Beta-Plane. *J. Phys. Oceanogr.* 13: 368–376.

Laws EA (2013) Evaluation of in situ phytoplankton growth rates: a synthesis of data from varied approaches. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 5, 247–268.

Lee TN, Atkinson LP & Legeckis R (1981) *Deep-Sea Res.* Volume 28, Issue 4, April Pages 347-378.

Locarnini RA, Mishonov AV, Antonov JI, Boyer TP, Garcia HE, Baranova OK, Zweng MM, Paver CR, Reagan JR, Johnson DR, Hamilton M & Seidov D (2013) *World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature.* S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp.

Lutjeharms JRE & Valentine HR (1987) Water types and volumetric considerations of the South-East Atlantic upwelling regime, *S. Afr J Marine Sci.* 5:1, 63-71, DOI: 10.2989/025776187784522487

Lutjeharms JRE & Van Ballegooyen RC (1988) The Retroflexion of the Agulhas Current. *J Phys. Oceanogr.* v. 18, pp. 1570 - 1583.

Lutjeharms JRE (2006) *The Agulhas Current.* Publisher: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Copyright Holder: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Lutjeharms JRE & Bornman TG (2010) The importance of the greater Agulhas Current is increasingly being recognized. *S. Afr J Marine Sci.* 106(3-4), 11-14, doi: doi 10.4102/Sajs.V106i3/4.160.

- Mackas DL Denman KL & Bennett AF (1987) Least-square multiple tracer analysis of water mass composition, *J. Geophys. Res.* 92, 2907-2918.
- Mantyla AW & Reid JL (1995) On the origins of deep and bottom waters in the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 100, 2417–2439.
- Matano RP & Beier EJ (2003) A kinematic analysis of the Indian/Atlantic interocean exchange", *Deep-Sea Res. II.* v. 50, pp. 229-249.
- McCartney MS (1982) The subtropical recirculation of mode waters. *J. Mar. Res.* 40 (Suppl.), 427–464.
- McCartney MS & Woodgate-Jones ME (1991) A deep-reaching anticyclonic eddy in the subtropical gyre of the eastern South Atlantic. *Deep-Sea Res.* vol. 38, Suppl 1, pp S411 – S443.
- McDonagh EL, Heywood KJ & Meredith MP (1999) On the structure, paths, and fluxes associated with Agulhas rings. *J Geophys. Res.* v. 104, n. C9, pp. 21007-21020.
- MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação). (23/07/2015) Disponível em: <http://geofisicabrasil.com/tvgeofisica/134-institucional/7326-navio-oceanografico-vital-de-oliveira-chega-ao-pais.html>. Acesso em: 05 jan. 2018.
- McWilliams JC & Flierl GR (1979) On the evolution of isolated, nonlinear vortices. *J. Phys. Oceanogr.* 9, pp. 1155-1182.
- Mitsudera H, Yoshikawa TWY & Taguchi B (2001) Anticyclonic eddies and Kuroshio meander formation. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28, No. 10, Pages 2025-2028, May 15.
- Morrow R, Birol F, Griffin D & Sudre J (2004) Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies. *Geophys. Res. Lett.* 31. doi:10.1029/2004GL020974.
- Nof D (1981) On the β -induced movement of isolated baroclinic eddies. *J. Phys. Oceanogr* 11, 1662–1672.
- Olson DB (1991) Rings in the ocean. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* v. 19, pp. 283-311.

Olson DB, Schmitt RW & Kennelly M (1985) A Two-Layer Diagnostic Model of the Long-Term Physical Evolution of Warm-Core Ring 82B. *J. Geophys. Res.* v. 90, n. C5, pp. 8813-8822. ISSN: 0148-0227. doi: 10.1029/JC090iC05p08813.

Olson DB & Evans RH (1986) Rings of the Agulhas current. *Deep-Sea Res.* 33 (1), 27–42.

Olson DB, Fine RA & Gordon AL (1992) Convective modifications of water masses in the Agulhas. *Deep-Sea Res.* v. 39. n. Suppl. 1, pp. S163-S181.

Pavia EG & Cushman-Roisin B (1990) Merging of frontal eddies. *J. Phys. Oceanogr.* 20(12):1886–1906.

Portos e Navios. Quinta, 01 Dezembro 2016 17:24. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/navegacao-e-marinha/36784-navio-de-pesquisa-hidroceanografico-vital-de-oliveira-realiza-primeira-campanha-hidrografica-na-cadeia-vitoria-trindade>>. Acesso em: 04 jan. 2018.

Redfield AC, Ketchum BH & Richards FA (1963) The influence of organism on the composition of sea water, volume 2 of *The Sea*, pages 26-77. Hill MN, editor. Interscience New York.

Richardson PL, Strong AE & Knauss JA (1973) Gulf Stream eddies: recent observations in the western Sargasso Sea. *J. Phys. Oceanogr.* 3, 397-301.

Richardson PL, Hufford GE & Limeburner R (1994) North Brazil Current retroflection eddies *J. Geophys. Res.* Vol. 99, No. C3, Pages 5081-5093, March 15.

Roman RE & Lutjeharms JRE (2007) Red Sea Intermediate Water at the Agulhas Current termination. *Deep-Sea Res. Pt I.* vol. 54, issue 8, pp. 1329-1340.

Sarthou G, Timmermans KR, Blain S & Treguer P (2005) Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *J. Sea Res.* 53, 25–42.

Shapiro GI, Meschanov SL (1991) Distribution and spreading of Red Sea Water and salt lens formation in the northwest Indian Ocean. *Deep-Sea Res. II.* 38, 21–34.

Schouten MW, De Ruijter WPM, Van Leeuwen PJ, & Lutjeharms JRE (2000) Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 105, 21,913–21,925.

Silveira ICA, Lima JAM, Schmidt ACK, Ceccopieri W, Sartori A, Francisco CPF & Fontes RFC (2008) Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability? *Dynam Atmos. Oceans* 45 (2008) 187–207.

Smith DC & O'Brien JJ (1983) The Interaction of a Two-Layer Isolated Mesoscale Eddy With Bottom Topography. *J. Phys. Oceanogr.* vol. 13, issue 9, pp. 1681-1697. Origin: CROSSREF. DOI: 10.1175/1520-0485(1983)013<1681:TIOATL>2.0.CO;2.

Souza JMAC, De Boyer, Montegut C & Le Traon PY (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 JMAC, Montegut CB, Cabane 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.* Vol. 38, L21602, doi:10.1029/2011GL049359.

Souza AGQ, Kerr R & Azevedo JLL (2017) South Atlantic Subtropical Mode water structure and variability. Submitted to *J Marine Syst.*

Thompson RORY & Edwards RJ (1981) Mixing and water mass formation in the Australian Sub-Antarctic, *J. Phys. Oceanogr.* 11; 1399-1406.

Tomczak M (1981) A multi-parameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of non-isopycnal mixing. *Progr. Oceanogr.* 10 (3), 147–171. doi:0079-6611/81-0701-0147\$05.00/0.

Tomczak M & Large DGB (1989) Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 94, 16.141-16.149. doi:10.1029/JC094iC11p16141.

Tsubouchi T, Suga T & Hanawa K (2010) Indian Ocean Subtropical Mode Water: its water characteristics and spatial distribution. *Ocean Sci.* v. 6, n. 1, pp. 41–50. ISSN: 1812-0792. doi: 10.5194/os-6-41-2010.

Ullgren JE, van Aken HM, Ridderinkhof H & de Ruijter WPM (2012) The hydrography of the Mozambique Channel from six years of continuous temperature, salinity, and velocity observations. *Deep-Sea Res. Pt I.* 69, 36–50.

Van Aken HM, van Veldhoven AK, Veth C, De Ruijter WPM, van Leeuwen PJ, Drijfhout SS, Whittle CP & Rouault M (2003) Observations of a young Agulhas ring, Astrid, during MARE in March 2000. *Deep. Res. Part II.* 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 Aken HM (2007) *The Oceanic Thermohaline Circulation. An Introduction.* Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol.39. Springer, New York.

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

Wakker KF, Zandbergen RCA, Naeije MC & Ambrosius BAC (1990) GEOSAT altimeter data analysis for the oceans around South Africa. *J. Geophys. Res.* 95, 2991-3006.

You Y (1997) Seasonal variations of thermocline circulation and ventilation in the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 102, 10391–10422.

You Y, Lutjeharms JRE, Boebel O & De Ruijter WPM (2003). Quantification of the interocean exchange of intermediate water masses around southern Africa. *Deep-Sea Res. Pt II.* 50, 197–228.

Zweng MM, Reagan JR, Antonov JI, Locarnini RA, Mishonov AV, Boyer TP, Garcia HE, Baranova OK, Johnson DR, Seidov D & Biddle MM (2013) *World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity.* S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.