



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/07.15.12.46-TDI

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA NO OCEANO ATLÂNTICO SUL SUBTROPICAL

Catarina Marques Cecilio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, e Ronald Buss de Souza, aprovada em 18 de julho de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EF96F8>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/07.15.12.46-TDI

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA NO OCEANO ATLÂNTICO SUL SUBTROPICAL

Catarina Marques Cecilio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, e Ronald Buss de Souza, aprovada em 18 de julho de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EF96F8>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cecilio, Catarina Marques.

C324v Variabilidade espaço-temporal da energia cinética turbulenta no Oceano Atlântico Sul subtropical / Catarina Marques Cecilio. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxvi + 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/07.15.12.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, e Ronald Buss de Souza.

1. Corredor de Vórtices das Agulhas. 2. MTM-SVD. 3. ECT. 4. ANM. 5. Agulhas Eddies. I.Título.

CDU 525.8:551.46

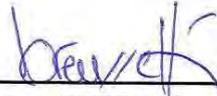


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. João Antonio Lorenzetti



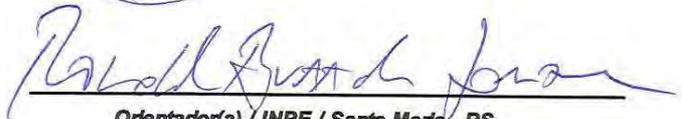
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Douglas Francisco Marcolino
Gherardi



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Ronald Buss de Souza



Orientador(a) / INPE / Santa Maria - RS

Dr. José Luiz Stech



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Marco A. Correa-Ramirez



Convidado(a) / PUCV / ValParaíso - CHL

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

() unanimidade

Aluno (a): **Catarina Marques Cecilio**

São José dos Campos, 18 de Julho de 2013

“La mar”

*A todos que de alguma forma
contribuíram para este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro concedido na forma de bolsa de mestrado e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudo e de utilização de suas instalações.

Aos meus orientadores Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, pela disposição e orientação e Dr. Ronald Buss de Souza, pela confiança em mim depositada, e pela ajuda nas horas mais difíceis.

Ao Cristián Henríquez, obrigada por se mostrar sempre disponível a ajudar, e principalmente, ao Dr. Marco Correa-Ramirez, por me receber, pela ajuda com a análise de MTM-SVD, pelo esclarecimento de diversas dúvidas, além das sugestões que foram de grande valia ao desenvolvimento deste trabalho.
Muchas gracias!!!

Aos meus companheiros de laboratório Otávio, Natália, Andressa, Carina, Luís, Fabian, Helena e em especial à Clau, pela amizade e disponibilidade de ajudar sempre, e à Dani, por compartilhar os desafios em nossa rotina de trabalho e agradecimentos, pelas ajudas e pela amizade.

Ao Jonas, Felipe, Clayton por estarem sempre por perto e tornarem minha estadia em SJC mais feliz, e em especial à Annia, pela amizade e por me aturar nos dias mais difíceis e ao Gá, pela companhia e amizade nos últimos meses.

À Pétala, Madê, e em especial à Isabel e à Regiane, pelo apoio, amizade, incentivo, boas conversas e pela convivência diária sob o mesmo teto.

Aos velhões amigos do Cassino, em especial à Helô e ao Piauí que mesmo longe se fazem sempre presentes.

Por fim, à minha família, meus irmãos Felipe e Raissa. Em especial a meus pais, Vagner e Alice, pela paciência e incansável apoio durante toda a minha vida.

RESUMO

No Oceano Atlântico Sul (OAS) parte do fluxo do giro anticiclônico é influenciado pela entrada de águas do Oceano Índico transportadas por vórtices oriundos da retroflexão da Corrente das Agulhas, região conhecida como Vazamento das Agulhas (VA). A presença desses vórtices no OAS induz processos ondulatórios que permitem a interação entre modos de variabilidade das diferentes bacias, variando de alta a baixa frequência. Nos últimos anos, diversos estudos apontam para uma intensificação do VA e, conseqüentemente, para um aumento da comunicação dos giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul. Este estudo tem como objetivo investigar a variabilidade da energia cinética turbulenta (ECT) associada a feições de mesoescala no OAS. Foram utilizados dados derivados de satélites altimétricos, como anomalia do nível do mar (ANM) e anomalia da velocidade geostrófica meridional e zonal. Análises estatísticas no domínio do espaço e da frequência, como Funções Ortogonais Empíricas (EOF) e o Método Multitaper-Decomposição em Valores Singulares (MTM-SVD), foram aplicadas para examinar o modo de variabilidade espaço-temporal individual e conjunto dos campos de ECT, ANM e anomalia da velocidade geostrófica meridional. As análises de variabilidade da ECT mostram uma forte variabilidade anual no OAS e na Corrente do Brasil, enquanto no CBM e no VA esta frequência é menos intensa. Nas regiões de atividade de mesoescala mais energéticas (CBM e VA) o padrão de variabilidade é diferente. Na região da CBM a variabilidade interanual é dominante, enquanto que na região do VA a maior parte da variabilidade é associada à alta frequência. Tais resultados demonstram que a variabilidade da ECT é influenciada tanto por processos de larga escala (baixa frequência) como de escala regional (alta frequência) e evidenciam a influência dos vórtices das Agulhas na variabilidade da circulação oceânica do Atlântico Sul.

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF THE EDDY KINETIC ENERGY IN THE SUBTROPICAL SOUTH ATLANTIC OCEAN

ABSTRACT

In the South Atlantic Ocean (SAO) part of the inter-oceanic flow is accomplished through the issuance of anticyclonic eddies by the Agulhas Retroflexion. The Agulhas Leakage (AL), is responsible by the intermittent shedding of eddies in the SAO. The propagation of eddies into the SAO induces wave processes ranging from high to low frequency allowing the interaction between modes of variability of different basins. In the last years, several studies have been suggesting the intensification of AL and the increasing of communication of subtropical gyre of South Indic Ocean and SAO. The aim of this study was investigate the variability of the eddy kinetic energy (EKE) related to mesoscale features into SAO. We used sea level anomaly (SLA) and zonal and meridional geostrophic velocity anomaly derived from satellite altimetry. Statistical analysis about space and frequency as the Empirical Orthogonal Functions (EOF) and the Multitaper Method – Singular Value Decomposition (MTM-SVD) were used to evaluate the pattern of individual and joint spatio-temporal variability of the EKE, the SLA and the meridional geostrophic velocity anomaly fields. The ECT has a strong annual variability in the SAO and in the Brazil Current, while this frequency is not so strong in the BMC and AL. The pattern of variability in the most energetic mesoscale activity regions (BMC and AL) is different. In the BMC region the interannual variability has a related pattern, while in the AL region most part of variability is related to high frequencies. The results show that the variability of EKE depends both large scale (low frequency) and regional scales process (high frequency). In addition, this study emphasize the influence of the Agulhas eddies in the ocean circulation variability of the SAO.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 – Esquema do sistema das Agulhas incorporando os giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul. A figura mostra a conexão entre o oceano Índico e Atlântico afetada pelos ventos de oeste e pela posição da frente subtropical. As cores de fundo mostram a circulação média do giro subtropical, as setas pretas e os balões ilustram características significativas do fluxo. O gráfico da direita apresenta a expansão para o sul dos ventos de oeste do HS ao longo de um período de 30 anos, através da média entre as longitudes de 20°E e 110°E (setor do Oceano Índico). As mudanças associadas ao deslocamento para sul da frente subtropical é ilustrada pelas setas vermelhas e seu possível efeito no Vazamento das Agulhas é mostrado pela entrada dos vórtices no Atlântico. E trajetória dos vórtices das Agulhas até o ramo superior da circulação termohalina (Leakage-AMOC pathway) é mostrada pelo balão realçado de vermelho.....1

Figura 1.2 – Ilustração dos processos induzidos pela entrada de vórtices das Agulhas no ramo superior da *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC). Os vórtices das Agulhas e ondas de Rossby são representados pelas feições em amarelo, enquanto ondas de Kelvin aparecem em vermelho.. 4

Figura 1.3 – Trajetória dos vórtices anticiclônicos da retroflexão da Corrente das Agulhas cruzando o OAS. As cores representam a medida do raio em km (acima), amplitude em cm (em baixo à esquerda) e a velocidade de rotação em cm s^{-1} (em baixo à direita)..... 5

Figura 1.4 – Mapa esquemático simplificado da circulação de águas intermediárias na Bacia do Cabo, com base em trajetórias de flutuadores e outros dados..... 10

Figura 1.5 – Primeiro modo de variabilidade acoplada entre a temperatura da superfície do mar (TSM - cores em K) e a pressão atmosférica ao nível do mar (contornos em hPa) no OAS. A covariância explicada pelo modo é de 38,35%. Estrutura norte-sul do dipolo de TSM do OAS. 15

Figura 1.6 – Esquema das correntes na camada superficial do Oceano Atlântico Sul. ACC, Corrente Circumpolar Antártica (Antarctic Circumpolar Current); AR, Retroflexão da Corrente das Agulhas (Agulhas Retroflexion); AE, Corredor de Vórtices das Agulhas (Agulhas Eddy Corridor); BC, Corrente do Brasil (Brazil Current); BeC, Corrente de Benguela (Benguela Current); MC, Corrente das Malvinas (Malvinas Current); NBUC, North Brazil Undercurrent; SAC, Corrente Sul Atlântica (South Atlantic Current); SEC, Corrente Sul Equatorial (South Equatorial Current); TCC, Corrente Tristan da

Cunha/Corrente de Santa Helena (Tristan da Cunha (Saint Helena) Current);
ZA, Anticiclone Zapilo (Zapiola Anticyclone). 23

Figura 2.1 – Campo médio da ECT para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm^2s^{-1} . (a) região da Corrente do Brasil. (b) região do Corredor de Vórtices das Agulhas. (c) região do Vazamento das Agulhas. (d) região da Confluência Brasil-Malvinas. 34

Figura 3.1 – Campo médio da ECT para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm^2s^{-1} 38

Figura 3.2 – (a) Padrão espacial e (b) série temporal dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ECT normalizada para o OAS. Porcentagem total de variância explicada de 1,5%. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e a série temporal foi filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes normalizadas pelo desvio padrão. 40

Figura 3.3 – (a) Padrão espacial e (b) série temporal dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ECT não normalizada para o OAS. Porcentagem total de variância explicada de 4%. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e a série temporal foi filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes normalizadas pelo desvio padrão. 41

Figura 3.4 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%. 43

Figura 3.5 – Padrão espacial do campo de variância explicada da energia cinética turbulenta reconstruído para a frequência de (a) 6,5 anos, (b) 1 ano, (c) 0,39 anos, (d) 0,23 anos e (e) 2,25 anos. Unidade em porcentagem (%). ... 46

Figura 3.5 – Continuação da figura anterior. 47

Figura 3.6 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência de 6,5 anos. Cada grau corresponde a 6,6 dias. 49

Figura 3.7 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência anual. Cada grau corresponde a 1,02 dias. A linha preta corresponde à propagação teórica do primeiro modo baroclínico de uma onda de Rossby. E os círculos evidenciam o padrão de propagação. 50

Figura 3.8 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência de 2,8 meses. Cada grau corresponde a 0,25 dias.....	51
Figura 3.9 – (a) Padrão espacial de correlação cruzada entre as séries de anomalia de energia cinética turbulenta (ECT) reconstruídas para a frequência de 6,5 anos e o índice de Oscilação Antártica (AAO) defasado temporalmente 52 semanas. Os valores em branco na barra de cores correspondem aos resultados não significativos a 95%. (b) série temporal média da anomalia da ECT reconstruída para a frequência de 6,5 anos e índice de AAO (unidades normalizadas).....	54
Figura 3.10 – (a) Padrão espacial de correlação cruzada entre as séries de anomalia de energia cinética turbulenta (ECT) reconstruídas para a frequência de 1 ano e o índice de Oscilação Antártica (AAO) defasado temporalmente 59 semanas. Os valores em branco na barra de cores correspondem aos resultados não significativos a 95%. (b) série temporal média da anomalia da ECT reconstruída para a frequência de 1 ano e índice de AAO (unidades normalizadas).....	55
Figura 3.11 – Campo médio da ANM para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm.	57
Figura 3.12 – Campo médio da AVGM para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm s^{-1}	57
Figura 3.13 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 14,7%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.	59
Figura 3.14 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do segundo modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 2,62%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.	60
Figura 3.15 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do terceiro modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 2,26%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. .	61

Figura 3.16 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da AVGM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 1,1%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. 62

_Toc362615646

Figura 3.17 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. 65

Figura 3.18 – Padrão espacial do segundo modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. 66

Figura 3.19 – Padrão espacial do terceiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. 68

Figura 3.20 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) AVGM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão. 71

Figura 3.21 – Espectro conjunto de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) e anomalia do nível do mar (ANM) para (a) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB) e Confluência Brasil-Malvinas e (b) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95%, 80% e 50%. 73

Figura 3.22 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 2,9 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 2,9 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO). 76

Figura 3.23 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 1 ano. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 1 ano e índice de Oscilação Antártica (AAO). 78

Figura 3.24 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 0,23 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 0,23 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO)..... 79

Figura 3.25 – Espectro conjunto de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) para (a) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB) e Confluência Brasil-Malvinas e (b) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95%, 80% e 50%. 82

Figura 3.26 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) reconstruídos para a frequência de 1 ano. (c) séries temporais médias da ECT e da AVGM reconstruídas para a frequência de 1 ano e índice de Oscilação Antártica (AAO). 83

Figura 3.27 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) reconstruídos para a frequência de 0,23 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da AVGM reconstruídas para a frequência de 0,23 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO). 85

Figura A. 1 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%. 101

Figura A. 2 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de anomalia do nível do mar (ANM) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%. 101

Figura A. 3 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%..... 102

Figura A. 4 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) TCV e os respectivos coeficientes de expansão. (a) os contornos mostram o padrão espacial da TCV sobrepostos ao padrão da ECT. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão..... 102

Figura A. 5 – Padrão espacial do segundo modo da SVD entre a (a) ECT e (b) TCV e os respectivos coeficientes de expansão. (a) os contornos mostram o padrão espacial da TCV sobrepostos ao padrão da ECT. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão..... 103

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Dados de anomalia do nível do mar (ANM), anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) e zonal (AVGZ) e índice de Oscilação Antártica (AAO) empregados no presente estudo.....	25
Tabela 3.1 - Fração de variância explicada para os três primeiros modos de EOF (EOF1, EOF2 e EOF3), em porcentagem, para os dados de ANM e AVGM.....	63
Tabela 3.2 - Fração de covariância quadrada (PCQ) explicada e coeficiente de correlação (r) entre os coeficientes de expansão acoplados da ECT e ANM para os três primeiros modos de variabilidade. Entre parênteses estão os níveis de significância da correlação.....	63
Tabela 3.3 - Porcentagem de covariância quadrada (PCQ) e coeficiente de correlação (r) entre os coeficientes de expansão acoplados da ECT e AVGM para o primeiro modo de variabilidade. Entre parênteses estão os níveis de significância da correlação.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAO	Oscilação Antártica (<i>Antarctic Oscillation</i>)
AMOC	<i>Atlantic Meridional Overturning Circulation</i>
ANM	Anomalia do Nível do Mar
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
AVGM	Anomalia da Velocidade Geostrófica Meridional
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
AVISO	<i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data</i>
CA	Corrente das Agulhas
CB	Corrente do Brasil
CBe	Corrente de Benguela
CBM	Confluência Brasil-Malvinas
CCA	Corrente Circumpolar Antártica
CM	Corrente das Malvinas
CPC	<i>Climate Prediction Center's</i>
CSA	Corrente Sul Atlântica
CSE	Corrente Sul Equatorial
CTC/CSH	Corrente Tristão da Cunha/Corrente de Santa Helena
CVA	Corredor de Vórtices das Agulhas
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ECT	Energia Cinética Turbulenta
ENOS	El Niño – Oscilação Sul
EOF	Funções Ortogonais Empíricas (<i>Empirical Orthogonal Functions</i>)
FST	Frente Oceânica Subtropical
GSAS	Giro Subtropical do Atlântico Sul
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
LFV	Variância Fracional Local (<i>Local Fractional Variance</i>)
MAV	Método de Análise Variacional
MTM	Método de Multitapers (<i>Multitaper Method</i>)
MTM-SVD	Método de Multitapers - Decomposição em Valores Singulares (<i>Multitaper Method – Singular Value Decomposition</i>)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OAS	Oceano Atlântico Sul
OI	Oceano Índico
PNM	Pressão ao Nível do Mar
SVD	Decomposição em Valores Singulares (<i>Singular Value Decomposition</i>)
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VA	Vazamento das Agulhas
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Vórtices de mesoescala.....	6
1.2. Características dos Vórtices das Agulhas.....	8
1.3. Vazamento das Agulhas.....	9
1.4. Sensoriamento Remoto e Vórtices de Mesoescala.....	12
1.5. Variabilidade climática do Oceano Atlântico Sul	14
1.5.1. Oscilação Antártica	17
1.6. Motivação e Justificativa.....	19
1.7. Objetivos	20
1.7.1. Objetivo Geral.....	20
1.7.2. Objetivos Específicos.....	20
1.8. Área de Estudo.....	21
2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1. Materiais.....	25
2.1.1. Anomalia da superfície do mar (ANM) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) e zonal.....	25
2.1.2. Índice de Oscilação Antártica (AAO).....	26
2.2. Métodos.....	27
2.2.1. Métodos Estatísticos	27
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
3.1. Variabilidade da ECT no OAS	37
3.1.1. Comportamento médio da ECT.....	37
3.1.2. Variabilidade espaço-temporal da ECT no OAS.....	38
3.1.3. Variabilidade da ECT no OAS associada ao Vazamento das Agulhas	42
3.1.4. Variabilidade da ECT no OAS e Oscilação Antártica.....	53
3.2. Variabilidade da ECT acoplada com a circulação oceânica no OAS.....	56
3.2.1. Comportamento médio.....	56
3.2.2. Variabilidade da circulação oceânica no OAS	58
3.2.3. Variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica no OAS.....	63
3.2.4. Variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica em regiões específicas do OAS.....	71
4 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
Apêndice A	101

1 INTRODUÇÃO

A circulação oceânica global promove a troca de massas d'água entre as bacias oceânicas de todo o planeta, influenciando a distribuição de propriedades físico-químicas dos oceanos e o clima. Essa troca de massas d'água ocorre através das conexões interoceânicas (e.g., Figura 1.1), que permitem que os regimes termohalinos de oceanos vizinhos interajam em diferentes escalas de tempo, desde altas frequências associadas a atividades de mesoescala, até baixas frequências associadas a fenômenos climáticos (WITTER e GORDON, 1999).

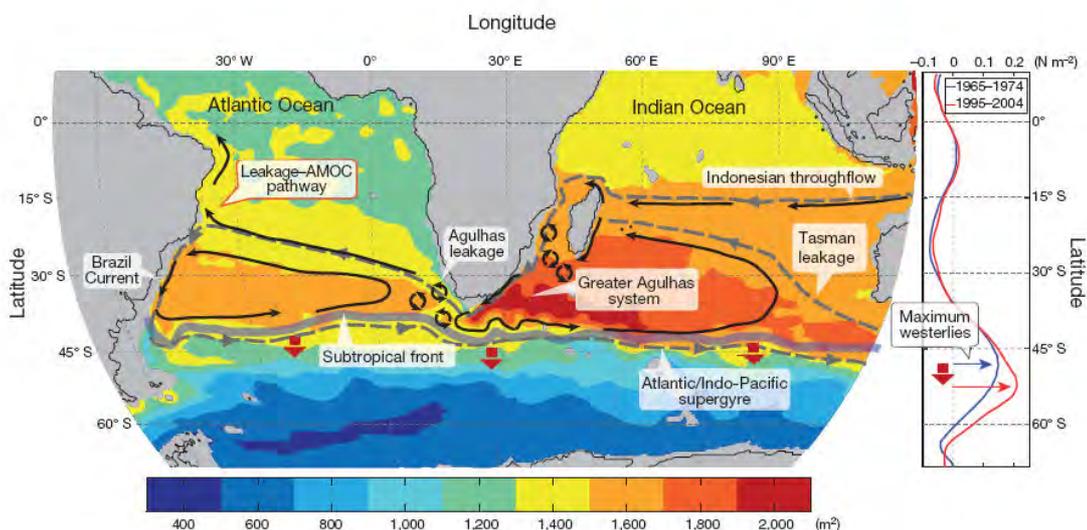


Figura 1.1 – Esquema do sistema das Agulhas incorporando os giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul. A figura mostra a conexão entre o oceano Índico e Atlântico afetada pelos ventos de oeste e pela posição da frente subtropical. As cores de fundo mostram a circulação média do giro subtropical, as setas pretas e os balões ilustram características significativas do fluxo. O gráfico da direita apresenta a expansão para o sul dos ventos de oeste do HS ao longo de um período de 30 anos, através da média entre as longitudes de 20°E e 110°E (setor do Oceano Índico). As mudanças associadas ao deslocamento para sul da frente subtropical é ilustrada pelas setas vermelhas e seu possível efeito no Vazamento das Agulhas é mostrado pela entrada dos vórtices no Atlântico. E trajetória dos vórtices das Agulhas até o ramo superior da circulação termohalina (Leakage-AMOC pathway) é mostrada pelo balão realçado de vermelho.

Fonte: Adaptado de Beal et al. (2011).

No Oceano Atlântico Sul (OAS) essas conexões interoceânicas são realizadas de duas formas. A primeira, conhecida como “rota fria”, é dada pela intrusão de água de origem polar transportada pela Corrente Circumpolar Antártica (CCA) através da Passagem de Drake. A segunda, conhecida como “rota quente”, é dada pela emissão de vórtices anticiclônicos e filamentos da corrente de borda oeste do giro subtropical do Oceano Índico (OI), via Corrente das Agulhas (CA) (ver Figura 1.1) (LUTJEHARMS, 2006).

Os vórtices anticiclônicos, denominados vórtices das Agulhas, são liberados na região da retroflexão da CA. Devido ao seu caráter intermitente, esse transporte interoceânico é conhecido como Vazamento das Agulhas (LUTJEHARMS, 1996; BIASTOCH et al., 2009), responsável pela entrada de águas quentes e salinas do OI para o OAS (BYRNE et al., 1995; LUTJEHARMS, 1996; BIASTOCH et al., 2009). O Vazamento das Agulhas contribui para o aumento da salinidade e para o armazenamento de calor no OAS, influenciando diretamente o ramo superior da circulação termohalina (BEAL et al., 2011).

A circulação termohalina é a componente do movimento dos oceanos atribuída aos gradientes de densidade. Seu início está relacionado à formação da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) nas proximidades de 50°N. A alta salinidade do Atlântico, associada à perda de calor durante o inverno, é um dos fatores determinantes para o aumento da densidade e formação da APAN. Após sua formação, a APAN é transportada em profundidade para o sul contribuindo para o ramo inferior da circulação termohalina global. Na região da divergência Antártica (60°S), a APAN passa a ser transportada pela CCA, sendo então distribuída para as demais bacias oceânicas (STOMMEL e ARONS, 1960) e influenciando na distribuição global de calor.

As massas d’água de alta salinidade transportadas pelos vórtices das Agulhas alcançam a Corrente Norte do Brasil, contribuindo para o aumento da densidade e, conseqüentemente, maior formação da APAN. Este padrão de

circulação do Atlântico, onde águas superficiais são levadas para o norte, perdem calor para a atmosfera, ganham densidade, sofrem convecção e posteriormente são transportadas para o sul, recebe o nome de Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation* - AMOC).

Richardson (2007) estimou o transporte do Vazamento das Agulhas em 15 Sv para os primeiros 1000m, o que é equivalente ao transporte da AMOC nas camadas superficiais. Dessa forma, além de compensar a perda de massa pela formação de água profunda (GORDON, 1986), o Vazamento das Agulhas representa uma importante componente da AMOC, desempenhando um papel fundamental na circulação termohalina e influenciando o clima em escala global (ver Figura 1.1).

Além de transportar águas quentes e salinas, os vórtices das Agulhas são uma importante fonte de energia (BEAL et al., 2011; BIASTOCH et al., 2009). Contendo a maior parte da energia cinética turbulenta (ECT) do OAS, os vórtices das Agulhas desempenham um importante papel na circulação superficial dos oceanos (FU, 2006).

Ao entrarem no OAS, os vórtices das Agulhas derivam em direção à América do Sul, cruzando o Atlântico de leste para oeste. A região por onde os vórtices migram é conhecida como Corredor de Vórtices das Agulhas e localiza-se entre 25°S e 35°S de latitude, nas longitudes à oeste da Cordilheira de Walvis (BYRNE et al., 1995; GARZOLI e GORDON, 1996; AZEVEDO et al., 2012). Durante esse deslocamento os vórtices das Agulhas induzem a formação de processos ondulatórios (Figura 1.2), como ondas de Rossby que se propagam pelo oceano. Ao encontrar a plataforma continental, essas ondas de Rossby geram ondas de Kelvin que se propagam em direção ao Hemisfério Norte (HN) (BEAL et al., 2011).

Grodsky e Carton (2006), por meio de análises estatísticas de EOF, indicaram uma região de termoclina rasa no Atlântico sudoeste, associada à propagação

de ondas de Rossby. Essa região coincide com o Corredor de Vórtices das Agulhas, sugerindo que sua variabilidade é afetada não somente pelos vórtices, como também por ondas planetárias. Essa afirmação está de acordo com Gherardi et al. (2010), que sugerem que anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM), na mesma região, podem estar relacionadas à variação da termoclina gerada pela passagem de ondas de Rossby.

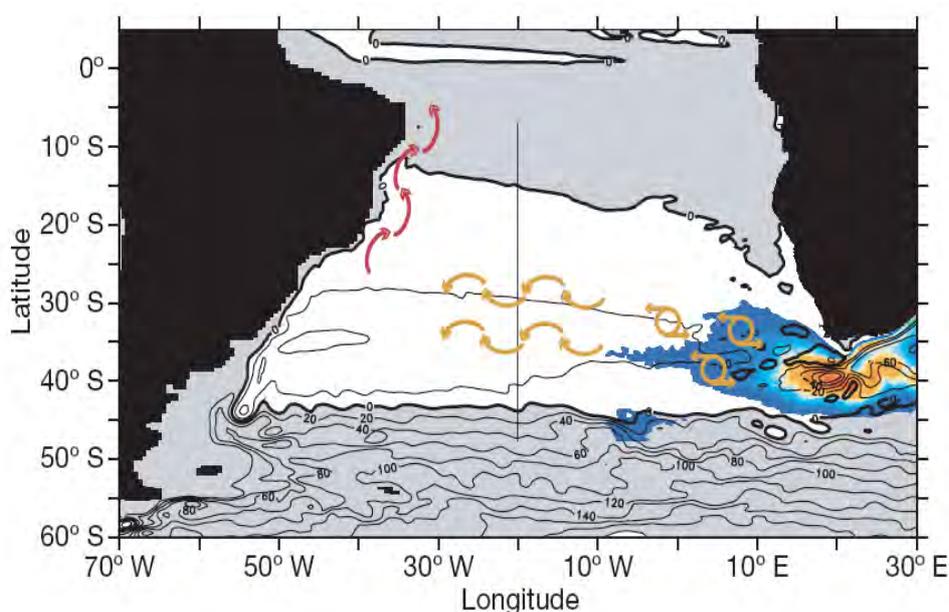


Figura 1.2 – Ilustração dos processos induzidos pela entrada de vórtices das Agulhas no ramo superior da *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC). Os vórtices das Agulhas e ondas de Rossby são representados pelas feições em amarelo, enquanto ondas de Kelvin aparecem em vermelho. Fonte: Adaptado de Biastoch et al. (2008).

O trabalho pioneiro de Byrne et al. (1995), rastreou vórtices provenientes da retroflexão da CA até a longitude de aproximadamente 40°W. Os autores descrevem que apesar de mostrarem apenas 10% de suas características iniciais, os vórtices ainda possuem propriedades que influenciam significativamente o ambiente onde se encontram. Pilo (2013), utilizando dados de satélite, descreve que ao se deslocarem em direção à borda oeste do oceano os vórtices das Agulhas perdem velocidade e amplitude, no entanto, o raio dessas feições aumenta.

Na Figura 1.3 é possível observar a trajetória de 52 vórtices provenientes da retroflexão da CA que cruzam o OAS. Após se desprenderem da CA os vórtices migram para noroeste, até atingir a Cordilheira de Walvis. Neste ponto algumas feições adquirem uma rota em direção ao norte (PILO, 2013; SCHOUTEN et al., 2002), enquanto os vórtices que cruzam a cordilheira adquirem uma rota essencialmente zonal, propagando-se pelo Corredor de Vórtices das Agulhas (PILO, 2013).

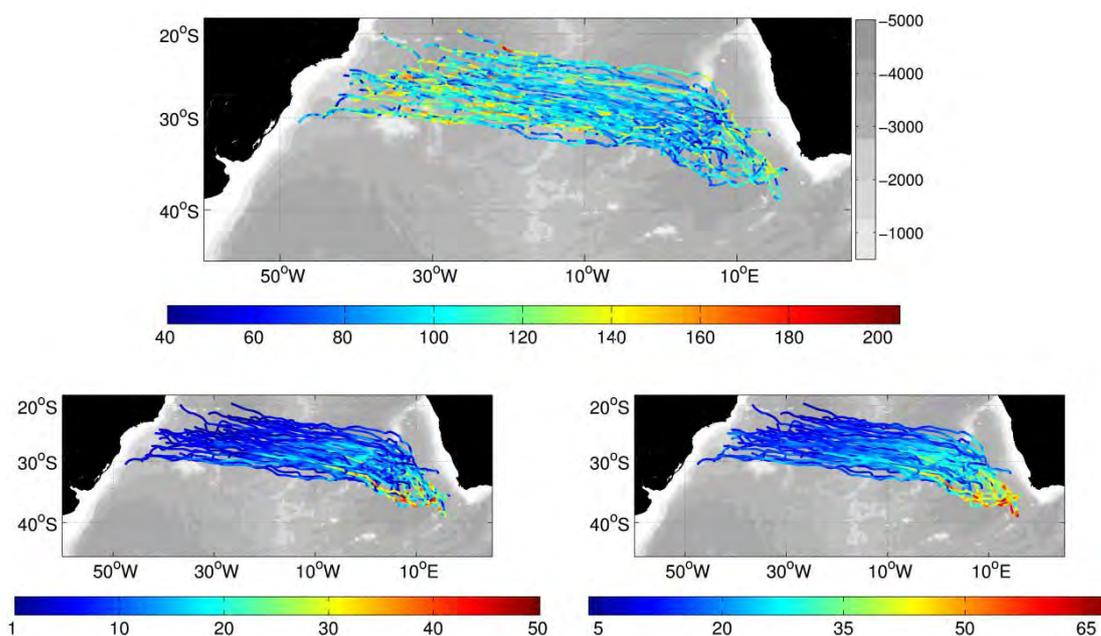


Figura 1.3 – Trajetória dos vórtices anticiclônicos da retroflexão da Corrente das Agulhas cruzando o OAS. As cores representam a medida do raio em km (acima), amplitude em cm (em baixo à esquerda) e a velocidade de rotação em cm s^{-1} (em baixo à direita).

Fonte: Adaptado de Pilo (2013).

As primeiras evidências da interação de um vórtice das Agulhas com a corrente de contorno oeste, a Corrente do Brasil (CB) foram constatadas por Guerra (2011). O autor descreve que a interação de um vórtice das Agulhas com a CB pode gerar jatos de $1,2 \text{ m s}^{-1}$, três vezes a velocidade média local. Azevedo et al. (2012), através simulações numéricas, buscaram uma melhor compreensão dos processos físicos associados à chegada dos vórtices das Agulhas na costa oeste do OAS. Os autores descrevem essa interação como um “efeito dominó”,

que começa com a absorção dos vórtices das Agulhas pela CB, seguida por um crescimento de instabilidades e geração de um pulso, terminando na influência da variabilidade da posição da Confluência Brasil-Malvinas (CBM).

Nos últimos anos, diversos estudos (e.g. BIASTOCH et al., 2009; LEE et al., 2011; BEAL et al., 2011) apontam para uma intensificação do Vazamento das Agulhas e, conseqüentemente, aumento da ECT no OAS. No entanto, pouco se sabe sobre os efeitos dos vórtices das Agulhas neste oceano. Estudos sobre esse tema são escassos e o entendimento desses processos ainda é um desafio para a comunidade científica. Dessa forma, considerar a energia proveniente dos vórtices das Agulhas nos estudos de circulação e variabilidade oceânica é de extrema importância.

1.1. Vórtices de mesoescala

Vórtices de mesoescala são definidos como fluxos em rotação originados a partir do meandramento de correntes, que podem se auto-advectar, e caracterizam-se por apresentar a parcela de fluido interno (temperatura e salinidade) diferente daquela do fluido circundante. Essas feições possuem escala espacial da ordem de dezenas a centenas de quilômetros, e podem permanecer nos oceanos por vários anos (BYRNE et al., 1995; SCHOUTEN et al., 2000). Em relação à dinâmica desses vórtices, estes possuem natureza dispersiva e longevidade variável, sendo diretamente afetados pelo ambiente turbulento no qual estão inseridos. Assim como as correntes oceânicas que os geram, os vórtices de mesoescala são aproximadamente geostróficos (ROBINSON, 1983).

Os vórtices de mesoescala são encontrados em praticamente todos os oceanos (OLSON, 1991; CHELTON et al., 2011). Devido à sua capacidade de transportar momentum, calor, sal e nutrientes para longe de sua região de formação, os vórtices desempenham um papel importante na distribuição das propriedades das massas de águas e na determinação da circulação do

oceano (ROBINSON, 1983; LEE et al., 2007; CHELTON et al., 2011). A influência dos vórtices na circulação de larga escala envolve não somente a transferência de energia e de propriedades associadas com o seu local de origem, como também impacta nos processos de mistura na coluna d'água (OLSON, 1991; LEE et al., 2007) e de interação oceano-atmosfera (DRIJFHOUT, 1990), além de armazenarem a maior parte da energia cinética dos oceanos (FU, 2006).

De acordo com sua polaridade, os vórtices podem ser divididos em duas classes, os ciclônicos e anticiclônicos, dependendo do sentido de rotação do fluxo. Vórtices ciclônicos, no Hemisfério Sul (Norte), giram no sentido horário (anti-horário) e são caracterizados por transportar águas frias (em relação ao meio), gerando um rebaixamento da superfície livre do mar. Já os vórtices anticiclônicos, também no Hemisfério Sul (Norte), giram no sentido anti-horário (horário) e transportam águas relativamente quentes, causando uma elevação da superfície livre do mar.

O deslocamento dos vórtices, de modo geral, apresenta um padrão quase zonal em diversas regiões nos oceanos, sendo que aproximadamente 76% dos vórtices oceânicos propagam-se predominantemente para oeste (CHELTON et al., 2011). Durante este deslocamento, os vórtices tendem a ser defletidos meridionalmente em direção aos polos no caso dos ciclônicos, e em direção ao equador, no caso dos anticiclônicos (MORROW et al., 2004; CHAIGNEAU et al., 2009; CHELTON et al., 2011). Outra característica dos vórtices anticiclônicos é que estes tendem a ter longos períodos de vida e a se propagarem por grandes distâncias (CHELTON et al., 2011). Nesta categoria se enquadram os vórtices gerados na retroflexão da CA, denominados vórtices das Agulhas, que são anticiclônicos e se propagam pelo OAS, cruzando-o de leste para oeste, por longos períodos (BYRNE et al., 1995; SCHOUTEN et al., 2000; CHELTON et al., 2011).

1.2. Características dos Vórtices das Agulhas

Conhecida como a região mais energética dos oceanos do Hemisfério Sul (HS), a retroflexão da CA também é considerada a região de formação dos vórtices mais energéticos do mundo (OLSON e EVANS, 1986; LUTJEHARMS e VAN BALLEGOOYEN, 1988), exercendo um importante papel na circulação oceânica do OAS, uma vez que os vórtices de mesoescala são considerados a maior fonte de ECT dos oceanos (FU, 2006).

Os vórtices das Agulhas dominam a energia turbulenta do giro subtropical do OAS. O aporte de energia de um único vórtice proveniente da CA para o OAS é equivalente a 7% da energia anual oriunda do vento que é transferida para o giro subtropical (comparativo feito na faixa de latitude compreendida entre 10°S e 45°S) (OLSON e EVANS, 1986). A energia de dois anéis da CA é comparável à energia turbulenta calculada para toda bacia do OAS, quando descontada a influência direta dos vórtices das Agulhas (OLSON e EVANS, 1986).

O diâmetro de um vórtice oriundo da zona de retroflexão da CA varia entre 200 e 380 km (OLSON e EVANS, 1986; DE RUIJTER et al., 1999), não ultrapassando os 300 km em média e atingindo profundidades superiores a 1000 m. Quando comparados em volume com um vórtice de núcleo quente da Corrente do Golfo, com $3,9 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$, constata-se que os vórtices das Agulhas apresentam um volume cerca de 5 vezes maior, com $19,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$. Richardson et al. (2003) descreveram que um único vórtice das Agulhas transporta entre 0.5 e 1.5 Sv, podendo chegar a 9 Sv o transporte total por ano.

O tempo de residência dos vórtices provenientes da CA no OAS foi estimado de 3 a 4 anos (BYRNE et al., 1995; DENCAUSSE et al., 2010a) e a frequência de liberação desses vórtices varia de 4 a 6 feições por ano (RICHARDSON, 2007). O processo de liberação dos vórtices pela retroflexão da Corrente das Agulhas é modulado pelo Pulso de Natal (*Natal Pulse*; LUTJEHARMS, 1988), por alterações no padrão de ventos no Oceano Índico (BEAL et al., 2011), fenômenos atmosféricos como ENOS, Dipolo do Oceano Índico (DE RUIJTER

et al., 2004) e feições provenientes de outras regiões do mesmo oceano, como o Canal de Moçambique e a Corrente Leste de Madagascar (SCHOUTEN et al., 2002).

Após deixar a região de origem, os vórtices das Agulhas tendem a se propagar para noroeste até alcançar a Cordilheira de Walvis, quando adquirem uma rota essencialmente para oeste (FU, 2006; PILO, 2013). Durante o deslocamento a velocidade de propagação dessas feições é afetada basicamente por três fatores: a autopropulsão (deriva intrínseca à feição), a topografia de fundo e os fluxos circunvizinhos (AZEVEDO e MATA, 2010). A autopropulsão da feição é responsável por gerar até metade das velocidades translacionais dessas estruturas, a topografia de fundo e os fluxos circunvizinhos são responsáveis pela outra metade (BYRNE et al., 1995). Em relação à topografia de fundo, os vórtices que se deslocam sobre uma topografia profunda e mais suave tendem a ser mais rápidos do que os que se deslocam sobre águas mais rasas em topografias mais acentuadas (BYRNE et al., 1995).

Fu (2006) observou a influência dos fluxos circunvizinhos e descreveu a existência de uma nítida demarcação entre maiores velocidades (4-6 km dia⁻¹) a norte de 30°S e menores velocidades (0-2 km dia⁻¹) ao sul desta latitude. Essa transição ocorre ao longo de uma crista na topografia, que divide o giro subtropical do OAS em duas regiões. Na região sul do giro a direção média dos fluxos de superfície é para leste e na parte norte do giro é para noroeste. Uma vez que a velocidade de propagação intrínseca de um vórtice anticiclônico tem uma componente para oeste (CUSHMAN-ROISIN et al. 1990), esta é reforçada pelo fluxo médio na parte norte do giro e compensada pelo fluxo médio na parte sul.

1.3. Vazamento das Agulhas

O Vazamento das Agulhas (Figura 1.4) é resultado de uma complexa interação, altamente não-linear, entre a forte corrente de contorno oeste ao longo da costa sul da África, a CA, e uma vigorosa atividade de mesoescala, no sul do

continente africano, onde a CA é retrorrefletida (10°E e 20°E) de volta para o OI (BIASTOCH et al., 2009). Como parte do processo de retroflexão, são formadas estruturas na forma de anéis e filamentos, que por sua vez são lançadas no OAS, transportando águas quentes e salinas do Índico para o Atlântico (BYRNE et al., 1995; LUTJEHARMS, 1996; BIASTOCH et al., 2009). Apesar de representar apenas entre 10 e 20% do transporte da CA, o Vazamento das Agulhas constitui uma das principais fontes de água para o OAS, representando entre 30 e 50% do transporte do giro subtropical (GORDON e LUTJEHARMS, 1987; GORDON et al., 1992; DE RUIJTER et al., 1999; DONNERS e DRIJIFHOUT, 2004).

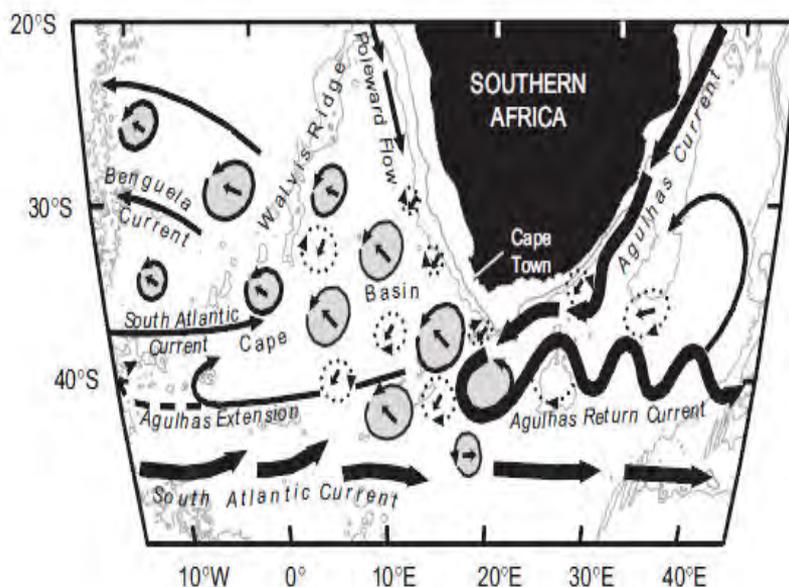


Figura 1.4 – Mapa esquemático simplificado da circulação de águas intermediárias na Bacia do Cabo, com base em trajetórias de flutuadores e outros dados. Fonte: Adaptado de Richardson (2007).

A variabilidade espaço-temporal do Vazamento das Agulhas, é associada ao campo de vento de larga escala, em particular, com a posição dos ventos de oeste do HS. Os ventos de oeste por sua vez estão relacionados à latitude da Frente Oceânica Subtropical (FST), que separa o giro subtropical da CCA. Assim, se os ventos de oeste deslocam-se para sul a passagem entre o

continente africano e a FST expande e o escoamento entre o OI e o OAS aumenta (DE RUIJTER, 1982; BIASTOCH et al., 2009). O contrário acontece se os ventos de oeste se deslocam para o norte (BEAL et al., 2011).

Dados de satélite e hidrográficos mostram uma expansão do giro subtropical do OI e uma tendência de aquecimento do sistema das Agulhas, gerando assim um deslocamento para sul da FST (BEAL et al., 2011; ROUAULT et al., 2009). Em decorrência desse deslocamento ocorre um aumento na ECT no Atlântico sudeste, indicando um aumento no número de vórtices associados ao Vazamento das Agulhas (ROUAULT et al., 2009).

Recentemente, estudos utilizando modelos de alta resolução da circulação geral do oceano (e.g. BIASTOCH et al., 2009) encontraram um aumento do Vazamento das Agulhas nas últimas décadas, o que estaria associado a alterações no padrão dos ventos de oeste de médias latitudes (30°S e 60°S). Alguns autores (BIASTOCH et al., 2009; BEAL et al., 2011 e LEE et al., 2011) descrevem que a intensificação dos ventos de oeste é tida como o principal regulador do transporte de águas do Vazamento das Agulhas.

Nesse contexto, Gonçalves (2012) investigou o impacto das condições atmosféricas sobre a intensificação do Vazamento das Agulhas. O autor sugeriu um aumento de 1,1 Sv por década no transporte entre o oceano Índico e o Atlântico Sul, entre 1960 e 2010. Este fato estaria relacionado à migração da FST para sul, ocasionada pelo deslocamento em direção ao polo, dos ventos de oeste. Já Biastoch et al. (2009) e Rouault et al. (2009) estimaram esse aumento em 1,4-4 Sv por década, concordando com a hipótese de que a migração para o sul dos ventos de oeste do HS tem intensificado o transporte do Índico para o Atlântico nas últimas décadas (BIASTOCH et al., 2009; LEE et al., 2011).

Outro papel importante exercido pelos vórtices, além de influenciar na dinâmica oceânica, ocorre nos processos de interação oceano-atmosfera. Mudanças no volume de água transportada do oceano Índico para o Atlântico geram também

mudanças na circulação atmosférica do Atlântico Sul. Haarsma et al. (2009) investigaram, com o uso de um modelo acoplado oceano-atmosfera, o impacto da interrupção do Vazamento das Agulhas no Atlântico Tropical. Os autores descrevem que, como parte da resposta atmosférica, ocorre um deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), gerando uma redução no bombeamento de Ekman na região Equatorial. Essa mudança no padrão da ZCIT é associada a uma banda de anomalia negativa de precipitação e, conseqüentemente, aumento da salinidade no Atlântico Sul Tropical.

1.4. Sensoriamento Remoto e Vórtices de Mesoescala

Os primeiros satélites utilizados na observação de feições de mesoescala utilizavam imagens do infravermelho para caracterizá-las a partir de intensos gradientes térmicos. Produtos derivados destes sensores, como o sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), são utilizados no estudo dos processos de mesoescala dos oceanos de todo o globo e das características meteo-oceanográficas associadas a estes (e.g. LENTINI et al., 2002). No entanto, o uso de sensores ópticos, que operam na faixa do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, como o AVHRR, possui limitações para a identificação de feições de mesoescala. Nestas regiões do espectro, o vapor d'água que constitui as nuvens funciona como uma espécie de barreira física à energia eletromagnética, impedindo a aquisição dos dados de TSM em determinados locais. Além disso, a presença de vórtices também pode ser mascarada em regiões onde os valores de TSM apresentam-se bastante homogêneos e devido à interação oceano-atmosfera, que resfria rapidamente as águas superficiais mais quentes contidas no interior dos vórtices (SCHOUTEN et al., 2000).

Em contrapartida, os sensores altimétricos realizam medidas diretas da altura do nível do oceano sem sofrer efeito de nuvens, uma vez que estes sensores operam na região de micro-ondas. O conhecimento sobre a variabilidade dos oceanos, que resultou da utilização dos sensores altimétricos, inclui aspectos

do campo de fluxos turbulentos e de larga escala, tais como ondas planetárias, ciclo sazonal da circulação em escala de bacia e conteúdo de calor nos oceanos (SCHARFFENBERG e STAMMER, 2010). O uso da altimetria para monitoramento da circulação vem sendo cada vez mais importante, especialmente para observação dos campos energéticos dos vórtices de mesoescala (e.g. DE RUIJTER et al., 1999; CHELTON et al., 2011). As primeiras descrições em escala global sobre esse tipo de energia só foram possíveis com o advento dos sensores altimétricos no início dos anos 1990, por exemplo, JASON-1 e Topex/Poseidon (e.g. STAMMER, 1997; STAMMER e WUNSCH, 1999). As observações feitas por satélites altimétricos permitem examinar esses processos e suas associações com a circulação oceânica e o clima (JIA et al., 2011).

Outros produtos provenientes de imagens de altimetria, como anomalia da velocidade geostrófica, também são muito utilizados para estudos de feições de mesoescala. A partir de dados de anomalia da velocidade geostrófica pode-se calcular os valores de ECT, que estão altamente relacionados com vórtices de mesoescala, como descrito na seção anterior. No entanto, é importante ressaltar que ainda existe uma grande dificuldade em separar a ECT proveniente de vórtice e de ondas de Rossby (CHELTON et al., 2007; OLIVEIRA, 2010), portanto, para este estudo os valores de ECT serão interpretados como feições de mesoescala, sem distinção entre vórtices e ondas de Rossby.

O monitoramento de feições de mesoescala não é algo trivial. Durante o deslocamento os vórtices interagem com o meio, podendo aumentar ou diminuir de tamanho. Um processo bastante comum durante o trajeto dessas feições é a divisão dos vórtices em feições menores (DENCAUSSE et al., 2010a). Schouten et al. (2000) destacam que dos 20 vórtices estudados entre 1993 e 1996, 13 novas feições foram geradas por divisão dos vórtices originais. Outra dificuldade associada ao monitoramento dessas feições é o decaimento da anomalia da superfície ao longo do tempo e o deslocamento no sentido do

equador, que pode ocasionar uma redução de até 25% na intensidade do sinal na superfície do mar (SCHOUTEN et al., 2000). Nesse sentido, o uso de ferramentas estatísticas associadas a dados obtidos por satélites é uma ótima alternativa para o estudo da variabilidade dessas feições.

1.5. Variabilidade climática do Oceano Atlântico Sul

O entendimento dos mecanismos de variabilidade climática é de fundamental importância para o conhecimento da dinâmica dos oceanos e para o aperfeiçoamento de previsões globais. A variabilidade climática, em escalas maiores do que anual, pode ser resultante da interação (transporte e troca de energia) entre o oceano e a atmosfera. A dinâmica entre ambos os sistemas é acoplada através de processos de trocas na interface comum aos meios (STERL e HAZELEGER, 2003). Para entender a variabilidade climática, o estudo da variabilidade comum aos dois sistemas, e sua relação nos processos de troca é relevante.

Os principais mecanismos envolvidos na variabilidade da TSM no OAS são descritos através do acoplamento entre a TSM e a pressão ao nível do mar (PNM). Venegas et al. (1997) investigando os principais modos de variabilidade entre a TSM e a PNM identificaram as principais oscilações com períodos de aproximadamente 14-16 anos, 6-7 anos e 4 anos, somando próximo a 90% do quadrado da covariância total entre as duas variáveis. Os autores descrevem que o primeiro modo de variabilidade apresentou um forte acoplamento entre a interface oceano-atmosfera em escala de tempo decenal (14-16 anos). Esse padrão está associado às variações na intensidade do anticiclone subtropical na atmosfera que são acompanhadas por flutuações da estrutura norte-sul do dipolo de TSM do OAS. Posteriormente, esse padrão também foi encontrado por Sterl e Hazeleger (2003), como mostra a Figura 1.5.

Sterl e Hazeleger (2003) descrevem os principais mecanismos envolvidos na variabilidade da TSM no OAS, sugerindo o padrão acoplado entre essa variável e a PNM como principal modo de oscilação. Esse acoplamento consiste em um

padrão de TSM com fortes gradientes de nordeste para sudoeste e um monopolo da PNM centrado em 15°W e 45 °S. Os ventos anômalos gerados pelo monopolo de PNM são os responsáveis por esse padrão de TSM, que é modulado por meio de anomalias no fluxo de calor latente e aprofundamento da camada de mistura. Dessa forma, os autores sugerem que a variabilidade acoplada no OAS consiste em anomalias na circulação atmosférica que induzem anomalias na TSM, que ocorrem através dos fluxos anômalos de calor latente e do aprofundamento da camada de mistura induzido pelo vento. Esse padrão também foi identificado por Haarsma et al. (2005), que atribuíram a variabilidade da TSM à troca de fluxos de calor turbulento, transporte de Ekman e à mistura induzida pelo vento.

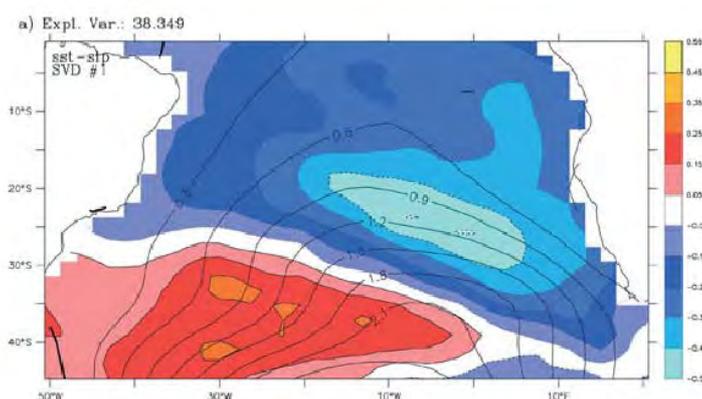


Figura 1.5 – Primeiro modo de variabilidade acoplada entre a temperatura da superfície do mar (TSM - cores em K) e a pressão atmosférica ao nível do mar (contornos em hPa) no OAS. A covariância explicada pelo modo é de 38,35%. Estrutura norte-sul do dipolo de TSM do OAS. Fonte: Adaptado de Sterl e Hazeleger (2003).

Em escala de bacia, mudanças no padrão de TSM estão associadas às variações da PNM, que por sua vez, têm impacto na intensidade do transporte da circulação do giro. O trabalho pioneiro de Witter e Gordon (1999) descreveu a variabilidade interanual do giro subtropical do Atlântico Sul (GSAS) e da circulação regional próxima às bordas leste e oeste do OAS. O primeiro modo da variabilidade interanual é associado à variação zonal da posição do giro subtropical, e está ligado ao padrão de ventos locais. Essa variação coincide

com a variação da energia associada ao corredor de vórtices das Agulhas. O que sugere que o incremento de salinidade e vorticidade para o GSAS por meio dos vórtices das Agulhas é parcialmente controlado pelas variações interanuais do vento forçando a circulação de larga escala. Os autores descrevem ainda que variações na intensidade da circulação geostrófica da parte nordeste do giro desempenham um papel fundamental na dispersão dos vórtices das Agulhas. Os vórtices propagam-se para noroeste em anos em que o giro se estende mais a leste, e quando o giro é deslocado para o oeste eles propagam-se para oeste. Já o segundo modo foi associado à variabilidade interanual da posição meridional da CBM, influenciada pela energia dos vórtices da CB. Os autores concluem ainda, que embora as variações interanuais associadas a ambos os modos contribuam significativamente para a variabilidade total da circulação do Atlântico Sul, as oscilações em escalas de tempo sazonais ainda são maiores.

Mais recentemente, Vianna e Menezes (2011) estudaram a variabilidade do giro subtropical do Atlântico Sul. Os autores observaram um alargamento e intensificação do giro, com fortes variações interanuais, concordando com estudos anteriores (e.g., WITTER e GORDON, 1999; GARNIER et al., 2003; GRODSKY e CARTON, 2006a, 2006b) que mostram que o OAS possui uma forte variabilidade interanual. Essa foi responsável por 25% da variância, seguida pela intrasazonal com 22% e anual com 18%. Os autores descrevem que o modo intrasazonal é mais importante no Atlântico oeste, entre 24°S e 30°S, na CBM e na retroflexão da CA, coincidindo com as regiões de maiores valores de ECT.

Como descrito anteriormente, a variabilidade do OAS é influenciada por meio de trocas interoceânicas, como por exemplo, o Vazamento das Agulhas. Grodsky e Carton (2006a, 2006b) estudaram a variabilidade interanual da anomalia da superfície do mar do giro subtropical e encontraram que o período de 4-5 anos explica 20% da variabilidade total. Os autores relatam que um dos processos que forçam a variação interanual do giro é a incorporação dos

vórtices das Agulhas ao giro, como sugerido por Byrne et al. (1995) pela primeira vez. Os autores sugerem ainda que a variabilidade interanual do corredor de vórtices das Agulhas está associada às ondas de Rossby geradas no Atlântico tropical.

A variabilidade oceânica e atmosférica também pode ser influenciada remotamente, por meio de teleconexões atmosféricas. O El Niño – Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno acoplado resultante da interação oceano-atmosfera no Oceano Pacífico Equatorial. Na fase positiva do ENOS (*El Niño*), o Pacífico Equatorial é dominado por anomalias positivas de TSM enquanto que na fase negativa (*La Niña*), o domínio passa a ser de anomalias negativas. O efeito remoto do ENOS é apontado em várias regiões do planeta, influenciando o clima por meio de teleconexões atmosféricas em escala temporal interanual. Diversos trabalhos (e.g., VENEGAS et al., 1997; CAMPOS et al., 1999) descrevem a influência da ENOS na variabilidade do OAS. Venegas et al. (1997) encontraram um modo acoplado, entre a TSM e a PNM, de variabilidade (temporal e espacial) fortemente correlacionada com o fenômeno ENOS, oscilando na escala interanual (~ 4 anos) e representando 6% da covariabilidade total para o OAS. Outro fenômeno climático que influencia a variabilidade do OAS é a Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation - AAO*), por estar fortemente relacionada à variabilidade do Vazamento das Agulhas será descrita com maiores detalhes na seção seguinte.

1.5.1. Oscilação Antártica

A AAO é o modo de variabilidade atmosférica predominante no HS (THOMPSON e WALLACE, 2000), e representa uma gangorra de oscilação de pressão na superfície do mar entre altas e médias latitudes. A variabilidade da AAO é calculada através do índice da AAO, que representa a diferença de pressão atmosférica entre médias e altas latitudes (GONG e WANG, 1999), caracterizando a intensificação e enfraquecimento periódicos do “cinturão” de ventos de oeste troposféricos que circunda o continente Antártico.

Anomalias positivas no índice indicam uma intensificação da baixa pressão sobre a Antártica e da alta pressão nas latitudes médias, resultando em um fortalecimento dos ventos de oeste em superfície (YUAN e LI, 2008). Esse padrão também pode ser identificado através do uso da técnica de Análise de Componentes Principais aplicado ao campo de altura geopotencial em 700 hPa. O primeiro modo é representado pela AAO e que explica cerca de 47% da variância total da altura geopotencial em 700 hPa para o HS (THOMPSON e WALLACE, 2000).

Nos últimos 30 anos foi observada uma tendência positiva no índice de AAO, que resulta no fortalecimento e deslocamento em direção ao polo dos ventos de oeste (THOMPSON e SOLOMON, 2002). Essa tendência positiva também provoca um deslocamento para sul e uma intensificação da circulação circumpolar, bem como uma expansão para sul das condições atmosféricas mais quentes e úmidas (HALL e VISBECK, 2002). Hall e Visbeck (2002) demonstram que na atmosfera, valores positivos da AAO estão associados à intensificação dos ventos de oeste em aproximadamente 55°S e um enfraquecimento em aproximadamente 35°S, o que corresponde a quase toda variabilidade da média zonal dos ventos em superfície nessa região. Ainda para o transporte de calor meridional em direção ao polo, para valores positivos da AAO, há um incremento de 15% ao redor de 30°S e uma redução de aproximadamente 20% na região circumpolar.

Estudos indicam que a AAO não apenas influencia o clima na região Antártica, mas também os oceanos subtropicais (THOMPSON e WALLACE, 2000; JIA et al., 2011). Modelos acoplados oceano-atmosfera sugerem que grande parte da variabilidade do Atlântico Sul, de 30°S em direção ao polo, tem uma relação direta com a AAO (HALL e VISBECK, 2002). Jia et al. (2011) enfatizam o papel do AAO na modulação interanual da ECT no OI sudeste. Os autores demonstram que a atividade de mesoescala na região é fortemente influenciada pela AAO, com sua máxima correlação quatro meses após um

evento forte de AAO. Os autores descrevem ainda que anomalias positivas (negativas) no índice de AAO correspondem a baixos (altos) valores de ECT.

Um estudo de modelagem numérica (GONÇALVES, 2012) mostrou que a tendência positiva da AAO também pode estar associada a um aumento na TSM na região da retroflexão da CA. O aumento no índice da AAO estaria também relacionado à intensificação dos ventos de oeste, que são tidos como o principal regulador do transporte de águas do Vazamento das Agulhas (BIASTOCH et al., 2009; BEAL et al., 2011 e LEE et al., 2011). No Atlântico Sul sudoeste, Gherardi et al. (2010) encontraram correlações significativas entre o IOA e anomalias de TSM em escalas de variabilidade interanual.

1.6. Motivação e Justificativa

A importância do Vazamento das Agulhas na AMOC e, conseqüentemente, na circulação termohalina global, foi investigada em diversos estudos (e.g. WEIJER et al., 2002; BIASTOCH et al., 2008; 2009; HAARSMA et al., 2009; BEAL et al., 2011). No entanto, a influência da atividade turbulenta associada a essas feições de mesoescala na circulação geral do Atlântico e na interação oceano-atmosfera ainda é pouco conhecida.

O estudo da variabilidade do OAS tem sido realizado levando em conta apenas variáveis como TSM, pressão atmosférica e vento (e.g. VENEGAS et al., 1997; STERL e HAZELEGER, 2003), desconsiderando fontes de energia de origem remota, como os vórtices das Agulhas. Assim considerar a entrada desses vórtices no OAS significa adicionar outra fonte de energia e vorticidade pouco investigada até o momento.

O presente estudo investiga a variabilidade da ECT, no domínio do espaço e da frequência, associada às feições de mesoescala no OAS a partir de dados derivados da altura da superfície do mar. Também será dada uma atenção especial a como essa variável (ECT) covaria com a anomalia do nível do mar (ANM) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM).

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é investigar, através de ferramentas estatísticas, a variabilidade espaço-temporal da energia cinética turbulenta (ECT) no Oceano Atlântico Sul em diferentes frequências de oscilação (escalas de tempo) e sua covariância com a circulação de larga escala com base em dados de satélites.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Analisar a influência das feições de mesoescala provenientes do Vazamento das Agulhas na variabilidade da ECT no OAS, em diferentes frequências de tempo, e como esses padrões se propagam no espaço.
- Verificar a influência da Oscilação Antártica na variabilidade da ECT no OAS.
- Caracterizar os principais padrões de covariância entre a ECT e a anomalia do nível do mar, anomalia da velocidade geostrófica meridional.
- Identificar e descrever a variabilidade acoplada, no domínio espacial e da frequência, da atividade turbulenta de mesoescala e a circulação oceânica nas seguintes regiões: Vazamento das Agulhas, Corredor de Vórtices das Agulhas, Corrente do Brasil e Confluência Brasil-Malvinas.

1.8. Área de Estudo

A área de estudo corresponde à região do OAS subtropical, inserida entre os paralelos de 20°S e 45°S e meridianos de 60°W e 25°E. Considerando um padrão de larga escala, o regime de ventos dominante nessa região são os ventos alísios de SE e os ventos de oeste.

Os ventos alísios de SE são sistema de ventos tropicais que sopram do centro de alta pressão, Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), em direção ao centro de baixa pressão no equador, formando uma das maiores componentes da circulação atmosférica global. A ASAS é um centro semipermanente de alta pressão, com circulação anticiclônica que possui variabilidade sazonal associada ao deslocamento meridional e zonal desse centro. Essa migração está associada à variação da incidência de radiação solar no HS (WAINER e TASHETO, 2006). Durante o verão o centro da ASAS é localizado mais ao sul e a leste, em aproximadamente 5°W e 32°S. No inverno, o centro é deslocado para norte e para oeste, localizado aproximadamente em 10°W e 27°S (PETERSON e STRAMMA, 1991). Em médias latitudes (30°S a 60°S) os ventos dominantes são os ventos de oeste, sendo um padrão muito importante para o HS. Conhecido como “cinturão” de ventos de oeste troposféricos que circunda o continente Antártico. Esses ventos atuam como um regulador do transporte de água, na camada de mistura, do OI para o Atlântico (DE RUIJTER, 1982).

O padrão de divergência dos ventos em baixos níveis da atmosfera, caracterizado pelos alísios em baixas latitudes e os ventos de oeste em médias latitudes, são tidos como a principal forçante da circulação superficial dos oceanos. Ao soprar de SE o transporte induzido pelos alísios impulsiona as correntes para oeste que, por continuidade tendem a estabelecer um padrão de circulação na forma de um giro, conhecido como giro subtropical do Atlântico Sul (GSAS).

O GSAS é centrado em aproximadamente 30°S e é limitado ao norte pela Corrente Sul Equatorial (CSE), ao sul pela Corrente Sul Atlântica (CSA), a oeste pela CB e a leste pela Corrente de Benguela (CBe). A CSE flui para oeste em direção à América e bifurca-se em dois ramos, um mais forte ao longo do equador que dá origem à Corrente Norte do Brasil, que flui em direção ao HN para se tornar a Corrente das Guianas, e outro mais fraco, que forma a CB (PETERSON e STRAMMA, 1991).

A CB é a corrente de contorno oeste associada ao GSAS, e origina-se ao sul de 10°S a partir do ramo mais setentrional da CSE (SILVEIRA et al., 1994). Esta é considerada a mais fraca dentre as demais correntes de contorno oeste (STRAMMA et al., 1990). A CB flui para sul ao longo da costa brasileira orientando-se de acordo com a linha de costa até encontrar a Corrente das Malvinas (CM), entre as latitudes de 33°S e 38°S, onde ambas são defletidas ao largo da costa em direção à África para tornar-se a CAS, próximo a 45°S (OLSON et al., 1988; SARACENO et al., 2004). A CM é o ramo da CCA que flui para norte carregando águas frias ao longo da costa da Argentina até encontrar-se com a CB ao largo da desembocadura do Rio da Prata. A região de encontro destas duas correntes é chamada de Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e é conhecida por ser uma região de alta atividade de mesoescala. A CAS flui para leste, paralela à CCA, até alcançar a região da retroflexão da CA advinda do Índico. Nessa região a CAS se separa da CCA e desvia-se para norte onde irá alimentar a CBe (STRAMMA e PETERSON, 1991). A CBe é a corrente de borda leste do Atlântico Sul que flui para norte ao longo da costa sudoeste da África em direção ao equador, separando-se da costa entre 24 e 30° S para fechar o giro do Atlântico Sul.

Apesar de ser uma feição bastante descrita na literatura, trabalhos recentes (e.g. VIANNA e MENEZES, 2011) mostram que o GSAS é, na verdade, uma célula dupla de circulação. Essa estrutura foi estabelecida pela primeira vez pelo trabalho pioneiro de Tsuchiya (1985) e posteriormente confirmada por Memery et al. (2000). A célula sul é descrita como um padrão quase zonal,

centrado próximo à latitude de 33°S entre 50°W e 8°W a leste da Cadeia Meso-Atlântica. Limitada pela recém descoberta Corrente Tristão da Cunha/Corrente Santa Helena (CTC/CSH) e pela frente subtropical norte (próxima a 35°S) ao sul e pelo Corredor de Vórtices das Agulhas ao norte. Já o giro norte posicionado no lado oeste do Atlântico (centrado em aproximadamente 24°S e 38°W) e limitado ao sul pelo giro sul e ao norte pela CSE.

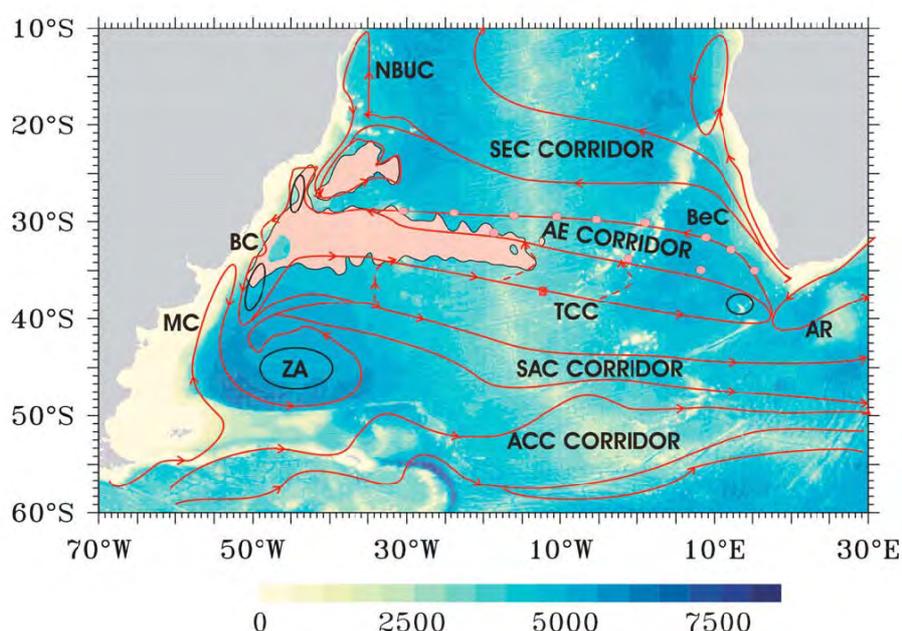


Figura 1.6 – Esquema das correntes na camada superficial do Oceano Atlântico Sul. ACC, Corrente Circumpolar Antártica (Antarctic Circumpolar Current); AR, Retroflexão da Corrente das Agulhas (Agulhas Retroflexion); AE, Corredor de Vórtices das Agulhas (Agulhas Eddy Corridor); BC, Corrente do Brasil (Brazil Current); BeC, Corrente de Benguela (Benguela Current); MC, Corrente das Malvinas (Malvinas Current); NBUC, North Brazil Undercurrent; SAC, Corrente Sul Atlântica (South Atlantic Current); SEC, Corrente Sul Equatorial (South Equatorial Current); TCC, Corrente Tristan da Cunha/Corrente de Santa Helena (Tristan da Cunha (Saint Helena) Current); ZA, Anticiclone Zapiola (Zapiola Anticyclone).
Fonte: Adaptado de Vianna e Menezes (2011).

2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no presente trabalho compreende a análise estatística dos padrões de variância e covariância entre campos de ECT, ANM e AVGM. Uma descrição detalhada da área de estudo, das variáveis e dos métodos utilizados é apresentada a seguir.

2.1. Materiais

Na Tabela 2.1 podemos visualizar um resumo das variáveis oceânicas utilizadas. Essas variáveis foram escolhidas de acordo com sua importância para alcançar os objetivos do estudo e suas características de resolução espacial e temporal, que serão descritas com detalhes a seguir.

Tabela 2. 1 - Dados de anomalia do nível do mar (ANM), anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) e zonal (AVGZ) e índice de Oscilação Antártica (AAO) empregados no presente estudo.

Variável	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Período	Fonte
ANM	0.33 x 0.33°	7 dias	out/92-dez/11	AVISO
AVGM	0.33 x 0.33°	7 dias	out/92-dez/11	AVISO
AVGZ	0.33 x 0.33°	7 dias	out/92-dez/11	AVISO
AAO	Unidimensional	Mensal	out/92-dez/11	CPC/NOAA

2.1.1. Anomalia da superfície do mar (ANM) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) e zonal

Os dados de anomalia do nível do mar (ANM) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) e zonal foram obtidos no site da *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data* (AVISO) e são produtos gerados pela *Ssalto/Duacs*, com suporte do *Centre National d'Etudes Spatiales*. Os dados correspondem a um produto derivado da combinação de medidas de altimetria de diferentes missões, como TOPEX/Poseidon, Jason-1 e 2 e também os satélites *European Remote Sensing* (ERS) 1-2 e ENVISAT da *European Space Agency* (ESA). Os dados de ANM são calculados com base

nas médias semanais de altura do nível do mar para o período entre 1993 e 1999 (7 anos). Dessa forma remove-se a altura média do nível do mar, a fim de eliminar as incertezas relacionadas ao geóide. Já a anomalia de velocidade geostrófica zonal (U'_g) e meridional (V'_g) são deduzidas a partir dos mapas de ANM e uma aproximação geostrófica (JIA et al., 2011), através das equações abaixo:

$$U'_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y} \text{ e } V'_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x} \quad (m \text{ s}^{-1}) \quad (2.1)$$

onde η' é ANM, g é a aceleração da gravidade e f é o parâmetro de Coriolis.

O conjunto de dados compreende o período de aproximadamente 19 anos, entre outubro de 1992 e dezembro de 2011. A resolução espacial é de $0.33 \times 0.33^\circ$ de latitude por longitude, e a resolução temporal é semanal (a cada 7 dias). Os conjuntos de dados estão disponíveis em: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/index.html>.

2.1.2. Índice de Oscilação Antártica (AAO)

O índice de AAO será empregado na etapa de correlação, para identificar padrões de teleconexões entre a variabilidade da anomalia da ECT no OAS e a circulação atmosférica na região Antártica. O AAO é calculado a partir do primeiro modo resultante da aplicação da técnica de funções ortogonais empíricas nos dados de anomalia de altura geopotencial em 700 hPa, a partir de 20°S em direção ao polo. Os dados compreendem o período entre out/1992 e dez/2011. A série de dados relativa a este índice pertence ao *Climate Prediction Center's* (CPC) do *National Weather Service* (NWS) e pode ser encontrada em: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao/ao.shtml.

2.2. Métodos

Primeiramente, a região de estudo foi definida e todos os dados foram recortados para os limites de 20° a 45°S e 60°W a 25°E. Inicialmente pretendia-se utilizar uma área maior do OAS, porém por questões de capacidade computacional a área teve que ser reduzida para otimizar o processamento.

Como forma de parametrizar as feições de mesoescala a ECT foi calculada. Para o cálculo foram utilizados os dados de anomalia da velocidade geostrófica, que representam a variabilidade associada ao campo médio de velocidades, gerada em sua maioria por vórtices e meandros. O método utilizado foi o mesmo proposto por Ducet et al. (2000), Swart et al. (2010) e Scharffenberg e Stammer (2010), o qual estima a ECT a partir dos dados de anomalia da velocidade geostrófica zonal (U'_g) e meridional (V'_g), conforme a equação abaixo:

$$ECT = \frac{1}{2} [U'_g{}^2 + V'_g{}^2] \text{ (m}^2\text{s}^{-2}\text{)} \quad (2.2)$$

onde ECT é a ECT por unidade de massa.

2.2.1. Métodos Estatísticos

Para averiguar a confiabilidade dos dados e sua concordância com estudos pretéritos as médias temporais foram calculadas para cada conjunto de dados. Para estudar os padrões espaciais e temporais foram utilizados três diferentes métodos estatísticos: 1) Funções Ortogonais Empíricas (*Empirical Orthogonal Functions* - EOF), 2) Decomposição em Valores Singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD) e 3) Método de Multitapers - Decomposição em Valores Singulares (*Multitaper Method – Singular Value Decomposition* - MTM-SVD). Ambos os métodos são técnicas estatísticas baseadas fundamentalmente em operadores matriciais. Tanto para a análise de um único campo, como de campos acoplados, os dados foram organizados em matrizes espaço-tempo, onde a informação de cada ponto de grade corresponde às diferentes colunas, e as linhas correspondem à variação no tempo, como mostra a matriz abaixo:

$$F_{np} = \begin{matrix} & \xrightarrow{\text{posições}} & & \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} & \begin{matrix} \text{mapa no tempo } t_1 \\ \downarrow \text{tempo} \end{matrix} & & \end{matrix} \quad (2.3)$$

A matriz F , n por p , contém todo o conjunto de dados, sendo n o tamanho da série de tempo e p o número de pontos de grade. Assim cada localização x_1, x_2, \dots, x_p é uma determinada posição ao longo do tempo t_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Para a análise dos campos acoplados (SVD e MTM-SVD) as séries temporais devem possuir os mesmos tempos t_i (os campos devem ter sido medidos simultaneamente) e a matriz F é construída da mesma forma, sendo que para MTM-SVD acoplada a segunda variável é adicionada a partir do t_i ($i = n + 1$). Dessa forma a matriz F passa a ser $2n$ por p . Por fim, para que as diferentes áreas e variáveis possam ser comparadas, todos os dados foram normalizados, conforme mostra a equação:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{S_x} = \frac{x'}{S_x} \quad (2.4)$$

onde z é a anomalia normalizada, x é o valor semanal, \bar{x} é a média climatológica da semana correspondente e S_x é o desvio padrão, também da semana correspondente. Como resultado, as unidades finais são adimensionais (WILKS, 2006).

2.2.1.1. Funções Ortogonais Empíricas

O método das EOFs é uma técnica estatística que identifica os principais padrões de variabilidade espacial e temporal, além de fornecer uma medida da importância relativa de cada padrão. Baseada em operações matriciais, a matriz covariância da variável a ser estudada é construída:

$$R = F^t F \quad (2.5)$$

e diagonalizada:

$$R = C\Lambda C^t \quad (2.6)$$

resultando em um conjunto de autovalores (Λ) e autovetores (C) correspondentes. Cada autovetor pode ser interpretado como um padrão espacial, ou seja, um mapa de covariância. Já o autovalor mostra a fração de variância total explicada pelo autovetor. A partir da projeção dos autovetores sobre o campo original dos dados são calculados os coeficientes de expansão

$$\alpha_j = F \times c_j \quad (2.7)$$

onde c_i é um vetor coluna da matriz C . Os coeficientes de expansão (ou séries temporais) são interpretados como o padrão temporal, ou seja, mostram como cada padrão espacial evolui no tempo. Assim como os autovetores são ortogonais no espaço os coeficientes de expansão são ortogonais no tempo.

$$C^t C = C C^t = I \quad (2.8)$$

onde I é a matriz identidade. Desse modo, o conjunto de um autovalor, um autovetor e uma série de coeficientes de expansão define um modo de variabilidade. O modo principal, relacionado ao maior autovalor, explica a maior fração da variância total, o segundo modo explica a maior fração da variância restante, e assim por diante. Mais detalhes do método podem ser encontrados em Bretherton et al. (1992) e Björnsson e Venegas (1997). As análises de EOF foram realizadas no MATLAB com o auxílio da função *princomp.m*.

2.2.1.2. Decomposição em Valores Singulares

A análise de SVD, assim como a EOF, é uma análise estatística que identifica os principais padrões variabilidade espacial e temporal, porém para campos de duas ou mais variáveis acopladas. O método é geralmente aplicado a dois campos de dados para identificar pares fortemente acoplados de padrões

espaciais, que explicam o máximo possível da covariância entre as duas variáveis. Similar a EOF, é construída uma matriz de covariância cruzada,

$$P = F_{v1}^t F_{v2} \quad (2.9)$$

e diagonalizada,

$$P = ULV^t \quad (2.10)$$

resultando em dois conjuntos (U e V) de vetores singulares (análogo aos autovetores, mas uma para cada variável) e um conjunto (L) de valores singulares (análogo aos autovalores). Cada par de vetor singular é associado a um valor singular, e juntos descrevem a fração de covariância quadrada entre as duas variáveis. O primeiro par de vetores singulares descreve a maior fração da covariância quadrada e cada par que sucede descreve uma fração máxima da covariância quadrada que não é explicada pelos pares anteriores (BRETHERTON et al., 1992). O coeficiente de expansão de cada modo é calculado projetando o respectivo vetor singular no campo de dados original,

$$E_1 = F_{v1}U \quad (2.11)$$

e

$$E_2 = F_{v2}V \quad (2.12)$$

Como resultado final, tanto os coeficientes de expansão quanto os vetores singulares são ortogonais entre si. O coeficiente de correlação entre os coeficientes expansão das duas variáveis indica quão fortemente relacionados são os padrões acoplados. Mais detalhes sobre a metodologia pode ser encontrado em Björnsson e Venegas (1997). As análises de SVD foram realizadas no MATLAB com o uso da função *svd.m*.

A representação dos padrões espaciais dos diferentes modos de EOF e SVD pode ser feitas de diversas formas, como mapas de correlação, de variância e pelos próprios autovetores. Como a interpretação dos valores de amplitudes dos

autovetores não é tão simples foram gerados mapas de correlação para facilitar a interpretação dos resultados. Os mapas de correlação (m_j) indicam o quão precisa a anomalia de cada ponto de grade pode ser prevista a partir da série temporal (coeficiente de expansão), além de prover uma medida da porcentagem da variância local explicada para cada modo a partir do quadrado do valor de correlação vezes cem (HOUGHTON e TOURRE, 1992). Equação para gerar o mapa de correlação:

$$m_j = F \times \alpha_j \quad (2.13)$$

e porcentagem de variância explicada:

$$var = 100 m_j^2 \quad (2.14)$$

onde m_j é mapa de correlação e α_j é a série de coeficiente de expansão.

2.2.1.3. Método de Multitaper – Decomposição em Valores Singulares

A MTM-SVD é uma técnica de estatística multivariada utilizada para isolar e reconstruir a componente oscilatória e "quase-oscilatória" do sistema. Descrita com detalhes por Mann e Park (1994; 1999), esta técnica combina o método de estimativa espectral, Método de Múltitaper (*Multi-Taper Method* - MTM), desenvolvido por Thomson (1982), com a análise de principais componentes, a SVD.

De forma geral, métodos estatísticos no domínio da frequência são restritos a uma única série de tempo, impossibilitando a análise espacial da variabilidade em uma determinada região. No entanto, a MTM-SVD é uma técnica estatística que consegue analisar múltiplas séries de tempo no domínio da frequência, tempo e espaço, caracterizando-se por combinar a detecção das principais frequências de oscilação, e sua descrição e evolução no espaço (CORREA-RAMIREZ e HORMAZABAL, 2012). Dessa forma, a variabilidade espacial

coerente pode então, ser associada com bandas de frequências estreitas e distintas (TOURRE e WHITE, 2006).

Inicialmente, a série temporal de cada ponto de grade é passada do domínio do tempo para o domínio do espectro, utilizando-se a técnica de MTM. Diferente de outras técnicas de análise espectral, a MTM reduz a variância das estimativas espectrais mediante o uso de um conjunto de janelas ortogonais, os “*Slepian Tapers*”, que atuam como um filtro passabanda ótimo (THOMPSON, 1982). O método multiplica cada série temporal pelo conjunto de janelas ortogonais (k), produzindo um conjunto de estimativas espectrais independentes, que quando combinadas produzem uma estimativa mais robusta do espectro de potência. Os “*Slepian Tapers*” possuem a propriedade de sua amplitude decrescer em direção as bordas, o que permite evitar incluir frequências fictícias, que são produzidas pela descontinuidade das séries de tempo (fenômeno de Gibbs).

Para este trabalho foi utilizado um conjunto de três janelas ortogonais ($k = 3$), através das quais foram computadas as estimativas espectrais independentes para a série temporal de cada ponto de grade (m_i). Cada série temporal foi multiplicada pelo conjunto de três tapers ortogonais, como mostra a equação:

$$Y_k^m(f) \quad (2.15)$$

onde k_l ($l = 1,2,3$) são os tapers, m_i ($i = 1, \dots, M$) são os pontos de grade e f a frequência. Para cada frequência são calculadas três estimativas espectrais para cada ponto de grade M , que são organizadas numa matriz $M \times 3$:

$$A(f) = \begin{bmatrix} Y_1^1(f) & Y_2^1(f) & Y_3^1(f) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_1^M(f) & Y_2^M(f) & Y_3^M(f) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Para cada matriz $A(f)$ é aplicado o método de SVD. Dessa forma, o primeiro modo da decomposição é proporcional à variância contida no sinal mais significativo detectado nos dados, dentro de uma faixa estreita em torno desta frequência.

A partir dessas informações, o espectro de variância fracional local (Local Fractional Variance - LFV) é então construído através dos valores de porcentagem de variância explicada pelo primeiro modo de cada frequência, com os respectivos níveis de significância estatística obtidos por um teste de Monte Carlo (MANN e PARK, 1999). Dessa forma, as escalas de tempo dominantes podem ser identificadas através de picos de frequências altamente significativos. Posteriormente, o primeiro modo espacial e espectral da decomposição em valores singulares é então utilizado para a reconstrução do padrão espacial e temporal associado à frequência selecionada. Uma descrição detalhada sobre a técnica pode ser encontrada em Mann e Park (1999) e Correa-Ramirez e Hormazabal (2012). Toda a análise de MTM-SVD foi realizada no MATLAB utilizando o código disponibilizado por Correa-Ramirez e Hormazabal (2012).

Devido à alta variabilidade climática ao longo da área de estudo e à análise de MTM-SVD identificar apenas oscilações significativas estatisticamente que são comuns a todos os pontos de grade (VENEGAS e DRINKWATER, 2001) foram gerados espectros de LFV “regionais”, para áreas menores dentro do OAS. As áreas foram definidas de acordo com os objetivos do estudo, a fim de identificar a variabilidade mais próxima da realidade de cada região. Para estudar a influência do Vazamento das Agulhas foram gerados LFVs da região do Corredor de Vórtices das Agulhas (24° - 36° S e 39° W- 13° E), do Vazamento das Agulhas (33° - 43° S e 10° - 25° E) e de toda área de estudo (entre 20° - 45° S e 25° E- 60° W). Já para descrever a variabilidade acoplada os LFVs foram construídos para as regiões de maiores valores médios de ECT: Vazamento das Agulhas (33° - 43° S e 10° - 25° E), Corredor de Vórtices das Agulhas (24° - 36° S e 39° W- 13° E), Corrente do Brasil (23° - 34° S e 40° - 50° W) e Confluência Brasil-Malvinas (36° - 43° S e 38° - 54° W), como mostra a Figura 2.1.

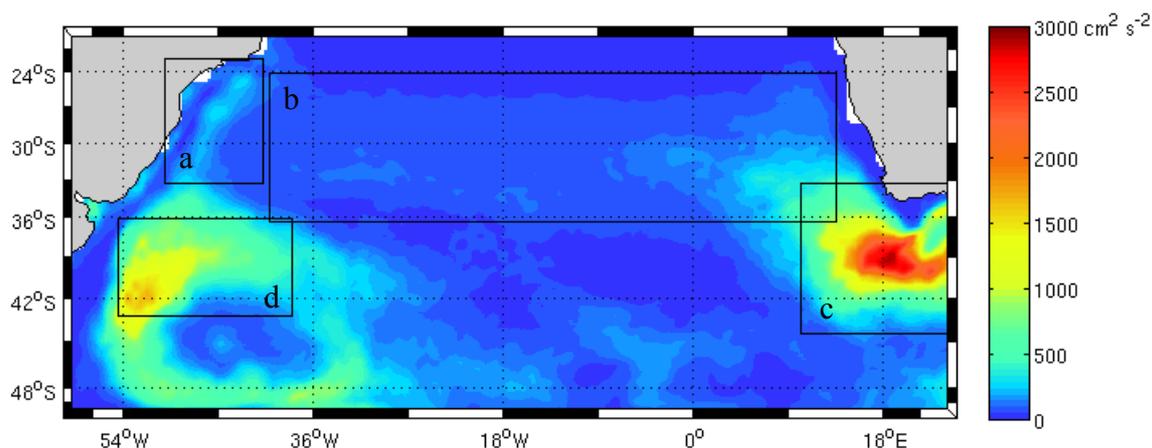


Figura 2.1 – Campo médio da ECT para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm^2s^{-1} . (a) região da Corrente do Brasil. (b) região do Corredor de Vórtices das Agulhas. (c) região do Vazamento das Agulhas. (d) região da Confluência Brasil-Malvinas.

Por fim, é importante ressaltar que ambos os métodos estatísticos utilizados neste trabalho separam os dados em modos estatísticos de variabilidade, sendo primeiramente modos dos dados e não necessariamente modos físicos de variabilidade. A priori os modos estatísticos não possuem relação com os padrões físicos de variabilidade observada, porém, muitas vezes esses modos representam a variabilidade associada a um mecanismo físico, que pode ser total ou parcial.

2.2.1.4. Correlação cruzada

Visando detectar a influência remota da AAO na variabilidade da ECT na região de estudo foram realizadas correlações cruzadas. A série temporal do índice AAO foi correlacionada com as séries temporais (de cada ponto de grade) reconstruídas para as frequências de variabilidade, obtidas pelo método da MTM-SVD, mais associada ao Vazamento das Agulhas e Corredor de Vórtices das Agulhas. Para tal, o índice AAO foi fixado e as séries temporais da ECT deslocadas temporalmente. A análise de correlação cruzada foi realizada no software MATLAB considerando o intervalo de confiança de 95%. O coeficiente de correlação cruzada (r_{xy}) foi obtido através da equação:

$$r_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.17)$$

onde k é a defasagem de tempo (*lag*), x e y são as duas séries de tempo, c_{xy} é o coeficiente de covariância cruzada, σ é o desvio padrão das séries temporais.

O coeficiente de covariância cruzada c_{xy} foi estimado por:

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{P} \sum [(x_t - \bar{x}) \cdot (y_{t+m} - \bar{y})] \quad (2.18)$$

para, $t_0 = 1$ a $t_n = P - 1$; $m = 0$ para valores de k positivos e,

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{P} \sum [(y_t - \bar{y}) \cdot (x_{t+m} - \bar{x})] \quad (2.19)$$

para, $t_0 = 1$ a $t_n = P + 1$; $m = -1$ para valores de k negativos,

onde P é o número total de observações da série, x_t representa o valor da variável x no tempo t , y_t o valor da variável y no tempo t , \bar{x} a média da série de tempo x , \bar{y} a média da série de tempo y .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variabilidade da ECT no OAS

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes à análise individual de EOF e MTM-SVD para a ECT no OAS, assim como os resultados referentes à análise de correlação cruzada entre os campos de ECT reconstruídos para frequências específicas e a AAO.

3.1.1. Comportamento médio da ECT

Os valores médios semanais de ECT para o OAS (Figura 3.1), entre out/1992 e dez/2011, mostram que o Vazamento das Agulhas (VA) e a região da CBM são as regiões mais energéticas desse oceano, com valores médios de 2500 e 1500 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$, respectivamente. O padrão em forma de “C” da distribuição da ECT na região da CBM ficou bem evidente, assim como, o Anticiclone Zapiola, que é caracterizado por uma circulação quase estacionária e por baixos valores de ECT ($<100 \text{ cm}^2 \text{s}^{-2}$) (TEIXEIRA et al. 2009; SARACENO et al., 2009). Outra feição relacionada ao Anticiclone Zapiola é o vórtice estacionário no seu centro. Alguns autores (e.g., SARACENO et al., 2009) descrevem que vórtices da região da CBM contornam o anticiclone e, por algum motivo que ainda não é muito claro, entram na circulação anticiclônica e ficam presos. Também conectada a região da CBM está a CB, com valores médios de 500 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$. Diversos estudos (e.g., GONI e WAINER, 2001; LENTINI et al., 2002) sugerem que a deriva da posição da CBM está associada à variações no transporte da CB, que por sua vez pode ser influenciada pela absorção de vórtices da própria corrente (LENTINI et al., 2006) ou de outros locais (AZEVEDO et al., 2012). Outras feições, porém menos pronunciadas, também podem ser observadas no mapa de ECT média, como o Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e a frente subtropical e a subantártica (45° - 50° S). Valores muito baixos de ECT ($<10 \text{ cm}^2 \text{s}^{-2}$) são encontrados sobre a plataforma continental, tal padrão pode estar associado ao cálculo da ECT que para esse estudo usa apenas valores de velocidade geostrófica, descartando assim feições de menor escala. Outra

explicação para os baixos valores de ECT nessa região está relacionada a pouca acurácia dos dados derivados de altímetros em regiões costeiras (Souza, 2005).

De maneira geral, a distribuição da ECT no OAS está de acordo com a literatura (e.g. DUCET et al., 2000; GARNIER et al., 2003; STAMMER et al., 2006), com os maiores valores médios referentes as regiões de maior atividade de mesoescala.

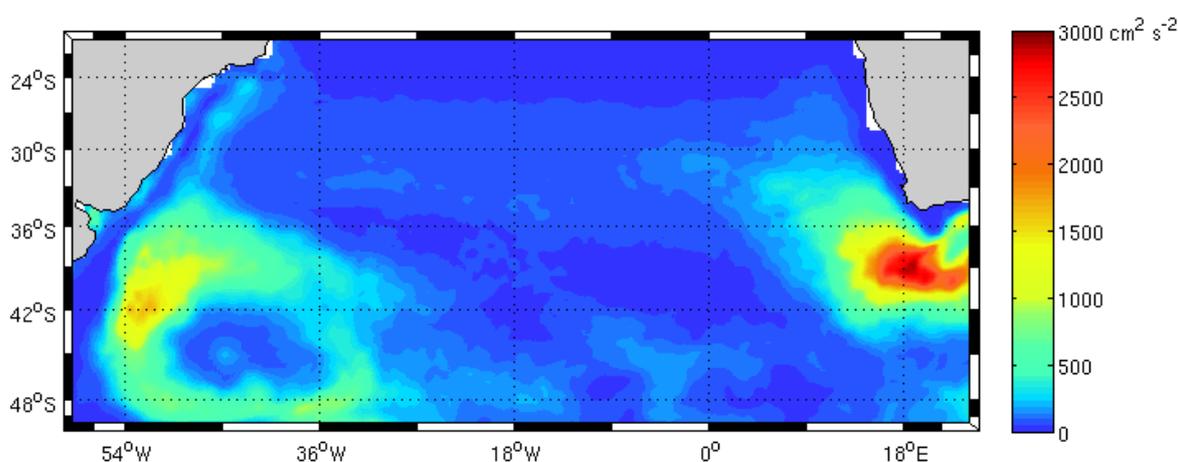


Figura 3.1 – Campo médio da ECT para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm^2s^{-1} .

3.1.2. Variabilidade espaço-temporal da ECT no OAS

Devido à grande variabilidade espacial dos valores de ECT ao longo do OAS optou-se por fazer a análise de EOF com os dados normalizados e com os dados não normalizados. De acordo com a literatura (e.g., WALLACE, 2001; WALLACE et al., 1992) as primeiras EOFs de dados não normalizados explicam mais da variância do conjunto de dados do que EOFs baseadas na matriz de correlação (dados normalizados), além de tenderem a ser um pouco mais robustas estatisticamente. No caso da EOF com dados não normalizados, os centros de maiores amplitudes tendem a ser deslocados na direção e/ou ficam mais concentrados nas regiões da alta variância. Uma vez que o gradiente espacial do campo de variância é estritamente ligado à estrutura espacial do campo, seria

artificial eliminar essa característica. Por outro lado, para dados normalizados todos os elementos (ponto de grade) recebem o mesmo peso, portanto, apenas a estrutura (e não a amplitude) influencia na determinação dos modos principais.

Tanto para a análise com os dados normalizados quanto para os dados não normalizados será considerado apenas o primeiro modo de variabilidade devido à baixa variância explicada pelos modos seguintes.

Em relação à análise de EOF para os dados normalizados, o primeiro modo (Figura 3.2) descreve um padrão de dipolo leste-oeste entre 20°S-35°S, com valores negativos no lado leste da bacia e valores positivos do lado oeste, mostrando que a variabilidade da ECT oscila em fases diferentes nessas duas regiões. Esse padrão é bem similar ao padrão médio da topografia dinâmica do OAS, como mostra a Figura 1 do trabalho de Vianna e Menezes (2011).

Maiores valores de correlação (>0.4) são observados entre 25°S-30°S, e podem ser associados à região do CVA (ver Figura 1.6). De acordo com Garnier et al. (2003) esta região (entre 25°-30°S) apresenta grande variabilidade, além de representar a propagação para oeste dos vórtices das Agulhas. No primeiro modo (Figura 3.2b) as oscilações ocorrem preferencialmente em escala anual, sugerindo que a variabilidade da ECT está associada ao padrão médio de circulação.

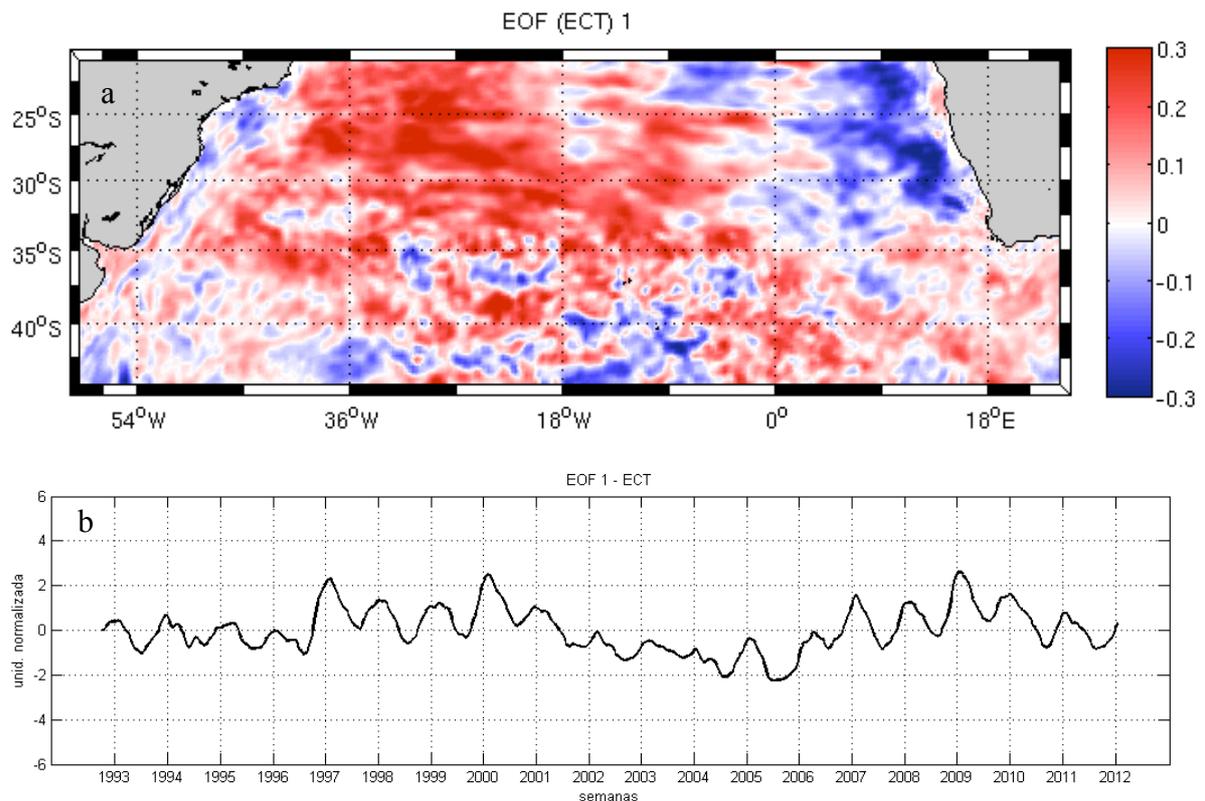


Figura 3.2 – (a) Padrão espacial e (b) série temporal dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ECT normalizada para o OAS. Porcentagem total de variância explicada de 1,5%. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e a série temporal foi filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes normalizadas pelo desvio padrão.

Para a EOF dos dados não normalizados, o primeiro modo explica cerca de 4% da variância total. Um aumento de 2,5% na porcentagem explicada em relação à EOF com os dados normalizados (1,5%). Esse resultado é esperado, uma vez que as EOFs dos dados não normalizados representam melhor as regiões de maior variabilidade. O padrão espacial do campo de ECT semanal (Figura 3.3) apresenta maiores valores de correlação na região da retroflexão da CA, evidenciando a tendência de amplificação das regiões com maiores amplitudes médias na análise com dados não normalizados. Esse padrão concorda com o mapa médio da ECT (Figura 3.1), representando o comportamento de alta frequência do campo de ECT, uma vez que estes estão associados a feições de

mesoescala (2 a 6 meses). Essa maior variabilidade de alta frequência da ECT na região do VA pode ser confirmada na série temporal dos coeficientes de expansão (Figura 3.3b), assim como nos resultados da análise de MTM-SVD, que serão mostrados adiante.

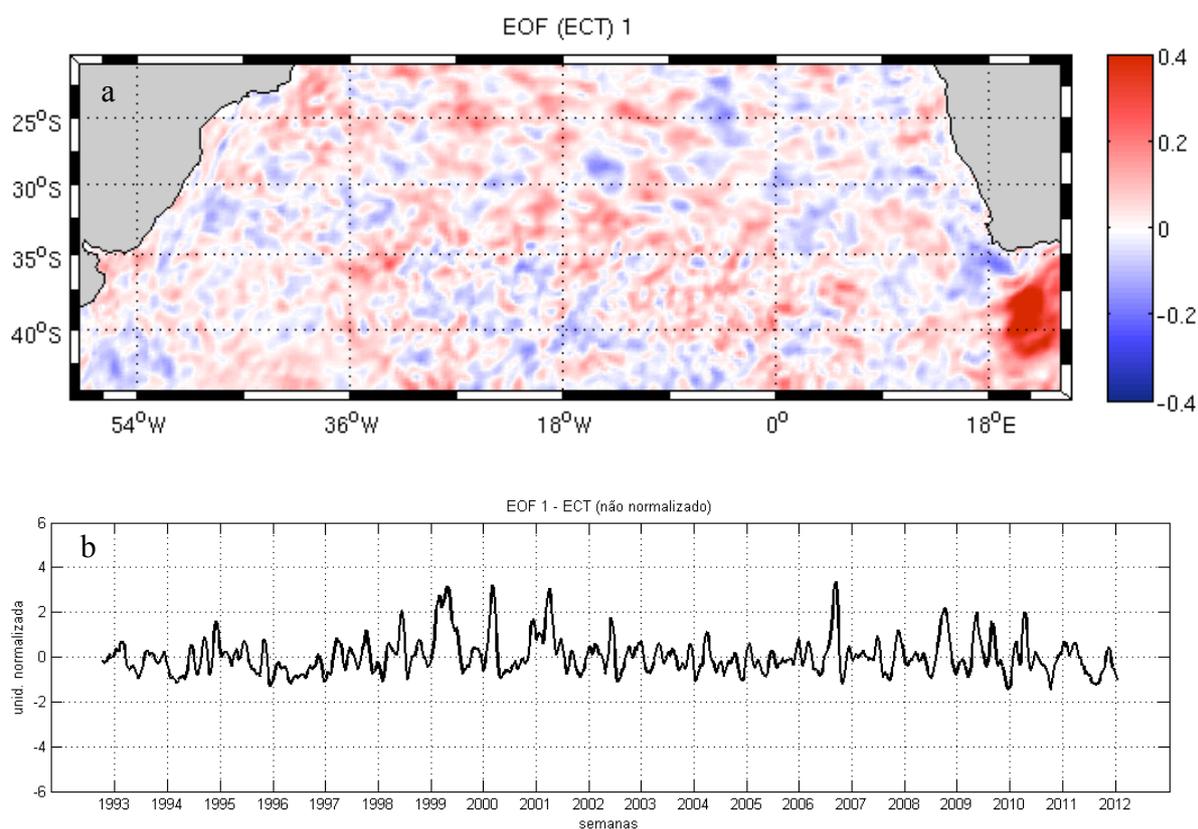


Figura 3.3 – (a) Padrão espacial e (b) série temporal dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ECT não normalizada para o OAS. Porcentagem total de variância explicada de 4%. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e a série temporal foi filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes normalizadas pelo desvio padrão.

Lembrando que o quadrado do valor de correlação representa a variância local explicada (HOUGHTON e TOURRE, 1992), o primeiro modo descreve cerca de 40% da variância na região do VA. Já nas outras regiões do OAS a fração de variância local explicada, para este modo, é praticamente nula. Como descrito anteriormente, esse padrão está atrelado a não normalização dos dados e ao

caráter altamente variável dos valores de ECT ao longo do OAS, que faz com que os resultados sejam deslocados para as regiões de maiores amplitudes. Dessa forma, os resultados das análises de EOF com os dados não normalizados também concordam com a literatura (e.g. DUCET et al., 2000; STAMMER et al., 2006).

3.1.3. Variabilidade da ECT no OAS associada ao Vazamento das Agulhas

Com o intuito de descrever de forma mais detalhada a variabilidade da ECT do OAS e sua relação com o VA, a análise de MTM-SVD foi aplicada ao campo de ECT e os LFVs regionais foram calculados também para as regiões do VA e do CVA, como descrito na metodologia (Figura 2.1).

O espectro LFV dos campos de ECT semanais para o período entre out/1992 e dez/2011 é apresentado na Figura 3.4. Como descrito anteriormente, o LFV fornece uma medida da distribuição de variância para cada frequência, além de mostrar os limiares acima do nível de significância, neste caso 95% e 50%. O OAS apresentou frequências entre 1,5-2 anos e 1 ano, significativas a 95%. Enquanto o CVA e o VA apresentaram frequências variando desde altas até baixas frequências, com picos significativos entre 6-7 anos, 1 ano, 7,2 meses e 4,5 meses para o LFV do CVA e 4-6 anos, 1,5-2,8 anos, 1 ano, 9 meses, 7 meses, 5-3,5 meses e 3 meses para o VA. Os picos de 15-18 anos, apesar de serem significativos a 95%, não foram considerados, pois representam uma variabilidade muito próxima ao tamanho original da série temporal.

De forma geral, o OAS e o CVA apresentaram maiores variância associadas ao ciclo anual e interanual, enquanto o VA apresentou uma variabilidade mais complexa, com diversas frequências significativas porém com um ciclo anual pouco pronunciado.

Os resultados do LFV para as três regiões analisadas concordam com as análises de EOF dos dados não normalizados (Figura 3.2) e normalizados (Figura 3.3). O primeiro descreve uma maior porcentagem da variância total e

local (quando comparada com a EOF dos dados normalizados) associada à região da retroflexão da CA, o que concorda com a dominância de picos de alta frequência no VA. Por outro lado, a EOF dos dados normalizados descreve um padrão espacial associado à variabilidade de larga escala e a menores frequências (anual), concordando novamente com os resultados do LFV, onde as regiões do CVA e de todo o OAS aparecem associadas às frequências anuais e interanuais enquanto o VA, apesar de dominar a variabilidade da ECT no OAS, não apresenta um sinal anual forte.

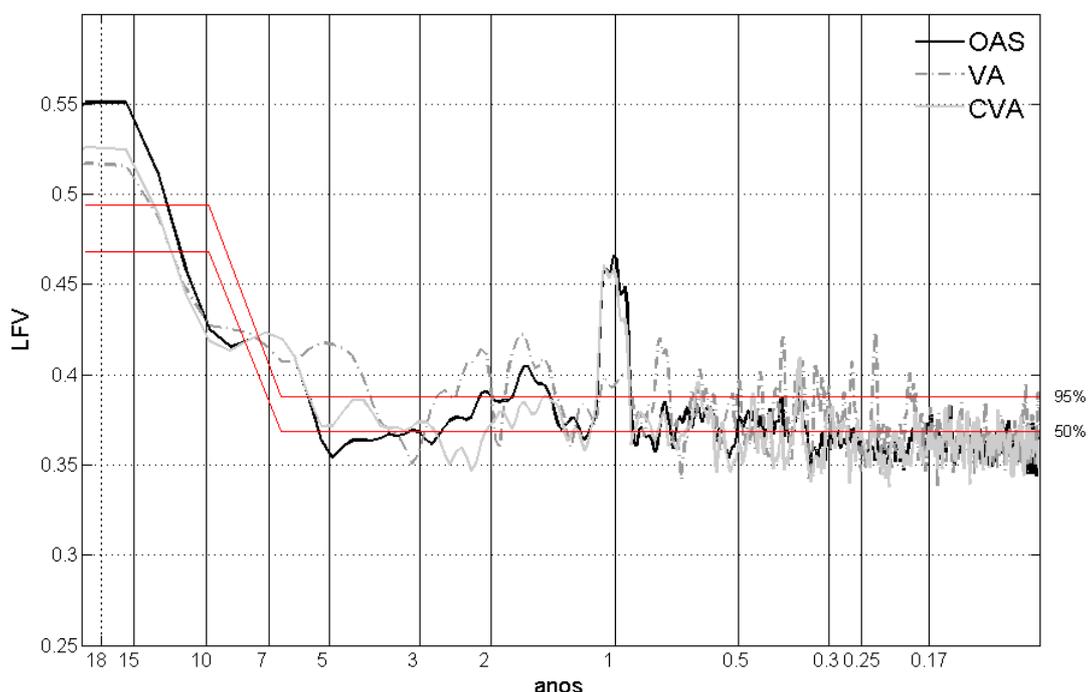


Figura 3.4 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%.

O fraco sinal na banda do anual na região do VA pode ser explicado devido à falta de um ciclo anual distinto no campo de vento da região (PEARCE e GRÜNDLINGH, 1982). Por isso, as variações temporais nessa região são frequentemente atribuídas a variações intra-anuais dos campos de vento (FFIELD et al., 1997; BEAL et al., 2011) e/ou à formação intermitente de vórtices

na retroflexão da CA (GARZOLI e GORDON, 1996). Resultados de modelos sugerem também, que a variabilidade na longitude da retroflexão é resultado de variações no transporte da CA e da influência do pulso de Natal (LUTJEHARMS e VAN BALLEGOOYEN, 1988; LUTJEHARMS, 1989).

A dominância do ciclo anual encontrada na variabilidade da ECT para o OAS está de acordo estudos feitos para outras variáveis oceânicas e com os resultados apresentados no item 3.1.2 (p. 54). Segundo Fu (2006), a maior parte da ECT está associada à circulação superficial forçada pelo vento, na qual predomina o ciclo anual. Essa por sua vez, é forçada por variações sazonais do centro de alta pressão do Atlântico Sul, modulada por variações no ciclo solar. Dessa forma, considerando que o CVA está inserido no GSAS, é esperado que a variabilidade do giro influencie a variabilidade do corredor, conforme sugerido pelos resultados do LFV, que apresentam a dominância do sinal anual nessas regiões.

Após identificar os picos mais significativos do espectro LFV, o padrão espacial de variância explicada foi construído para cada frequência, no entanto para este estudo serão apresentados apenas os padrões mais relevantes. A Figura 3.5 mostra o padrão espacial de variância da ECT para as frequências de 6,5 anos, 2,25 anos, 1 ano, 4,7 meses e 2,8 meses, respectivamente. De forma geral, é possível notar que as principais feições associadas à ECT estão presentes nos padrões espaciais, bem como o CVA e a região da retroflexão da CA.

Os resultados sugerem uma diferença marcante entre as regiões dominadas pela baixa e pela alta frequência, com exceção da frequência de 2,25 anos (Fig. 3.5b). A baixa frequência (Figura 3.5a) está associada à parte oeste, enquanto, a alta frequência (Figura 3.5d e 3.5e) à parte leste da bacia, O padrão diferenciado leste-oeste é mais evidente na região do CVA, onde ocorre a diminuição das frequências de oscilação em direção oeste, corroborando com o padrão diferenciado encontrado na primeira EOF (Figura 3.2) e com os resultados de Pilo (2013). A autora descreve que conforme os vórtices vão se

distanciando da região de formação (retroflexão da CA) e se deslocando em sentido à costa do Brasil, a velocidade de fase e a amplitude dos vórtices diminuem enquanto o diâmetro aumenta (Figura 1.3), alterando o período de oscilação dessas feições.

Na frequência de 2,25 anos, o mapa de variância (Figura 3.5b) apresenta a maior parte da variância explicada associada à CBe, sugerindo que a ECT proveniente do VA propaga de forma diferente nesta frequência. O modo reflete a variabilidade relacionada à parte da ECT que é transportada pela CBe, alcançam a Corrente Norte do Brasil e então é transferida para o HN, influenciando o ramo superior da AMOC. De acordo com Biastoch et al. (2008), o VA pode afetar a circulação oceânica meridional de duas formas. A primeira ocorre por meio da indução de processos ondulatórios através da atividade de mesoescala gerada na retroflexão da CA, como pode ser observado na Figura 1.2. A segunda, que acontece em escalas de tempo maiores, está associada à advecção de anomalias de salinidade por meio dos vórtices transportados em direção à região de formação da água profunda no norte do Atlântico Norte. O padrão espacial do mapa de variância da ECT, da frequência de 2,25 anos (Figura 3.5b), descreve um padrão de propagação para noroeste coincidindo com a região descrita por Biastoch et al. (2008) como a segunda forma do VA afetar a AMOC.

Em conformidade com os resultados do LFV, a região VA possui altos valores de variância associados à alta frequência (Figuras 3.5d e 3.5e) e praticamente não aparece no mapa de variância do ciclo anual (Figura 3.5c). No entanto, em relação ao CVA, o ciclo anual é o que melhor representa a variabilidade dessa região, com um corredor bem definido por altos valores (10-12%) de variância explicada.

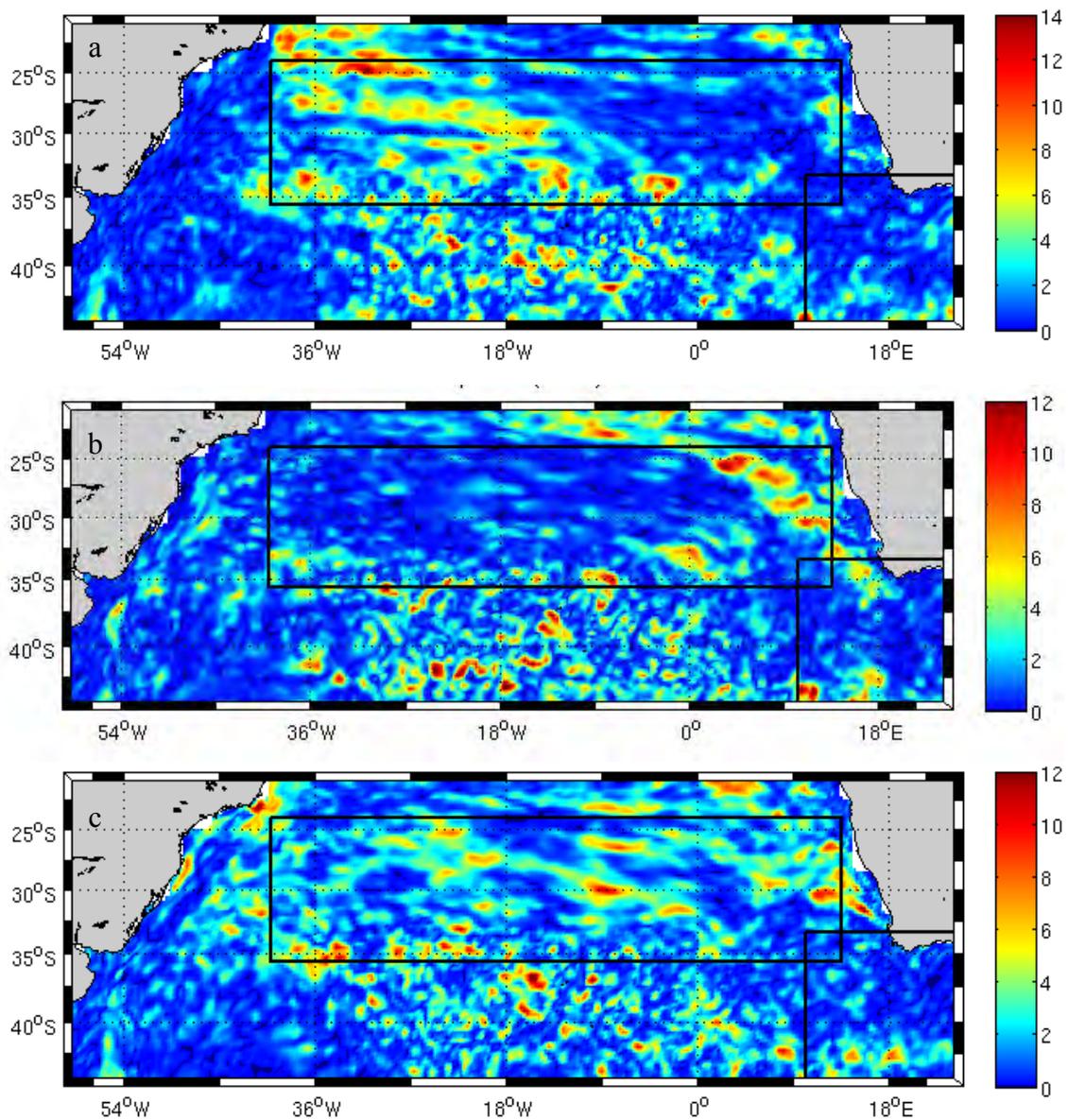


Figura 3.5 – Padrão espacial do campo de variância explicada da energia cinética turbulenta reconstruído para a frequência de (a) 6,5 anos, (b) 1 ano, (c) 0,39 anos, (d) 0,23 anos e (e) 2,25 anos. Unidade em porcentagem (%).

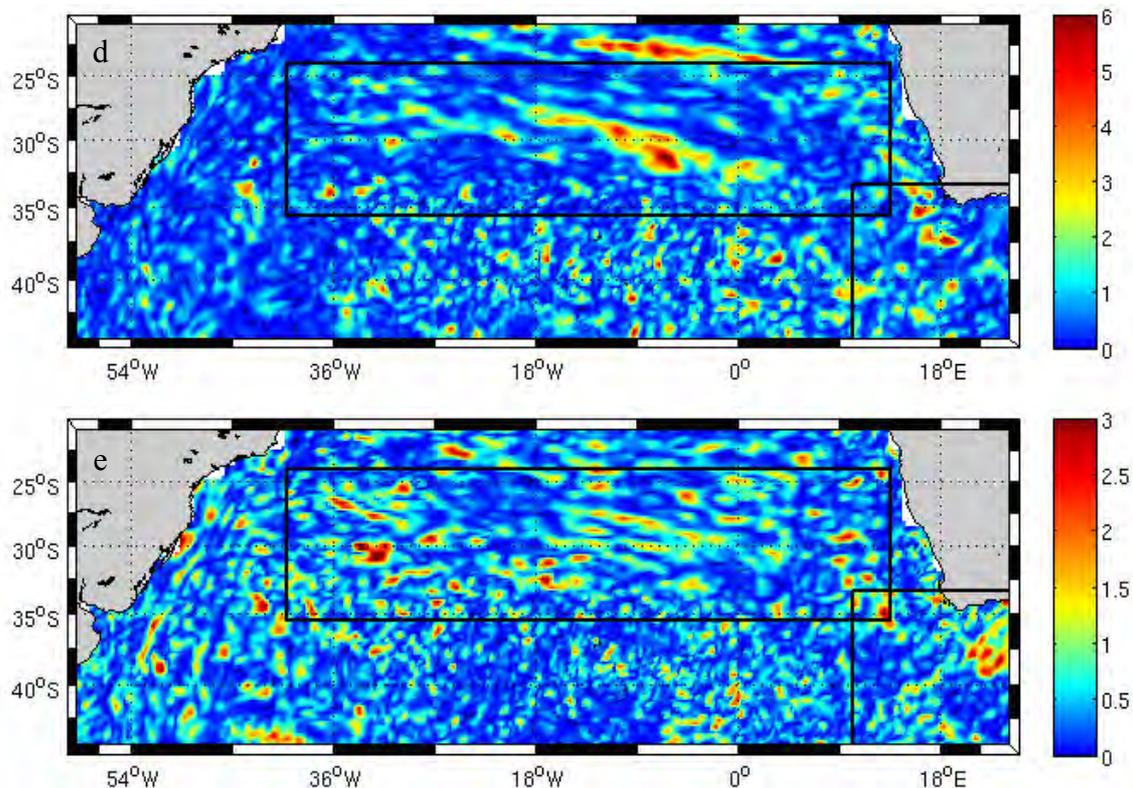


Figura 3.5 – Continuação da figura anterior.

Para confirmar a propagação para oeste das feições de mesoescala associadas ao VA e ao CVA, visualizadas nos mapas de variância e descritas na literatura, o padrão espacial de diferentes frequências foram reconstruídos, como mostram as Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8. A sequência de imagens em diferentes fases do ciclo canônico descreve com maiores detalhes o padrão espacial e os sinais estacionários ou propagantes referentes a cada frequência.

Na frequência interanual (6,5 anos) é possível observar, através da Figura 3.6, que a região do CVA oscila de forma estacionaria, com mínimos e máximos de anomalias nas fases de 80° e 240° , respectivamente. Por outro lado, na variabilidade anual (Figura 3.7) a mesma região é marcada por anomalias propagantes. Anomalias positivas e negativas, na forma de um dipolo, propagando em direção a oeste pela região do CVA. Esse padrão de propagação pode ser acompanhado até aproximadamente 35°W , onde o sinal

desaparece quase por completo. Outra feição interessante, também associada à variabilidade anual, encontra-se na região mais próxima ao continente africano. Inicialmente a anomalia é negativa e se propaga de forma progressiva para noroeste, com maiores amplitudes negativas (positivas) em 40° (240°).

O padrão de oscilação intra-anual (2,8 meses - Figura 3.8) também apresenta uma distribuição das anomalias de ECT similar ao modo anual, com os maiores valores ($>200 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$) de anomalia associados ao VA e à CBM e com sinais propagantes no CVA. Porém esses sinais ocorrem na forma de pulsos oscilando entre anomalias positivas e negativas, com feições de escalas substancialmente menores do que nos modos anteriores.

De acordo com Chelton et al. (2007), existem dois processos capazes de explicar a porção propagante para oeste do espectro oceânico em mesoescala; ondas de Rossby e vórtices. Nesse contexto, para acompanhar as propagações das anomalias de ECT foi traçada uma linha com velocidade de propagação igual à velocidade de fase teórica do primeiro modo baroclínico de uma onda de Rossby (parâmetros obtido em Chelton et al., 1998), próxima a região de formação dessas anomalias (ver Figura 3.7). A velocidade de propagação da anomalia de ECT se mostrou semelhante à velocidade de fase da onda de Rossby, corroborando a hipótese de que as anomalias de ECT no CVA são geradas pela propagação de feições de mesoescala associadas ao VA. Ainda confirmando esse resultado, Oliveira (2010) constatou que os vórtices das Agulhas se propagam com velocidades semelhantes às velocidades de fase de ondas de Rossby do primeiro modo baroclínico nesse oceano.

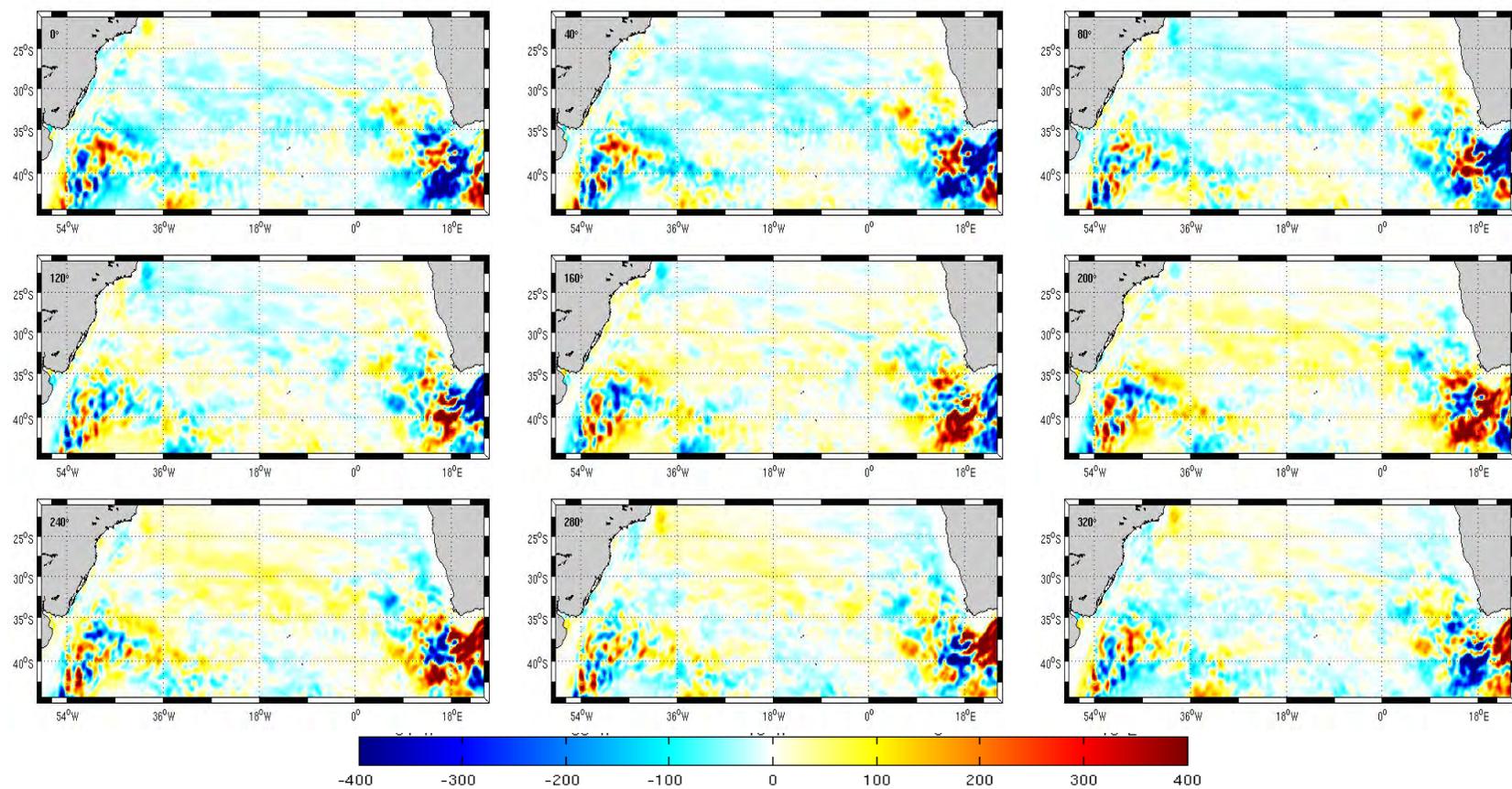


Figura 3.6 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência de 6,5 anos. Cada grau corresponde a 6,6 dias.

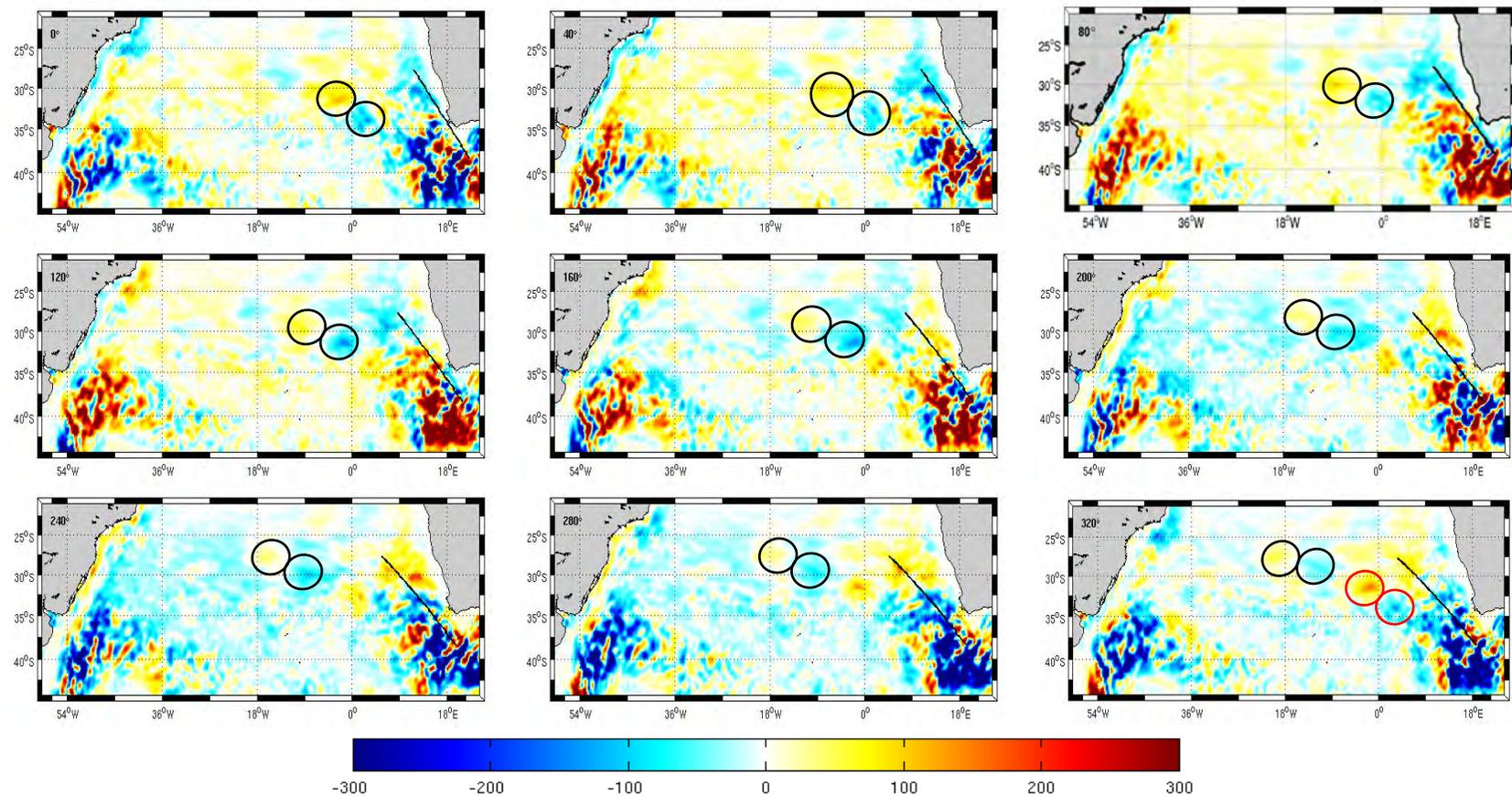


Figura 3.7 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência anual. Cada grau corresponde a 1,02 dias. A linha preta corresponde à propagação teórica do primeiro modo baroclínico de uma onda de Rossby. E os círculos evidenciam o padrão de propagação.

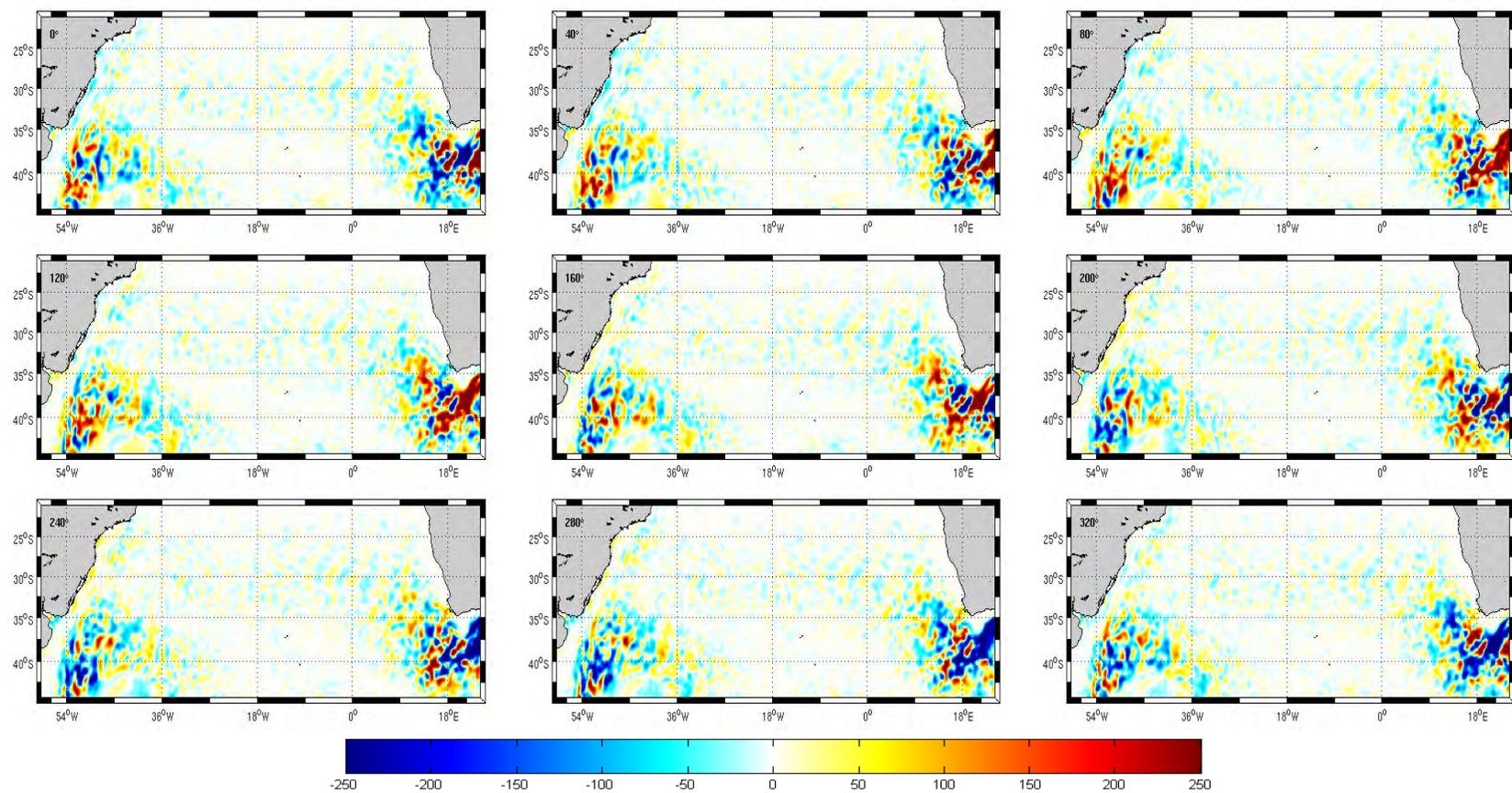


Figura 3.8 – Sequência de mapas do padrão espacial da anomalia da energia cinética turbulenta ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) reconstruída para o ciclo canônico da frequência de 2,8 meses. Cada grau corresponde a 0,25 dias.

De forma geral, o CVA apresenta oscilação estacionária em escala interanual, enquanto nas escalas anual e intra-anual é observado um sinal propagante ao longo dessa região. Os padrões de deslocamento das anomalias de ECT concordam com o padrão de deslocamento dos vórtices das Agulhas que consta na literatura (BYRNE et al., 1995; AZEVEDO et al., 2012; PILO, 2013; BIASTOCH et al., 2008). À medida que os vórtices são liberados pela retroflexão da CA, eles tendem a se deslocar para oeste. No entanto, próximo a latitude de 40°S, os vórtices encontram a barreira física das correntes que fluem para leste (CSA e CTC/CSH) e desviam sua trajetória para o Norte. A partir de 35°S, onde o fluxo médio passa ser em direção a oeste, os vórtices se propagam também nessa direção, pelo CVA no interior do GSAS, como mostram as sequências de imagens do ciclo canônico.

O trabalho pioneiro de Witter e Gordon (1999) forneceu as primeiras evidências de variabilidade interanual no interior do GSAS associadas às propriedades do VA. Os autores descrevem que a passagem de ondas de Rossby formam um sinal propagante para oeste, entre 24°S e 33°S, que modula a variabilidade interanual. Os autores citam ainda que essa variabilidade sobrepõe-se à variabilidade intrassazonal gerada pelos vórtices das Agulhas, que também se propagam por essa região. Flutuações de escala interanual (entre 4-5 anos) nessa região também são observadas por Grodsky e Carton (2006), que associam a variabilidade da altura do nível do mar à propagação de ondas de Rossby. Os autores sugerem que essa propagação é suficientemente lenta (com velocidade geostrofica meridional de $0,25 \text{ cm s}^{-1}$), implicando em uma diferença de fase entre o lado leste e oeste da bacia do Atlântico Sul. Nesse contexto a variabilidade da ECT associada à ANM será investigada com mais detalhes no item 3.2.

Resultados de análises de SVD entre a tensão de cisalhamento do vento e ECT (não apresentadas – Apêndice A, Figura A.4 e A.5) mostram que a região de maior gradiente do vento coincide com o CVA, sugerindo que a propagação dos Vórtices das Agulhas está associada aos campos de ventos, que por sua vez modulam a circulação oceânica superficial. Esse resultado concorda com

estudos pretéritos, que relatam os fluxos circunvizinhos ao vórtice como responsáveis por cerca de 50% do deslocamento dessas feições (BYRNE et al. 1995). Dessa forma, a trajetória dos vórtices anticiclônicos das Agulhas, que já é para oeste devido à autopropulsão (AZEVEDO et al., 2012), é reforçada pelo fluxo médio do oceano.

3.1.4. Variabilidade da ECT no OAS e Oscilação Antártica.

Diversos estudos apontam para uma intensificação do Vazamento das Agulhas e, conseqüentemente, aumento da ECT no OAS. O aumento no transporte de massa entre o Índico e o Atlântico nas últimas décadas estaria associado à migração para o sul dos ventos de oeste do HS, que são considerados o principal regulador do transporte dessa região. Variações na AAO estão associadas à intensificação ou ao enfraquecimento desses ventos, que por sua vez estão relacionadas à variabilidade do transporte do VA.

Para verificar a influência remota da AAO na variabilidade da ECT no oceano Atlântico foram realizadas correlações cruzadas entre o índice AAO e as séries temporais reconstruídas da ECT para as frequências de 6,5, 1 e 0,23 anos. Essas frequências foram escolhidas por melhor representar a variabilidade da ECT associada ao VA e ao CVA, como descrito no item anterior. As Figura 3.9 e Figura 3.10 apresentam os mapas de correlação cruzada para as frequências de 6,5 anos e 1 anos, respectivamente. Para o período de 0,23 anos as correlações não apresentaram valores significativos, por este motivo o mapa de correlação não será mostrado.

Os padrões espaciais nos mapas de correlação cruzada corroboram com os padrões de oscilação e propagação das anomalias de ECT apresentados na sequência de imagens do ciclo canônico (Figura 3.6 e Figura 3.7). No mapa de correlação do modo interanual (Figura 3.9) a correlação positiva ao longo de todo o corredor confirma o padrão estacionário da feição. Já no mapa de correlação do modo anual (Figura 3.10), a presença de padrões oscilatórios com valores positivos e negativos intercalados, ocorre na parte leste da bacia e

esta associada ao VA. Esta feição concorda com o padrão propagante da anomalia de ECT no ciclo canônico nesta frequência.

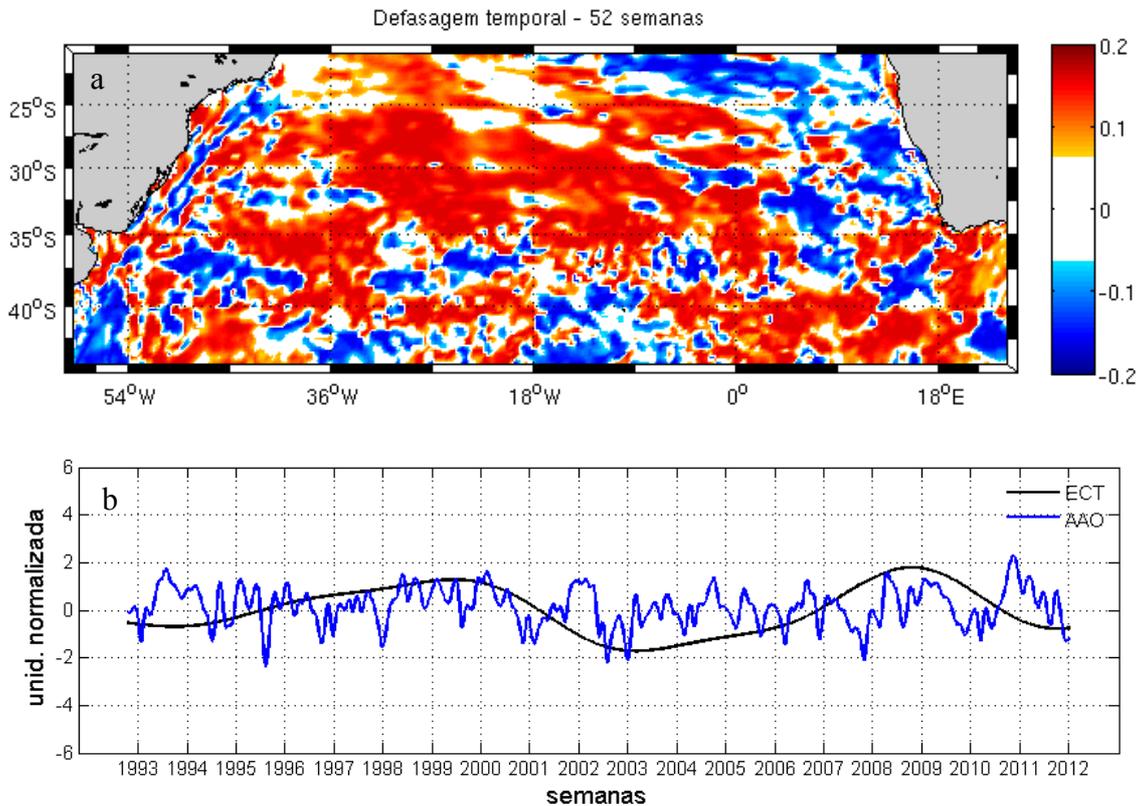


Figura 3.9 – (a) Padrão espacial de correlação cruzada entre as séries de anomalia de energia cinética turbulenta (ECT) reconstruídas para a frequência de 6,5 anos e o índice de Oscilação Antártica (AAO) defasado temporalmente 52 semanas. Os valores em branco na barra de cores correspondem aos resultados não significativos a 95%. (b) série temporal média da anomalia da ECT reconstruída para a frequência de 6,5 anos e índice de AAO (unidades normalizadas).

Os resultados sugerem que a ECT proveniente do VA está associada à intensificação/enfraquecimento dos ventos de oeste, que por sua vez, estão relacionados à AAO. Nos últimos anos 30 anos uma tendência positiva no índice da AAO é apontada, sendo responsável por gerar um deslocamento para sul da CCA e intensificando o transporte do VA (ver Figura 1.1, THOMPSON e SOLOMON, 2002). Nesse contexto, os resultados significativos de correlação positiva entre a ECT e o índice de AAO nas regiões influenciadas por esse transporte corroboram com a hipótese de que mudanças na posição

dos ventos de oeste são responsáveis pelo aumento ou diminuição do transporte interoceânico entre o Índico e o Atlântico.

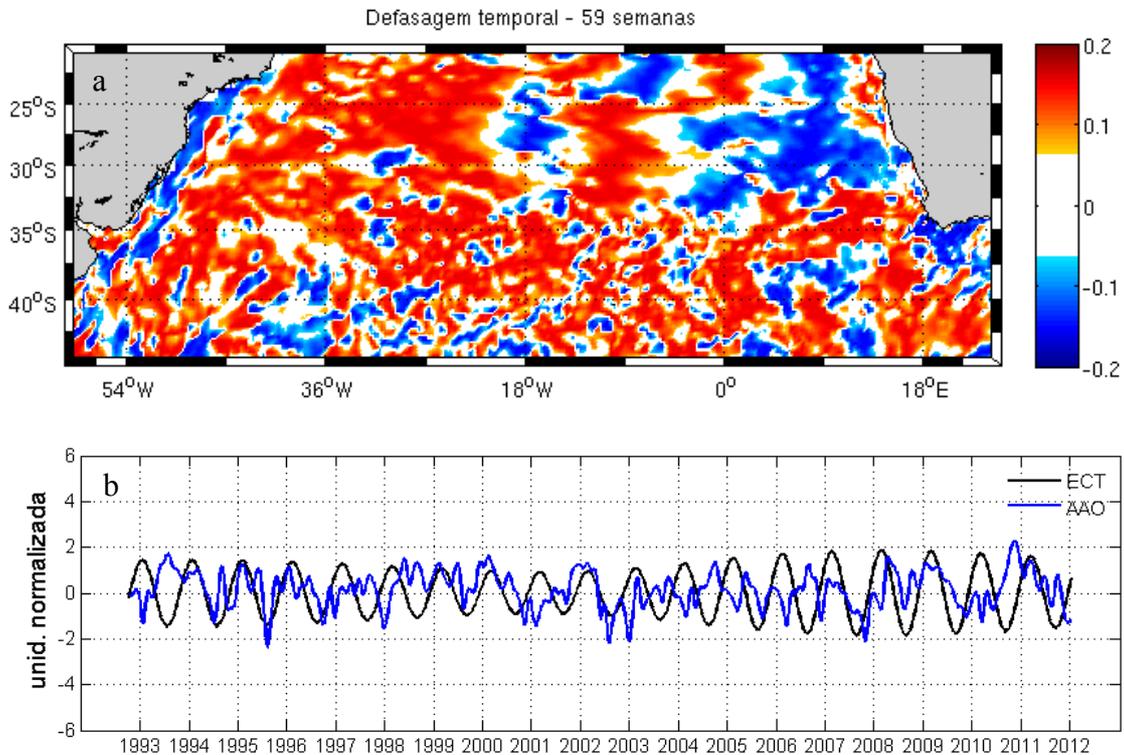


Figura 3.10 – (a) Padrão espacial de correlação cruzada entre as séries de anomalia de energia cinética turbulenta (ECT) reconstruídas para a frequência de 1 ano e o índice de Oscilação Antártica (AAO) defasado temporalmente 59 semanas. Os valores em branco na barra de cores correspondem aos resultados não significativos a 95%. (b) série temporal média da anomalia da ECT reconstruída para a frequência de 1 ano e índice de AAO (unidades normalizadas).

De forma geral o interior dos giros subtropicais tende a ser uma região de menor atividade turbulenta, contudo, no caso do OAS um aspecto particularmente original da variabilidade desse oceano é a propagação para oeste de feições de mesoescala oriundas do VA. Nesse contexto, o interior do GSAS é marcado pela propagação de ondas de Rossby e de vórtices que advectam ECT de regiões remotas para esse local. Dessa forma os resultados sugerem que, em termos de ECT, as feições de mesoescala do VA desempenham um papel ativo na dinâmica do GSAS, confirmando as primeiras evidencias descritas por Byrne et al. (1995).

Por fim, podemos concluir com base nos resultados mostrados que tanto a alta quanto a baixa frequência são importantes para a variabilidade da ECT no OAS, e que está amplamente associada ao VA.

3.2. Variabilidade da ECT acoplada com a circulação oceânica no OAS

Para estudar a variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica foram utilizados campos de ANM e de AVGM. Diversas técnicas estatísticas foram aplicadas, como a análises de EOF para identificar os principais padrões de variabilidade individuais de cada variável. Análises de SVD, para encontrar possíveis relações entre as diferentes variáveis e por fim, foi aplicada a análise de MTM-SVD, para identificar as principais frequências de oscilação acoplada entre a ECT e a circulação oceânica e para detalhar o padrão espacial associada a cada frequência.

3.2.1. Comportamento médio

O campo médio semanal de ANM para o período entre out/1992 e dez/2011 é apresentado na Figura 3.11. A figura mostra que os maiores valores médios de anomalia estão associados à região da CBM, ao Vazamento das Agulhas e à CSA. Os valores negativos estão associados a regiões pontuais na CBM e na retroflexão da CA, sugerindo uma circulação ciclônica relativa a águas mais frias. Já as anomalias positivas estão associadas a elevação da superfície do mar relacionadas a circulações anticiclônicas de massas d'águas quentes. Os valores de anomalia variam entre -6 e 10 cm, concordando com estudos pretéritos (GIAROLLA e MATANO, 2013; CHELTON et al., 2011; GRODSKY e CARTON, 2006).

Na Figura 3.12 temos o mapa médio da AVGM semanal, também para o período de estudo (entre out/92 e dez/11). O padrão espacial da AVGM concorda com o campo médio da ANM, apresentando maiores valores de anomalia média nas mesmas regiões, porém sem um padrão espacial bem definido. As anomalias apresentam um comportamento na forma de pulsos alternados, entre valores positivos e negativos, principalmente na região do

corredor da CSA. Os valores de anomalia da velocidade variam de -10 a 10 cm s^{-1} .

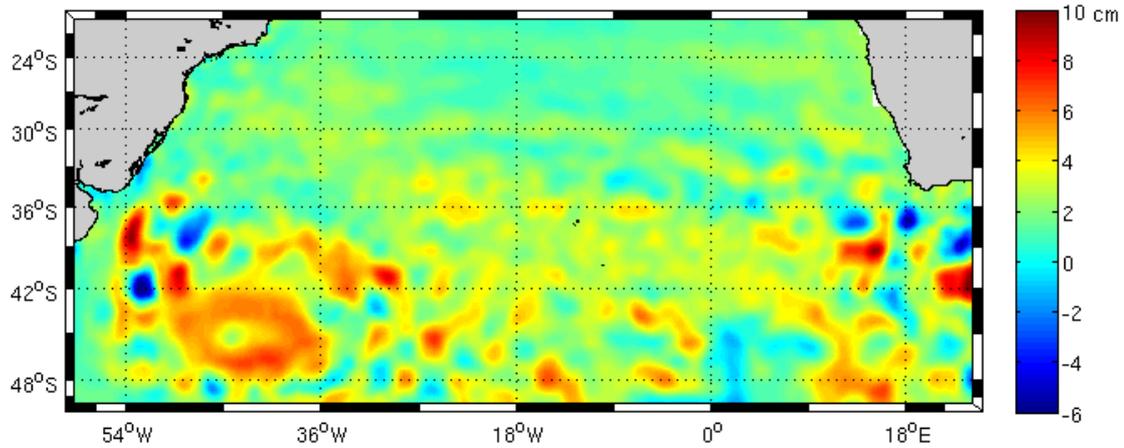


Figura 3.11 – Campo médio da ANM para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm.

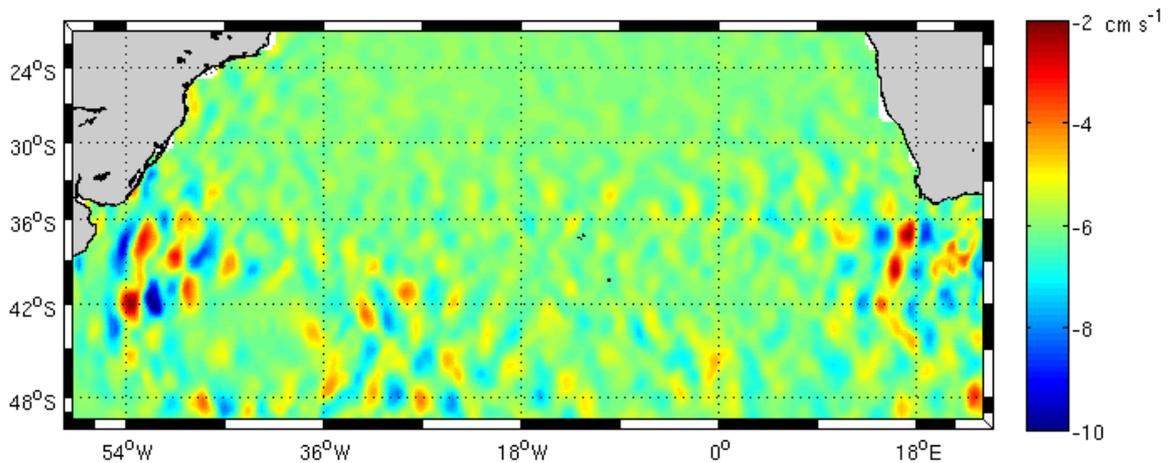


Figura 3.12 – Campo médio da AVGM para o período entre out/1992 e dez/2011, em cm s^{-1} .

De forma geral, as feições e os valores médios encontrados nos mapas de ANM e AVGM estão de acordo com a literatura (e.g., GIAROLLA e MATANO, 2013; CHELTON et al., 2011; GRODSKY e CARTON, 2006; WITTER e GORDON, 1999). Grodsky e Carton (2006) descrevem que a variabilidade da altura do nível do mar no OAS está concentrada em duas regiões, a oeste na CBM e a leste na retroflexão da CA, concordando com os resultados acima.

3.2.2. Variabilidade da circulação oceânica no OAS

a) *Anomalia da Superfície do Mar*

Os padrões espaciais e os coeficientes de expansão associados aos três primeiros modos de variabilidade da ANM são apresentados nas Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15. A variância total explicada pelos três modos juntos é de aproximadamente 19%, e a fração individual explicada é mostrada na Tabela 3.1.

O primeiro modo (Figura 3.13), que explica 14,7% da variância, apresenta um padrão de correlações positivas em quase todo OAS, com maiores valores (>0.7) associados às correntes de contorno, à CSE e à região central abaixo de 35°S . Valores muito próximos de zero são encontrados nas regiões da CBM e retroflexão da CA, sugerindo que este modo de oscilação não é significativo nessas regiões da bacia. Essas regiões coincidem com as regiões de maiores amplitudes médias de ANM e ECT, como mostrado nos campos médios das Figura 3.11 e Figura 3.1, respectivamente.

A série temporal dos coeficientes de expansão sugerem que a variabilidade do primeiro modo está associada ao ciclo anual, corroborando os resultados com Chelton et al. (1990), que descrevem a variabilidade anual como uma fração significativa da variabilidade total do Atlântico Sul. Padrões espaciais similares foram encontrados por Vianna e Menezes (2011), que descrevem que o modo anual (responsável por 18,7% da variância total) domina a borda oeste da bacia e algumas áreas ao longo da CSA, enquanto o modo de tendência (>17 anos, e responsável por 6,8%) domina o ramo sul da CSE e a CTC/CHS na parte mais central do OAS. Logo, o primeiro modo de variabilidade da ANM reflete a dominância do padrão anual, concordando com os resultados das séries temporais dos coeficientes de expansão.

Cabe ressaltar, no entanto, que variações no nível do mar, principalmente na escala anual, são resultantes de mudanças na dinâmica das correntes geostróficas superficiais e/ou de expansões estéricas (densidade) locais. De

acordo com Witter e Gordon (1999), estimativas simples da variação estérica sugerem que entre 30% e 50% do primeiro modo do sinal do nível do mar é resultante da expansão térmica e o remanescente (50-70%) pode ser atribuído a variações na circulação oceânica de larga escala. Desta forma, deve-se considerar a possibilidade de que parte da variabilidade da altura do nível do mar está atrelada a anomalias na temperatura da coluna d'água gerada por variações na circulação oceânica.

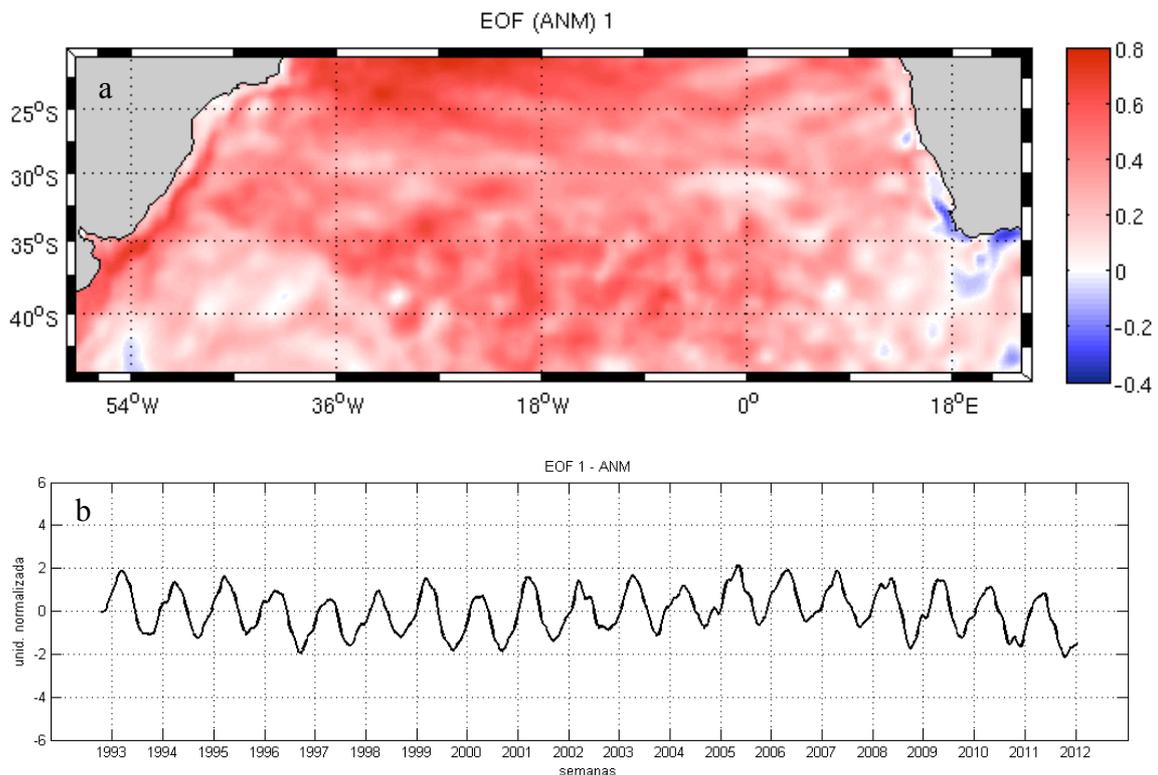


Figura 3.13 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 14,7%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

O segundo modo (Figura 3.14) mostra um padrão inverso ao primeiro modo, com valores de correlações negativos ao norte de 25°S e na costa oeste da bacia. É possível observar uma região de valores positivos entre 25°S e 35°S, coincidindo com o CVA. Essa feição também foi encontrada, por Vianna e Menezes (2011), no modo de variabilidade intrassazonal. Ainda neste modo,

observa-se um dipolo próximo à retroflexão da CA (36°S e 18°E), confirmando que esse padrão pode estar associado à feições de mesoescala, uma vez que os coeficientes de expansão apresentam variações na mesma escala.

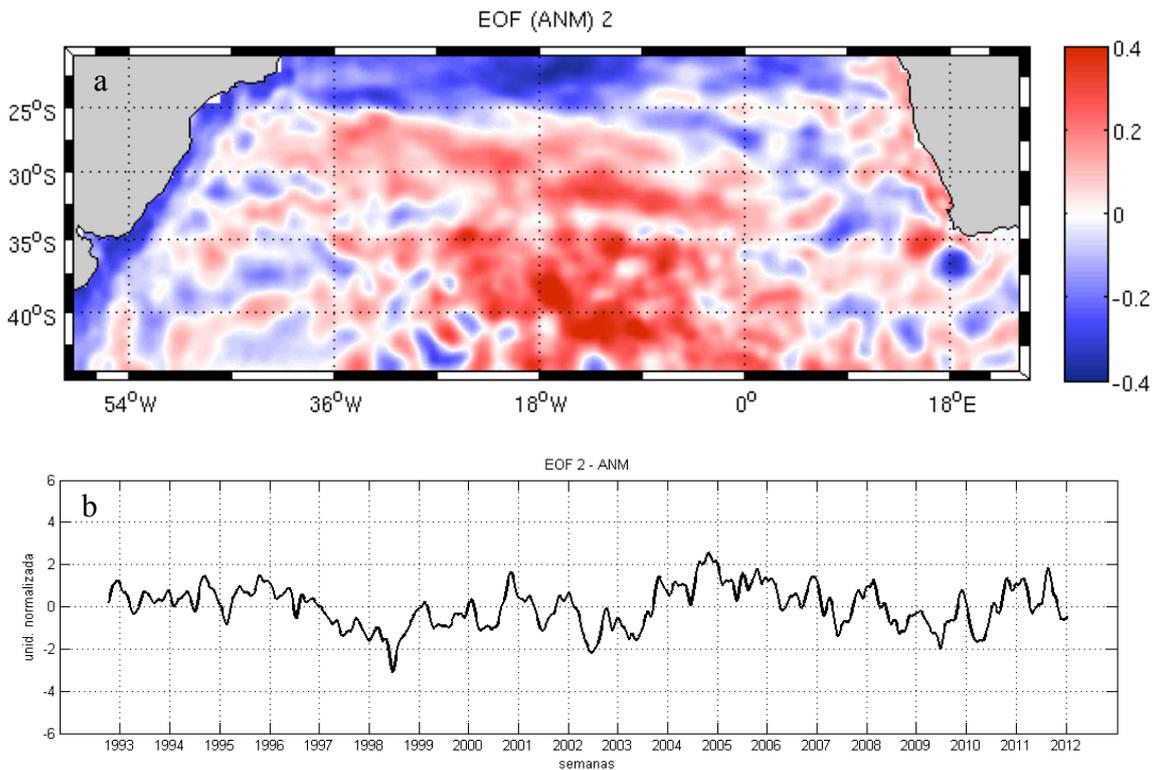


Figura 3.14 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do segundo modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 2,62%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

O terceiro modo (Figura 3.15) é marcado por um padrão espacial de oscilação no OAS, com valores positivos na parte leste da bacia e valores negativos na parte oeste. Esse padrão reflete a circulação associada ao GSAS, com os maiores valores de correlação (>0.5) no centro da célula sul do giro. Essa feição também pode ser observada nos resultados de Vianna e Menezes (2011), associada ao ciclo interanual da ANM. Tal resultado pode ser confirmado pelos coeficientes de expansão, que mostram um padrão temporal de variabilidade interanual (Figura 3.15b).

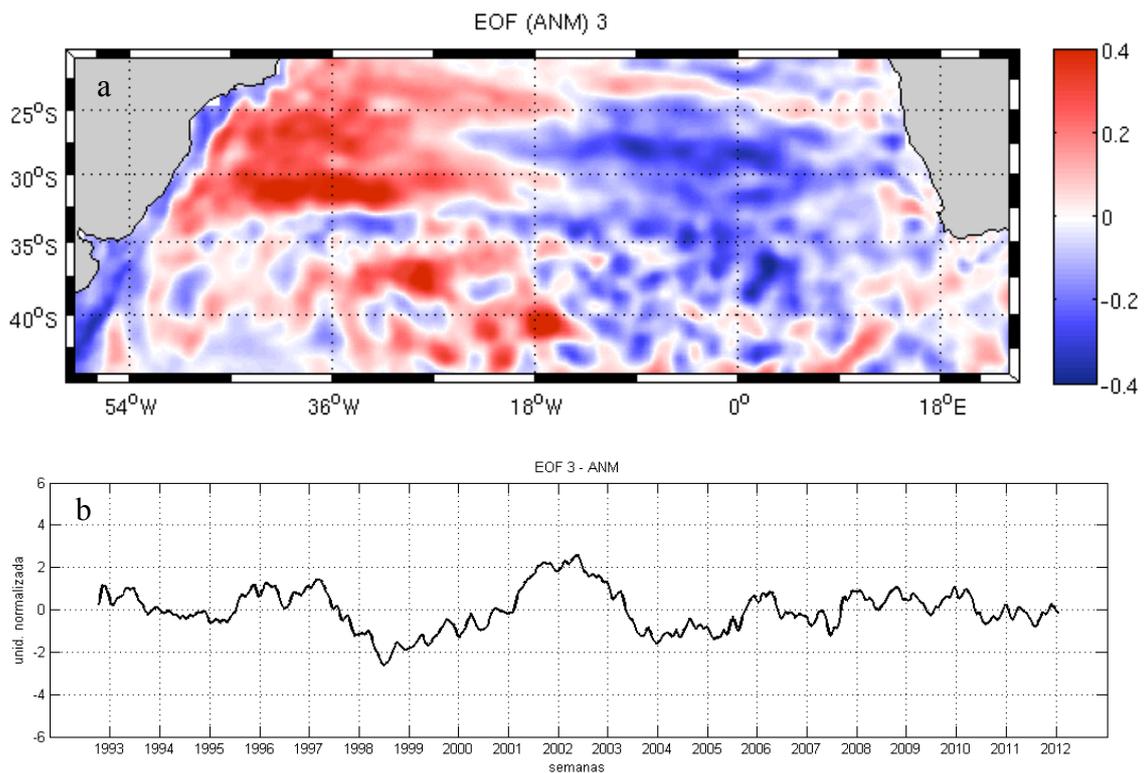


Figura 3.15 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do terceiro modo da EOF da ANM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 2,26%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

b) Anomalia da Velocidade Geostrófica Meridional

Devido à baixa variância total explicada, serão apresentados apenas os resultados do primeiro modo de variabilidade da AVGM. A Figura 3.16, apresenta o padrão espacial e os coeficientes de expansão do primeiro modo.

O primeiro modo apresenta um padrão de oscilações entre valores positivos e negativos abaixo de 30°S e valores positivos de correlação ao longo de toda costa oeste. A feição ao longo da costa coincide com a posição da CB, que possui um fluxo essencialmente meridional. Na borda leste do OAS observa-se a propagação meridional da CBe, através de valores negativos ao longo da costa africana. Abaixo de 38°S, maiores valores de correlação ($>|4|$) representam a CSA (STRAMMA e PETERSON, 1990), e a norte desta mesma

latitude, com uma feição menos definida está a CTC/CSH (VIANNA et al., 2007). Vianna e Menezes (2011) descrevem que durante a propagação da CSA e CTC/CSH, em direção a leste, os fluxos são defletidos para o equador diversas vezes até a CTC/CSH virar em direção a norte, fechando o giro sul do GSAS. Enquanto a CAS continua com fluxo zonal, próxima a 38°S, em direção ao Ol. Esse padrão espacial é similar ao campo médio de AVGM (Figura 3.12). De forma geral, os coeficientes de expansão apresentaram dominância da variabilidade associada ao ciclo anual.

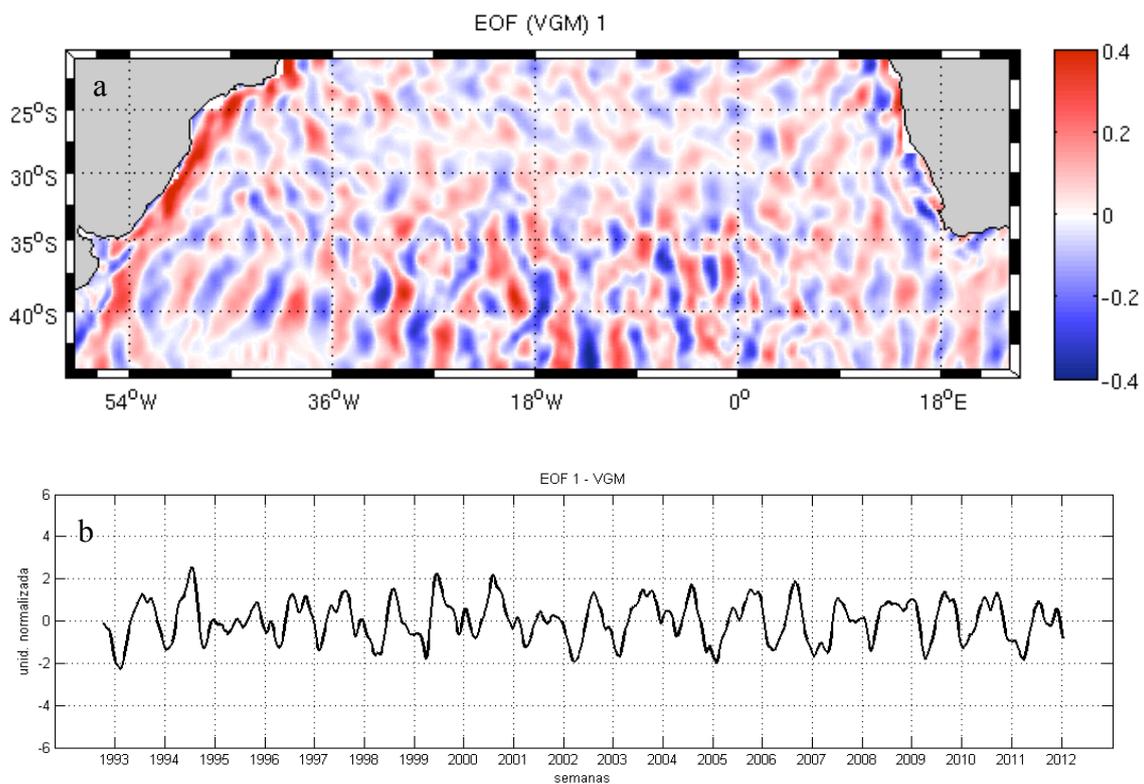


Figura 3.16 – (a) Padrão espacial e (b) séries temporais dos coeficientes de expansão do primeiro modo da EOF da AVGM para o OAS. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação. Porcentagem total de variância explicada de 1,1%. A série temporal filtrada com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

A Tabela 3.1 mostra os valores de variância total explicada para cada modo de variabilidade. Os baixos valores de porcentagem de variância explicada, quando comparados com resultados de outros estudos, podem ser explicados pela alta resolução temporal e espacial dos dados utilizados, aliados a uma

grande área de estudo, uma vez que o método estatístico identifica apenas frequências presentes em todos os pontos de grade (VENEGAS e DRINKWATER, 2001). Já a alta variabilidade presente nos dados age de forma semelhante a um sinal de fundo (ruído), dificultando a separação em modos de variabilidade mais representativos.

Tabela 3.1 – Fração de variância explicada para os três primeiros modos de EOF (EOF 1, EOF 2 e EOF 3), em porcentagem, para os dados de ANM e AVGM.

	ANM (%)	VGM (%)
EOF 1	14,70	1,11
EOF 2	2,62	-
EOF 3	2,26	-

3.2.3. Variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica no OAS

a) *Energia Cinética Turbulenta x Anomalia da Superfície do Mar*

As Figuras 3.17, 3.18 e 3.19 apresentam os três primeiros modos de variabilidade acoplada entre a ECT e ANM e as séries temporais associadas a cada modo. Os três primeiros modos correspondem a 34,76% da covariância quadrada total dos campos acoplados. A porcentagem de covariância explicada por cada modo acoplado e o coeficiente de correlação entre as séries temporais das duas variáveis é apresentado Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Fração de covariância quadrada (PCQ) explicada e coeficiente de correlação (r) entre os coeficientes de expansão acoplados da ECT e ANM para os três primeiros modos de variabilidade. Entre parênteses estão os níveis de significância da correlação.

Modo	PCQ (%)	r
SVD 1	27,15	0,93
SVD 2	3,92	0,92
SVD 3	3,69	0,95

No primeiro modo acoplado o padrão espacial da ANM é semelhante ao primeiro modo da EOF da ANM (Figura 3.13a), que explica 14,7% da variância da ANM e corresponde ao modo anual. A predominância de valores positivos

de correlação na SVD da ANM sugere que neste modo a ANM varia em fase com a ECT. As séries temporais dos coeficientes acoplados (Figura 3.17Figura 3.17c) apresentam padrões distintos entre os primeiros anos e depois do ano de 2000. No período entre 1993 e 1999 o ciclo anual é marcado por valores negativos, enquanto nos anos posteriores (2000 a 2011) os valores são positivos. Esse resultado sugere que o primeiro modo está associado à variabilidade anual sobreposta a uma oscilação de aproximadamente 20 anos, concordando com os resultados de Vianna e Menezes (2011) descritos no item 3.2.2 (p.74), que descrevem padrões espaciais similares para a frequência anual e para tendência (>17 anos).

O segundo modo acoplado (Figura 3.18) apresenta um padrão semelhante à primeira EOF da ECT (Figura 3.2), com um forte gradiente na direção leste-oeste da bacia onde valores positivos são encontrados no lado leste e valores negativos no lado oeste da bacia. Em ambos os mapas de correlação a região do CVA é evidente, demonstrando que esse modo descreve o acoplamento entre a ECT e a ANM durante o deslocamento dessas feições ao longo do OAS. Outra feição importante mostrada neste modo é o acoplamento entre a ECT e a da CB. Essa feição também é observada no primeiro modo de variabilidade acoplado entre a ECT e a AVGM que será descrita mais adiante. De forma geral, os coeficientes de expansão mostram que o segundo modo acoplado é marcado por oscilações de variabilidade decenal (Figura 3.18c).

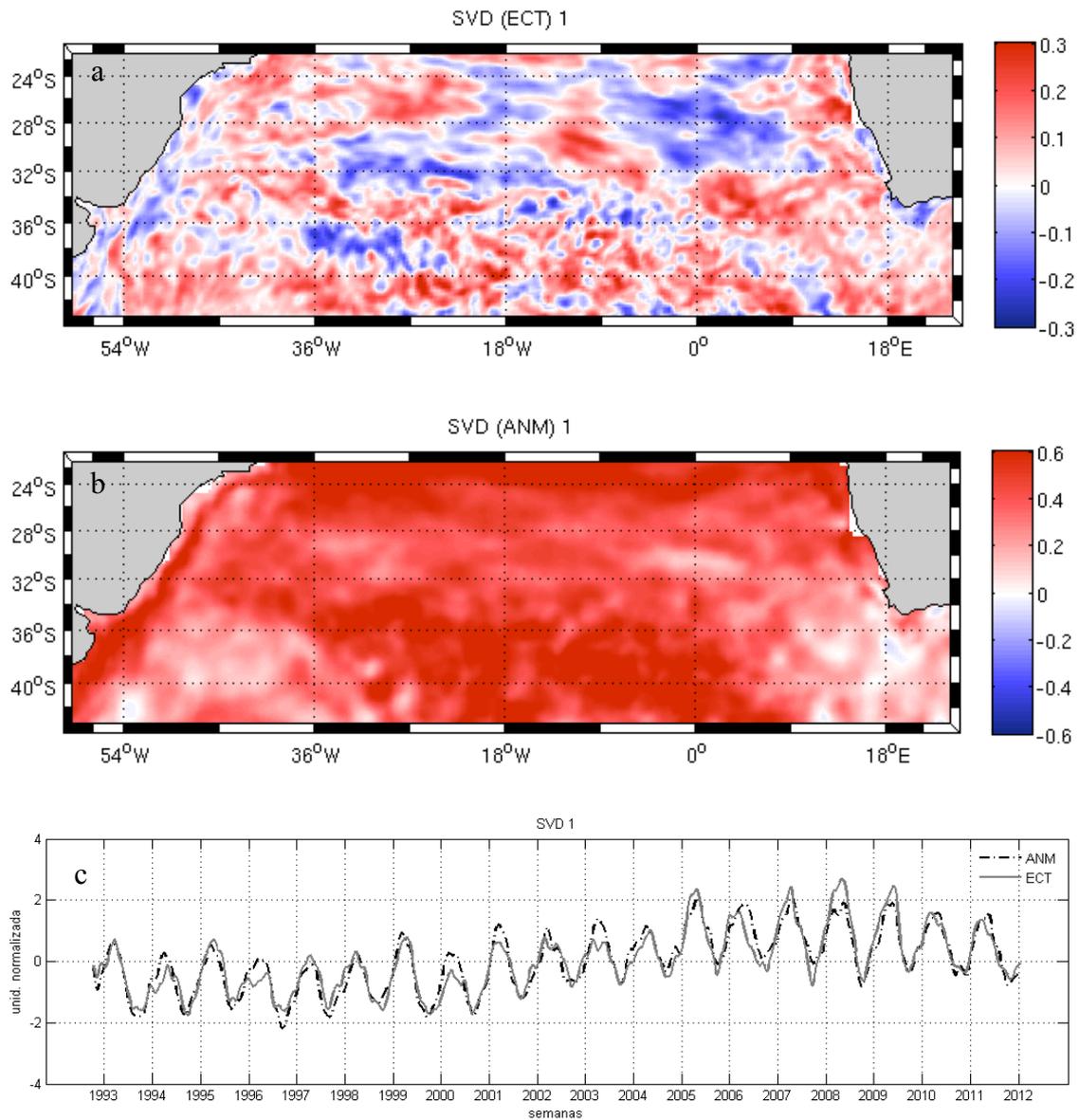


Figura 3.17 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

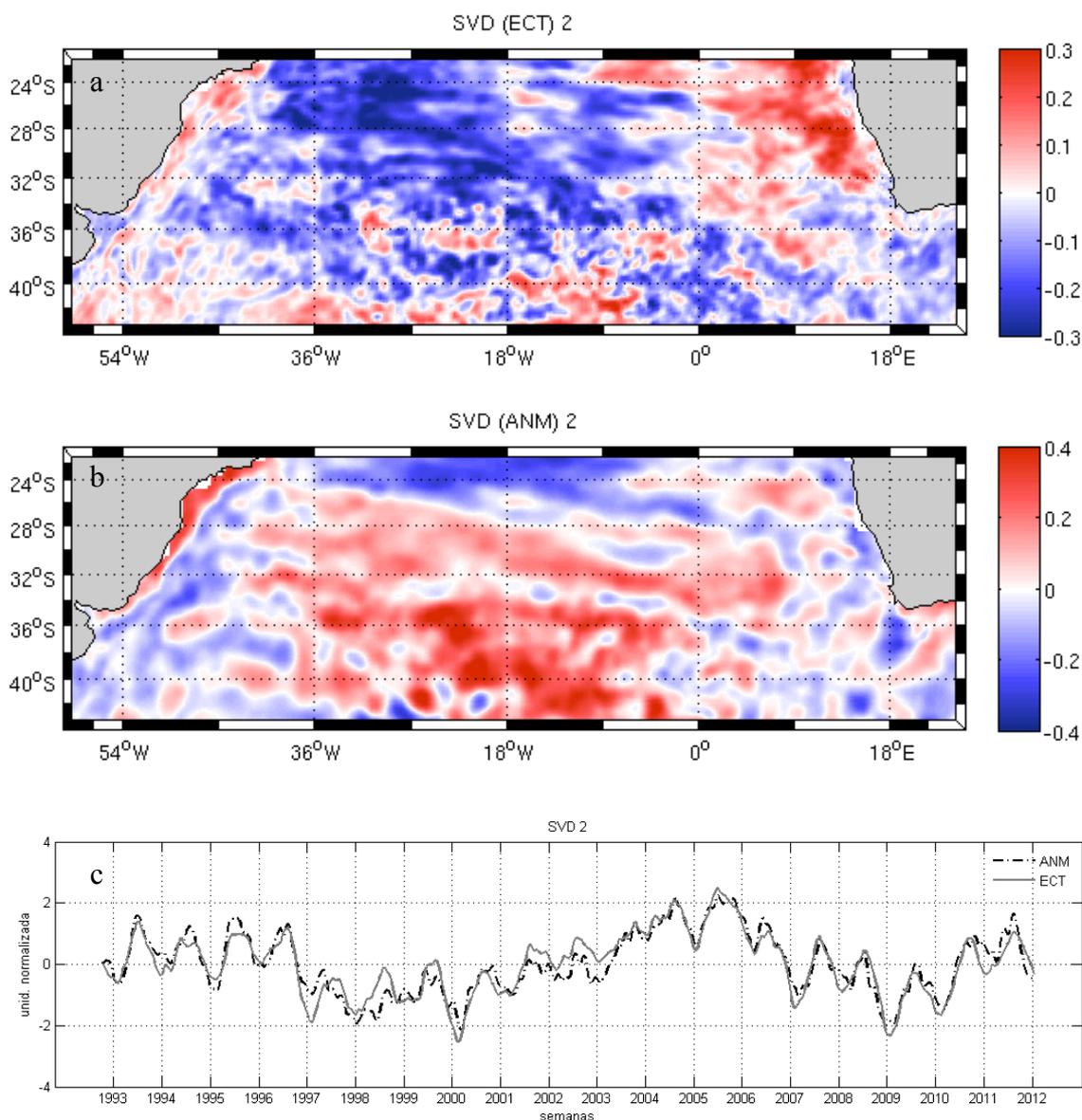


Figura 3.18 – Padrão espacial do segundo modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

Assim como observado no segundo modo, o terceiro modo acoplado (Figura 3.19) apresenta um padrão diferenciado entre o lado leste e oeste da bacia. De forma geral as feições associadas ao terceiro modo acoplado da ANM (Figura 3.19b) são similares ao terceiro modo da EOF da ANM (Figura 3.15), evidenciando o acoplamento da ANM e a ECT no centro do GSAS. Esse acoplamento é ainda maior na célula sul do GSAS, descrita por Vianna e

Menezes (2011) como uma região de forte assinatura, quando comparada com o giro norte, e com a presença de estruturas vorticais em seu interior. Os autores descrevem que a variabilidade de baixa frequência do giro é dominada por frequências interanuais. Tal resultado concorda com as séries temporais do terceiro modo acoplado (Figura 3.19c) que também sugerem oscilações interanuais (>3 anos) para esse modo de variabilidade.

De acordo com Witter e Gordon (1999), ligações entre a circulação a oeste e a leste do Atlântico Sul indicam que variações da circulação do OAS devem ser consideradas para a bacia como um todo. Dessa forma, variações no número de vórtices gerados pela retroflexão da CA podem induzir mudanças no fluxo de vorticidade turbulenta em todo o OAS. Byrne et al. (1995) relata que esse fluxo contribui significativamente para a vorticidade da CB, com potencial efeito nas taxas de formação de vórtices e misturas na região da CBM. Assim como sugerido por Garzoli et al. (1997), que descrevem que a variabilidade do transporte no Atlântico sudeste, entre o final de 1992 e meados de 1995, correspondeu à passagem dos vórtices das Agulhas, em vez de responder à variações na circulação de larga escala.

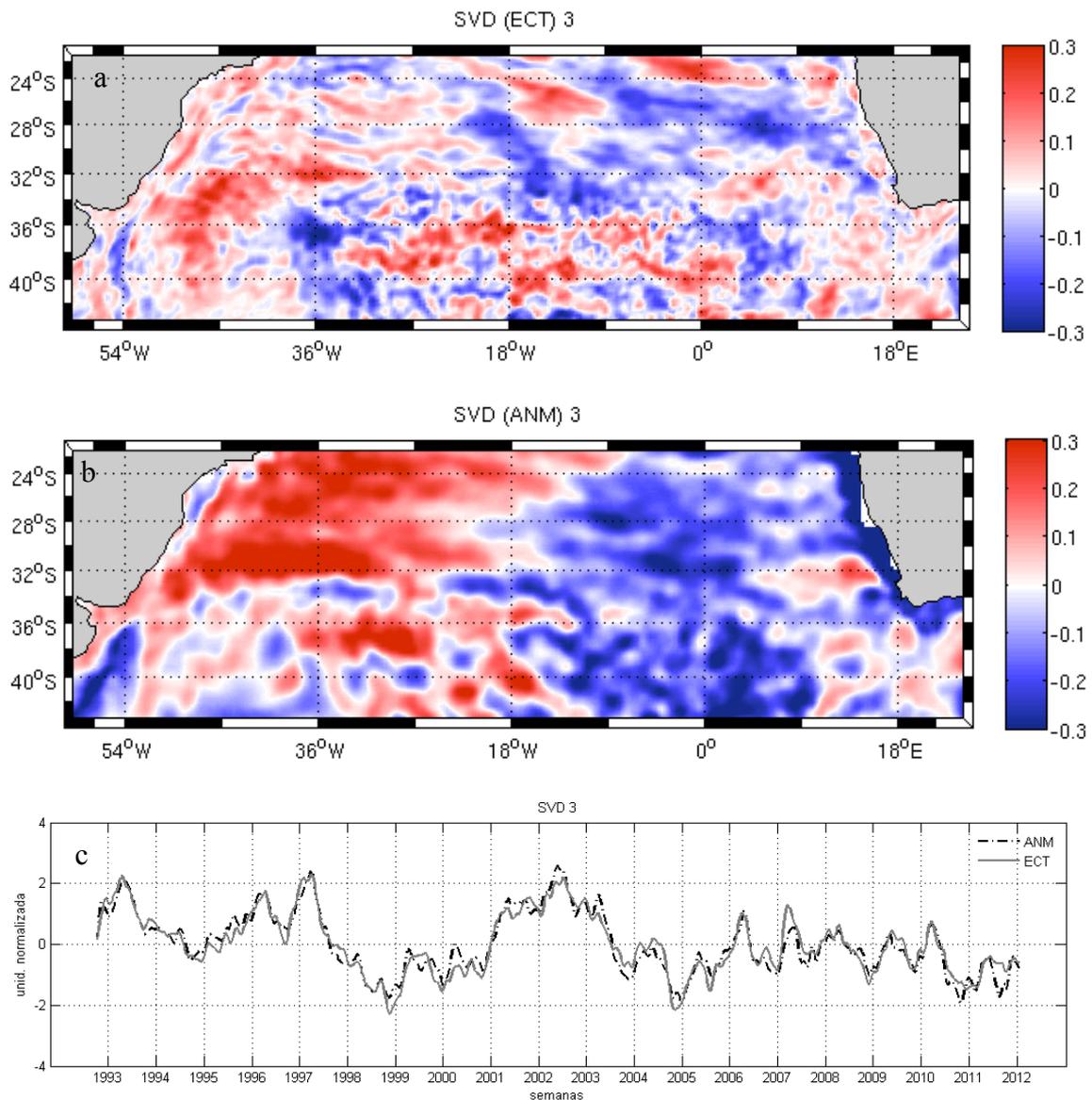


Figura 3.19 – Padrão espacial do terceiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) ANM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontos e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

Simulações numéricas da circulação do Atlântico Sul (MATANO et al., 1993), em escala sazonal, demonstraram que a intensidade e extensão zonal da circulação do giro são sensíveis a variações no rotacional da tensão de cisalhamento do vento. Quando analisada apenas a influência do vento sobre a circulação do giro é observada uma circulação mais intensa na parte oeste da bacia e uma circulação relativamente mais fraca na parte leste. O padrão

espacial da variabilidade sazonal da circulação do giro obtido por Matano et al. (1993) é similar ao padrão de variabilidade do terceiro modo da ANM da SVD entre ECT e ANM (Figura 3.19), sugerindo que esse padrão está associado à circulação do giro forçada pelo vento. Concordando também com Witter e Gordon (1999), que sugerem que o que governa a dinâmica da circulação de larga escala do OAS pode ser qualitativamente semelhante em escalas de tempo sazonal e interanual.

Análises de tendência da altimetria do nível do mar também sugerem que o padrão do giro subtropical está migrando lentamente em direção ao sul e está crescendo em amplitude (Vianna e Menezes, 2011). Essas mudanças (migração para sul do giro) estão relacionadas à migração para sul da Frente Subtropical (FST), que por sua vez, está correlacionada com a migração em direção ao polo dos ventos de oeste e aumento do transporte da VA e entra de ECT no OAS.

b) Energia Cinética Turbulenta x Anomalia da Velocidade Geostrófica Meridional

Assim como na análise de EOF, devido à baixa covariância quadrada total explicada pelo segundo e terceiro modo (menos de 2% cada) apenas o resultado do primeiro modo será apresentado e discutido. A Figura 3.20 apresenta o primeiro modo acoplado entre a ECT e a AVGM, e os respectivos coeficientes de expansão. A Tabela 3.3 mostra a porcentagem de covariância total e o coeficiente de correlação entre as séries temporais da ECT e AVGM. Assim como na SVD anterior, os coeficientes de expansão apresentaram alta correlação.

Tabela 3.3 - Porcentagem de covariância quadrada (PCQ) e coeficiente de correlação (r) entre os coeficientes de expansão acoplados da ECT e AVGM para o primeiro modo de variabilidade. Entre parênteses estão os níveis de significância da correlação.

Modo	PCQ	r
1	3,12	0,94

O primeiro modo corresponde a 3,1% da covariância quadrada total e é semelhante ao padrão espacial da primeira EOF da ECT (Figura 3.2) e da AVGM (Figura 3.13), porém com valores de correlação inversa no caso da SVD da ECT (Figura 3.20a) sugerindo que essas variáveis oscilam de forma oposta. O padrão espacial sugere que a corrente de contorno oeste, a CB, está fortemente associada à ECT nesse modo de variabilidade. Um padrão similar nessa região foi encontrado na segunda SVD da ECT e ANM (Figura 3.18), indicando que a variabilidade da ECT, nesta região, está mais associada à velocidade geostrófica do que à ANM. As séries temporais (Figura 3.20c) evidenciam que o primeiro modo de variabilidade acoplado ocorre predominantemente no padrão anual. De forma geral, os resultados sugerem que a ECT está associada às correntes oceânicas superficiais, corroborando a hipótese de que a maior parte da ECT dos está contida nas correntes de borda oeste (Fu, 2006).

Os resultados entre a ECT e ANM e ECT e AVGM apresentaram padrões acoplados de variabilidade (espacial e temporal) semelhantes aos padrões descritos pela análise de EOF dos campos individuais. Tais resultados sugerem que os principais modos de variabilidade de ambas as variáveis possuem frequências similares, e comprovam a eficiência dos métodos e a robustez dos resultados.

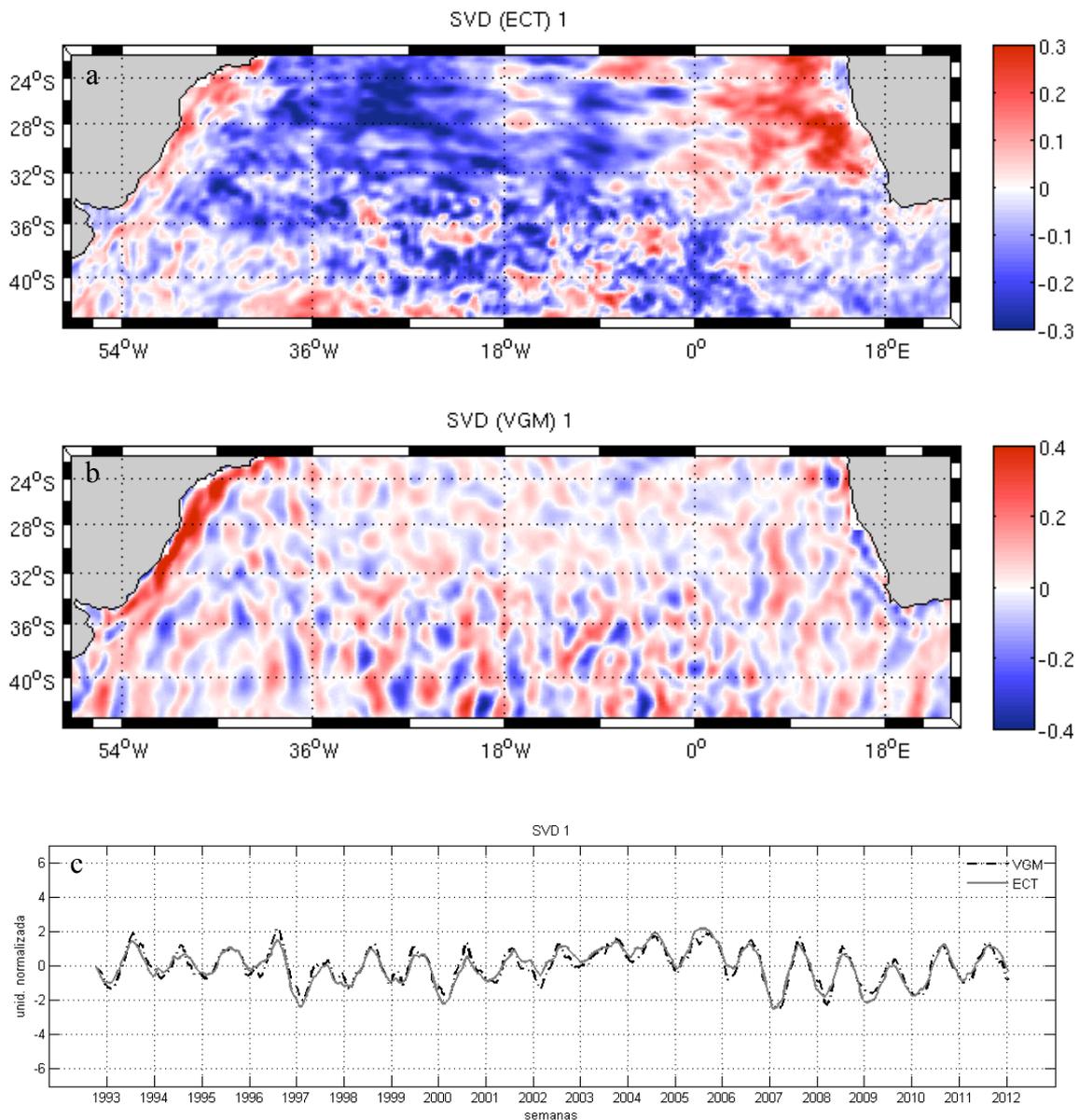


Figura 3.20 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) AVGM e os respectivos (c) coeficientes de expansão. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

3.2.4. Variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica em regiões específicas do OAS.

O método foi aplicado para os dados de ECT e ANM e ECT e AVGM acoplados, com o intuito de descrever e a variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica de forma mais detalhada do que os modos acoplados da

SVD. Para melhor compreender a variabilidade acoplada os LFVs da ANM e AVGM foram gerados para detalhar a variabilidade individual de cada variável. No entanto, por não ser o objetivo desse estudo, os gráficos serão apresentados no Apêndice A e poderão se citados ao longo do texto. A Figura 2.1 apresenta as regiões escolhidas para melhor caracterizar a variabilidade acoplada entre a ECT e a circulação oceânica.

a) Energia Cinética Turbulenta x Anomalia da Superfície do Mar

O espectro LFV obtido pela análise de MTM-SVD acoplada entre a ECT e a ANM para os dados semanais no período entre out/1992 e dez/2011 é apresentado na Figura 3.21. A partir do espectro LFV é possível observar que a dominância da variabilidade acoplada está associada à frequência anual. No entanto, assim como no primeiro modo da EOF da ANM (Figura 3.13) e da SVD entre ECT e ANM (Figura 3.17), as regiões da CBM e VA não apresentam um sinal anual pronunciado. Na banda interanual apenas a região da CBM e CB apresentam picos significativos a 95%, que se encontram entre 1,7 e 5 anos e entre 7-10 anos, respectivamente. Já na banda decenal todas as regiões apresentaram picos significativos. E assim como na análise individual da ECT, mostrada anteriormente, picos em altas frequências (entre 0,17 e 0,25 anos) são observados na variabilidade da região do Vazamento das Agulhas. De forma geral, as frequências de variabilidade encontradas concordam com estudos anteriores sobre a circulação oceânica (e.g., WITTER e GORDON, 1999 e SARACENO et al., 2009).

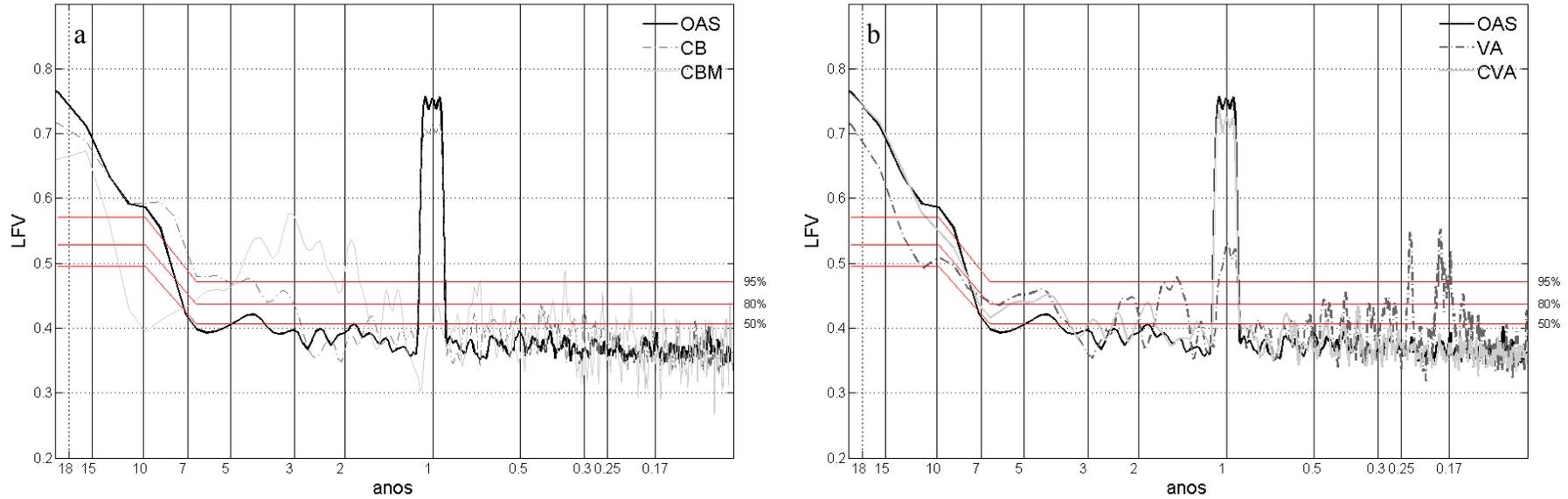


Figura 3.21 – Espectro conjunto de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) e anomalia do nível do mar (ANM) para (a) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB) e Confluência Brasil-Malvinas e (b) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95%, 80% e 50%.

Os resultados dos LFVs para as diferentes áreas sugerem que a variabilidade acoplada entre a ECT e a ANM é dominada por frequências distintas nas duas regiões mais energéticas do OAS, o VA e a CBM. Altas frequências são associadas ao VA, enquanto baixas frequências são associadas à CBM. Este resultado corrobora com Witter e Gordon (1999), que encontraram um modo de variabilidade interanual (2-3 anos) relacionado a variações meridionais da posição da CBM e a variações na distribuição de vórtices na CBM. Já a variabilidade da região do VA, amplamente descrita como uma região de alta frequência, está associada a uma forte atividade de mesoescala, como a formação de vórtices das Agulhas e a retroflexão da CA (BIASTOCH et al., 2009; LUTJEHARMS, 2006).

Em relação à variabilidade interanual, diversos estudos relatam variações na circulação oceânica do OAS associada a essa escala de tempo (e.g. VIANNA e MENEZES, 2011; GRODSKY e CARTON, 2006; WITTER e GORDON, 1999). Grodsky e Carton (2006) estudaram a variabilidade interanual do GSAS a partir de dados de ANM filtrados para a remoção do sinal anual. Períodos de 4-5 anos foram encontrados e atribuídos ao impacto da entrada dos vórtices pelo Vazamento das Agulhas. Os autores descrevem esse processo como uma das principais forçantes da variação interanual da circulação oceânica na região do CVA, como sugerido inicialmente por Byrne et al. (1995).

WITTER e GORDON (1999) também observaram variações interanuais no CVA associadas a mudanças no sentido norte-sul da posição do corredor. Segundo os autores, a variabilidade interanual (entre 6-7 anos) nessa região pode ser uma resposta direta a variações da circulação oceânica de larga escala. Essa por sua vez, pode ser afetada pela presença dos vórtices das Agulhas, que dependendo da direção de deslocamento podem ou não contribuir para com as velocidades geostróficas das correntes do lado leste da circulação do GSAS. Outra explicação para a relação entre as trajetórias dos vórtices e a variabilidade da circulação de larga escala seria de que os movimentos nas duas escalas são sensíveis a um mesmo mecanismo forçante, como por exemplo, o campo de ventos.

No entanto, o presente estudo não encontrou frequências interanuais, significativas a 95%, entre os dados de ECT e ANM para a região do CVA e do OAS. Tal resultado sugere que essa frequência pode ter sido mascarada pelo forte sinal anual, uma vez que essas oscilações são significativas a 80%. Outra possibilidade para a não detecção desse sinal pode estar associada à influência de regiões com grandes amplitudes e diferentes modos de variabilidade, como a CBM e o VA, uma vez que a MTM-SVD identifica apenas picos de variabilidade presentes em todos os pontos de grade (VENEGAS e DRINKWATER, 2001).

É importante ressaltar também que os diversos estudos que descrevem a variabilidade interanual utilizam filtros a priori para descartar frequências que não são de interesse. No entanto, como o objetivo principal desse estudo é caracterizar a variabilidade total do sistema optou-se pela não utilização de dados previamente filtrados.

Diversos estudos (PROVOST et al., 1992; MATANO et al., 1993; WAINER et al., 2000; GONI e WAINER, 2001) relacionam a variabilidade da posição CBM a mudanças no transporte da CB e CM. Provost et al. (1992), baseada em imagens infravermelho de satélite, analisaram a variabilidade temporal da TSM nessa região e encontraram modos de variabilidade anual e semianual, sendo o anual mais fraco em direção ao sul. O modo anual mostrou estar fortemente associado ao ciclo anual da CB, que é forçada pelos ventos subtropicais. Enquanto no ciclo sazonal (6 meses) mostrou-se associado à CM, que é forçada pelos ventos na Passagem de Drake. Os ventos de oeste geram pulso ao passar por essa região, que por sua vez são repassados para a CCA e então para a CM. No entanto, apesar de ser descrito como um modo de variabilidade marcante o ciclo anual foi observado apenas para o LFV da região da CB. O LFV acoplado da ECT e da AVGM apresentou resultados similares para a variabilidade da CBM na escala anual e será discutido com mais detalhes adiante.

Após identificar as frequências mais relevantes para a variabilidade acoplada da ECT e ANM os padrões espaciais de variância explicada foram construídos

para cada frequência. As Figura 3.22, Figura 3.23 e Figura 3.24 apresentam o padrão espacial e temporal de variância da ECT e da ANM para as frequências de 2,9 anos, 1 ano e 2,8 meses, respectivamente.

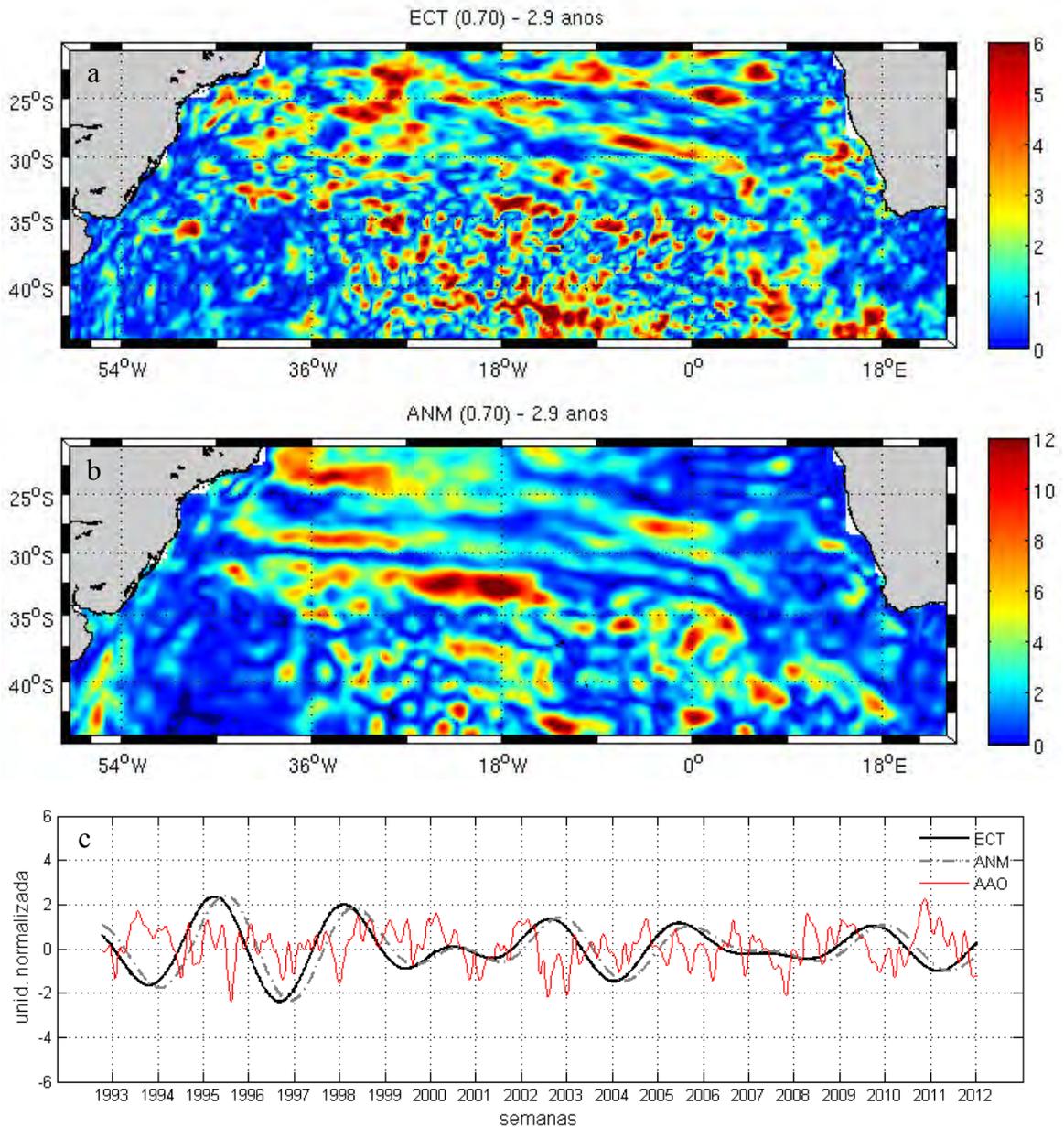


Figura 3.22 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 2,9 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 2,9 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO).

Os mapas de variância explicada para a frequência de 2,9 anos (Figura 3.22), significativa para a região da CBM, não apresentam um padrão acoplado evidente. De acordo com a Figura 3.22b, observa-se maiores valores (6-8%) de variância associados à CM, sugerindo que o acoplamento está associado às mudanças na posição da CM. Esse resultado sugere que a variabilidade nesta frequência está mais relacionada ao deslocamento da CBM do que à variabilidade da atividade de mesoescala. Resultados de altimetria indicam que, apesar de ser conhecida com uma importante região geradora de feições de mesoescala, a variabilidade da região da Confluência Brasil-Malvinas é composta por feições de menor escala espacial àquelas observadas na região da retroflexão da CA (PILO, 2013; OLIVEIRA, 2010), corroborando com a hipótese acima, que sugere que a variabilidade da CBM nessa frequência está mais associada a variações da ANM referente CM do que à atividade de mesoescala.

O padrão espacial de variância da ANM na escala interanual concorda com os resultados de Witter e Gordon (1999), que descrevem anomalias no nível do mar associadas à passagem de ondas de Rossby na região do CVA. Tais ondas são responsáveis por advectar ECT de regiões remotas para o interior do GSAS (Figura 3.22a), região conhecida por baixa atividade de mesoescala.

Em relação ao padrão temporal da frequência de 2,9 anos (Figura 3.22c), a ECT e a ANM oscilam em fase com uma defasagem temporal de 11 semanas.

A Figura 3.2Erro! Fonte de referência não encontrada.3b apresenta o padrão espacial de variância associado à frequência de um ano para ANM, que concorda com o resultado do primeiro modo da EOF da ANM (Figura 3.13), evidenciando a variabilidade anual sugerida pelo coeficiente de expansão da EOF e a representação da circulação superficial geostrófica média indicada pelo padrão espacial. Esse resultado reforça a ideia/percepção de que a variabilidade da ECT na frequência anual está associada à circulação de larga escala. A oscilação anual desse padrão espacial é confirmada nas séries temporais médias mostradas na Figura 3.23c e apresentam uma defasagem temporal de 2 semanas entre a ECT e a ANM.

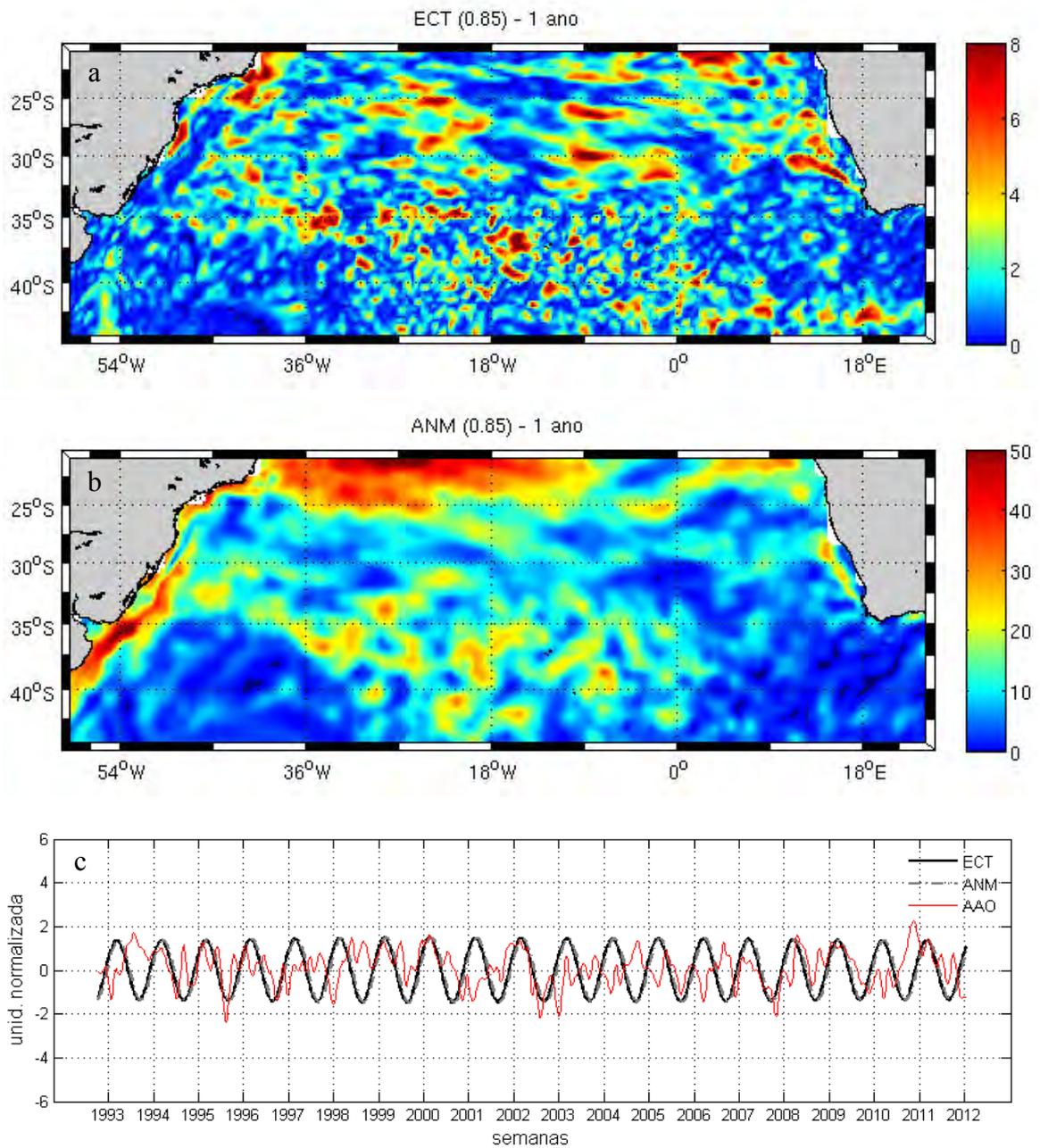


Figura 3.23 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 1 ano. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 1 ano e índice de Oscilação Antártica (AAO).

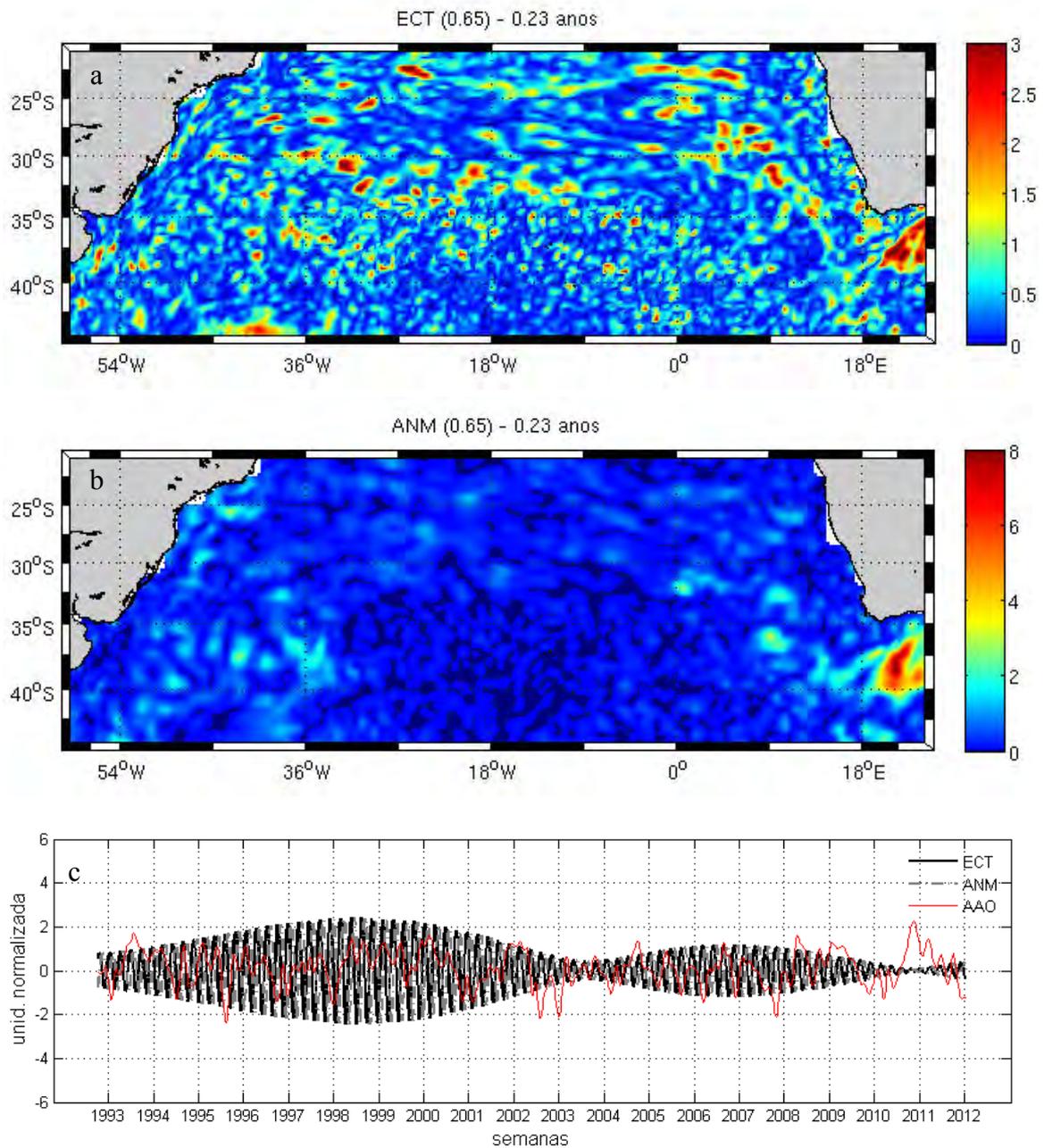


Figura 3.24 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia do nível do mar (ANM) reconstruídos para a frequência de 0,23 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da ANM reconstruídas para a frequência de 0,23 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO).

A Figura 3.24, referente ao mapa de variância da alta frequência (2,8 meses), reflete o forte acoplamento entre a ECT e a ANM na retroflexão da CA, concordando com os resultados anteriores. Tanto o padrão de ECT quanto de ANM são semelhantes ao padrão espacial da primeira EOF da ECT não

normalizada, confirmando a hipótese que de a utilização de dados não normalizados tendem a deslocar os centros de maiores amplitudes na direção das regiões da alta variância/frequência. Na Figura 3.24c observa-se que as séries temporais da ECT e ANM variam de fora de fase (180°) e que a amplitude desse sinal diminui a partir do ano de 2003.

b) Energia Cinética Turbulenta x Anomalia da Velocidade Geostrófica Meridional

A Figura 3.25 apresenta o espectro LFV acoplado da ECT e da AVGM. O ciclo anual é o modo de variabilidade dominante, exceto para a região da CBM. As regiões do VA e CBM apresentam picos significativos a 95% na frequência interanual, oscilando entre 1,5-1,8 anos e 2-3,7 anos, respectivamente. Altas frequências (<0,5 anos) são observadas principalmente no VA e no CVA.

O padrão de distribuição das frequências acopladas é similar ao padrão do espectro LFV acoplado da ECT e ANM, porém com potências menores. Este resultado é esperado, uma vez que a AVGM é derivada da ANM e representa apenas uma componente da velocidade geostrófica. No entanto, observa-se que o pico significativo entre 6 e 10 anos, que aparece no acoplamento entre a ECT e ANM na região da CB, não aparece no acoplamento com a AVGM, sugerindo que essa escala temporal pode ser associada à componente zonal da circulação superficial do oceano.

Dencausse et al. (2010b) e Lutjeharms (2006) reportam que a posição da retroflexão da CA apresenta variabilidade interanual no sentido norte-sul, o que concorda com o resultado do LFV acoplado entre a ECT e AVGM que apresenta picos significativos entre 1,5 e 2 anos para a mesma região.

A componente anual é mais pronunciada na região da CB, evidenciando a variabilidade meridional do fluxo da CB. Já para a região do VA essa componente é menos intensa, concordando com estudos pretéritos que descrevem a presença desse ciclo (FFIELD, 1997; MATANO et al., 1998) porém com sinal mais fraco (PEARCE e GRÜNDLINGH, 1982

Witter e Gordon (1999), através de análises de EOF regionais, descrevem a presença da variabilidade interanual na região da CBM e do VA forçada por fenômenos locais. Os autores sugerem que a variabilidade interanual da ANM no VA é resultado da produção de vórtices pela retroflexão da CA. Já para a região da CBM as baixas frequências estão associadas à circulação de mesoescala da própria região. Os autores utilizaram o padrão espacial interanual para reconstruir a AVGM e concluíram que essa variabilidade está associada a mudanças na posição da CBM, que é modulada por variações na CB. Nesse contexto, o padrão de distribuição da variância interanual (de 2 a 3,5 anos) entre a CB e a CBM é similar.

O LFV da ECT e AVGM não apresentou a frequência anual para a região da CBM, assim como no resultado do item anterior (Figura 3.21). Para verificar se a não detecção de um forte modo anual estava atrelada à variabilidade acoplada os espectros LFVs dos campos individuais de ECT, ANM e AVGM (Apêndice A - Figuras A.1, A.2 e A.3) foram analisados. No entanto, os campos individuais de ANM e AVGM também apresentaram fraca variabilidade anual para a região da CBM.

Tal resultado pode estar associado à dinâmica da região, que é influenciada por diferentes processos com diferentes frequências de variabilidade. Goni e Wainer (2001) descrevem que a variabilidade da posição média da CBM é associada, principalmente, à intensidade da CB, que por sua vez apresenta alta variabilidade anual. Já Provost et al. (1992), reportam que a variabilidade dessa região é controlada principalmente pela variabilidade da CM, que apresenta dominância do ciclo sazonal (6 meses). Nesse contexto, uma hipótese para explicar tal resultado seria de que a complexa interação de diferentes forçantes com diferentes frequências dificultam a formação de um ciclo anual bem definido.

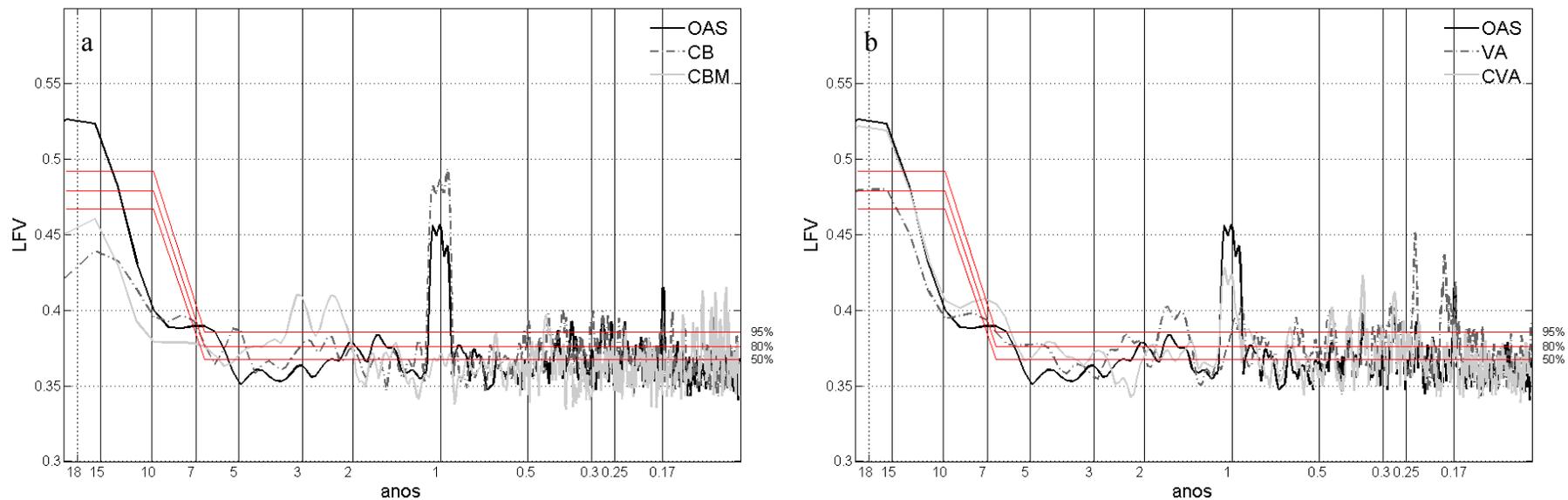


Figura 3.25 – Espectro conjunto de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) e anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) para (a) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB) e Confluência Brasil-Malvinas e (b) o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95%, 80% e 50%.

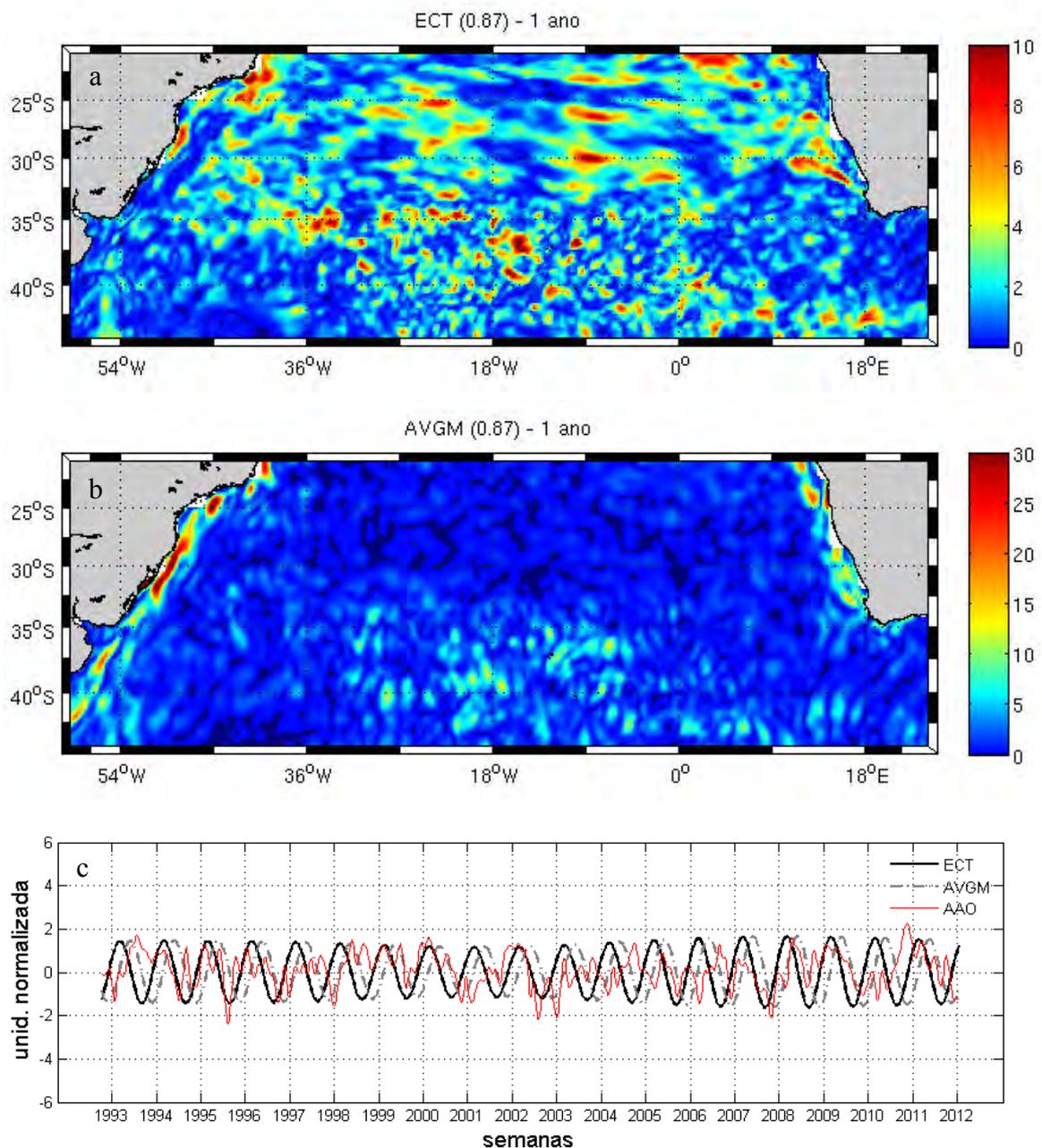


Figura 3.26 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) reconstruídos para a frequência de 1 ano. (c) séries temporais médias da ECT e da AVGM reconstruídas para a frequência de 1 ano e índice de Oscilação Antártica (AAO).

A Figura 3.26 apresenta o mapa de variância e as séries temporais médias da ECT e AVGM para a frequência de 1 ano. O padrão espacial concorda com os resultados do LFV e da primeira EOF (Figura 3.16) e SVD (Figura 3.20) da AVGM, que sugere a maior variabilidade associada às correntes de contorno.

As séries temporais confirmam o padrão anual e mostram uma defasagem de 12 semanas entre as oscilações da ECT e da AVGM nesta frequência.

Na alta frequência os mapas de variância (Figura 3.27) também concordam com os resultados anteriores, onde a maior parte dessa variabilidade está associada ao VA. E as séries temporais mostram que a ECT e a AVGM oscilam de fora de fase (180°), assim como com a ANM (Figura 3.24c).

De forma geral, os padrões espaciais das diferentes técnicas estatísticas e diferentes frequências apresentam uma feição bem definida no centro do OAS (entre 33°S - 45°S e 8°E - 35°W). Essa região coincide com o centro do Anticiclone do Atlântico Sul, que influencia a variabilidade da circulação superficial através do empilhamento de água, forçado pela diferença de pressão no interior do giro. Esse mecanismo gera uma elevação positiva da superfície do mar, que apresenta variabilidade de maior escala, gerando uma região característica definida no centro do OAS em todas as frequências.

Os resultados demonstram que uma fração significativa da variabilidade da ECT no OAS ocorre em frequências menores do que o ciclo anual, concordando com Witter e Gordon (1999), que descrevem a existência de variabilidade de alta frequência tanto para a circulação de larga escala do giro quanto para circulações de menores escalas associadas às correntes de contornos. A variabilidade anual domina a variabilidade no acoplamento entre a ANM e a AVGM, sugerindo a relação entre a ECT e a circulação oceânica associada ao ciclo solar. No entanto, nas regiões de maior atividade de mesoescala, o VA e a CBM, essa oscilação não foi predominante nessa frequência.

Por fim, cabe salientar que os resultados encontrados nas análises de EOF e SVD apresentaram um panorama mais geral do padrão espacial de variabilidade, enquanto na análise de MTM-SVD os padrões de distribuição, tanto espacial quanto temporal, foram mais detalhados confirmando a robustez da técnica estatística.

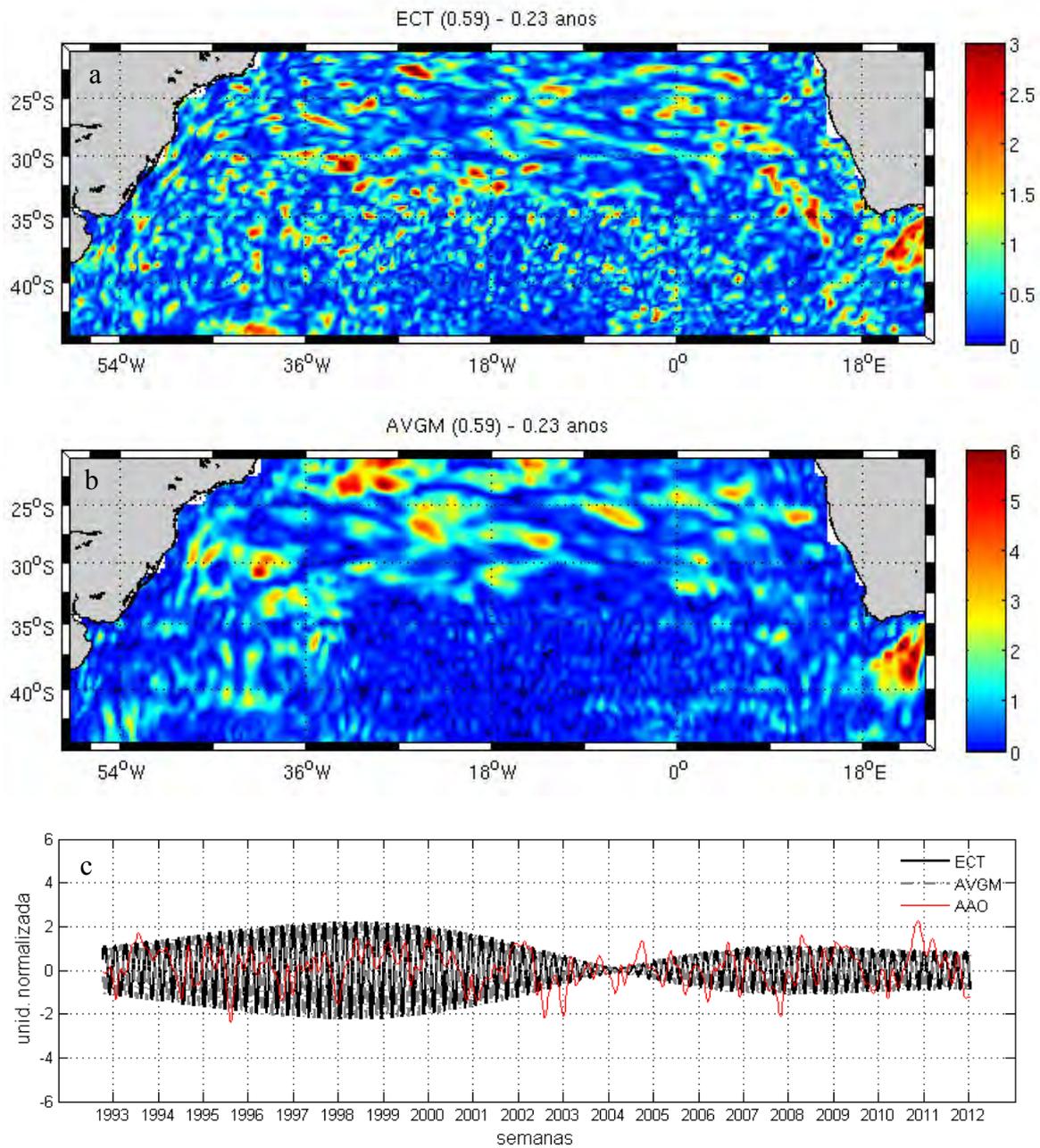


Figura 3.27 – Padrão espacial dos campos de variância explicada da (a) energia cinética turbulenta (ECT) e (b) anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) reconstruídos para a frequência de 0,23 anos. (c) séries temporais médias da ECT e da AVGM reconstruídas para a frequência de 0,23 anos e índice de Oscilação Antártica (AAO).

4 CONCLUSÕES

O presente estudo analisou a variabilidade dos campos de ECT no OAS, através de técnicas estatísticas e de dados de altimetria derivados da série temporal de 19 anos do banco de dados da AVISO. Foram aplicadas análises de EOF, SVD e MTM-SVD.

Os resultados das análises de EOF da ECT apresentaram uma maior porcentagem de variância explicada para a análise com os dados não normalizados, evidenciando que a maior parte da ECT do OAS está associada à retroflexão da CA. Em análises com dados normalizados todos os elementos (pontos de grade) recebem o mesmo peso, portanto, apenas a estrutura (e não a amplitude) influencia na determinação dos modos principais, enquanto na análise com dados não normalizados os padrões são construídos com base na variância do conjunto de dados, explicando assim as regiões mais importantes em relação à variância do dado.

Os padrões de distribuição e propagação da ECT estão de acordo com as regiões de maior atividade de mesoescala e com as rotas de propagação dos vórtices das Agulhas descritas na literatura, como esperado, uma vez que essa energia é atribuída, principalmente, a feições de mesoescala.

Os resultados demonstraram que tanto a alta (~3-6 meses) quanto a baixa frequência (~3-6 anos) da variabilidade da ECT são importante para o OAS. A baixa frequência está associada à parte oeste da bacia e a alta frequência está associada à parte leste, principalmente na região do CVA.

A CBM e o VA, regiões de maior atividade de mesoescala apresentaram dominância de escalas de variabilidade diferentes. As oscilações na região da CBM são moduladas por baixas frequências (2-5 anos), enquanto o VA apresenta maior variabilidade associada às altas frequências (2,5-10 meses).

O CVA foi observado com uma feição presente na maior parte das frequências, tanto nos dados de ECT quanto de ANM, apresentando-se como uma feição dominante na variabilidade da ECT do GSAS. Nesse contexto, os resultados

indicam que os vórtices provenientes do VA desempenham um importante papel na dinâmica do giro. Quando desconsideradas as regiões fontes de ECT, a retroflexão da CA e a CBM, a feição mais proeminente de variabilidade da ECT no OAS está entre 24°S e 35°S (CVA), associada à propagações para oeste.

As séries temporais da anomalia de ECT reconstruídas para as frequências de 2,9 anos, 1 ano e 0,23 anos demonstraram que a maior parte da ECT do OAS é proveniente do VA. Os resultados de correlação cruzada entre a ECT e o índice de AAO corroboram a hipótese de que grande parte da variabilidade da ECT do OAS está associada ao VA e que mudanças atmosféricas podem influenciar a essa variabilidade, desde mudanças no padrão espacial até mudanças no aporte de ECT proveniente do VA.

A presença do sinal anual na variabilidade oceânica foi dominante em larga escala, sugerindo que as variabilidades interanuais podem ter sido mascaradas por esta frequência, uma vez que essas oscilações não foram observadas com picos de frequência significativos. Diversos estudos descrevem o sinal interanual como uma forte componente da variabilidade do OAS, no entanto esses resultados são obtidos através de análises que utilizam conjuntos de dados filtrados para determinadas frequências. O uso prévio de filtros espectrais pode excluir frequências de variabilidade importantes, tornando essas análises tendenciosas.

Por outro lado, o estudo da variabilidade total sem restrição de frequência, gera uma gama de resultados complexos, de difícil interpretação, além de apresentar picos de alta frequência que podem estar associados à sinais de fundo (ruído). Desta forma, trabalhos relacionados a processos de mesoescala, ainda são escassos, devido à dificuldade de separar a frequência de ruídos.

As diferentes regiões, tanto na análise do campo individual quanto dos campos acoplados, apresentaram padrões de frequências distintos, evidenciando a importância da escolha dessas áreas de acordo com o objetivo do estudo. Os resultados sugerem que a escolha de uma área muito pequena pode

apresentar oscilações que não são representativas da variabilidade de larga escala, assim como áreas muito grandes podem mascarar frequências de variabilidade regionais importantes. Nesse contexto, a definição da área de estudo para análises estatísticas, como a EOF e a MTM-SVD, foi de extrema importância contribuindo para maximizar o entendimento da variabilidade do OAS.

Os métodos estatísticos demonstraram ser eficientes, apresentando padrões similares de variabilidade. A análise de MTM-SVD, por sua vez, demonstrou um detalhamento ainda maior da variabilidade, com padrões espaciais detalhados que descrevem os diferentes processos oceânicos.

Esse estudo apresenta uma análise estatística da variabilidade da ECT e seu acoplamento com a circulação oceânica superficial, uma análise dos processos físicos acerca desses modos de variabilidade é necessária. Analisar o acoplamento entre a ECT, proveniente de feições de mesoescala, e a atmosfera auxiliariam a compreender melhor como esses padrões são forçados, e conseqüentemente auxiliariam na compreensão do papel dessas feições na circulação oceânica.

Cabe ressaltar a importância de programas de coleta de dados espaciais de longo prazo para melhor compreensão da circulação oceânica, como é caso das séries temporais de altimetria disponibilizadas pela AVISO e utilizadas nesse trabalho. O uso de altimetria para monitoramento da circulação é uma ferramenta eficiente para observação dos campos energéticos associados a feições de mesoescala. Assim como séries temporais longas são necessárias para melhor caracterização da variabilidade oceânica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, J.L.; MATA, M.M. O Mecanismo de Autopropulsão de Vórtices Oceânicos: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 331-347, 2010.

AZEVEDO, J.L.; NOF, D.; MATA, M.M. Encounters of eddy trains with a continental boundary: a South Atlantic case study. **Journal Of Physical Oceanography**, v. 42, p. 1548-1565, 2012.

BEAL, L.M.; DE RUIJTER, W.P. M.; BIASTOCH, A.R. et al. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. **Nature**, v. 472, n. 7344, p. 429-436, 2011.

BIASTOCH, A.C.; BÖNING, W.; LUTJEHARMS, J.R. E. Agulhas Leakage Dynamics Affects Decadal Variability in Atlantic Overturning Circulation. **Nature**, v. 456, p. 489–492, 2008.

BIASTOCH, A.; BÖNING, C.W.; SCHWARZKOPF, F.U.; LUTJEHARMS, J.R.E. Increase in Agulhas Leakage Due to Poleward Shift of Southern Hemisphere Westerlies. **Nature**, v. 08519, n. 462, p. 495–499, 2009.

BJORNSSON, H.; VENEGAS, S.A. **A Manual for FOE and DVS analyses of Climatic Data**. McGill University, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, 53p, 1997.

BRETHERTON, C.S.; SMITH, C.; WALLACE, J.M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. **Journal of Climate**, v. 5, p. 541–560, 1992.

BYRNE, D.A.; GORDON, A.L.; HAXBY, W.F. Agulhas Eddies: A Synoptic View Using Geosat ERM Data. **Journal of Physical Oceanography**, v. 25, p. 902-917, 1995.

CAMPOS, E.J.D.; LENTINI, C.A.D.; MILLER, J.L.; PIOLA, A.R. Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 14, p. 2061-2064, 1999.

CHAIGNEAU, A.; ELDIN, G.; DEWITTE, B. Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). **Progress in Oceanography**, v. 83, p. 117–123, 2009.

CHELTON, D.B.; SCHLAX, M.G.; WITTER, D.L.; RICHMAN J.G. Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. 17, p. 877-1,903, 1990.

- CHELTON, D.B.; SCHLAX, M.G.; SAMELSON, R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. **Progress in Oceanography**, v. 91, p. 167–216, 2011.
- CHELTON, D. B.; M. G. SCHLAX; R. M. SAMELSON; R. A. DE SZOEKE. Global observations of large oceanic eddies, **Geophys. Res. Lett.**, 34, L15606, doi:10.1029/2007GL030812, 2007.
- CHELTON, D.B.; R.A. DESZOEKE; M.G. SCHLAX; K. EL NAGGAR; N. SIWERTZ. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. **J. Phys. Oceanogr.**, v 28, n (3), p 433-460, 1998.
- CORREA-RAMIREZ, M.; HORMAZABAL, S. MultiTaper Method-Singular Value Decomposition (MTM-SVD): variabilidad espacio-frecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar en el Pacífico suroriental. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 40, n. 4, p. 1039-1060, 2012.
- CUSHMAN-ROISIN, B.; CHASSIGNET, E.P.; TANG, B. Westward Motion of Mesoscale Eddies. **Journal of Physical Oceanography**, v. 20, p. 758-768, 1990.
- DE RUIJTER, W.P.M., BIASTOCH, A., DRIJFHOUT, S.S.J., et al. Indian-Atlantic interocean exchange: Dynamics, estimation and impact. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20.885–20.910, 1999.
- DE RUIJTER, W. Asymptotic analysis of the Agulhas and Brazil Current systems. **Journal of Physical Oceanography**, v. 12, n. 4, p. 361–373, 1982.
- DE RUIJTER, W.; AKEN, H.; BEIER, E.; LUTJEHARMS, J.; MATANO, R.; SCHOUTEN, M. Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 51, n. 3, p. 383–400, 2004.
- DENCAUSSE, G.; ARHAN, M.; SPEICH, S. Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 57, n. 11, 1406-1421, 2010a.
- DENCAUSSE, G.; ARHAN, M.; SPEICH, S. Spatio-temporal characteristics of the Agulhas Current retroflection. **Deep Sea Research**, v. 57, p. 1392–1405, 2010b.
- DONNERS, J.; DRIJFHOUT, S. The Lagrangian view of South Atlantic interocean exchange in a global ocean model compared with inverse model results. **Journal of Physical Oceanography**, p. 1019-1035, 2004.
- DRIJFHOUT, S.S. Ring genesis and the related transports of heat, momentum and vorticity: A parameter study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 20, p. 1645– 1665, 1990.

DUCET, N.; LE TRAON, P.Y.; RIVERDIN, G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and 2. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. C8, p. 19,477– 19,498, 2000.

FFIELD, A.; TOOLE, J.; WILSON, D. Seasonal circulation in the South Indian Ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 2, p. 2773-2776, 1997.

FU, L. Pathways of eddies in the South Atlantic Ocean revealed from satellite altimeter observations. **Geophysical Research Letters**, vol. 33. L14610, 2006.

GARNIER, E.; VERRON, J.; BARNIER, B. Variability of the South Atlantic upper ocean circulation: A data assimilation experiment with 5 years of TOPEX/POSEIDON altimeter observations. **International Journal Remote Sensing**, v. 24, p. 911–934, 2003.

GARZOLI, S.L.; GORDON A.L., 1996. Origins and variability of the Benguela Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 897– 906, 1996.

GARZOLI, S.L.; GONI, G.J.; MARIANO, A.J.; OLSON, D.B. Monitoring the upper southeastern Atlantic transports using altimeter data. **Journal of Marine Research**, v. 55, p. 453-481, 1997.

GHERARDI, D.F.M.; PAES, E.T.; SOARES, H.C.; PEZZI, L.P.; KAYANO, M.T. Differences between spatial patterns of climate variability and large marine ecosystems in the western South Atlantic. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 310-319, 2010.

GIAROLLA, E.; MATANO, R. The Low-Frequency Variability of the Southern Ocean Circulation. **Journal of Climate**. doi:10.1175/JCLI-D-12-00293.1, in press, 2013.

GONÇALVES, R. C. **Impactos de mudanças nos ventos de oeste do Hemisfério Sul no Vazamento das Agulhas**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física), Universidade de São Paulo, 2012.

GONG, D.; WANG, S. Definition of Antarctic oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v.26, p. 459-462, 1999.

GONI, G. J.; WAINER, I. Investigation of the Brazil Current front variability from altimeter data. **Journal of Geophysical Research**,, 106, 31,117– 31,128, 2001.

GORDON, A.L. The brawniest retroflection. **Nature**, v. 421, p. 904–905, 2003.

GORDON, A.L.. Interocean Exchange of Thermocline Water. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. C4, p. 5037–5046, 1986.

GORDON, A.L.; LUTJEHARMS, J. Stratification and circulation at the Agulhas retroflection. **Deep Sea Research Part A**, v. 34, n. 4, 1987.

GORDON, A.L.; WEISS, R.F.; SMETHIE JR., W.M.; WARNER, M.J. Thermocline and Intermediate Water Communication Between the South Atlantic and Indian Oceans. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C5, p. 7223–7240, 1992.

GRODSKY, S.A.; CARTON, J.A. Influence of the tropics on the climate of South Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 33: L06719.1-L06719.4, 2006a.

GRODSKY, S.A.; CARTON, J.A. Interannual variations of sea level in the South Atlantic based on satellite altimetry. In: SYMPOSIUM ON 15 YEARS OF PROGRESS IN RADAR ALTIMETRY, 2006, Venice. **Proceedings...** Venice, Italy: European Space Agency, 2006b. ISBN:92-9092-925-1 .

GUERRA, L. A. A. Vórtices das Agulhas colidem com a Corrente do Brasil? Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011

HAARSMA, R.J.; CAMPOS, E.J.D.; HAZELEGER, C.W.; SEVERIJNS, C.; DRIJFHOUT, S. Impacts of interruption of the Agulhas leakage on the tropical Atlantic in coupled ocean-atmosphere simulations. **Climate Dynamics**, doi:10.1007/s00382-009-0692-7, 2009.

HAARSMA, R.J.; CAMPOS E.J.D.; HAZELEGER, W.; SEVERIJNS, C.; PIOLA, A.R.; MOLTENI, F. Dominant modes of variability in the South Atlantic: A study with a hierarchy of ocean-atmosphere model. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1719-1735, 2005.

HALL, A.; VISBECK, M. Synchronous variability in the southern hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3043-3057, 2002.

HOUGHTON, R.; TOURRE, Y. Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic. **Journal of Climate**, v. 5, p. 765–771, 1992.

JIA, F.; WU, L.; LAN, J.; QIU, B. Interannual modulation of eddy kinetic energy in the southeast Indian Ocean by Southern Annular Mode. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. C02029, 2011.

LEE, M.-M.; NURSER, A.J.G.; COWARD, A.C.; DE CUEVAS, B.A. Eddy advective and diffusive transports of heat and salt in the Southern **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, p. 1376–1393, 2007.

LEE, S-K.; PARK, W.; VAN SEBILLE, E.; BARINGER, M.O.; WANG, C.; ENFIELD, D.B.; YEAGER, S.G.; KIRTMAN, B.P. What caused the significant increase in Atlantic Ocean heat content since the mid-20th century? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 17, p. 1-6, 2011.

LENTINI, C.A.D.; GONI, G.J.; OLSON, D.B. Investigation of Brazil Current Rings in the Confluence Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. C06013, 2006.

LENTINI, C.A.D.; OLSON, D.B.; PODESTA, G.P. Statistics of Brazil Current Rings Observed from AVHRR: 1993 to 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 16, 2002.

LUTJEHARMS, J.R.E. The Agulhas current. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006. 329 p.

LUTJEHARMS, J.R.E.; VAN BALLEGOOYEN, R.C. The retroflexion of the Agulhas Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1570-1583, 1988.

LUTJEHARMS, J.R.E. The exchange of water between the south Indian and South Atlantic Oceans. In: The South Atlantic: Present and Past Circulation, edited by: WEFER, G., BERGER, W. H., SIEDLER, G., WEBB, D. J. (eds.) Berlin (Springer-Verlag), 125–162, 1996. **The Southern Atlantic**: present and past circulation. New York: Springer-Verlag, 1996. p. 125-162.

LUTJEHARMS, J.R.E.; C.S. FILLIS. Intrusion of sub-Antarctic water across the Subtropical Convergence South of Africa. **South African Journal of Science**, v. 99, n. 3/4, p. 173–176, 2003.

LUTJEHARMS, J.R.E. Remote sensing corroboration of retroflexion of the East Madagascar Current. **Deep-Sea Research I**, v. 35, p. 2045–2050, 1988.

MANN, M. E.; PARK, J. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 25819-25833, 1994.

MANN, M.E.; PARK, J. Oscillatory spatio-temporal signal detection in climate studies: A multi-taper spectral domain approach. **Advances in Geophysics**, v. 41, p. 1 – 131, 1999.

MATANO, R.P.; SCHLAX, M.G.; CHELTON, D.B. Seasonal variability in the Southwestern Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, p. 18,027-18,036, 1993.

MATANO, R.P.; SIMIONATO, C.G.; DE RUIJTER, W.P.; VAN LEEUWEEN, P.J.; STRUB, P.T.; CHELTON, D.B.; SCHLAX, M.G. Seasonal variability in the

Agulhas Retroflection region. **Geophysical Research Letters**, v.5, p. 4361-4364, 1998.

MEMERY, L.; ARHAN, M.; ALVAREZ-SALGADO, X.A.; MESSIAS, M.-J.; MERCIER, H.; CASTRO, C.G.; RIOS, A.F. The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic. **Progress in Oceanography**, v. 47, p. 69–98, 2000.

MORROW, R.; BIROL, F.; GRIFFIN, D.; SUDRE, J. Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies. **Geophysical Research Letters**, v. 31, 2004.

OLIVEIRA, F.S.C. **Sinais propagantes para oeste no oceano Atlântico: vórtices ou ondas de Rossby?** Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física), Universidade de São Paulo, 2010.

OLSON, D.B.. Rings in the Ocean. **Annual Review Earth Planetary Sciences**, v. 19, p. 283-311, 1991.

OLSON, D.B.; EVANS, R.H. Rings of the Agulhas Current. **Deep-Sea Research**, v. 33, n. 1, p. 27-42, 1986.

OLSON, D.B., PODESTÁ, G.P.; EVANS, R.H.; BROWN, O.B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep-Sea Research**, v. 35, n. 12, p. 1971–1990, 1988.

PEARCE, A.F.; GRÜNDLINGH, M.L. Is there a seasonal variation in the Agulhas Current?. **Journal of Marine Research**, v. 40, p. 177-184, 1982.

PETERSON, R.G.; STRAMMA, L. Upper level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, p. 1-73, 1991.

PILO, G.S. **Demografia de vórtices oceânicos em três sistemas associados a correntes de contorno oeste do Hemisfério Sul.** Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.

PROVOST, C.; GARCIA, O.; GARÇON, V. Analysis of satellite sea surface temperature time series in the Brazil-Malvinas current confluence region: dominance of the annual and semiannual periods. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. 11, p. 17841-17858, 1992.

RICHARDSON, P. L. Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters. **Deep Sea Res. I**, v. 54, 1361–1389, 2007.

RICHARDSON, P.L.; LUTJEHARMS, J.R.E.; BOEBEL, O. Introduction to the “inter-ocean exchange around southern Africa”. **Deep-Sea Research II**, v. 50, n. 1, p. 1–12, 2003.

RICHARDSON, P.L. Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters. **Deep-Sea Research I**, v. 54, p. 1361–1389, 2007.

ROBINSON, A.R. Eddies in Marine Science. Berlin: **Springer Verlag**, p. 616, 1983.

ROUAULT, M.; PENVEN, P.; POHL, E B. Warming in the Agulhas Current system since the 1980's. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 12, p. 1–5, 2009.

SARACENO, M.; PROVOST, C.; PIOLA, A.; BAVA, J.; GAGLIARDINI, A. Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 2004.

SARACENO, M.; PROVOST, C. ; ZAJACZKOVSKI, U. Long-term variation in the 38 anticyclonic ocean circulation over the Zapiola Rise as observed by satellite altimetry: 39 evidence of possible collapses. **Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research**, v. 56, n. 7, p. 1077-1092, 2009.

SCHARFFENBERG, M.G.; STAMMER, D. Seasonal variations of the large-scale geostrophic flow-field and of eddy kinetic energy inferred from the TOPEX/Poseidon and Jason-1 Tandem Mission Data. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. C02008, 2010.

SCHOUTEN, M.W.; RUIJTER, W.P.M; VAN LEEUWEN, P.J. e LUTJEHARMS, J.R.E. Translation, Decay and Splitting of Agulhas Rings in the Southeastern Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. C9, p. 21913-21925, 2000.

SCHOUTEN, M.W.; DE RUIJTER, W.P.M.; VAN LEEUWEN, P.J. Upstream control of agulhas ring shedding. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, 2002

SHANNON, L.V.; LUTJEHARMS, J.R.E.; AGENBAG, J.J. Episodic input of Subantarctic water into the Benguela region. **South African Journal of Science**, v. 85, n. 5, p. 317–332, 1989.

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

SIEGEL, D.A.; MCGILLICUDDY, D.J.JR.; FIELDS, E.A. Mesoscale eddies, satellite altimetry, and new production in the Sargasso Sea. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. C6, p. 13359–13379, 1999.

SOUZA, R. B. **Oceanografia por Satélite**. São Paulo: Oficina de textos. cap. 18, p. 276-285, 2005.

STAMMER, D. Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/Poseidon altimeter measurements. **Journal of Physical Oceanography**, v. 27, p.1743–1769, 1997.

STAMMER, D.; WUNSCH, C. Temporal changes in the mesoscale variability of the oceans. **Deep-Sea Research II**, v. 46, p. :77–108, 1999.

STAMMER, D.; WUNSCH, C.; UEYOSHI, K. Temporal changes in ocean eddy transports, **Journal Of Physical Oceanography**, v.36, p. 543-550, 2006.

STERL, A.; HAZELEGER, W. Coupled variability and air-sea interaction in the South Atlantic Ocean. **Climate Dynamics**, v. 21, p.559–571, 2003.

STOMMEL, H.; ARONS, A. B. On the abyssal circulation of the world ocean -ii. an idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. **Deep Sea Research**, v. 6, p. 217-230, 1960.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R.G. Geostrophic transport in the Brazil Current region. **Deep-Sea Research**, v. 37, n. 12, p. 1875-1886, 1990.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20863-20883, 1999.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y. ; PETERSON, R.G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20°S. **Deep-Sea Research**, v. 37, p. 1875–1886, 1990.

SWART, S.; SPEICH , S.; ANSORGE , I.J.; LUTJEHARMS, J.R.E. An altimetry-based gravest empirical mode south of Africa: 1. Development and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. C03002, 2010.

TEIXEIRA, C.E.P.; MATA, M.M.; LENTINI, C.A.D.; GARCIA, C.A.E.; CAMPOS, E.J.D. On the temporal variability of the sea surface temperature in the southwestern Atlantic based on the analysis of “Pathfinder AVHRR/NOAA” images. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 3, p. 207-21, 2009.

THOMPSON, D.W. J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent southern hemisphere climate change. **Science**, v. 296, p. 895–899, 2002.

THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J. Annular modes in the extratropical circulation. part i: Month-to-month variability*. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, 2000.

THOMSON, D.J. Spectrum estimation and harmonic analysis. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, p. 1055-1096, 1982.

- TOURRE , Y.M.; WHITE, W.B. Global climate signals and equatorial SST variability in the Indian, Pacific and Atlantic oceans during the 20th century. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L06716, 2006.
- TSUCHIYA, M. Evidence of a double-cell subtropical gyre in the South Atlantic Ocean, **Journal of Marine Research**, v. 43, p.57–65, 1985.
- VENEGAS, S.A.; DRINKWATER, M.R. Sea ice, atmosphere and upper ocean variability in the Weddell Sea, Antarctica. **Journal of Physical Oceanography**, v. 106, n. C8, p. 16,747–16,766, 2001.
- VENEGAS, S.A.; MYSAK, L.A.; STRAUB, D.N. Atmosphere-ocean coupled variability in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v.10, p. 2904-2920, 1997.
- VIANNA, M. L.; MENEZES, V. V. Double-celled subtropical gyre in the South Atlantic Ocean: Means, trends, and interannual changes. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. C03024, 2011.
- VIANNA, M. L.; MENEZES, V.V.; CHAMBERS, D.P. A high resolution satellite-only GRACE-based mean dynamic topography of the South Atlantic Ocean, **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. L24604, 2007.
- WAINER, I.; GENT, P.; GONI, G. Annual cycle of the Brazil-Malvinas Confluence region in the National Center for Atmospheric Research Climate System Model. **Journal of Geophysical Research**, v. 105 n. C11, p. 26167-26177, 2000.
- WAINER, I.; TASHETTO, A.S. Climatologia na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). Diagnóstico para os períodos relativos aos levantamentos pesqueiros do programa revizee. In: Rossiwongtschowski, C.L.B.; Madureira, L.S. (Eds) **O ambiente oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil**. São Paulo: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2006. p. 472. ISBN 85-314-0948-9.
- WALLACE, J.M. Class notes on SVD and EOF analyses, Available online at <http://jisao.washington.edu/wallace/>, 2001. Access: jun. 2013.
- WALLACE, J.M.; SMITH, C.; BRETHERTON, C.S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. **Journal of Climate**, v. 5, p. 561–576, 1992.
- WEIJER, W. Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy. **Global and Planetary Change**, v. 34, n. 3-4, p. 293-311, 2002.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2 ed.
Londres: Academic Press, p. 648, 2006.

WITTER, D.L.; GORDON, A.L. Interannual variability of South Atlantic circulation from 4 Years of TOPEX/POSEIDON satellite altimeter observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 20927-20948, 1999.

YUAN, X.; LI, C. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. C06S91, 2008.

APÊNDICE A

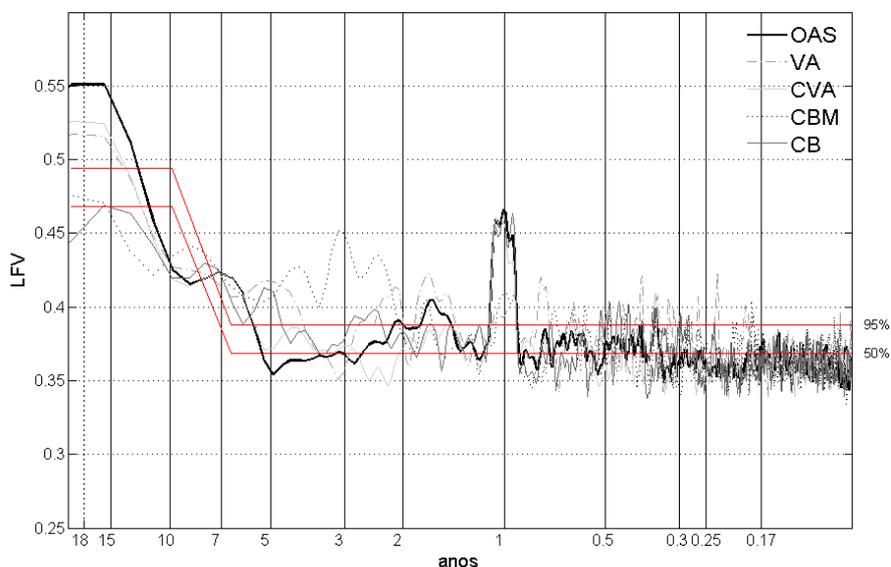


Figura A. 1 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de energia cinética turbulenta (ECT) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%.

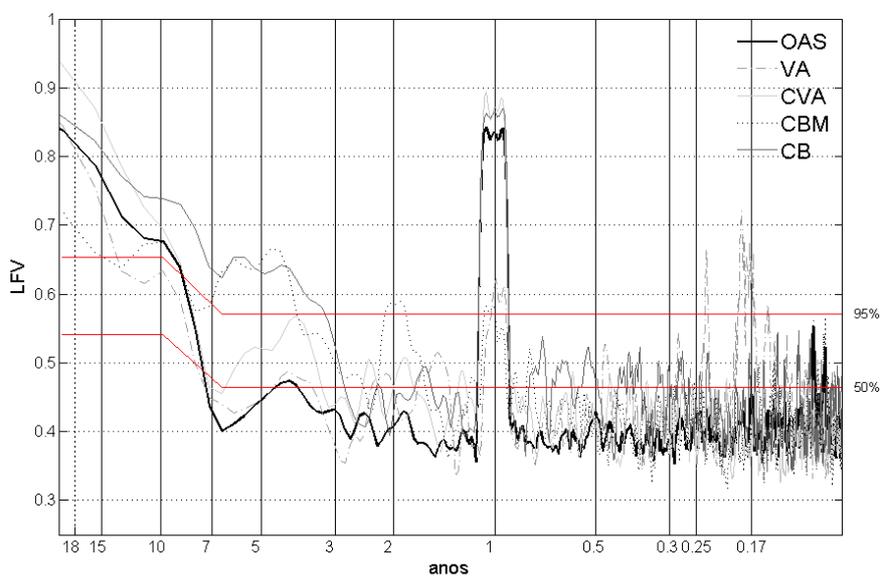


Figura A. 2 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de anomalia do nível do mar (ANM) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%.

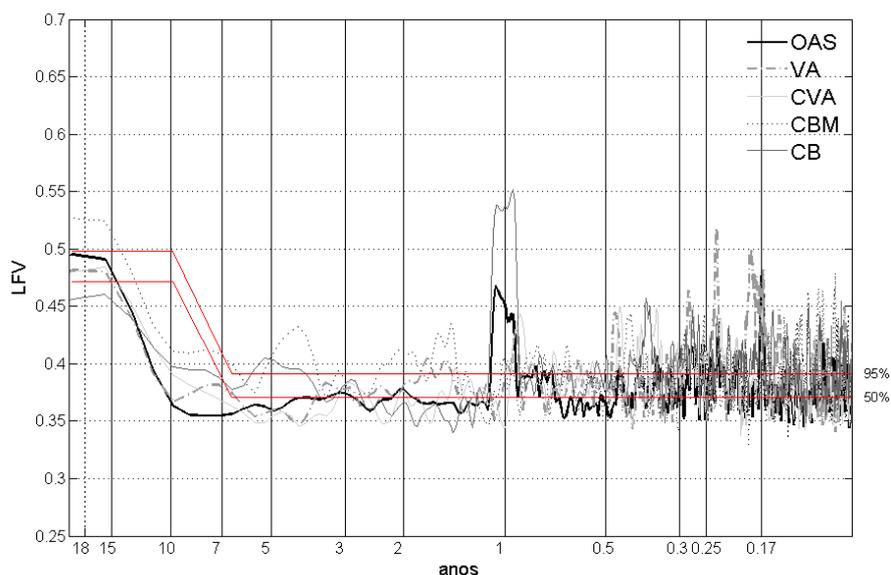


Figura A. 3 – Espectro de fração de variância local (LFV) calculado para a série temporal de 19 anos de dados de anomalia da velocidade geostrófica meridional (AVGM) para o Oceano Atlântico Sul (OAS), Corrente do Brasil (CB), Confluência Brasil-Malvinas, Corredor de Vórtices das Agulhas (CVA) e Vazamento das Agulhas (VA). As linhas vermelhas representam o nível de significância a 95% e 50%.

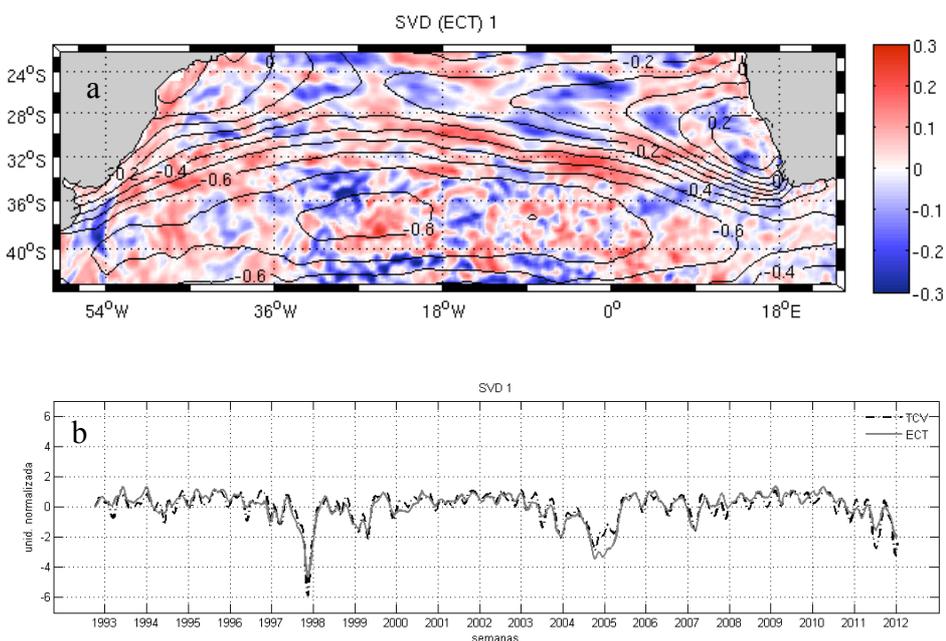


Figura A. 4 – Padrão espacial do primeiro modo da SVD entre a (a) ECT e (b) TCV e os respectivos coeficientes de expansão. (a) os contornos mostram o padrão espacial da TCV sobrepostos ao padrão da ECT. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.

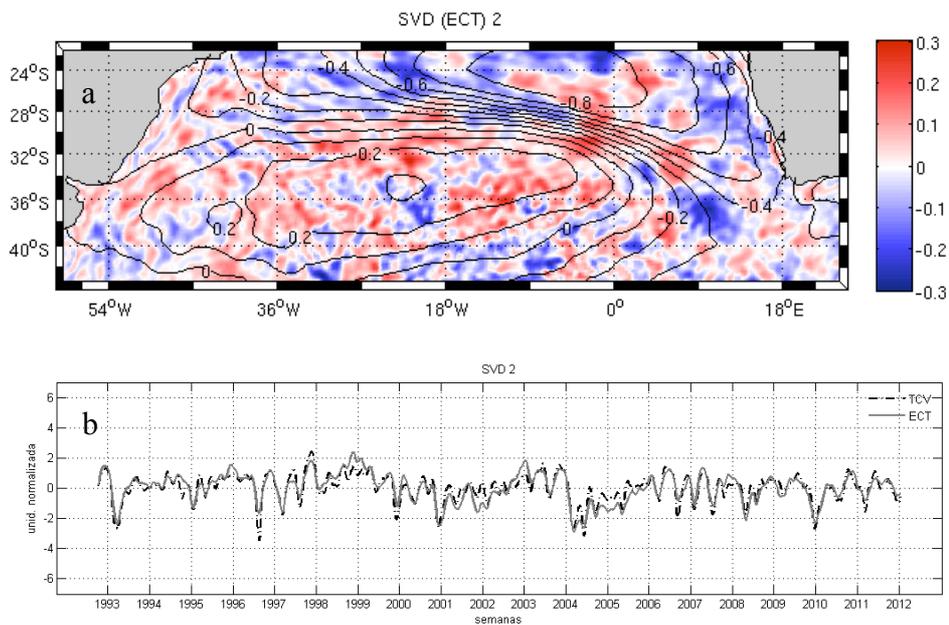


Figura A. 5 – Padrão espacial do segundo modo da SVD entre a (a) ECT e (b) TCV e os respectivos coeficientes de expansão. (a) os contornos mostram o padrão espacial da TCV sobrepostos ao padrão da ECT. Os padrões espaciais são apresentados na forma de mapas de correlação e as séries temporais foram filtradas com um filtro de média móvel de 5 pontas e as amplitudes foram normalizadas pelo desvio padrão.