



ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS DE RESSURGÊNCIA E DE SUAS FORÇANTES NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

Thiago Silva Baron

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Rio de Janeiro
Outubro de 2023

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS DE RESSURGÊNCIA E
DE SUAS FORÇANTES NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

Thiago Silva Baron

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Aprovada por: Prof. Afonso de Moraes Paiva

Prof. Marcos Nicolás Gallo

Prof. Mauro Cirano

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2023

Baron, Thiago Silva

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS
DE RESSURGÊNCIA E DE SUAS FORÇANTES NA
REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA/Thiago Silva Baron.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XV, 76 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Oceânica, 2023.

Referências: p. 72 – 76.

1. Ressurgência. 2. Cabo Frio. 3. Variabilidade
Interanual. 4. Intrusão da Corrente do Brasil. I.
Paiva, Afonso de Moraes. II. Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica.
III. Título.

*"Que nos apropriemos desse mar
com uma posse real, profunda,
apaixonada e definitiva."
(Alte Paulo Moreira)*

Agradecimentos

A Deus e à minha família por tudo.

À Marinha do Brasil pela oportunidade, em especial ao Almirante Rudicley Cantarin, então Comandante da BNRJ, pelo incentivo, e ao Diretor do IEAPM, CMG Uendel, e a Superintendente de Pesquisas, CF(T) Marcia Helena, pela confiança.

Ao professor Afonso Paiva, pelas orientações e por todos os ensinamentos passados ao longo do mestrado. Ainda, por coordenar, em um ambiente de muita colaboração, a equipe do Laboratório de Oceanografia Física - LOF/COPPE da UFRJ. A quem também agradeço todos os seus integrantes pela ajuda e pelo trabalho desenvolvido, sem o qual não seria possível a realização deste estudo.

Ao corpo docente da COPPE/UFRJ, em especial aos professores Marcos Gallo, Susana Vinzon, Claudio Freitas, Luiz Gallisa, Paulo Rosman e Mauro Cirano, pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos do IEAPM por todo apoio. Particularmente aos Comandantes Marcos Tonelli e Victor Daher, pela disponibilidade e substancial colaboração na fase final deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DOS CENTROS DE RESSURGÊNCIA E DE SUAS FORÇANTES NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

Thiago Silva Baron

Outubro/2023

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho tem como propósito investigar a variabilidade interanual da ressurgência na região sudeste brasileira, onde foi verificado que somente as forçantes atmosféricas não são suficientes para explicar as variações interanuais de afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS).

Foram utilizados 10 anos de resultados da base hidrodinâmica LSE24, uma re-análise oceânica desenvolvida pela equipe do Laboratório de Oceanografia Física - LOF/COPPE da UFRJ, utilizando simulações com o modelo HYCOM, no escopo da REMO - Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica.

A análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) da circulação indica que a variação da intensidade do fluxo da Corrente do Brasil sobre a plataforma continental exerce um importante papel como forçante da ressurgência na região sudeste como um todo. A quantificação e análise do transporte de Ekman na camada superficial, devido à ação do vento, e na camada de fundo, devido à intrusão da corrente na plataforma, indica que, para a região de Cabo Frio, a variabilidade interanual da ressurgência é modulada pela variação da intensidade da Corrente do Brasil na plataforma. No entanto, na região do Cabo de São Tomé, além dessas forçantes, a disponibilidade da ACAS na plataforma mostra-se relevante na variabilidade interanual da ressurgência.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF UPWELLING CENTERS AND THEIR DRIVERS IN THE BRAZILIAN SOUTHEAST REGION

Thiago Silva Baron

October/2023

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

This work aims to investigate the interannual variability of upwelling in the Southeast Brazilian region, where it was found that atmospheric drivers alone is not sufficient to explain the interannual variations of the South Atlantic Central Water (SACW) upwelling.

Ten years of results from the LSE24 hydrodynamic database were used, an oceanic reanalysis developed by the Physical Oceanography Laboratory - LOF/COPPE of UFRJ, employing simulations with the HYCOM model, within the scope of the REMO - Oceanographic Modeling and Observation Network.

EOF (Empirical Orthogonal Functions) analysis of the circulation indicates that the variation in the intensity of the Brazil Current flow over the continental shelf plays an important role as a driving factor of the upwelling in the Southeast region as a whole. Quantification and analysis of Ekman transport in the surface layer, due to wind drive, and in the bottom layer, due to current intrusion on the shelf, show that, for the Cabo Frio region, the interannual variability of upwelling is modulated by the variation in the intensity of the Brazil Current on the shelf. However, in the Cabo de São Tomé region, in addition to these driving factors, the availability of the South Atlantic Central Water (SACW) on the shelf shows to be relevant to the interannual variability of upwelling.

Sumário

Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
2 Metodologia	6
2.1 Reanálise	6
2.2 Identificação dos principais modos de variabilidade	8
2.3 Estimativa do transporte	9
2.3.1 Forçantes Atmosféricas	10
2.3.2 Forçante Oceanográfica	11
3 Resultados e Discussões	15
3.1 Variabilidade da TSM	15
3.2 Análise Espacial e Temporal	19
3.2.1 TSM	19
3.2.2 Forçantes	22
3.2.3 Disponibilidade da ACAS	27
3.3 Transporte de volume na camada superficial e de fundo	29
3.3.1 Cabo Frio	29
3.3.2 Cabo de São Tomé	48
3.3.3 Espírito Santo	63
4 Conclusões	69
Referências	72

Lista de Figuras

1.1	Série temporal da temperatura da superfície do mar coletada em Arraial do Cabo, extraído de CALIL ELIAS (2009).	4
2.1	Domínio de modelagem das simulações ATL12 e LSE24 (assinalado pelo retângulo vermelho), extraído de PAIVA <i>et al.</i> (2019).	7
2.2	Localização das seções utilizadas para a análise do transporte de Ekman superficial e de fundo, as estrelas verdes assinalam os pontos onde foram retiradas as séries da tensão do vento. A escala de cores representa a batimetria utilizada no modelo. Estão assinaladas as isóbatas de 50, 100 e 150 metros.	10
2.3	Perfis instantâneos de temperatura das seções de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo (Figura 2.2) assinalando (estrelas brancas) os pontos onde serão retiradas as séries temporais do transporte na camada limite de fundo.	12
2.4	Hovmoller da densidade σ_t ao longo da coluna d'água à 20 km da costa na seção de Cabo Frio.	13
2.5	Hovmoller da frequência de Brunt-Väisälä ao longo da coluna d'água à 20 km da costa na seção de Cabo Frio.	13
2.6	Camada limite de fundo (linha verde). São assinaladas as velocidades <i>cross-shore</i> (setas pretas) e <i>alongshore</i> (isolinhas brancas e escala de cores).	14
3.1	Instantâneo de TSM mostrando a localização dos centros de ressurgência. Os retângulos vermelhos assinalam as regiões onde foram retiradas as temperaturas superficiais mínimas para análise. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	15
3.2	Séries temporais das temperaturas superficiais mínimas nas áreas assinaladas na Figura 3.1.	16
3.3	Histogramas anuais da TSM para Cabo Frio. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 18°C (representados pelas barras azuis).	17

3.4	Histogramas anuais da TSM para Cabo de São Tomé. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 20°C (representados pelas barras azuis).	18
3.5	Histogramas anuais da TSM para Espírito Santo. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 20,5°C (representados pelas barras azuis).	18
3.6	Primeiro modo do padrão espacial da TSM (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	20
3.7	Segundo modo do padrão espacial da TSM (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	21
3.8	Comparação entre a série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e as temperaturas superficiais mínimas dos centros de ressurgência. As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão. A série temporal da EOF2 foi multiplicada por -1. São apresentadas as correlações obtidas entre elas.	22
3.9	Primeiro modo do padrão espacial da componente rotacionada para o eixo NE-SW da tensão do vento (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior), onde os valores positivos referem-se aos ventos de NE, favoráveis à ressurgência, e os valores negativos aos ventos de SW, desfavoráveis à ressurgência. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	23
3.10	Primeiro modo do padrão espacial do rotacional do campo de tensão do vento (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150m.	24
3.11	Primeiro modo do padrão espacial da intensidade da corrente (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	25
3.12	Série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e as séries temporais das componentes principais das EOF1 (PC1) da intensidade da corrente (azul), da tensão do vento rebatida para o eixo NE-SW (vermelho) e do rotacional do campo de tensão do vento (verde). As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão e multiplicadas por -1. São apresentadas as correlações cruzadas e os lags obtidos entre elas.	26
3.13	Série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e a série temporal da combinação linear entre as forçantes. As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão.	26

3.14	Campo médio (ao longo de 10 anos) da temperatura de fundo na plataforma continental. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	28
3.15	Primeiro modo do padrão espacial da temperatura de fundo (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.	28
3.16	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região de Cabo Frio (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	31
3.17	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção de Cabo Frio (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	33
3.18	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção de Cabo Frio (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	34

3.19	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção de Cabo Frio (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	35
3.20	Séries temporais do transporte de Ekman (azul), do bombeamento de Ekman integrado em 200 km (vermelho) ao longo da seção e do transporte de Ekman na camada limite de fundo (preto). As linhas finas representam a média móvel de 7 dias e as linhas grossas a média móvel de 30 dias. A linha verde assinala o transporte total. As setas roxas representam os períodos que serão analisados nas Figuras 3.22 à 3.27.	36
3.21	Série, na seção de Cabo Frio, da variação da temperatura (linha) com o transporte devido à corrente (painel superior) e com o transporte de Ekman (painel inferior), representados pelas bolas, além da ampliação dos eventos assinalados pelas setas roxas na Figura 3.20. A escala de cores indicam a intensidade dos transportes, onde os valores positivos são favoráveis à ressurgência.	37
3.22	Os campos a.1 até a.4 mostram a variação temporal da temperatura (escala de cores), da corrente <i>along-shore</i> (isolinhas brancas) e da corrente <i>cross-shore</i> (setas pretas) ao longo da seção de Cabo Frio (representada nas Figuras b, c e d). As Figuras b.1 até b.4 apresentam os campos de tensão do vento, onde também estão representadas as isóbatas de 50 e 150 m e a seção de Cabo Frio. Idem para as Figuras c.1 até c.4 e d.1 até d.4, que mostram, respectivamente, os campos de corrente superficial e de TSM. O período analisado encontra-se destacado nas Figuras 3.20 e 3.21.	39
3.23	Continuação da Figura 3.22.	40
3.24	Idem Figura 3.22 para o período de 14/08/2012 a 17/08/2012.	42
3.25	Continuação da Figura 3.25.	43
3.26	Idem Figura 3.22 para o período de 23/10/2014 a 26/10/2014.	45
3.27	Continuação da Figura 3.27.	46
3.28	Dados observacionais de anomalia da TSM do Multiscale Ultrahigh Resolution (MUR) para os dias 13/02/2014 (esquerda) e 07/11/2009 (direita), extraído de https://soto.podaac.earthdatacloud.nasa.gov	48

3.29	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região de Cabo de São Tomé (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	50
3.30	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	51
3.31	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	52
3.32	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	53
3.33	Região (retângulo vermelho) onde foi retirada a série temporal da temperatura média de fundo.	54

3.34	Série da variação da TSM com o transporte devido à corrente (painel superior) e com o transporte de Ekman (painel inferior), além da ampliação de três cenários distintos. A escala de cores indicam a intensidade do transporte, onde valores positivos correspondem a eventos favoráveis à ressurgência. A linha azul representa a temperatura de fundo na região assinalada na Figura 3.33.	55
3.35	Os campos a.1 até a.4 mostram a variação a cada três dias da temperatura (escala de cores), da corrente <i>along-shore</i> (isolinhas brancas) e da corrente <i>cross-shore</i> (setas pretas) ao longo da seção do Cabo de São Tomé (representada nas Figuras b, c e d). As Figuras b.1 até b.4 apresentam os campos de tensão do vento, onde também estão representadas as isóbatas de 50 e 150 m e a seção do Cabo de São Tomé. Idem para as Figuras c.1 até c.4 e d.1 até d.4, que mostram, respectivamente, os campos de corrente superficial e de temperatura de fundo. O período analisado encontra-se destacado na Figura 3.34.	56
3.36	Idem Figura 3.35 para o período de 08/02/2011 a 17/02/2011.	57
3.37	Idem Figura 3.35 para o período de 06/08/2012 a 15/08/2012.	59
3.38	Idem Figura 3.35 para o período de 18/08/2012 a 27/08/2012.	60
3.39	Idem Figura 3.35 para o período de 06/02/2013 a 15/02/2013.	61
3.40	Idem Figura 3.35 para o período de 18/02/2013 a 27/02/2013.	62
3.41	Campos médios da corrente, da TSM e da temperatura de fundo no período de março de 2012.	63
3.42	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região do Espírito Santo (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	65
3.43	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção do Espírito Santo (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	66

3.44	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção do Espírito Santo (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	67
3.45	a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção do Espírito Santo (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.	68

Capítulo 1

Introdução

A ressurgência é caracterizada como o movimento ascendente com duração e extensão mínimas necessárias para que a massa d'água mais profunda seja trazida para a camada superficial (SMITH, 1968). Ela pode ser classificada em três tipos, a costeira, induzida por uma divergência unilateral do campo de velocidade, a de oceano aberto, que ocorre em larga escala e é induzida pelo rotacional do campo de tensão do vento, e a equatorial, caso especial da oceânica, que é causada pelos ventos alísios (HIDAKA, 1972; SMITH, 1968). Uma vez que as águas das camadas mais profundas são ricas em nutrientes, o seu transporte em direção à superfície auxilia no aumento da atividade biológica, e de fato, importantes zonas pesqueiras ao redor do mundo se encontram em regiões de ressurgência (BOWDEN, 1983). As bordas lestes dos oceanos são as principais regiões onde ocorrem as ressurgências costeiras, como é caso de áreas localizadas na Corrente das Canárias, de Benguela, da Califórnia e do Peru (BOWDEN, 1983; SMITH, 1968).

Entretanto, esse fenômeno também pode ser observado nas bordas oestes dos oceanos, como acontece no litoral brasileiro, que possui três regiões típicas de incidência, a saber: o sul da Bahia, o Cabo de Santa Marta e a região Sudeste (KÄMPF e CHAPMAN, 2016). Nesta última, se destacam os centros de ressurgência localizados ao longo do Espírito Santo, no Cabo de São Tomé e no Cabo Frio, que inclusive, é conhecido de longa data por este fenômeno, onde o próprio nome Cabo Frio, encontrado nas cartas náuticas do século XVI, foi escolhido pela presença de águas de baixas temperaturas nas suas proximidades (DE CASTRO *et al.*, 2006).

A ressurgência de Cabo Frio despertou o interesse de vários pesquisadores, como ALLARD (1955), EMÍLSSON (1961), IKEDA *et al.* (1974), entre outros, que atribuíram a predominância de ventos de Nordeste como sendo a sua principal forçante. Nesse caso, a tensão de cisalhamento do vento é responsável por criar uma divergência costeira devido ao transporte de Ekman ao largo da costa, que por continuidade, impõe um fluxo vertical ascendente das águas mais profundas. Essa massa d'água mais fria que aflora na região é a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), que pos-

sui temperaturas entre 6°C e 20°C e salinidade entre 34,6 e 36,2 (DE CASTRO *et al.*, 2006; MIRANDA, 1985). Águas com temperaturas de até 13°C chegam a ser observadas em superfície durante a ressurgência de Cabo Frio (CALIL ELIAS, 2009).

O bombeamento de Ekman, que é causado pelo rotacional do campo de tensão do vento, é outro fator que pode contribuir para a ocorrência da ressurgência na região sudeste brasileira, como mostrado por CASTELAO e BARTH (2006). Após integrar a velocidade vertical do bombeamento de Ekman em 200 km ao largo da costa e compará-la com o transporte de Ekman, esses autores verificaram que os dois mecanismos associados ao vento possuíam o mesmo grau de influência como forçantes desse fenômeno próximo da região de Cabo Frio.

Apesar da existência de uma boa correlação entre os gradientes de temperatura resultantes do afloramento das águas das camadas mais profundas com o campo de vento, outros fatores também podem contribuir para a ocorrência da ressurgência. Um exemplo é a configuração da linha de costa e a batimetria, conforme apontado por RODRIGUES e LORENZZETTI (2001). Além disso, a atividade de mesoescala da Corrente de Contorno Oeste (CCO) também pode exercer grande influência nesse processo. Meandros e vórtices ciclônicos da Corrente do Brasil (CB) facilitam a penetração da ACAS em regiões mais rasas da plataforma continental, condicionando a massa d'água de modo que mesmo um campo de tensão do vento mais fraco seja suficiente para desencadear a ressurgência (CALADO *et al.*, 2010; CAMPOS *et al.*, 2000, 1995; CASTELAO *et al.*, 2004; PALÓCZY *et al.*, 2014).

Outros dois mecanismos associados à CCO que podem influenciar a ressurgência são o afastamento e a aproximação da corrente na plataforma (OKE e MIDDLETON, 2001; ROUGHAN e MIDDLETON, 2002). ROUGHAN e MIDDLETON (2002) analisaram, na costa leste da Austrália, a contribuição dessas duas forçantes, bem como da tensão do vento e da aceleração da corrente devido ao estreitamento da plataforma. Os autores verificaram que os maiores eventos de ressurgência ocorreram com a aproximação da corrente sendo intensificada pela topografia. Esses resultados corroboraram com o trabalho de OKE e MIDDLETON (2000), que utilizando modelagem numérica, verificaram que o estreitamento da plataforma leste da Austrália intensificava a velocidade da corrente, aumentando a tensão de fundo e desenvolvendo um transporte *cross-shore* ao longo da camada limite, favorecendo, portanto, a ressurgência.

Ainda em relação à influência da CCO, ROUGHAN e MIDDLETON (2004), utilizando 3 meses de dados observacionais na região de Smoky Cape e Diamond Head, onde a Corrente Leste da Austrália possui uma grande variabilidade tanto em intensidade quanto em direção, também atribuíram ao aumento do transporte na camada limite de fundo, devido à aproximação da corrente na plataforma, um maior

peso como forçante da ressurgência na região analisada. Também, SCHAEFFER *et al.* (2014), utilizando 4 anos de medições *in situ*, encontraram fortes evidências que sugerem que o transporte na camada limite de fundo era impulsionado pela variabilidade da Corrente Leste da Austrália ao invés da tensão do vento, evidenciando, portanto, o papel preponderante da CCO como forçante da ressurgência na região estudada.

Na região sudeste brasileira, AGUIAR *et al.* (2014) conduziram um estudo utilizando dados de modelagem numérica e sensoriamento remoto ao longo de 9 anos para analisar o papel das forçantes atmosféricas e oceanográficas em Cabo Frio, Marataízes e Prado. Em relação à intrusão da corrente, foi observado que essa forçante não atua de modo uniforme ao longo da costa, pelo contrário, dependendo da localização da seção, ela influenciará a ressurgência com intensidades distintas.

Além das múltiplas forçantes supracitadas, outro aspecto relevante sobre a ressurgência é a sua variabilidade interanual. Na região de Cabo Frio, utilizando um pouco mais de 20 anos de medições da temperatura da superfície do mar (TSM), realizadas pela Companhia Nacional de Álcalis na praia Grande, em Arraial do Cabo, CALIL ELIAS (2009) identificou três modos distintos de variabilidade interanual (intensidade, efetiva interrupção do período de não ocorrência e diferenças nos meses de início e término). Na Figura 1.1, que mostra a série de TSM analisada no trabalho do CALIL ELIAS (2009), verifica-se que nos períodos como 1974-1975, 1981-1982 e 1989-1990, o processo de ressurgência foi menos expressivo, enquanto que períodos como 1971, 1977-1978 e 1983-1984, a ressurgência apareceu de forma mais pronunciada, com médias mais frias. CALIL ELIAS (2009) analisou as forçantes atmosféricas (transporte e bombeamento de Ekman) e constatou que elas não foram suficientes para explicar toda a variabilidade interanual apresentada pela ressurgência de Cabo Frio. Esse aspecto ressalta a complexidade desse fenômeno e aponta para a influência de outros fatores na sua ocorrência.

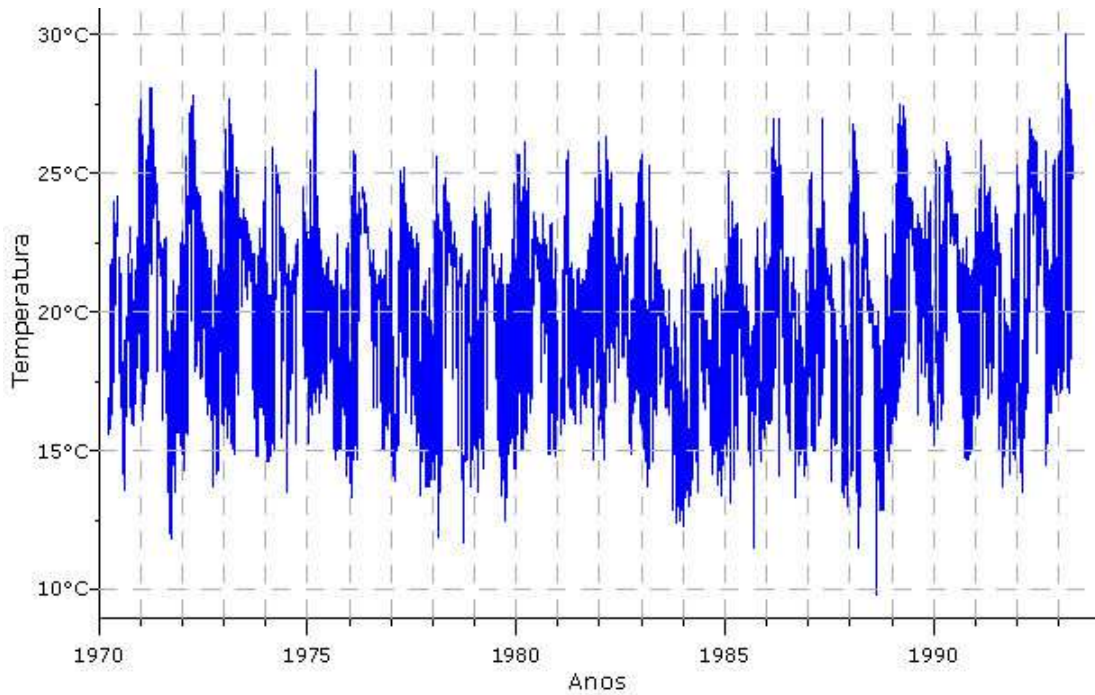


Figura 1.1: Série temporal da temperatura da superfície do mar coletada em Arraial do Cabo, extraído de CALIL ELIAS (2009).

Considerando o exposto, a hipótese básica deste estudo é de que a variabilidade interanual na intensidade da ressurgência, na região sudeste, está associada à variabilidade na posição da CB, que por sua vez está associada à dinâmica de mesoescala e possivelmente a uma variabilidade interanual.

Com base na hipótese apresentada acima, o objetivo principal deste trabalho é contribuir com o entendimento da variabilidade interanual da ressurgência na costa sudeste brasileira. Para isso, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais modos de variabilidade da TSM;
- Identificar os principais modos de variabilidade das forçantes atmosféricas, da intrusão da CB e da disponibilidade da ACAS na plataforma continental;
- Quantificar e analisar o transporte *cross-shore* devido às forçantes atmosféricas e à aproximação da CB nos principais centros de ressurgência da região sudeste brasileira.

Para atingir esses objetivos, as análises serão feitas com base em resultados de simulação hidrodinâmica, utilizando modelagem de longo período, cujos resultados foram disponibilizados para este estudo. Na metodologia serão abordados mais detalhes da simulação, conforme a divisão apresentada a seguir:

No segundo capítulo, será descrita a base hidrodinâmica utilizada, como também o método empregado para a identificação dos principais modos de variabilidade

e a formulação matemática adotada para a quantificação do transporte devido à ação das forçantes atmosféricas e da forçante oceanográfica, estando esta última relacionada à aproximação da CB na plataforma continental. No terceiro capítulo, por sua vez, serão apresentados os resultados dos principais modos de variabilidade da TSM e de suas forçantes, bem como da disponibilidade da ACAS na plataforma continental na região sudeste como um todo. Ainda neste capítulo, de posse dos transportes devido à ação do vento e da corrente, serão mostradas análises mais específicas para cada região típica de ressurgência (Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo). No quarto capítulo, serão apresentadas as conclusões sobre o papel da CB na variabilidade interanual da ressurgência.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Reanálise

Para atingir os objetivos supracitados, será utilizada a Base Hidrodinâmica Leste Sudeste (LSE24), uma reanálise que foi desenvolvida pela equipe do Laboratório de Oceanografia Física-LOF/COPPE, coordenada pelo Prof. Afonso de Moraes Paiva da UFRJ, utilizando simulações com o HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). Essa base, que faz parte do projeto da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) (FRANZ *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2013), possui a mesma configuração de modelagem utilizada no sistema previsor da Marinha do Brasil.

A LSE24 possui uma discretização vertical em 32 camadas σ_2 híbridas (coordenadas isopnciais, sigma e geopotenciais) e resolução horizontal de $1/24^\circ$, sendo capaz de representar fenômenos de larga e mesoescalas no oceano, interações entre águas oceânicas e de plataforma continental e, em função das forçantes nos contornos, efeitos em escala sinótica e oscilações devidas à maré astronômica (PAIVA *et al.*, 2019).

Nessa base hidrodinâmica, foi utilizado o sistema T-SIS, desenvolvido pelo Dr. Ashwanth Srinivasan, para assimilar dados de anomalia da altura da superfície do mar (ASM) e TSM provenientes de sensoriamento remoto e de perfiladores ARGO (ARGO, 2019). A simulação foi forçada com campos atmosféricos sinóticos a cada 3 horas do MERRA2 (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications da NASA - <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>) (GELARO *et al.*, 2017). Os dados de batimetria são provenientes do Etopo 1 e modificados com informações da Marinha do Brasil. Além disso, o modelo foi aninhado com uma simulação do oceano Atlântico, denominada ATL12, com resolução de $1/12^\circ$, conferindo condições de contorno mais realísticas (PAIVA *et al.*, 2019). A Figura 2.1 mostra o domínio da base ATL12, que inclui o Atlântico Sul, Norte e Equatorial e a parte adjacente do Oceano Austral, e o domínio da base LSE24, delimitado

pelo retângulo vermelho.

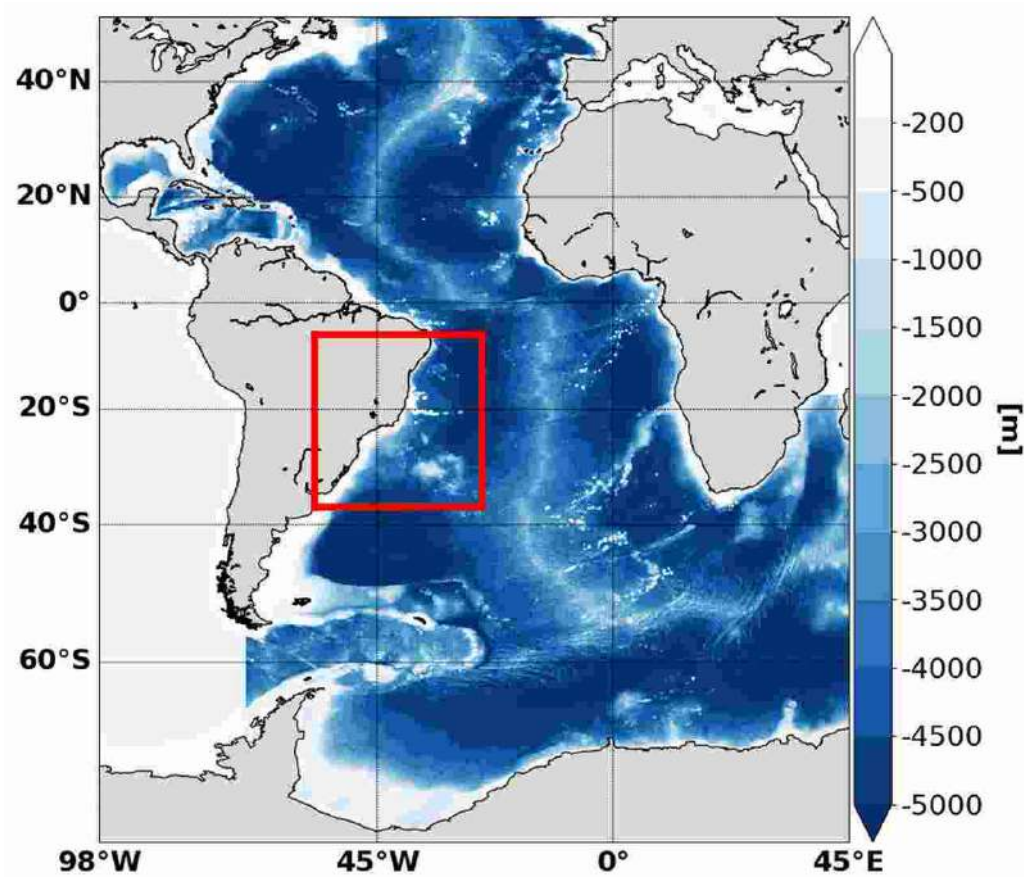


Figura 2.1: Domínio de modelagem das simulações ATL12 e LSE24 (assinalado pelo retângulo vermelho), extraído de PAIVA *et al.* (2019).

Para sua validação, foram utilizados dados de velocidade de corrente do PN-BOIA, dos fundeios NAT01 e NAT02 do INCT PRO-OCEANO, de séries de temperatura da água do programa PIRATA, de trajetórias de derivadores de superfície do Programa GDP, de seções de XBT do “High Density XBT Transects” da NOAA, de altimetria da AVISO, de TSM do OSTIA, de perfis climatológicos de T e S do WOA13, de climatologia de profundidade de camada de mistura do IFREMER e de dados maregráficos costeiros do GLOSS (PAIVA *et al.*, 2019).

No relatório técnico de PAIVA *et al.* (2019) são encontrados mais detalhes sobre a metodologia empregada, dados utilizados para validação, bem como resultados obtidos no modelo, que demonstraram a sua capacidade de gerar campos hidrodinâmicos de alta qualidade que podem ser utilizados em aplicações científicas, ambientais ou de engenharia. Cabe destacar a capacidade do modelo em capturar o fenômeno da ressurgência e sua variabilidade interanual, bem como a presença da ACAS na plataforma durante a primavera e o verão, mesmo sem a ocorrência do seu afloramento (PAIVA *et al.* (2019)).

Neste trabalho, serão utilizadas médias diárias dos campos de velocidade, tempe-

ratura e salinidade calculadas com base nos resultados do modelo salvos a cada 3h, minimizando, portanto, o efeito da maré. Em relação às forçantes atmosféricas, também serão utilizadas médias diárias dos campos do MERRA2 que foram utilizados como forçantes do modelo.

2.2 Identificação dos principais modos de variabilidade

Com a finalidade de identificar os principais modos de variabilidade da TSM, da corrente, do campo de tensão do vento e da disponibilidade da ACAS na plataforma, será utilizada a análise de funções ortogonais empíricas (Empirical Orthogonal Function – EOF), amplamente empregada na geociências (HANNACHI, 2004). Suas primeiras aplicações datam da década de 1950, com trabalhos pioneiros como o de LORENZ (1956), o qual abordou a possibilidade da sua utilização para previsão climática. A análise de EOF possui como vantagem a capacidade de fornecer uma descrição compacta da variabilidade espacial e temporal de um grande número de dados (EMERY e THOMSON, 2014), apresentando uma medida de relevância para cada padrão encontrado (BJÖRNSSON e VENEGAS, 1997).

O intuito dessa ferramenta matemática é encontrar uma combinação linear entre todos os pontos espaciais que exprima a máxima variância, resultando em um problema de autovalor (HANNACHI, 2004). Para tanto, inicialmente é necessário preparar a matriz de dados, deixando-a com duas dimensões, uma temporal e outra espacial, e então retira-se a média temporal em cada ponto do domínio. Após essa etapa, encontra-se a matriz de covariância C a partir da matriz obtida na etapa anterior, então se resolve o seguinte problema de autovalor (BJÖRNSSON e VENEGAS, 1997):

$$CX = X\Lambda \quad (2.1)$$

onde Λ e X são, respectivamente, a matriz diagonal dos autovalores e a matrix contendo os autovetores de C (BJÖRNSSON e VENEGAS, 1997). Os autovetores representam os padrões espaciais e, neste trabalho, serão denominados de EOF1, EOF2, e assim por diante, em que os números estão relacionados aos autovalores, os quais fornecem a fração da variância total explicada na EOF e estão ordenados de forma decrescente, ou seja, os primeiros modos da EOF explicam a maior variância dos dados (BJÖRNSSON e VENEGAS, 1997).

Para a determinação da variabilidade temporal a_i de cada EOF, denominada de componente principal, se faz a projeção da matriz de dados com as suas médias removidas F sobre as EOF, ou seja, $\vec{a}_i = F\vec{x}_i$, onde $\vec{x}_i$ representa cada vetor coluna

de X , que está associado a um padrão espacial. A matriz de dados F pode ser reconstruída a partir das EOF e das componentes principais, de forma que $F = \sum_{i=1}^p \tilde{a}_i(EOF_i)$. Uma das possibilidades da análise de EOF é truncar o somatório acima em $N < p$, onde N seria número dos autovalores mais expressivos, dessa forma, se teria uma matriz de dados mais "limpa", representada pelos principais modos de variabilidade (BJÖRNSSON e VENEGAS, 1997).

Cabe destacar que os resultados das EOF e das suas respectivas componentes principais se referem às variações em torno da média dos dados. Com intuito de facilitar a visualização desses resultados, foi realizada uma normalização de forma que a multiplicação do valor apresentado na escala de cores em um ponto do domínio pelo valor da componente principal em uma determinada data represente a variação absoluta, relativa ao modo analisado, em torno da sua média.

Vale ressaltar que os modos de variabilidade não representam necessariamente processos físicos. Uma alternativa para analisar se os padrões da EOF estão associados a mecanismos físicos é verificar se as variações temporais de determinado processo oceânico se assemelham à série temporal de alguma componente principal (EMERY e THOMSON, 2014). Portanto, para certificar que a EOF da TSM está representando bem o sinal da ressurgência nos principais centros da região sudeste, será analisada a correlação de séries temporais retiradas nesses centros com a componente principal da EOF correspondente a este fenômeno.

Será correlacionada a componente principal do modo da TSM que representa a ressurgência com as componentes principais dos principais modos das suas forçantes. Neste caso, serão utilizadas médias móveis de 7 dias como forma de se quantificar tanto a intensidade quanto a persistência das forçantes. Este foi um fator importante considerado no trabalho do (CALIL ELIAS, 2009), que inclusive cita autores que verificaram que o tempo de resposta à incidência de ventos predominantemente de nordeste para o afloramento da ACAS pode ser de até 4 dias. Na região de Vitória, MARTINS (2015) constatou que 60% das ressurgências ocorreram após 2 a 7 dias de vento favoráveis e cerca de 20% entre 8 e 12 dias.

Por fim, devido a dependência da análise de EOF com o domínio utilizado (HAN-NACHI, 2004), a EOF da TSM foi restringida à plataforma continental para uma melhor representação do sinal da ressurgência.

2.3 Estimativa do transporte

A Figura 2.2 mostra a localização das seções selecionadas para quantificar a contribuição dos mecanismos forçantes no afloramento das águas profundas. Os critérios adotados para a definição das posições dessas seções foram, principalmente, as localizações dos centros de ressurgência e as localizações onde ocorrem variações

significativas de intensidade da intrusão da corrente na plataforma, obtidas por meio da análise de EOF.

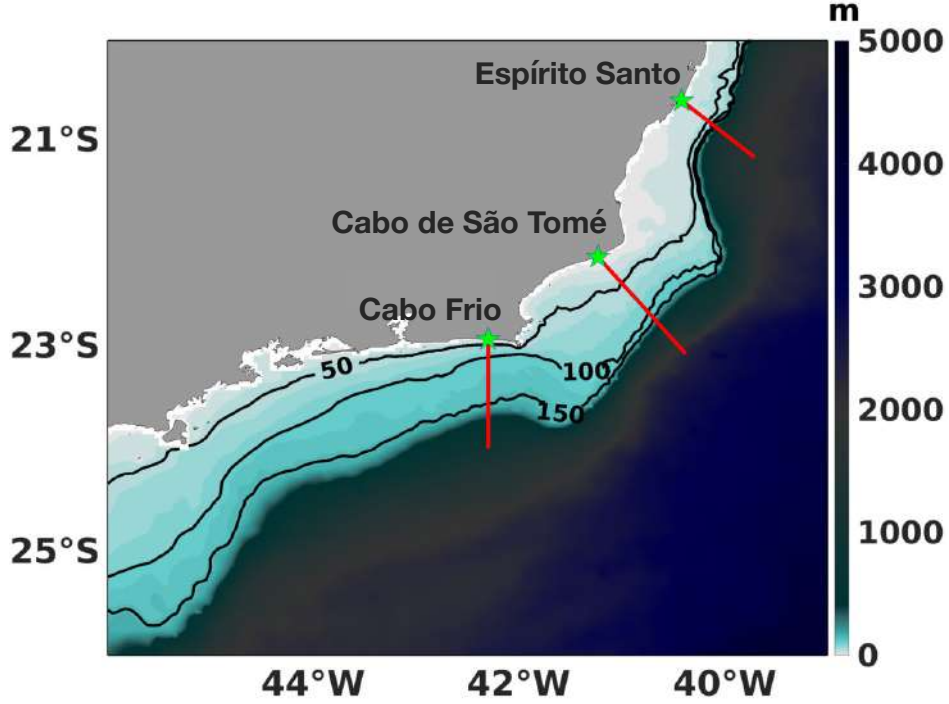


Figura 2.2: Localização das seções utilizadas para a análise do transporte de Ekman superficial e de fundo, as estrelas verdes assinalam os pontos onde foram retiradas as séries da tensão do vento. A escala de cores representa a batimetria utilizada no modelo. Estão assinaladas as isóbatas de 50, 100 e 150 metros.

2.3.1 Forçantes Atmosféricas

Para avaliar o transporte de Ekman (T_{ek}), foi utilizada a seguinte formulação (SMITH, 1968):

$$T_{ek} = \frac{\vec{\tau} \cdot \hat{t}}{\rho f} \quad (2.2)$$

onde, para a tensão do vento, $\vec{\tau}$, foi utilizado o ponto mais próximo à linha de costa (estrela verde da Figura 2.2), $\hat{t}$ é o vetor unitário perpendicular à seção e f é o parâmetro de Coriolis. A densidade da água do mar, ρ , foi adotada como sendo de 1025 kg m^{-3} .

Para a estimativa do transporte devido ao bombeamento de Ekman (T_b), inicialmente, foi determinada a velocidade vertical w , gerada pelo rotacional do campo de tensão do vento, utilizando a formulação a seguir (SMITH, 1968):

$$w = \hat{k} \cdot \nabla \times \frac{\vec{\tau}}{\rho f} \quad (2.3)$$

onde, $\hat{k}$ é o vetor unitário na direção vertical. Com objetivo de comparar a contribuição dos dois mecanismos associados à forçante atmosférica, a velocidade vertical associada ao bombeamento de Ekman foi integrada, no sentido *offshore*, ao longo dos 200 km da seção, distância aproximada na qual o rotacional do campo de tensão do vento se estende, seguindo CASTELAO e BARTH (2006).

2.3.2 Forçante Oceanográfica

A quantificação do transporte na camada limite de fundo em virtude da aproximação da corrente na plataforma, T_C , deduzida no trabalho do CUSHMAN-ROISIN e BECKERS (2011), a mesma empregada no estudo do AGUIAR *et al.* (2018), que analisaram as forçantes da ressurgência nas regiões da bifurcação da Corrente Sul Equatorial e do Canyon de Salvador, é dada por:

$$T_C = \frac{1}{2} \vec{V}_g \delta \quad (2.4)$$

Onde V_g é a velocidade média da corrente geostrófica (velocidade barotrópica do modelo), e δ é a espessura da camada limite de fundo.

Para a estimativa do valor de δ , foi empregada a formulação proposta por POLLARD *et al.* (1973), que relaciona a espessura da camada limite de fundo com a estrutura de densidade e com a tensão de fundo. PERLIN *et al.* (2007), observando a espiral de Ekman na camada limite de fundo, ratificou a importância de se considerar a estratificação no cálculo da sua espessura. SCHAEFFER *et al.* (2014), analisando quatro formulações diferentes, verificaram que a expressão proposta por POLLARD *et al.* (1973), forneceu uma estimativa razoável, e foi dentre as outras três metodologias utilizadas a que apresentou o melhor resultado para o transporte na camada limite de fundo. A formulação proposta por POLLARD *et al.* (1973) é a seguinte:

$$\delta = Ku^* / \sqrt{Nf} \quad (2.5)$$

onde K é um coeficiente de proporcionalidade ($K = 1,7$, PERLIN *et al.* (2007); SCHAEFFER *et al.* (2014)), f é o parâmetro de Coriolis, $N = \sqrt{-g\partial\rho/\rho\partial z}$ é a frequência de Brunt-Väisälä e $u^* = \sqrt{\tau_{by}/\rho}$ é a velocidade de atrito. Para o cálculo da componente *alongshore* da tensão de fundo τ_{by} , será utilizada a lei de arrasto linear $\tau_{by} = prv$, onde r é o coeficiente de resistência ($r = 5 \times 10^{-4} ms^{-1}$, LENTZ e WINANT (1986)) e v é a componente *alongshore* da velocidade de fundo.

Para definição dos locais da retirada das séries temporais do transporte na camada limite de fundo, foram observados os campos de temperatura para as três seções e escolhido um local próximo da fronteira onde o fluxo horizontal tende a res-

surgir (pontos assinalados pela estrela branca na Figura 2.3). Eles estão localizados a cerca de 20 km da costa em Cabo Frio e Espírito Santo e de 25 km da costa em Cabo de São Tomé. Cabe ressaltar que esses valores estão de acordo com o trabalho de HOURLY *et al.* (1987), o qual, utilizando dados do Levitus de 1982, encontrou um valor de 25 km para o raio de deformação de Rossby interno, que representa a distância da costa na qual ocorre a ressurgência em um modelo estratificado de duas camadas (BOWDEN, 1983).

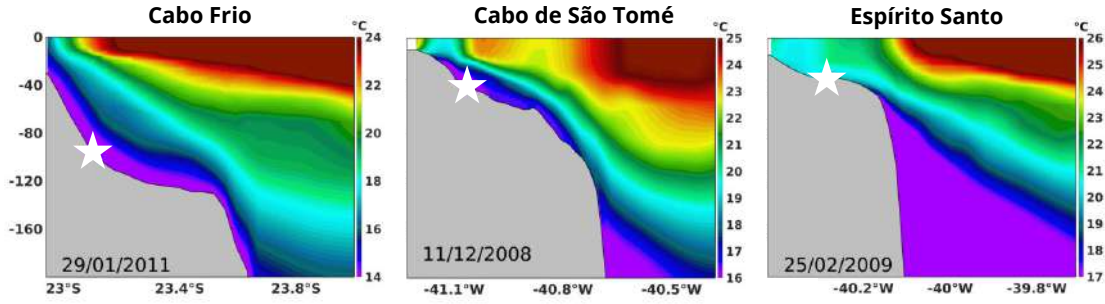


Figura 2.3: Perfis instantâneos de temperatura das seções de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo (Figura 2.2) assinalando (estrelas brancas) os pontos onde serão retiradas as séries temporais do transporte na camada limite de fundo.

Conforme os trabalhos de POLLARD *et al.* (1973) e PERLIN *et al.* (2007), a frequência de Brunt-Väisälä deve representar a estratificação da camada adjacente à camada de mistura, caracterizando dessa forma o ambiente estratificado. Desse modo, para a escolha de uma frequência representativa, foram plotados diagramas hovmollers da densidade e da frequência de Brunt-Väisälä, nas regiões assinaladas pelas estrelas brancas da Figura 2.3, para a seção de Cabo Frio (Figuras 2.4 e 2.5) e para as seções de Cabo de São Tomé e Espírito Santo, não mostrados aqui. Assim, foi escolhida uma profundidade que, no geral, pudesse representar bem esse ambiente estratificado logo acima da camada de fundo. Foram utilizadas, respectivamente, as frequências de Brunt-Väisälä nas profundidades de 50 m, 20 m e 20 m para as seções de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo, respectivamente.

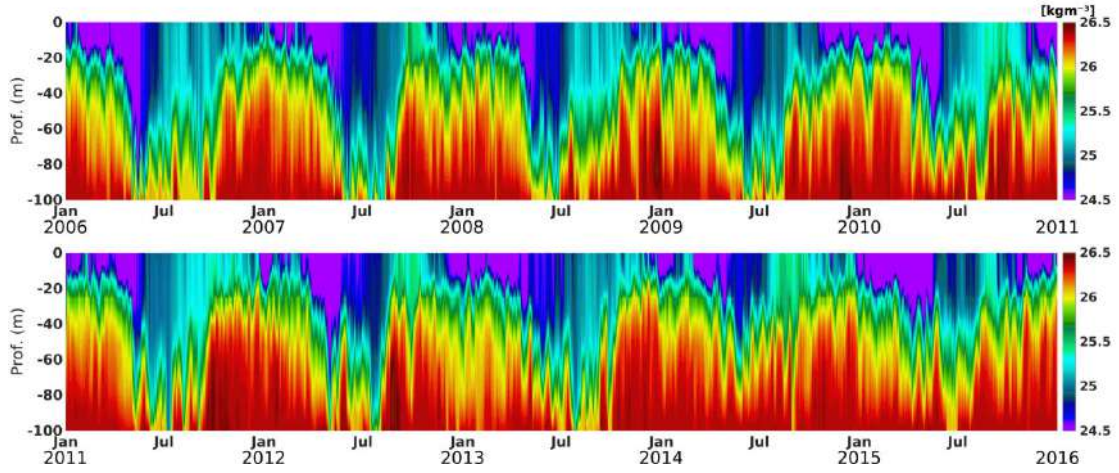


Figura 2.4: Hovmoller da densidade σ_t ao longo da coluna d'água à 20 km da costa na seção de Cabo Frio.

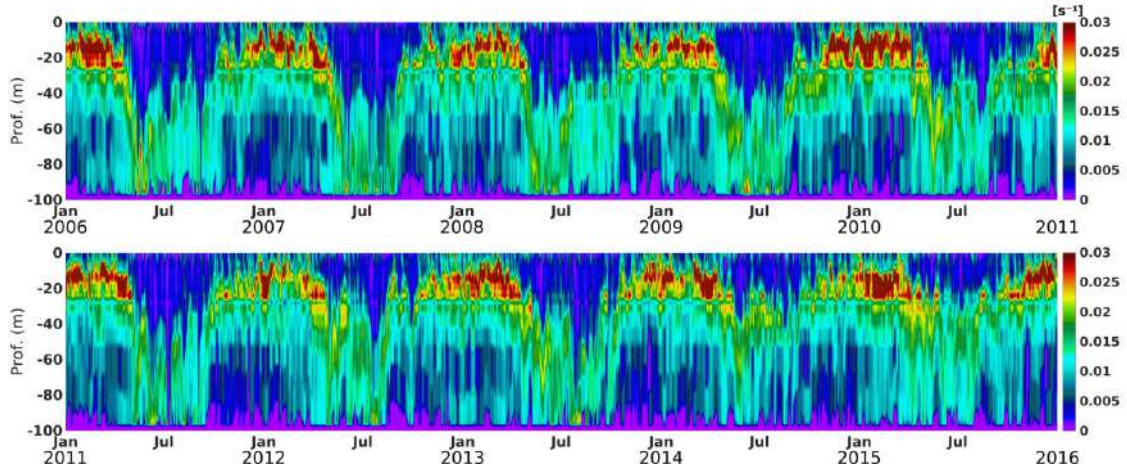


Figura 2.5: Hovmoller da frequência de Brunt-Väisälä ao longo da coluna d'água à 20 km da costa na seção de Cabo Frio.

A Figura 2.6 ilustra a camada limite de fundo ao longo da plataforma (linha verde), na seção de Cabo Frio, bem como as velocidades *cross-shore*, indicadas pelas setas, e *alongshore*, representadas pela isolinhas brancas e pela escala de cores, sendo que os valores negativos indicam que a corrente está indo para oeste, para um instante da simulação. Nesse dia, observa-se o transporte de Ekman na camada limite superficial e o transporte na camada limite de fundo, sendo possível verificar que o núcleo da CB está localizado sobre a plataforma continental externa, mas que a corrente se desenvolve ao longo de toda a plataforma.

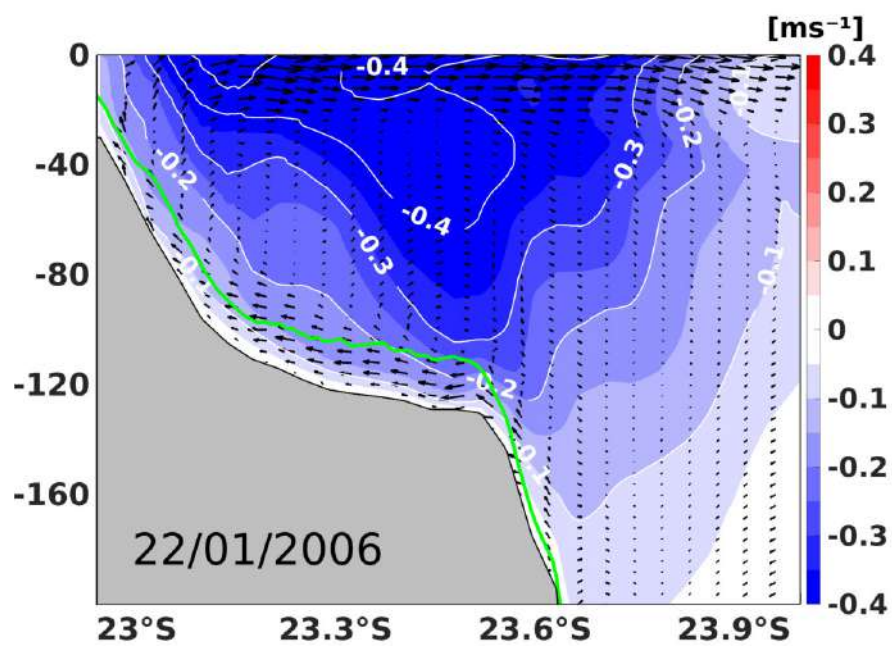


Figura 2.6: Camada limite de fundo (linha verde). São assinaladas as velocidades *cross-shore* (setas pretas) e *alongshore* (isolinhas brancas e escala de cores).

Capítulo 3

Resultados e Discussões

3.1 Variabilidade da TSM

Com o propósito de identificar a variabilidade interanual da TSM nos resultados do modelo, foram analisadas as séries temporais dos valores mínimos de TSM nas regiões assinaladas pelos retângulos vermelhos na Figura 3.1, que representam os centros de ressurgência de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo.

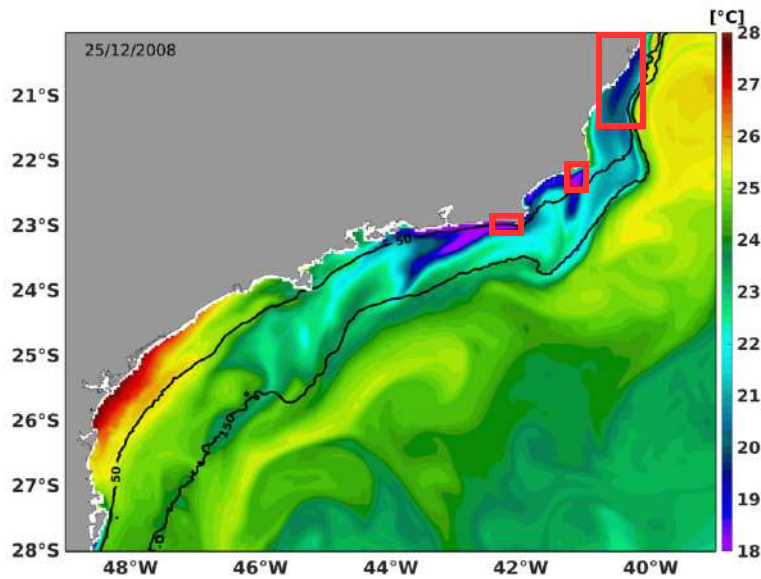


Figura 3.1: Instantâneo de TSM mostrando a localização dos centros de ressurgência. Os retângulos vermelhos assinalam as regiões onde foram retiradas as temperaturas superficiais mínimas para análise. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

Pelas séries temporais (Figura 3.2), nota-se que, no geral, a ressurgência de Cabo Frio, dentre as três, é a que apresenta as menores temperaturas, seguida por Cabo de São Tomé e Espírito Santo. Esse resultado está de acordo com o apresentado no trabalho de DE CASTRO *et al.* (2006), que utilizando dados de sensoriamento

remoto, observaram, respectivamente, temperaturas mínimas de 15°C, 17°C e 18°C para a ressurgência de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Vitória.

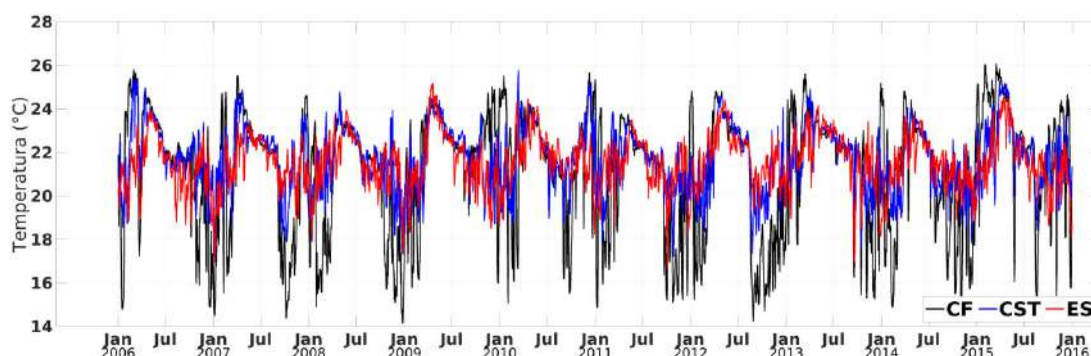


Figura 3.2: Séries temporais das temperaturas superficiais mínimas nas áreas assinaladas na Figura 3.1.

Ainda, se constata, principalmente em Cabo Frio, uma variabilidade interanual semelhante àquela verificada na série de dados *in situ* analisada por CALIL ELIAS (2009) (Figura 1.1). É possível observar que entre meados de 2009-2011 a ressurgência se apresentou menos intensa que nos outros anos, ao contrário do que aconteceu entre julho a dezembro de 2012. Os histogramas anuais da TSM em Cabo Frio (Figura 3.3), que foram calculados de junho a maio para englobar o período típico de ocorrência da ressurgência, primavera e verão, mostram que 2009-2010 e 2012-2013 foram, respectivamente, os períodos com os menores (25 dias) e maiores (105 dias) números de dias com TSM abaixo de 18°C, mostrando que o modelo conseguiu capturar a variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio.

Em Cabo de São Tomé, observa-se uma variabilidade interanual semelhante à de Cabo Frio, onde o período de 2009-2011 foi marcado por apresentar menos dias com temperaturas inferiores à 20°C (Figura 3.4). Cabe ressaltar que 20°C foi utilizado como indicador para a ressurgência do Cabo de São Tomé no trabalho de PALÓCZY *et al.* (2014). Esses autores justificaram a razoabilidade desse indicador com base no trabalho do DE CASTRO *et al.* (2006), que por meio de dados de sensoriamento remoto, observou um valor médio de 19,9°C para as plumas frias da ressurgência naquela região.

Para o Espírito Santo, verifica-se que o período de 2006-2007 foi o que teve o maior número de dias com TSM abaixo de 20,5°C (111 dias). O período de 2010-2011 se destacou como sendo o menos intenso, apresentando apenas 37 dias com a TSM inferior a 20,5°C (Figura 3.5). Cabe destacar que, no trabalho do DE CASTRO *et al.* (2006), foi observado que a temperatura média da pluma da ressurgência de Vitória era de 20,6°C. Além disso, MARTINS (2015), também analisando a ressurgência de Vitória, constatou que a média das temperaturas mínimas da pluma variou de

19,9°C a 20,7°C, por isso, a indicação do número de dias com TSM menores que 20,5°C nos histogramas se mostra razoável como indicador da ressurgência na região do Espírito Santo.

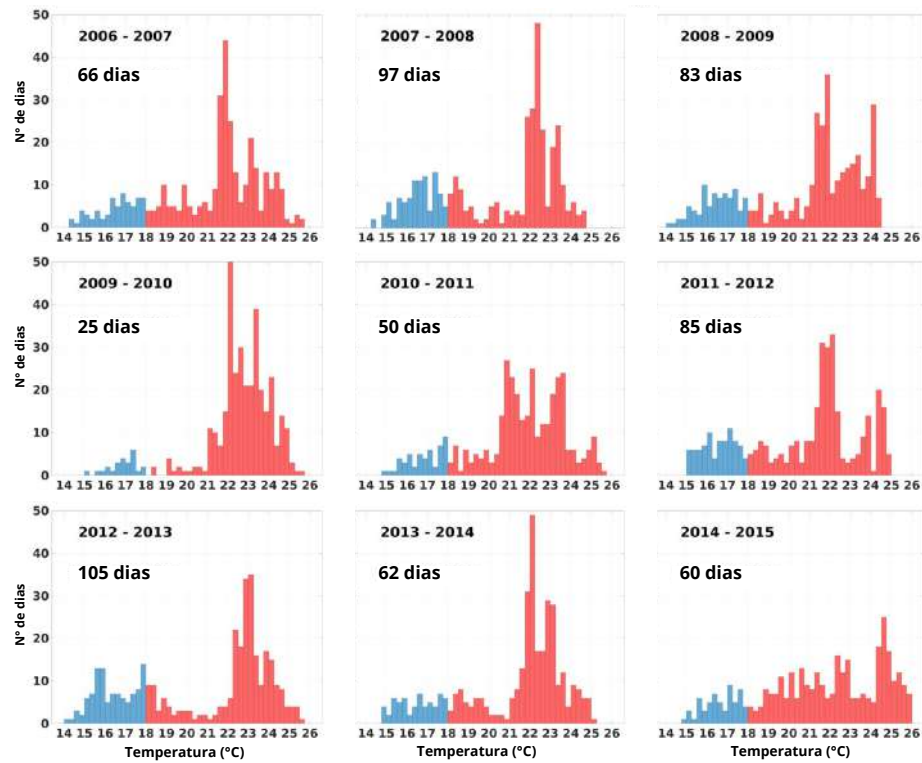


Figura 3.3: Histogramas anuais da TSM para Cabo Frio. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 18°C (representados pelas barras azuis).

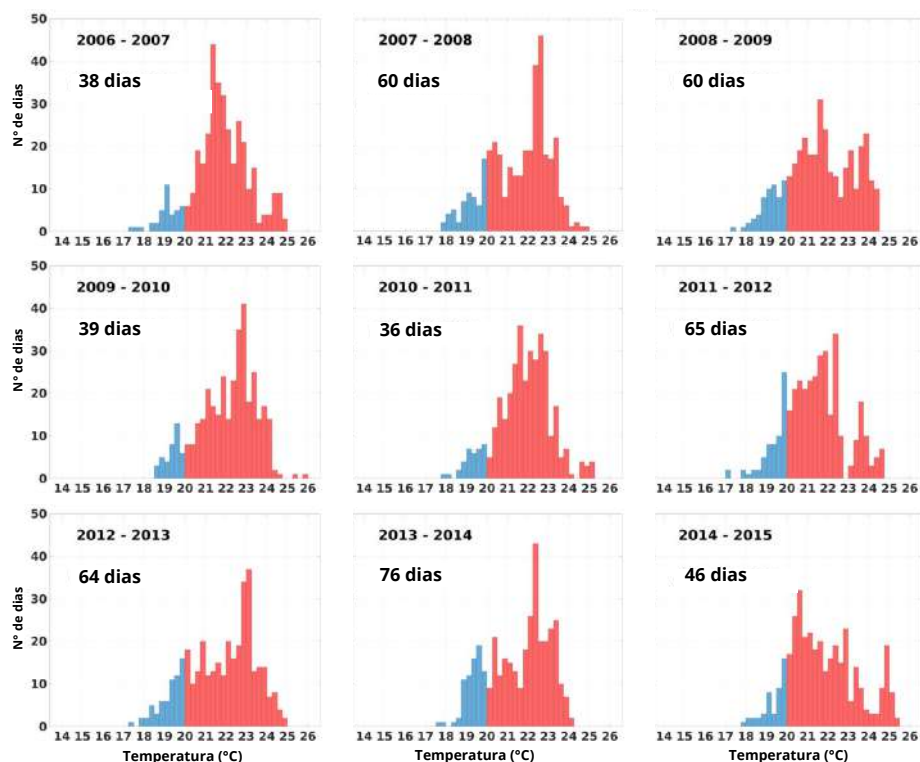


Figura 3.4: Histogramas anuais da TSM para Cabo de São Tomé. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 20°C (representados pelas barras azuis).

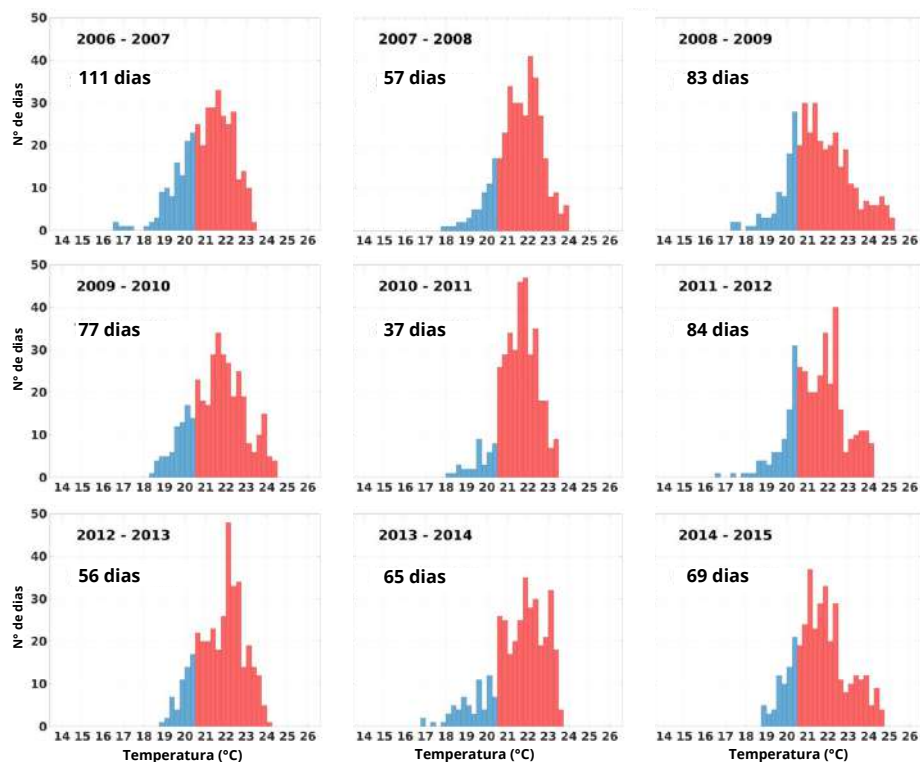


Figura 3.5: Histogramas anuais da TSM para Espírito Santo. Está indicado o número de dias com a TSM abaixo de 20,5°C (representados pelas barras azuis).

3.2 Análise Espacial e Temporal

Nesta seção, por meio da análise de EOF, serão mostrados os padrões espaciais e temporais da TSM e suas forçantes na região sudeste brasileira. Ainda, serão apresentados o quão bem o padrão da TSM representa a ressurgência nessa região, por meio da correlação da série temporal associada a esse padrão com as séries temporais analisadas na seção anterior, que foram retiradas de cada região (Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo).

Após a verificação da representatividade da EOF da TSM para a região sudeste, serão apresentados os padrões espaciais e temporais das suas forçantes (tensão do vento, rotacional da tensão do vento e intensidade da corrente) e como eles se relacionam com o padrão associado à TSM.

Na parte final desta seção, será mostrada a EOF da temperatura de fundo com o intuito de verificar como ocorre a variabilidade espacial e temporal da disponibilidade da ACAS na plataforma continental. A análise dos transportes devido as forçantes atmosféricas e a intrusão da corrente na plataforma será abordada na seção 3.3.

3.2.1 TSM

A seguir, são apresentados os dois primeiros modos da variabilidade espacial e temporal da TSM na plataforma continental, que juntos, explicam cerca de 88% da variância dos 3652 campos diários no domínio da análise.

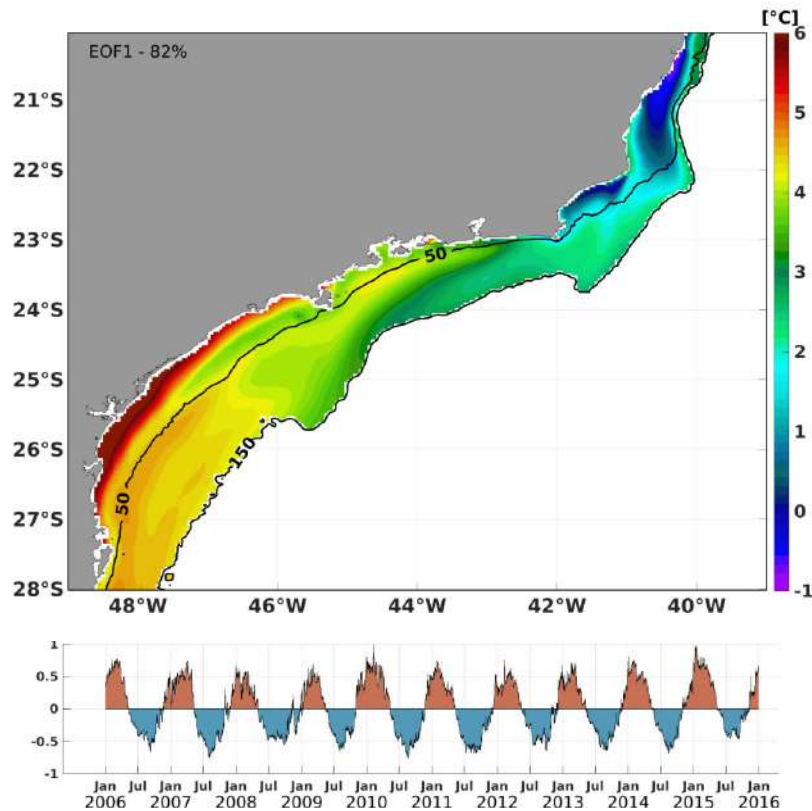


Figura 3.6: Primeiro modo do padrão espacial da TSM (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

A Figura 3.6 mostra o padrão espacial do primeiro modo (EOF1) e a sua respectiva série temporal, onde nota-se que ele está associado ao ciclo sazonal de aquecimento e resfriamento que ocorre durante o verão e o inverno. Ele está em fase na maior parte do domínio, somente os núcleos de ressurgência do Espírito Santo e do Cabo de São Tomé estão fora de fase, apresentando variações negativas da TSM no verão e positivas no inverno. Além disso, as maiores variações de amplitude ocorrem na região mais interna da plataforma ao sul da Ilha de São Sebastião, decrescendo conforme se afasta da costa, ao contrário do que acontece nos centros de ressurgência, onde o vetor gradiente da amplitude da temperatura é em direção ao largo.

O segundo padrão espacial (EOF2), Figura 3.7, representa 6,2% da variância dos dados. Nesse modo, se observa uma diferença de fase mais pronunciada, em que, no geral, durante a primavera e o verão, ocorrem variações positivas de temperatura em regiões situadas a oeste da longitude 44°W e negativas em regiões a leste, nas quais se destacam os centros de ressurgência de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, que apresentam as maiores amplitudes da variação de temperatura. Também, a série temporal exibe uma variabilidade interanual semelhante à observada nos centros de ressurgência de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, com o período entre meados de 2009-2011 sendo caracterizado como menos intenso. Ainda, constata-se que as extensões

das plumas que possuem as maiores amplitudes de variação (azul escuro e roxo) têm a mesma ordem de grandeza das extensões médias das plumas de ressurgência observadas no trabalho do DE CASTRO *et al.* (2006), que são, respectivamente, cerca de 100 km e 60 km, para Cabo Frio e Cabo de São Tomé. Na região do Espírito Santo, não se identifica um centro de ressurgência bem definido, indicando a existência de uma maior variabilidade na posição de ascensão das plumas, o que está de acordo com as observações feitas por MARTINS (2015) ao analisar a ressurgência de Vitória.

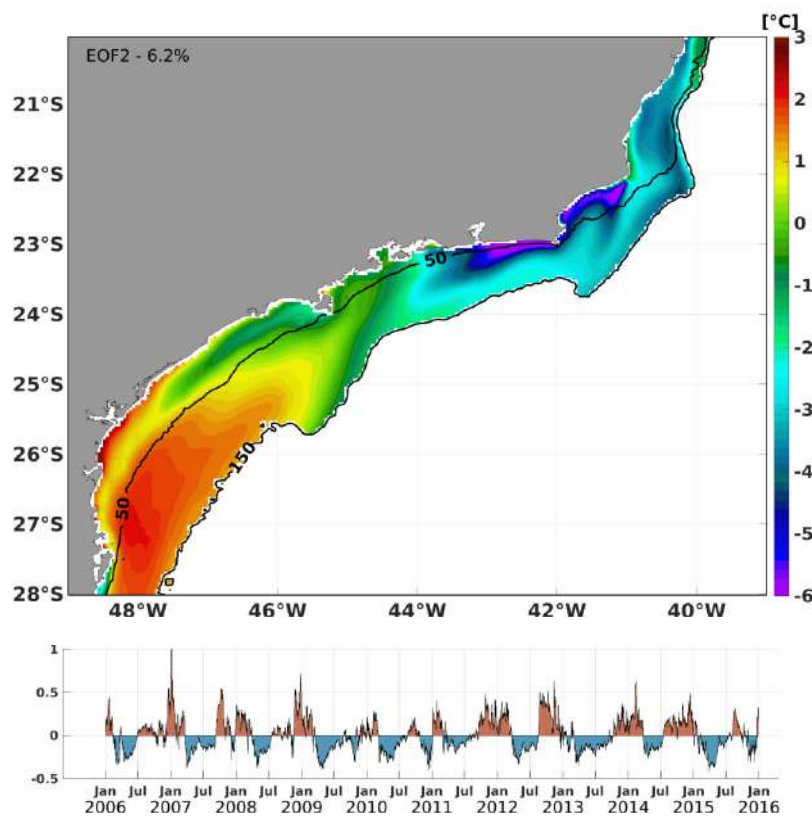


Figura 3.7: Segundo modo do padrão espacial da TSM (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

A Figura 3.8 mostra a correlação entre as séries temporais da TSM retidas em cada centro de ressurgência (Figura 3.2) e a componente principal da EOF2 (Figura 3.7). Verifica-se uma boa correlação entre elas, principalmente nos centros de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, com correlação de, respectivamente, 0,80 e 0,86. Dessa forma, a EOF2 da TSM demonstra ter uma boa representividade da variabilidade espacial e temporal dos principais centros de ressurgência na região sudeste brasileira.

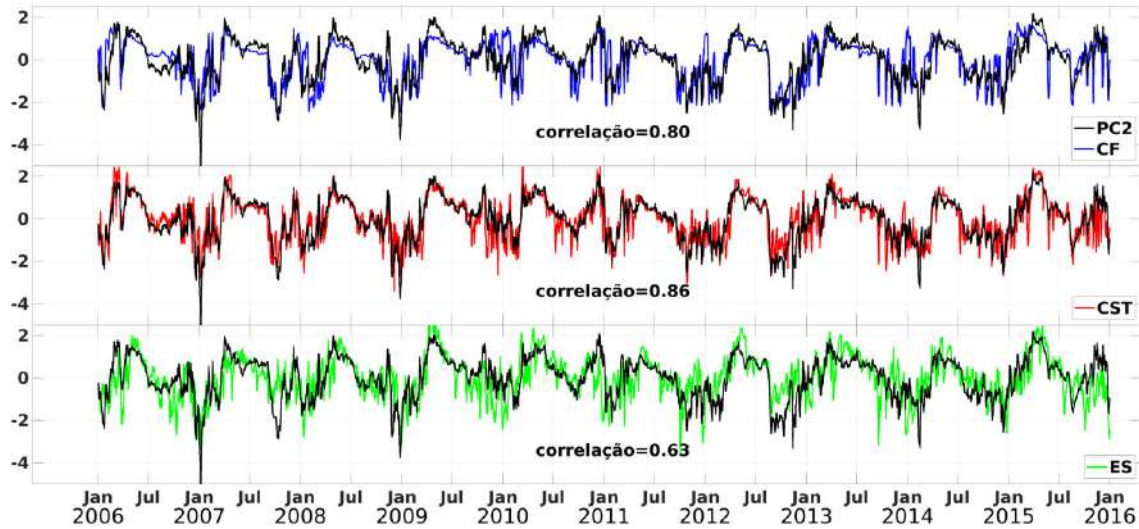


Figura 3.8: Comparação entre a série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e as temperaturas superficiais mínimas dos centros de ressurgência. As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão. A série temporal da EOF2 foi multiplicada por -1. São apresentadas as correlações obtidas entre elas.

3.2.2 Forçantes

O primeiro modo do padrão espacial da tensão do vento é responsável por 73% da variância dos dados e possui uma única fase em todo o domínio (Figura 3.9). Cabe ressaltar que os ventos predominantes na região analisada são provenientes do quadrante N-E (CALIL ELIAS, 2009; DE CASTRO *et al.*, 2006), sendo o eixo NE-SW aquele onde se encontram as maiores ocorrências CALIL ELIAS (2009), apresentando uma variância de 85% do vento local na região de Cabo Frio (FERREIRA, 2022). Em razão dessa característica, antes da realização da análise da EOF, o campo de tensão do vento foi rotacionado do eixo N-S e E-W para os eixos NE-SW e NW-SE, e foi utilizada apenas a componente NE-SW. Dessa forma, os valores positivos observados na série temporal da Figura 3.9 referem-se aos ventos de NE, favoráveis à ressurgência, e os valores negativos estão associados aos ventos de SW, devido a passagens de sistemas frontais (DE CASTRO *et al.*, 2006), sendo desfavoráveis à ressurgência. Na região analisada, a frequência da passagem dos sistemas frontais varia de 3 a 6 vezes por mês, sendo as menores ocorrências no verão e as maiores no inverno (DE CASTRO *et al.*, 2006). Como esperado, na componente principal da EOF1, constata-se maiores frequências de ocorrências desses sistemas frontais durante o outono e inverno, ao passo que na primavera e verão se observa uma predominância dos ventos favoráveis à ressurgência.

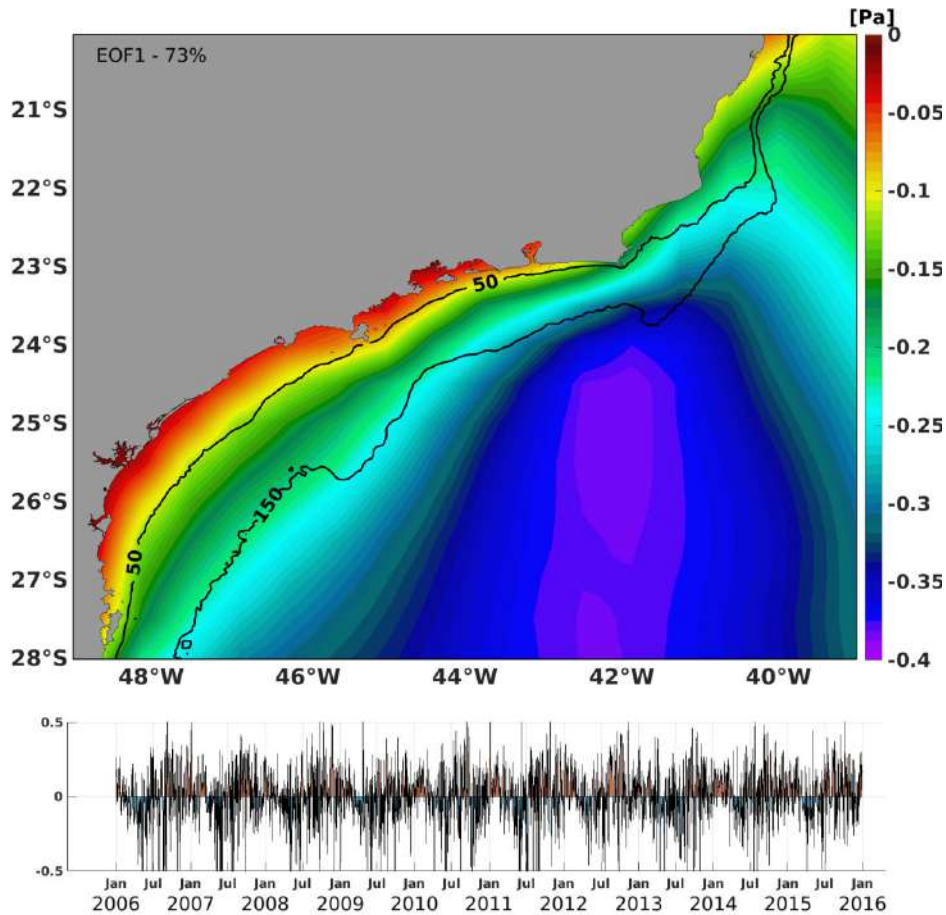


Figura 3.9: Primeiro modo do padrão espacial da componente rotacionada para o eixo NE-SW da tensão do vento (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior), onde os valores positivos referem-se aos ventos de NE, favoráveis à ressurgência, e os valores negativos aos ventos de SW, desfavoráveis à ressurgência. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

A EOF1 do rotacional do campo de tensão do vento explica 28% da variância dos dados e possui duas fases (uma próxima à costa, marcada pelas cores frias, e a outra ao largo da quebra da plataforma, marcada pelas cores quentes) (Figura 3.10). Os valores positivos da componente principal são propícios a ocorrência da ressurgência. As maiores amplitudes da EOF1 estão localizadas na região de Cabo Frio, em concordância com o trabalho de CASTELAO e BARTH (2006), os quais verificaram que o rotacional do campo de tensão do vento possui uma maior influência como forçante da ressurgência nessa região se comparado com o Cabo de São Tomé e Vitória. Como esperado, na primavera e verão observa-se a predominância de valores favoráveis à ocorrência da ressurgência próximo à costa.

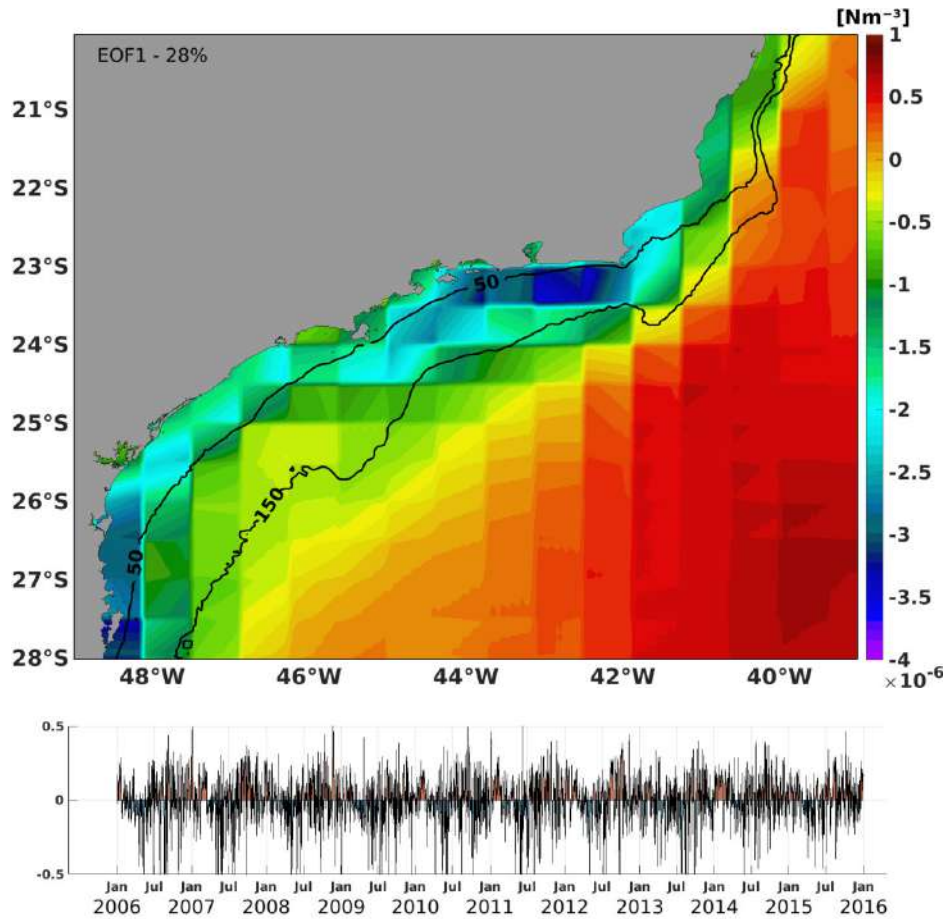


Figura 3.10: Primeiro modo do padrão espacial do rotacional do campo de tensão do vento (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150m.

Na Figura 3.11 é apresentada a EOF1 da intensidade da corrente. Assim como constatado no trabalho de LORENZZETTI *et al.* (2009), esse modo mostra uma variabilidade sazonal da corrente sobre a plataforma continental, tendo intensidades maiores que a média na primavera e verão e menores no outono e inverno, com destaque para as regiões onde estão localizados os três centros de ressurgência. Na região de Cabo Frio, verifica-se que a maior variância da intensidade da velocidade na plataforma ocorre a oeste da longitude de 42°W.

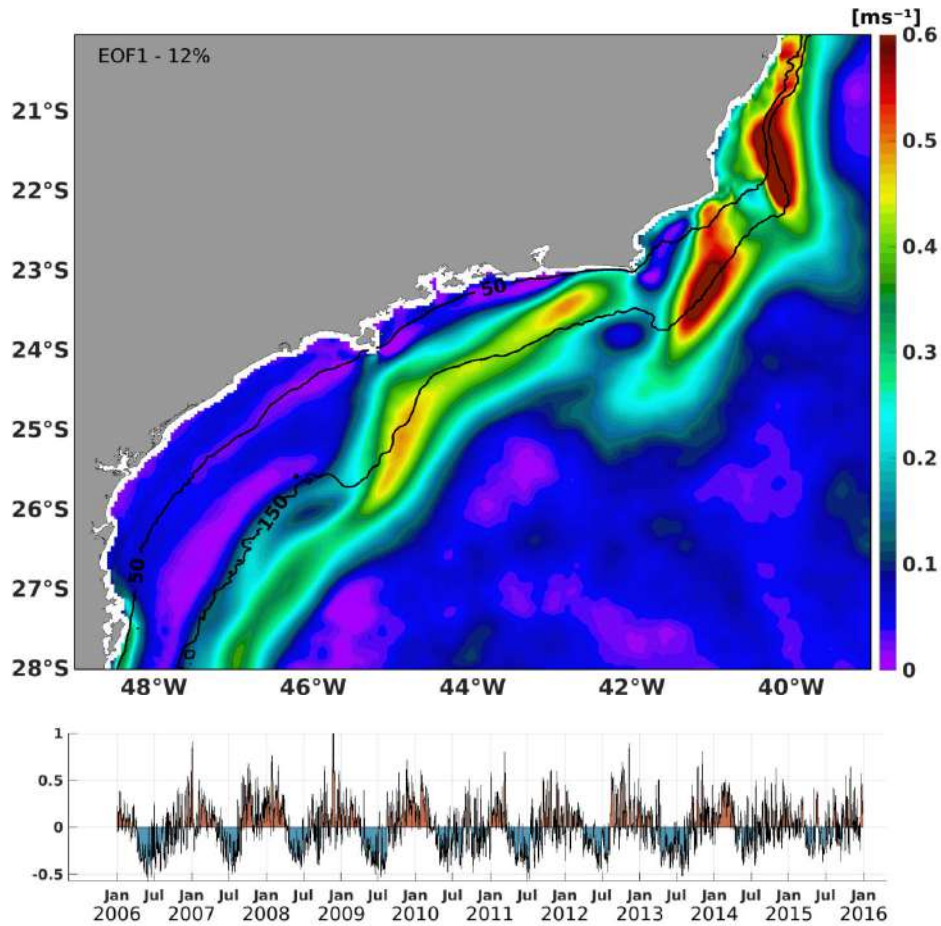


Figura 3.11: Primeiro modo do padrão espacial da intensidade da corrente (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

Com o propósito de analisar a correspondência dos padrões encontrados para as forçantes com a ressurgência, foi quantificada a correlação entre a componente principal da EOF2 da TSM, que se mostrou estar bem correlacionada com a ressurgência, com as séries temporais das EOF1 das forçantes. Foi constatada uma correlação de, respectivamente, 0,63, 0,5 e 0,53 para a velocidade, tensão do vento e rotacional da tensão do vento (Figura 3.12). A resposta da TSM em relação às forçantes apresentou um atraso de 3 dias.

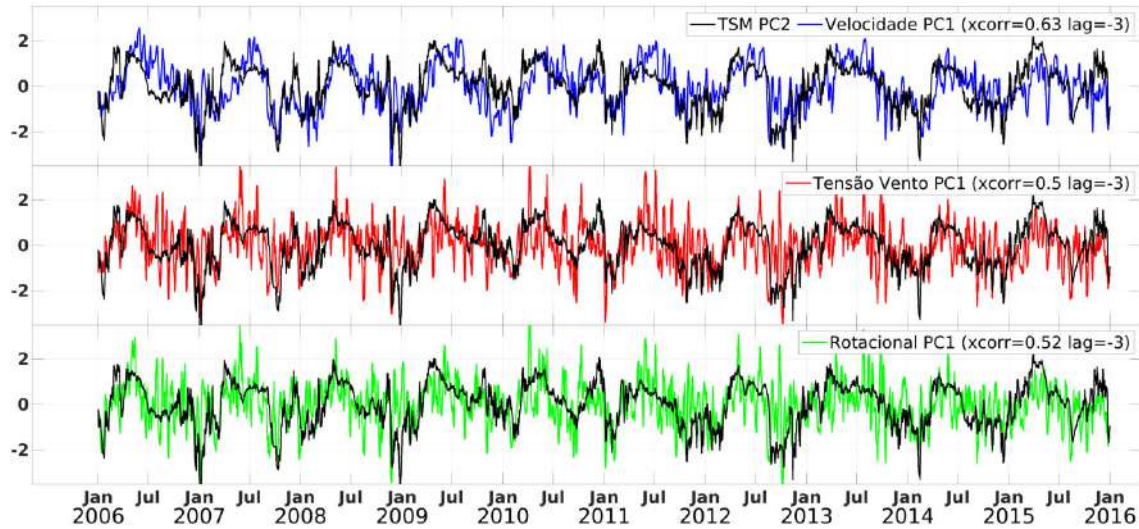


Figura 3.12: Série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e as séries temporais das componentes principais das EOF1 (PC1) da intensidade da corrente (azul), da tensão do vento rebatida para o eixo NE-SW (vermelho) e do rotacional do campo de tensão do vento (verde). As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão e multiplicadas por -1. São apresentadas as correlações cruzadas e os lags obtidos entre elas.

Foi feita uma regressão linear múltipla para verificar como ficaria a correlação da combinação linear das forçantes com a componente principal da EOF2 da TSM, cabe ressaltar que as séries temporais das forçantes foram transladadas para a remoção do lag de 3 dias entre elas e a série da TSM. Inicialmente, foi feita a regressão apenas para as forçantes atmosféricas, chegando-se a uma correlação de 0,51. Após a inclusão da componente principal da EOF da corrente, se chegou a uma correlação de 0,64. A equação linear encontrada foi a seguinte: $Y = 0,66C + 0,28V + 0,24R$, onde C , V e R representam, respectivamente, as componentes principais da corrente, da tensão do vento e do rotacional do campo de tensão do vento. A Figura 3.13 mostra a série temporal da componente principal da EOF2 da TSM e a equação que representa a combinação linear das forçantes (Y).

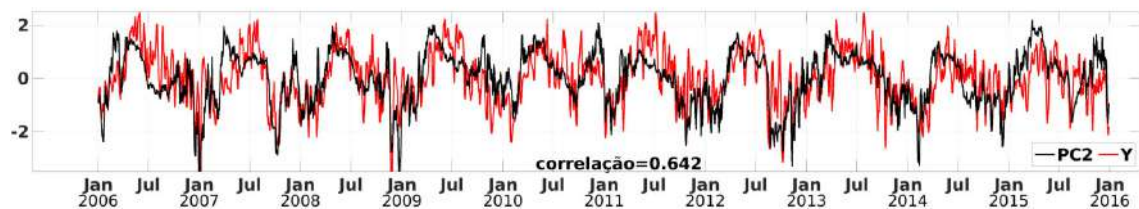


Figura 3.13: Série temporal da componente principal da EOF2 da TSM (PC2) e a série temporal da combinação linear entre as forçantes. As séries foram normalizadas pelo desvio-padrão.

Esses resultados indicam que a variação da intensidade da Corrente do Brasil contribui como forçante da ressurgência na região sudeste brasileira como um todo. Dessa forma, assim como constatado no trabalho de AGUIAR *et al.* (2014), verifica-se que a variação da intensidade da corrente não ocorre de modo uniforme ao longo da plataforma, possuindo regiões preferenciais, como observado em Cabo Frio, que possui as maiores amplitudes de variações acontecendo a oeste da Ilha do Cabo Frio (42°W) (Figura 3.11). Essa foi a mesma localidade em que a série de dados da TSM analisada por CALIL ELIAS (2009) foi coletada, dessa forma, evidenciando que a variação da intensidade da corrente pode ter tido um importante papel na variabilidade interanual da ressurgência nessa região.

3.2.3 Disponibilidade da ACAS

A Figura 3.14 mostra a temperatura média de fundo no período total, e a Figura 3.15 mostra a EOF1 da temperatura de fundo, que explica 55% da variabilidade dos dados. Analisando as Figuras 3.14 e 3.15, verifica-se que, na região de Cabo Frio, a temperatura média de fundo é de 14°C, com as maiores variações de amplitude ocorrendo bem próximo à linha de costa. Nessa região, ocorrem variações negativas de cerca de 3°C no período da primavera e verão e variações positivas de cerca de 5°C no período do outono e inverno. Ao largo da isóbata de 50 m, a variação sazonal da temperatura de fundo em torno da sua média é da ordem de 2°C, indicando a disponibilidade da ACAS durante o ano inteiro nessa região. Ao norte de Cabo Frio até o Cabo de São Tomé, constata-se uma maior variação da temperatura média, variando de ~21°C, na região próxima à linha de costa, até ~16°C, na região próxima da quebra da plataforma. Além disso, observa-se uma maior variabilidade devido ao ciclo sazonal, com variações negativas no verão e positivas no inverno. Ao norte do Cabo de São Tomé, as temperaturas médias de fundo são superiores a 21°C em toda a plataforma, e as variações sazonais possuem uma amplitude menor que nos outros centros de ressurgência, o que está condizente com a menor intensidade da ressurgência nessa região.

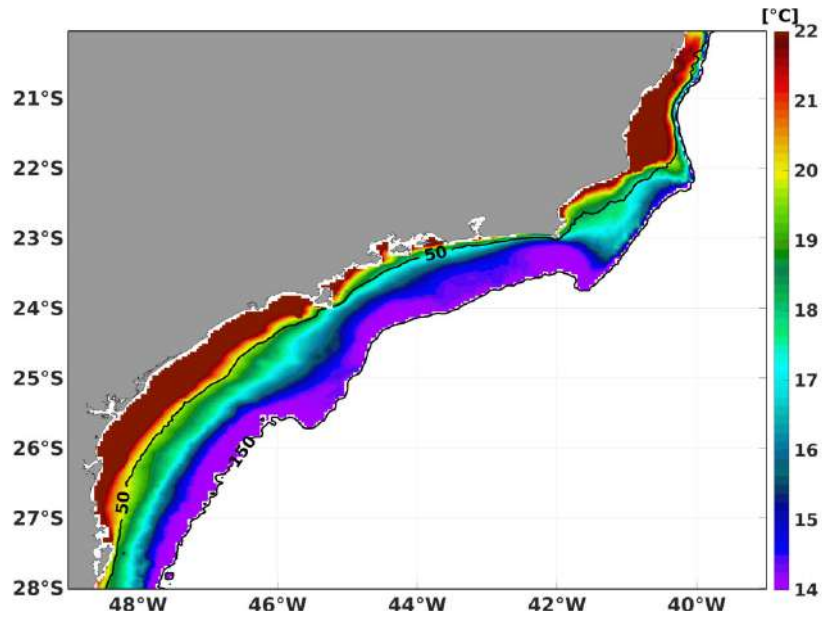


Figura 3.14: Campo médio (ao longo de 10 anos) da temperatura de fundo na plataforma continental. Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

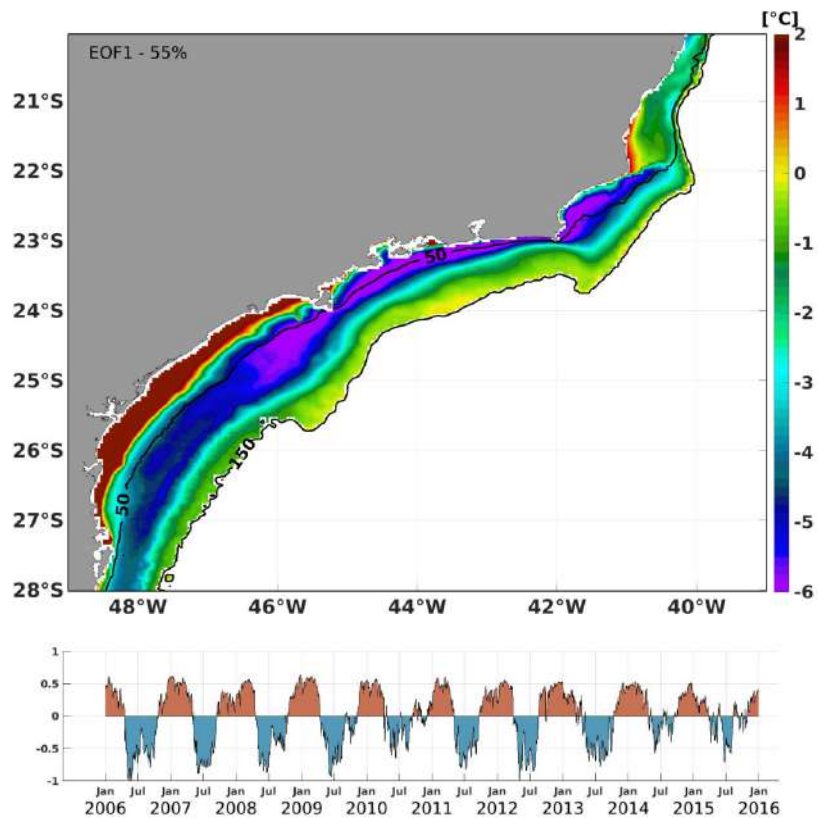


Figura 3.15: Primeiro modo do padrão espacial da temperatura de fundo (painel superior) e a série temporal da componente principal (painel inferior). Em preto, estão marcadas as isóbatas de 50 e 150 m.

3.3 Transporte de volume na camada superficial e de fundo

Na seção anterior, foi constatado por meio da análise de EOF que a variação da intensidade da Corrente do Brasil está bem correlacionada com o sinal da ressurgência na região sudeste como um todo, mas isso não significa que ela tenha o mesmo peso na modulação da variabilidade interanual em todos os centros de ressurgência dessa região. Por isso, nesta seção, será dado um enfoque particular para cada centro de ressurgência, de modo a responder qual o papel da variação da intensidade da corrente na variabilidade interanual em cada região específica. Para isso, serão analisados os transportes devido as forçantes atmosféricas e a intrusão da corrente na plataforma, calculados nas seções de Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo (Figura 2.2) conforme a metodologia apresentada na seção 2.3.

A principal ferramenta utilizada nesta seção para analisar a variabilidade interanual desses transportes será a transformada de ondeletas, onde, por meio da decomposição de uma série temporal no domínio tempo-frequência, pode-se descobrir os modos energeticamente dominantes e como eles variam no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998). A escolha dessa ferramenta foi exatamente por ela conseguir analisar sinais não estacionários, os quais as amplitudes das componentes de frequência mudam com o tempo (EMERY e THOMSON, 2014), como foi observado na variabilidade interanual da TSM.

3.3.1 Cabo Frio

A Figura 3.16 (a) mostra o espectro de energia da transformada de ondeletas da série temporal da TSM retirada na região da ressurgência de Cabo Frio (Figura 3.1), onde o eixo das ordenadas representa o período e o eixo das abscissas os 10 anos da série. Foi utilizada a função ondeleta de Morlet. A energia aumenta das cores frias para as cores quentes, com os contornos pretos indicando níveis de 95% de confiança estatística, tendo como referência um *red-noise* com o coeficiente lag-1 de 0,96 (valor da autocorrelação de lag-1 da série temporal) (TORRENCE e COMPO, 1998). A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e no final da série indicam o cone de influência, as regiões fora do cone sofrem efeito das extremidades e não são consideradas como sendo significativas. A Figura 3.16 (b) mostra o espectro global de energia, onde constata-se que a sua maior concentração encontra-se em torno do período sazonal, o que está de acordo com a análise feita por CALIL ELIAS (2009).

Na Figura 3.16 (c) é apresentada a variância média na banda de 300 a 400 dias, onde se constata que essa análise captura a variabilidade interanual da ressurgência

observada na região de Cabo Frio. Verifica-se um sinal menos significativo entre 2009-2011, período que possui menos dias com temperaturas abaixo de 18°C , e dois picos mais significativos (2007-2008 e 2012-2013), sendo o período de 2012-2013 o que teve o maior número de dias com TSM abaixo de 18°C (Figura 3.3).

Na periodicidade de até 32 dias (Figura 3.16 (a)), observa-se regiões de baixa energia (roxo), que correspondem à época de não ocorrência da ressurgência, e períodos significativos com um pouco mais de energia (escala verde), que estão associados às oscilações de temperatura devido à ressurgência.

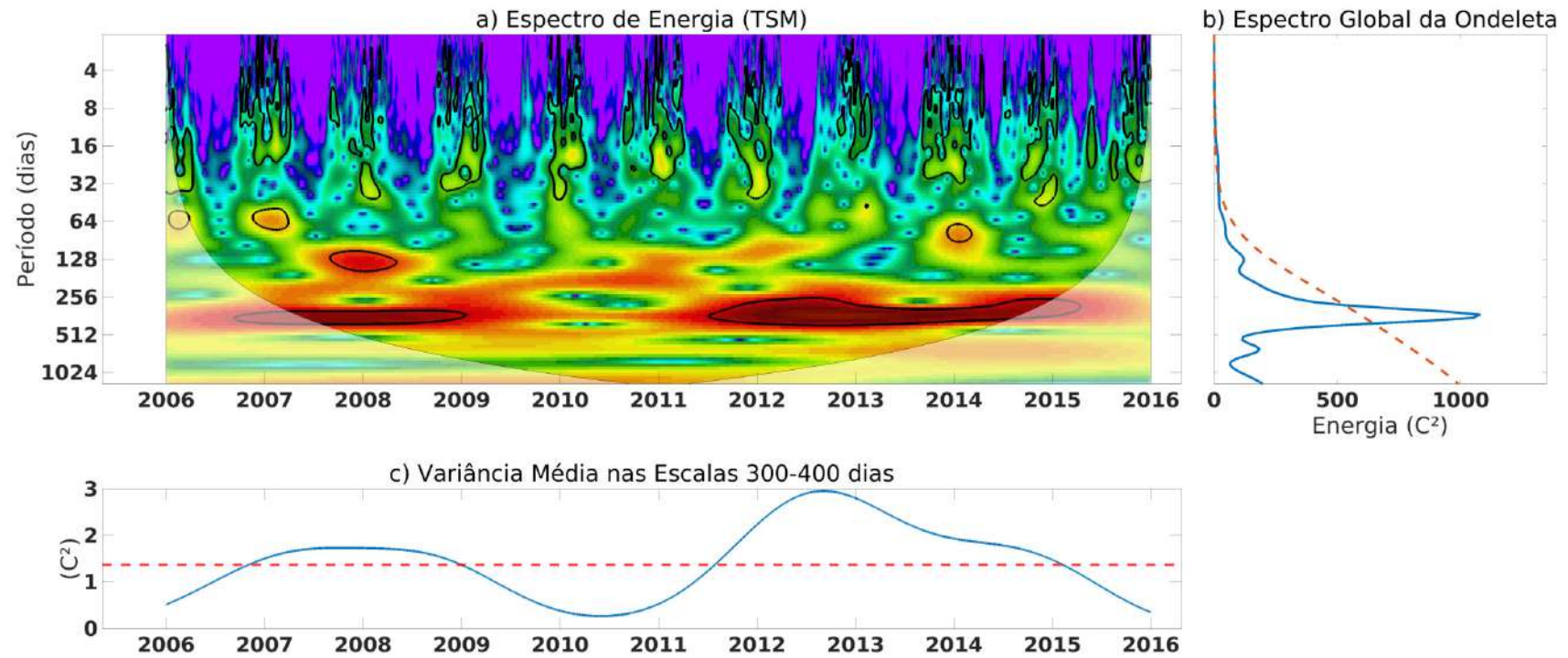


Figura 3.16: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região de Cabo Frio (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

A Figura 3.17 mostra a análise realizada com a série temporal do transporte de Ekman para a seção de Cabo Frio (Figura 2.2), onde foi considerado um *red-noise* com coeficiente lag-1 de 0,6 para o cálculo do intervalo de confiança de 95%. A Figura 3.17 (b) mostra uma faixa energética situada em períodos de até 16 dias, possivelmente associada a passagem de sistemas frontais na região e, assim como observado com a TSM, foi destacado um pico de energia na faixa sazonal. A variância média na banda de 300 a 400 dias (Figura 3.17 (c)) mostra um comportamento semelhante ao da TSM, com um pico mais pronunciado em 2007-2008 seguido por uma queda de energia até a formação de outro pico em 2012. No entanto, ao contrário do que ocorreu com a TSM, este último pico foi menos pronunciado que o primeiro.

A análise de ondeletas para o transporte devido ao bombeamento de Ekman (Figura 3.18), na seção de Cabo Frio (Figura 2.2), apresenta um comportamento muito semelhante ao observado com o transporte de Ekman (Figura 3.17), possuindo o pico mais relevante entre 2007-2008 na banda de 300 a 400 dias (Figura 3.18 (c)).

O resultado da análise de ondeletas para as forçantes atmosféricas evidencia que, assim como constatado por CALIL ELIAS (2009), elas não foram suficientes para justificar toda a variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio, tendo em vista o descasamento entre os picos mais energéticos entre essas forçantes atmosféricas e a TSM.

A análise de ondeletas realizada para a série temporal do transporte na camada limite de fundo devido à ação da corrente (Figura 3.19) para a seção de Cabo Frio (Figura 2.3), com um *red-noise* com coeficiente lag-1 de 0,7 para o cálculo do intervalo de confiança de 95%, também mostrou um pico energético na periodicidade sazonal (Figura 3.19 (b)). Apresentando, nessa periodicidade, assim como observado com a TSM e com as forçantes atmosféricas, dois picos com maiores energias, em 2008 e 2012 (Figura 3.19 (c)). No entanto, ao contrário do que ocorreu com as forçantes atmosféricas, o pico mais energético foi em 2012, consoante com o pico mais expressivo observado pela TSM. Dessa forma, esta análise indica que o transporte na camada limite de fundo devido à ação da Corrente do Brasil possui um importante papel na regulação interanual da ressurgência em Cabo Frio.

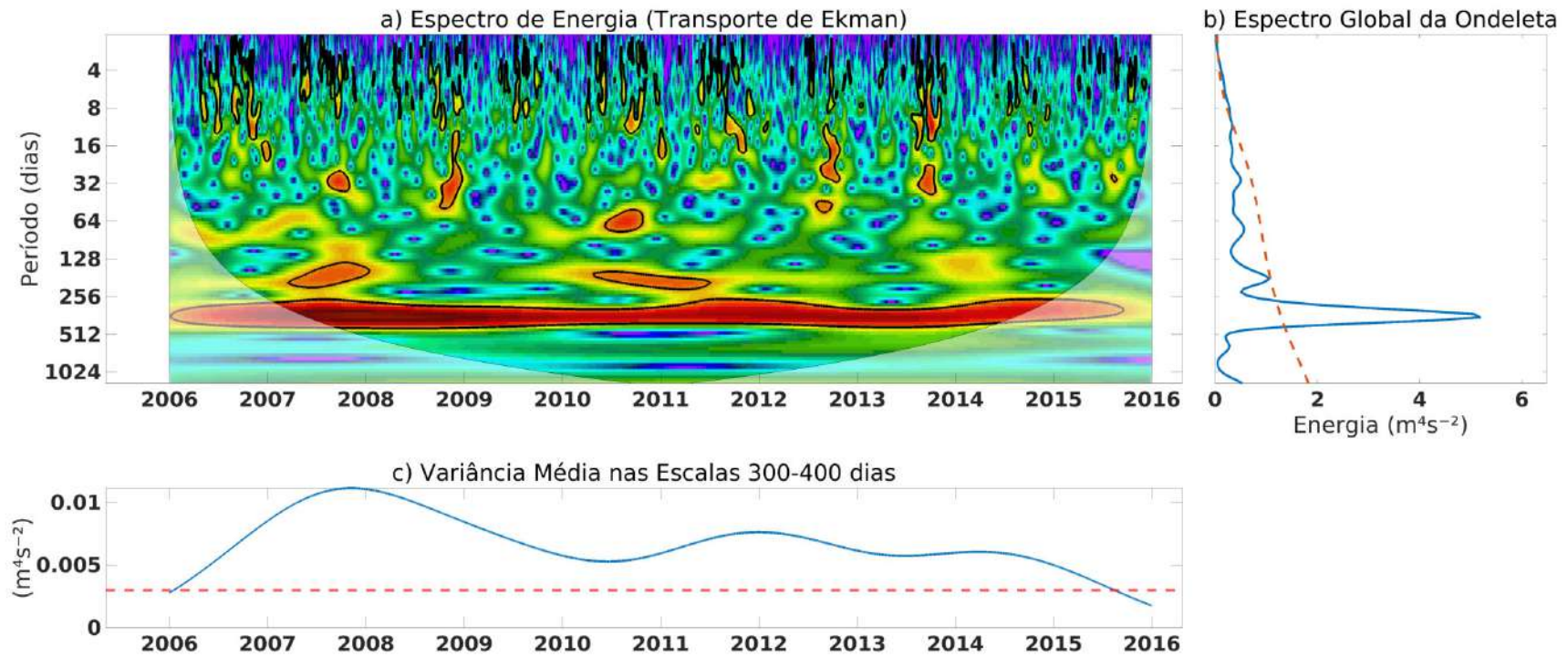


Figura 3.17: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção de Cabo Frio (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

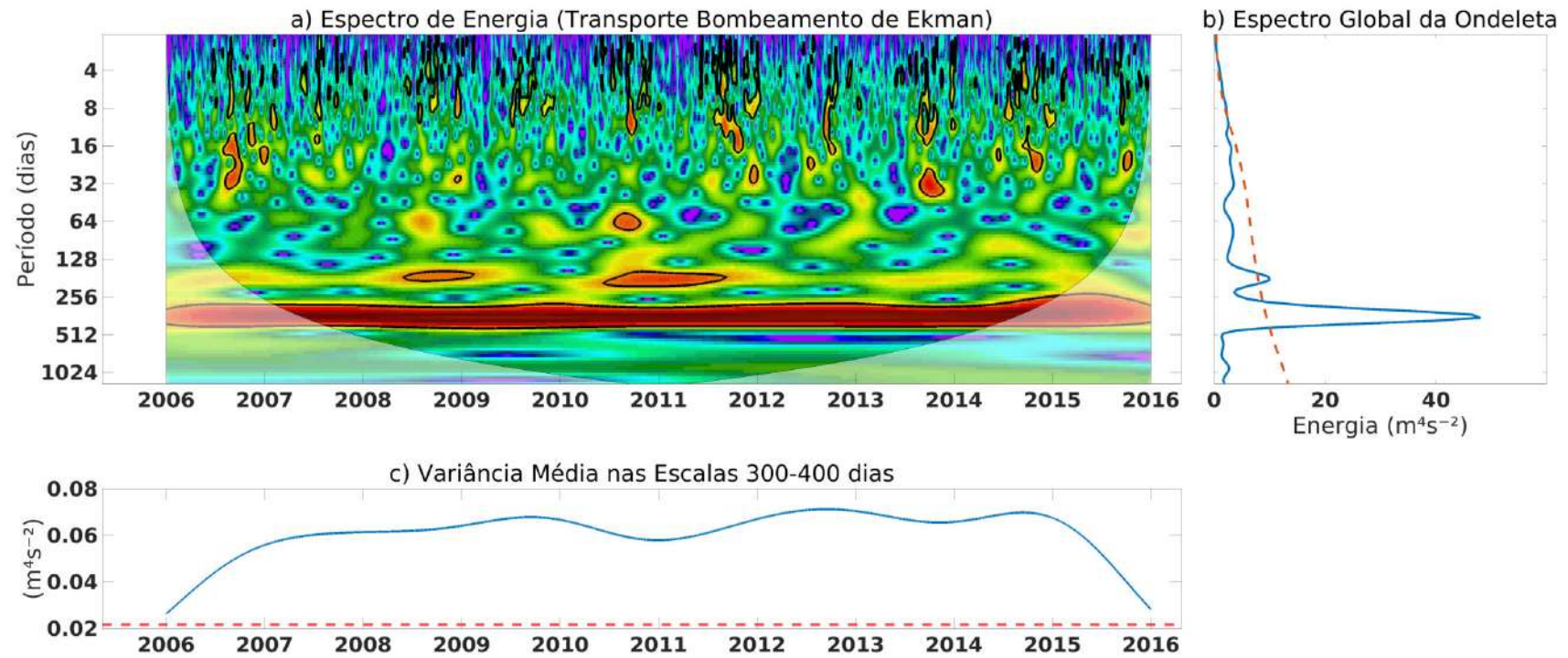


Figura 3.18: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção de Cabo Frio (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

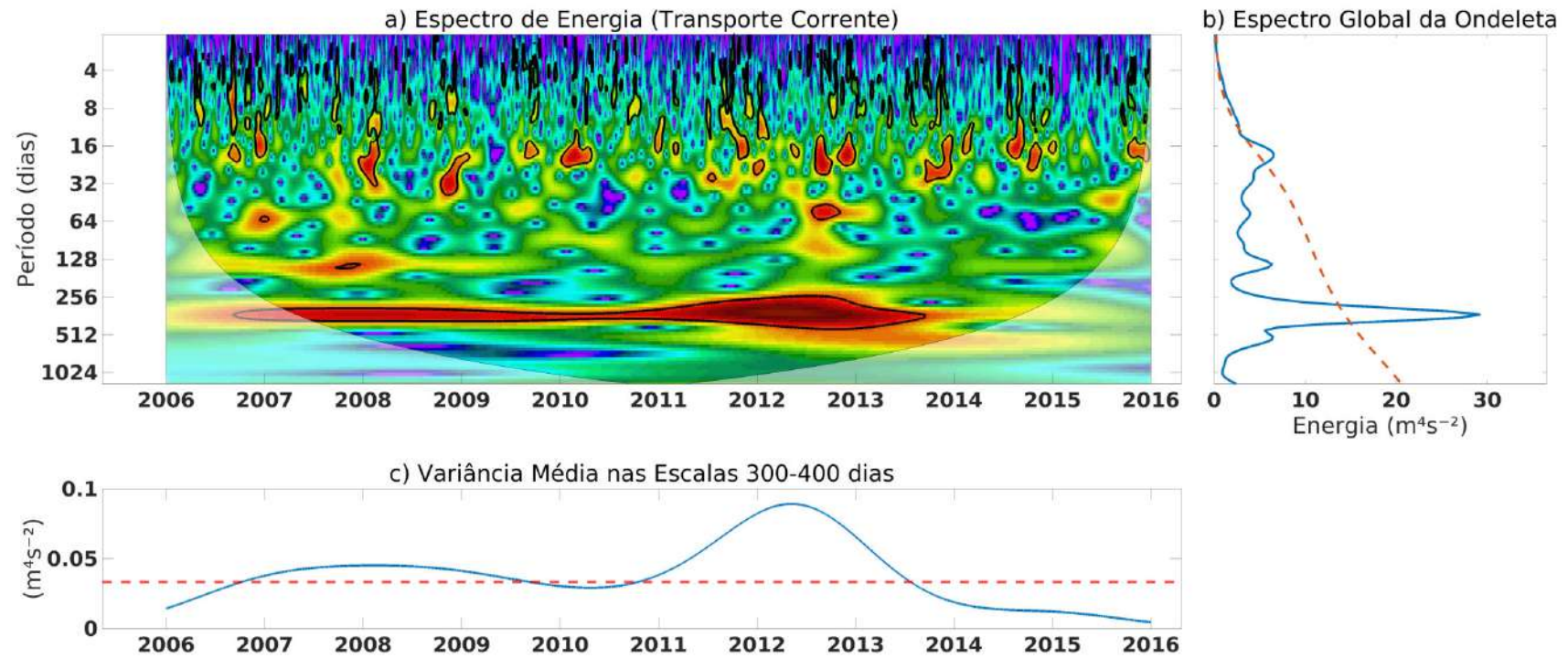


Figura 3.19: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção de Cabo Frio (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

Assim como observado nas análises das ondeletas, nas séries temporais do transporte de Ekman, do transporte devido à corrente e do bombeamento de Ekman (Figura 3.20), onde os valores positivos (negativos) são favoráveis (desfavoráveis) à ocorrência da ressurgência, constata-se eventuais descasamentos entre as forçantes. Pelas linhas grossas, que representam a média móvel de 30 dias, fica notório o papel da intrusão da corrente na plataforma em meados de 2012, onde o seu transporte médio (linha grossa preta) esteve maior que os transportes devido às forçantes atmosféricas (linhas grossas azul e vermelha). Ainda, é possível ver eventuais descasamentos entre as forçantes em escalas menores de tempo, como os mostrados pelas linhas finas, que representam a média móvel de 7 dias.

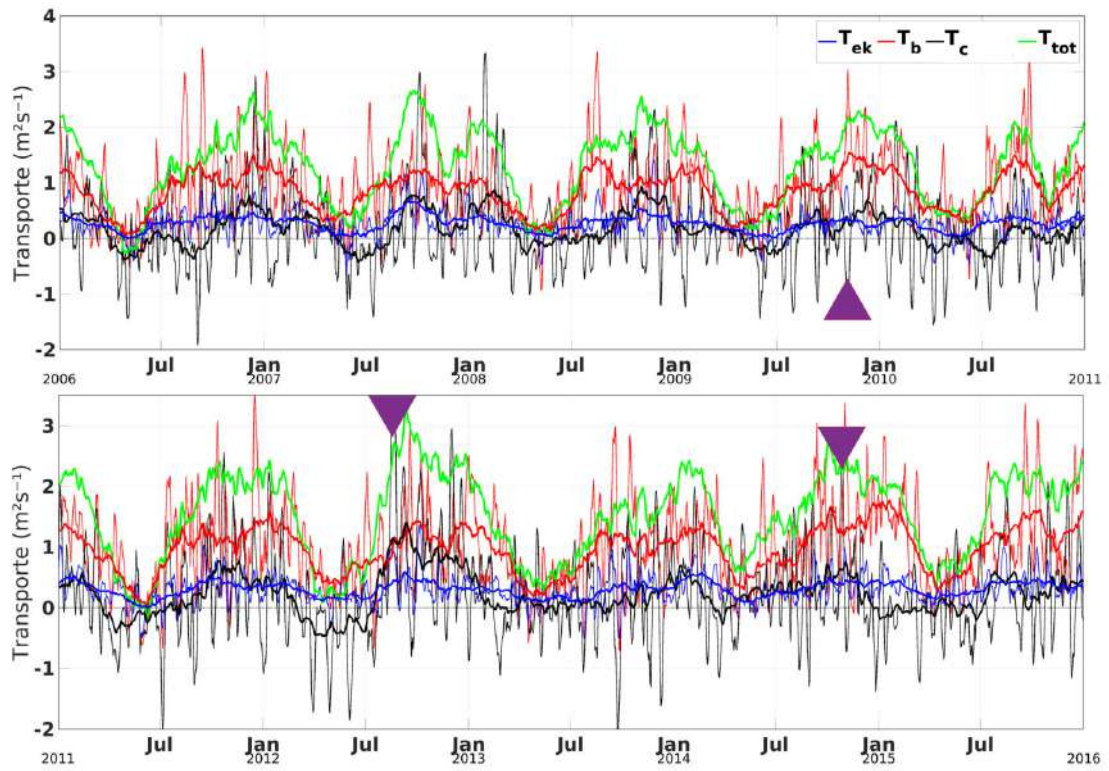


Figura 3.20: Séries temporais do transporte de Ekman (azul), do bombeamento de Ekman integrado em 200 km (vermelho) ao longo da seção e do transporte de Ekman na camada limite de fundo (preto). As linhas finas representam a média móvel de 7 dias e as linhas grossas a média móvel de 30 dias. A linha verde assinala o transporte total. As setas roxas representam os períodos que serão analisados nas Figuras 3.22 à 3.27.

Para se ampliar o entendimento sobre o papel das forçantes na ressurgência de Cabo Frio, foram selecionados três períodos nos quais os transportes atuaram de maneira distintas. Eles estão assinalados pelas setas roxas na Figura 3.20. No início de novembro de 2009, observa-se que o transporte de Ekman (linha azul) estava positivo e intenso (acima da média móvel de 30 dias) ao passo que o transporte devido à corrente (linha preta) estava negativo. Já em agosto de 2012, ambos os

transportes estavam positivos e intensos. E no final de outubro de 2014, o transporte de Ekman, apesar de positivo, não estava tão intenso quanto nos casos anteriores (abaixo da média móvel de 30 dias), ao contrário do que aconteceu com o transporte devido à corrente, que apresentou valores positivos, consideravelmente acima da média móvel de 30 dias.

A Figura 3.21 destaca a variação da temperatura (linha preta) para as três situações citadas acima. Em novembro de 2009, não houve ressurgência, apesar de um transporte de Ekman intenso e positivo, o que pode estar associado ao transporte devido à corrente desfavorável. Em agosto de 2012, com o transporte de Ekman e o da corrente propícios à ressurgência, observou-se uma queda de cerca 8°C na TSM, tendo ocorrido a ressurgência. Em outubro de 2014, também foi observada a ocorrência da ressurgência, com uma queda de aproximadamente 7°C na TSM. O transporte de Ekman estava fraco e o da corrente intenso e positivo. Ainda em 2014, no início de novembro, diante da diminuição da intensidade do transporte da

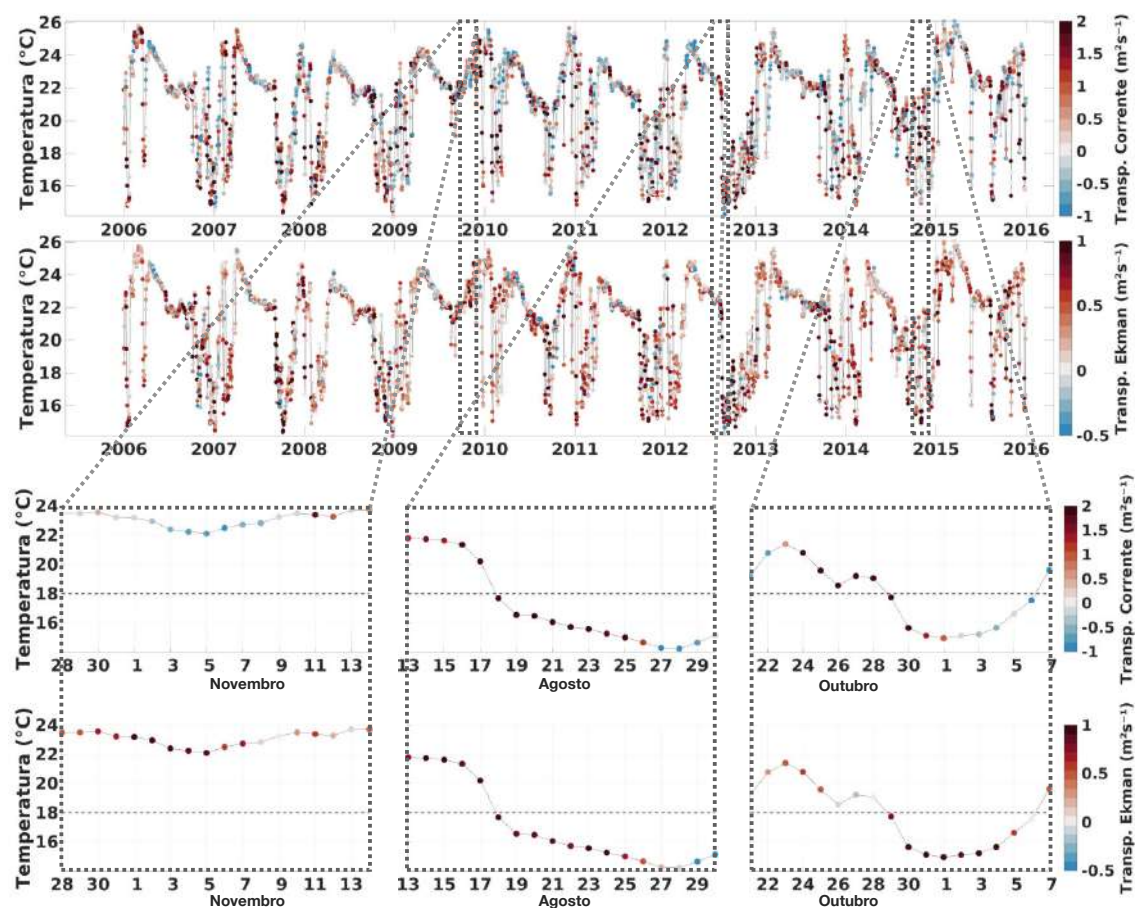


Figura 3.21: Série, na seção de Cabo Frio, da variação da temperatura (linha) com o transporte devido à corrente (painel superior) e com o transporte de Ekman (painel inferior), representados pelas bolas, além da ampliação dos eventos assinalados pelas setas roxas na Figura 3.20. A escala de cores indicam a intensidade dos transportes, onde os valores positivos são favoráveis à ressurgência.

corrente, e mesmo com a intensificação do transporte de Ekman, a TSM volta a aumentar em cerca de 5°C. Esta análise ilustra a contribuição do transporte devido à intrusão da corrente na plataforma para a variação da TSM na região de Cabo Frio, de acordo com as análises anteriores realizadas com a EOF e com as ondeletas.

Também, foram analisadas seções diárias de velocidade *along-shore*, temperatura da água e velocidade *cross-shore*, campos de tensão do vento, velocidades horizontais das correntes superficiais e TSM para os três eventos analisados acima (Figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27).

Nas Figuras 3.22 e 3.23, evento de 2009, verifica-se uma sequência contínua de campos de tensão do vento intensos, propícios para a ocorrência da ressurgência (campos b.1 até b.7). Em c.1 até c.8 são apresentando os campos de corrente superficial, nota-se que, na região de Cabo Frio, a CB está ao largo da quebra da plataforma (representada pela isóbata de 150 m) e que uma corrente para leste se desenvolve próxima à costa. Essa corrente se intensifica à medida que a temperatura costeira aumenta a oeste da seção de Cabo Frio (linha vertical assinalada nos campos), como se constata nas imagens de TSM (d.1 até d.8), onde também é possível observar o desenvolvimento da ressurgência no Cabo de São Tomé e no Espírito Santo. As imagens a.1 até a.8 contemplam a variação da temperatura (escala de cores) na seção de Cabo Frio, bem como da corrente *along-shore* (isolinhas brancas), onde os valores negativos (positivos) indicam um fluxo para oeste (leste), e da corrente *cross-shore*, representadas pelas setas pretas. Na camada limite superficial, tem-se um transporte predominantemente ao largo da costa em toda a sequência analisada, indicando a atuação do vento favorável à ressurgência. Ao mesmo tempo, com a intensificação da corrente costeira citada anteriormente, um transporte na camada limite de fundo, próximo à costa, inibe o desenvolvimento da ressurgência, apesar da abundante disponibilidade da ACAS na plataforma.

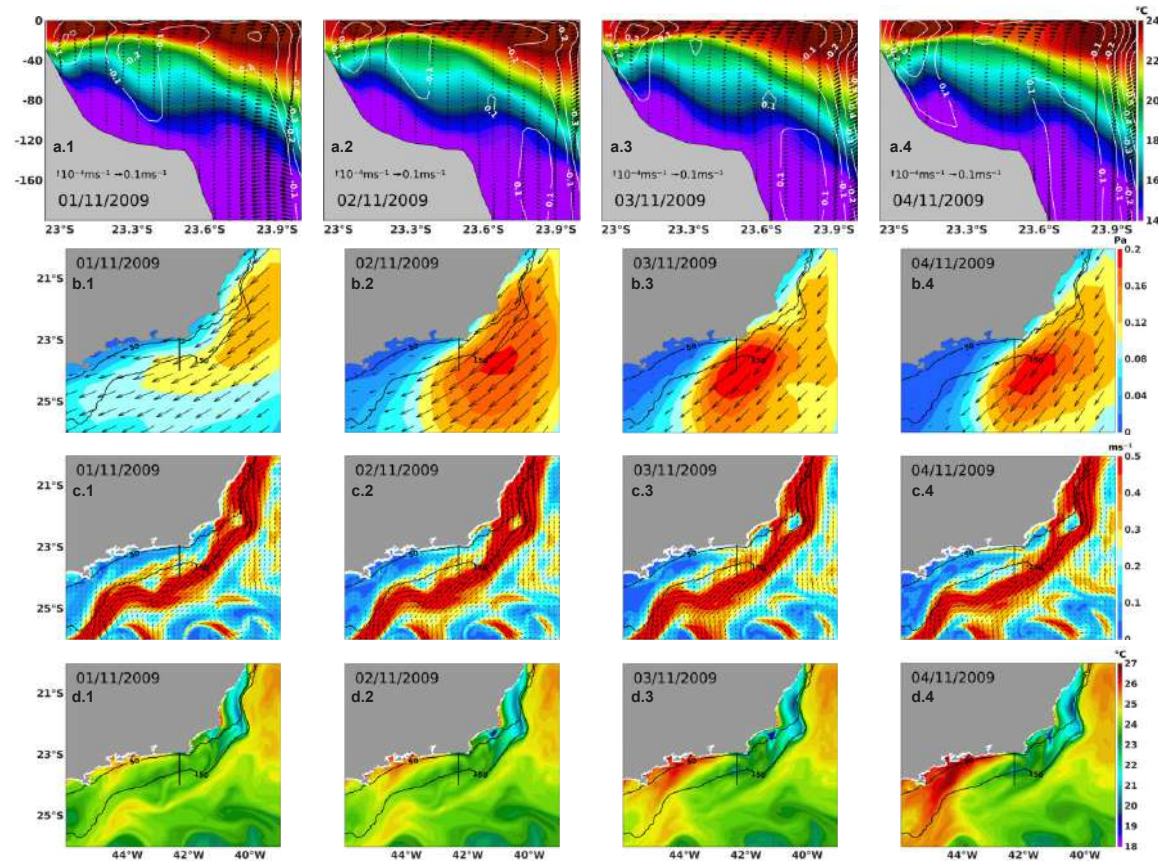


Figura 3.22: Os campos a.1 até a.4 mostram a variação temporal da temperatura (escala de cores), da corrente *along-shore* (isolinhas brancas) e da corrente *cross-shore* (setas pretas) ao longo da seção de Cabo Frio (representada nas Figuras b, c e d). As Figuras b.1 até b.4 apresentam os campos de tensão do vento, onde também estão representadas as isóbatas de 50 e 150 m e a seção de Cabo Frio. Idem para as Figuras c.1 até c.4 e d.1 até d.4, que mostram, respectivamente, os campos de corrente superficial e de TSM. O período analisado encontra-se destacado nas Figuras 3.20 e 3.21.

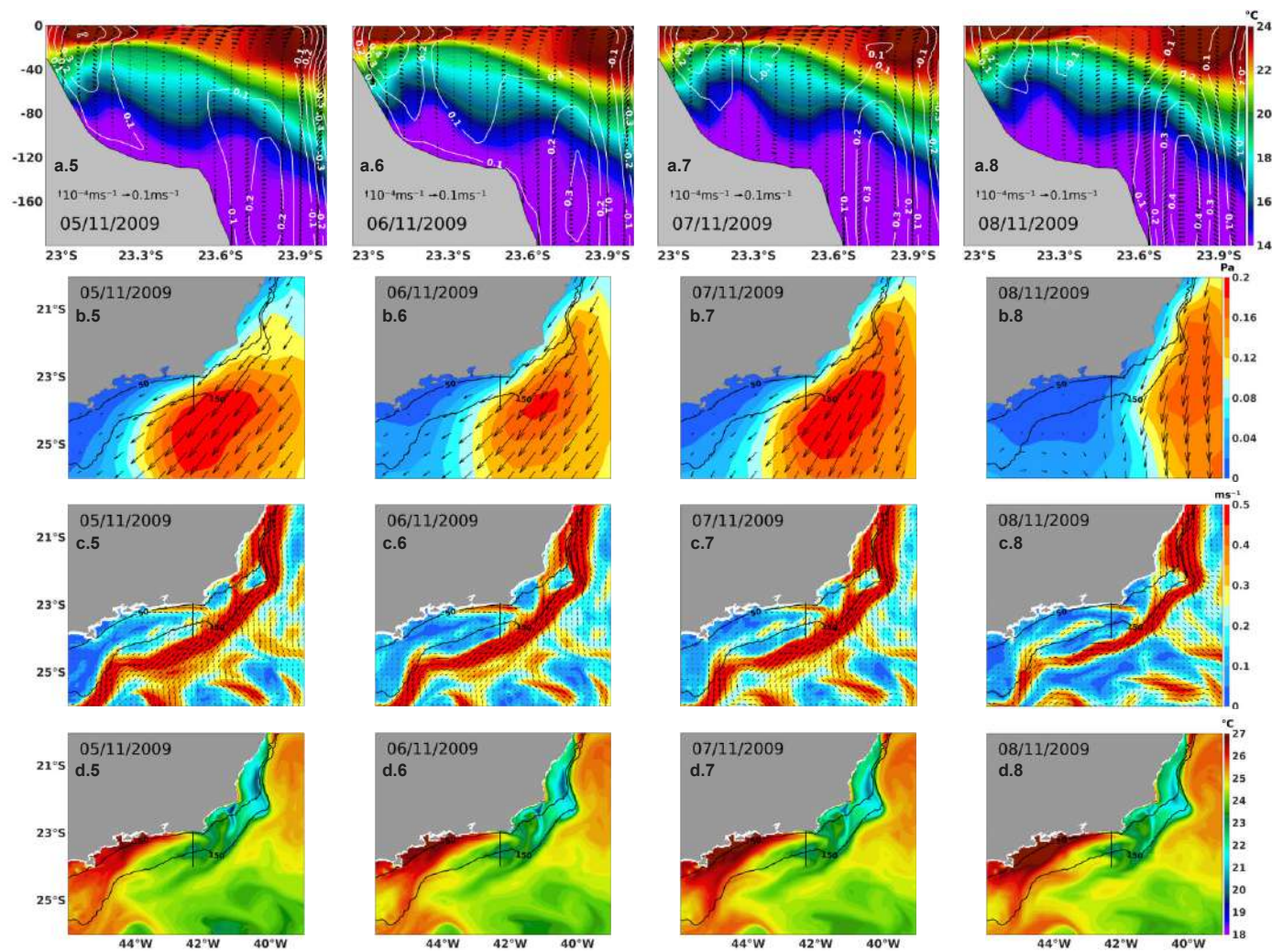


Figura 3.23: Continuação da Figura 3.22.

Em agostos de 2012, o transporte devido à corrente e ao vento foram intensos e persistentes, e estão associados a uma forte redução da TSM (Figura 3.21), chegando à valores próximos de 14°C e permanecendo abaixo de 18°C por mais de 13 dias consecutivos. As Figuras 3.24 e 3.25 mostram os campos diários da tensão do vento (b.1 até b.8) e da corrente (c.1 até c.8), confirmando a persistência e intensidade dessas forçantes. Nos campos de TSM (d.1 até d.8), é possível observar o desenvolvimento da longa pluma de água ressurgida com temperaturas inferiores à 18°C . Nos campos da seção de Cabo Frio (a.1 até a.8), observa-se a intensificação da corrente ao longo da plataforma bem como o transporte no fundo. É interessante notar que em alguns campos, como o a.7, o núcleo da corrente está localizado próximo da quebra da plataforma, e houve uma intensificação da corrente próximo da costa, possivelmente associada ao fluxo geostrófico em função do gradiente de densidade gerado pela ressurgência.

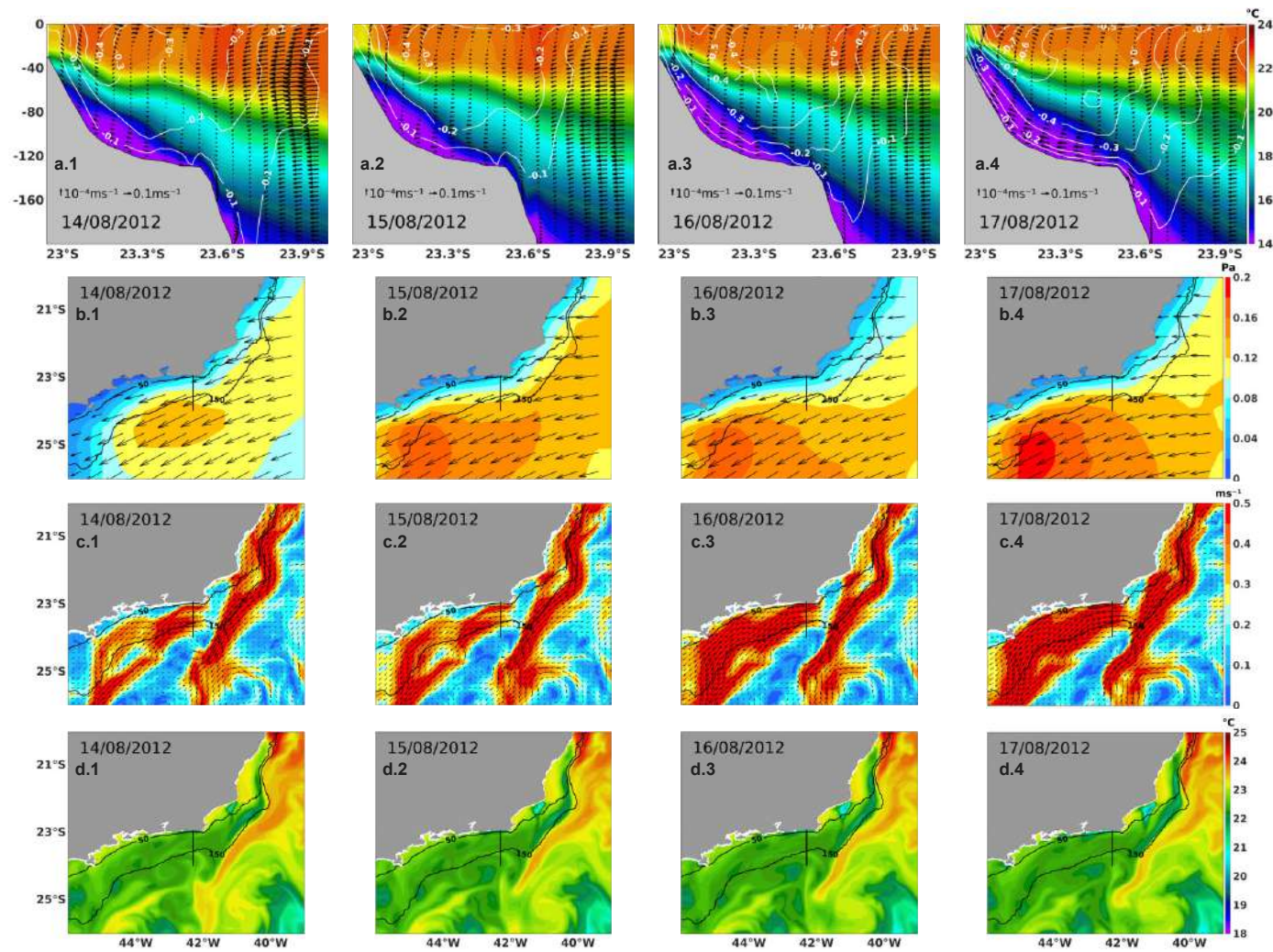


Figura 3.24: Idem Figura 3.22 para o período de 14/08/2012 a 17/08/2012.

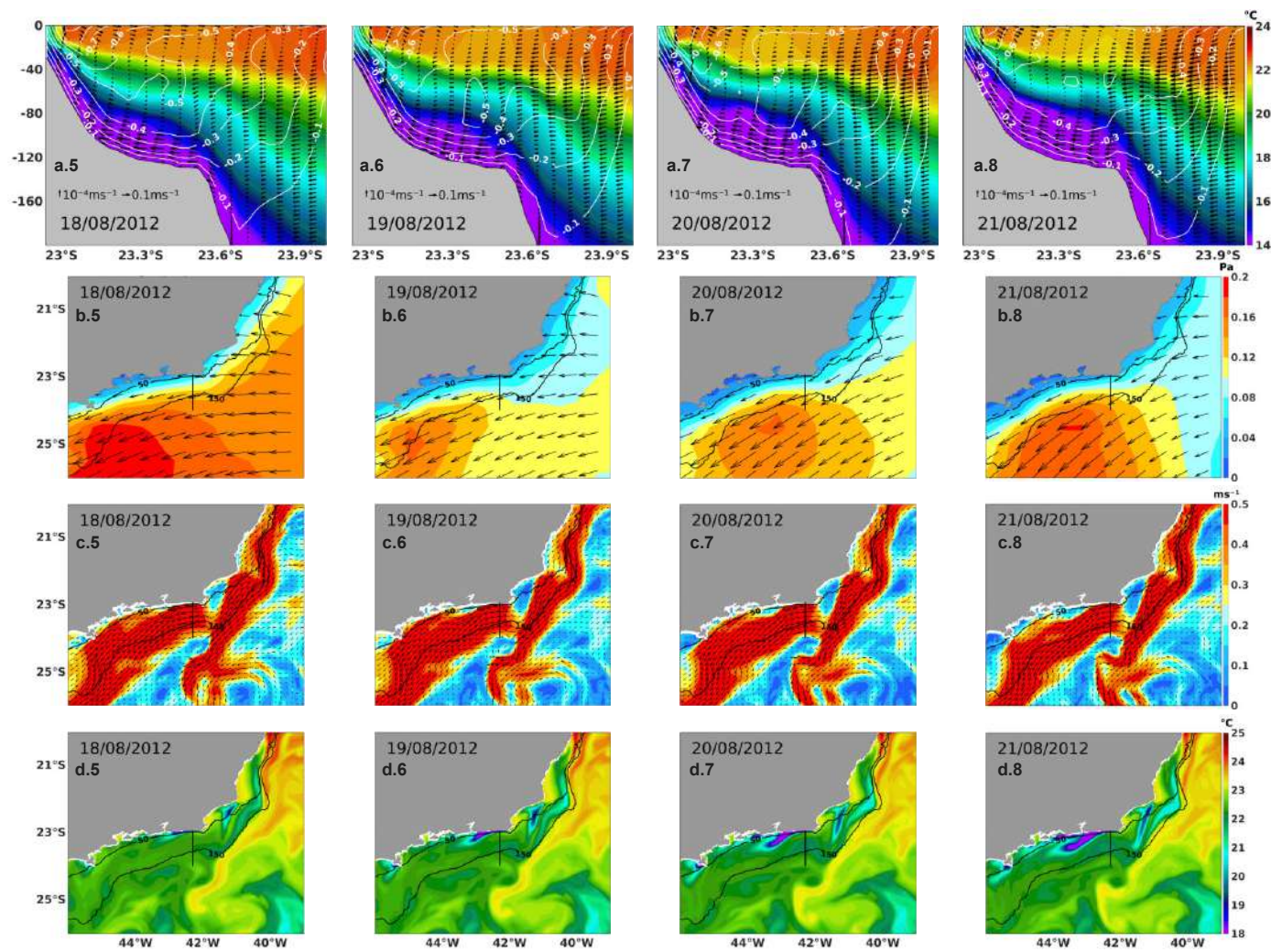


Figura 3.25: Continuação da Figura 3.25.

Ainda analisando as formas de atuação das forçantes, foi observado que, eventualmente, o transporte na camada limite de fundo exerce um papel fundamental para a diminuição do esforço do vento, como constatado no final de outubro de 2014 (Figura 3.21), onde, mesmo com ventos menos intensos que os observados em 2009 e após um período de 3 dias de interrupção de ventos favoráveis (campos b.4 até b.6 das Figuras 3.26 e 3.27), foram necessários apenas 2 dias de ventos propícios para que houvesse a ressurgência. Nas seções das Figuras 3.26 e 3.27, observa-se que a corrente ao longo de toda a plataforma continental gerou um transporte ininterrupto que contribuiu para o afloramento da ACAS.

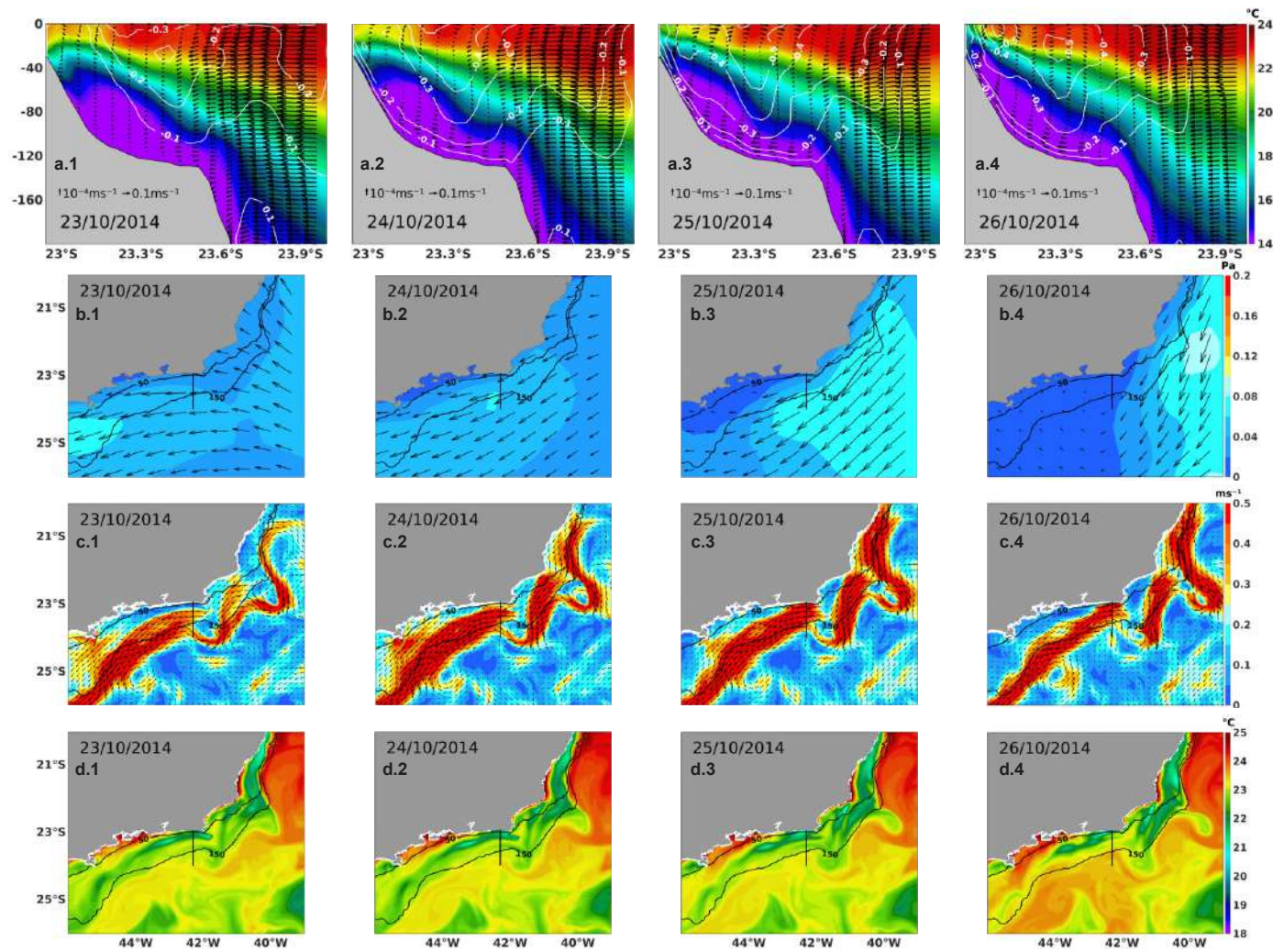


Figura 3.26: Idem Figura 3.22 para o período de 23/10/2014 a 26/10/2014.

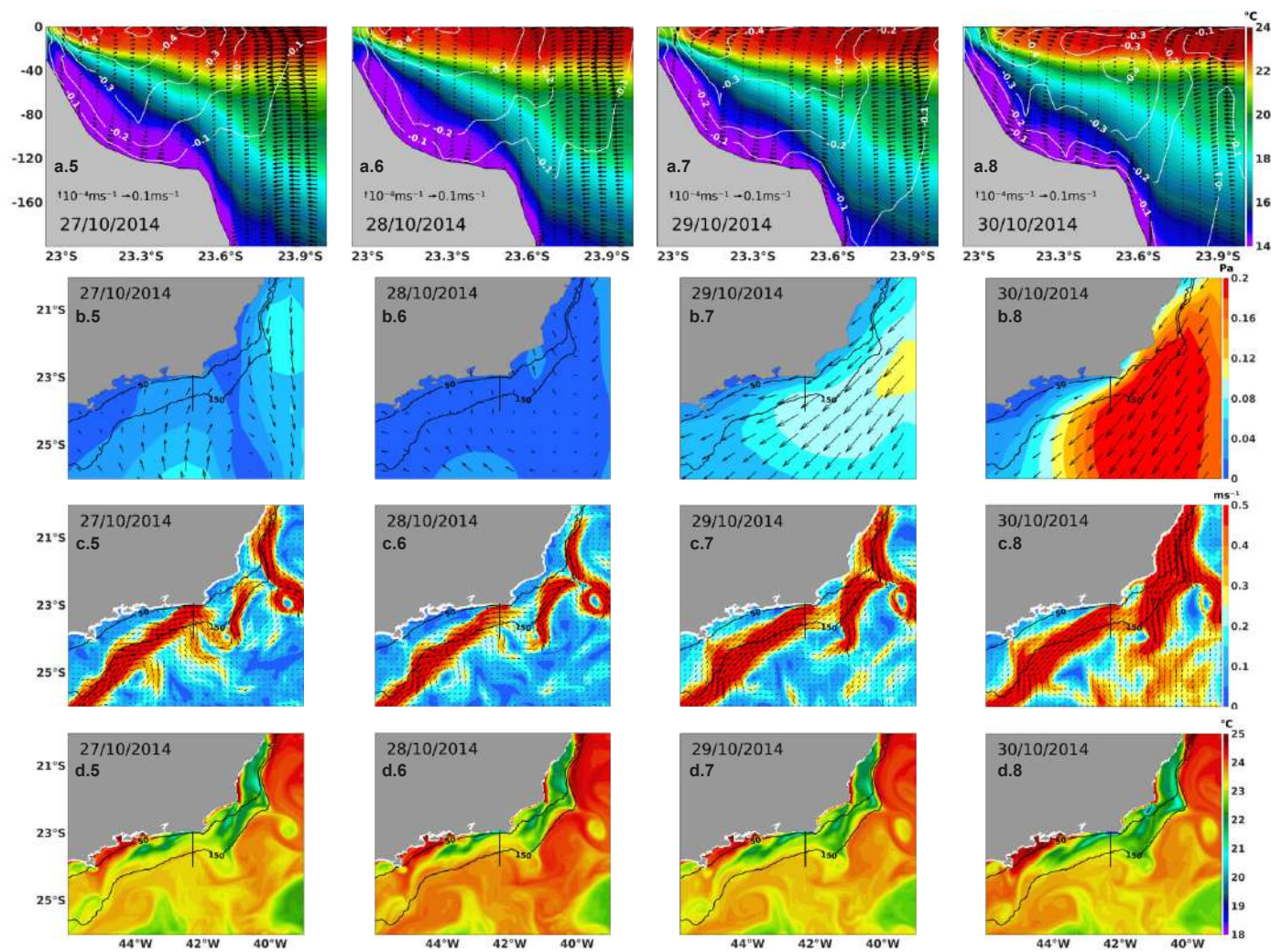


Figura 3.27: Continuação da Figura 3.27.

O ponto que mais chamou atenção nessas análises foi a situação exposta em 2009, onde constatou-se, próximo da costa, uma corrente para leste, apesar da predominância dos ventos de nordeste, que tenderia a induzir uma corrente costeira para sudoeste, tendo em vista que a hidrodinâmica nessa região é altamente dependente do vento (DE CASTRO *et al.*, 2006). Contudo, também verificou-se um aumento da temperatura à oeste da seção de Cabo Frio, o que poderia justificar o surgimento dessa corrente. É possível que essa elevação da TSM esteja associada a uma Onda de Calor Marinha (OCM), definida como sendo um evento com duração de 5 dias, ou mais, no qual a TSM está anormalmente elevada (HOBDAY *et al.*, 2016). As OCM podem ser causadas por uma combinação de processos atmosféricos e oceanográficos (HOBDAY *et al.*, 2016). O trabalho de RODRIGUES *et al.* (2019) indica que, na parte oeste do Atlântico Sul, cerca de 60% das ocorrências da OCM estão associadas à um bloqueio atmosférico, que é caracterizado por uma persistente circulação anticiclônica no sudeste Brasileiro.

SILVA e DOTTORI (2021) analisaram o impacto na estrutura termohalina e na circulação costeira no Embaiamento Sul Brasileiro de um evento extremo de bloqueio atmosférico que ocorreu no verão de 2013-2014. Esses autores constataram que a mudança no regime de ventos fortalece a ocorrência da ressurgência na região de Cabo Frio e que a estrutura termohalina final induziu a formação de uma corrente para nordeste próximo da costa entre Cananéia e a Ilha de São Sebastião. No trabalho de SILVA e DOTTORI (2021), observa-se um aumento anômalo da TSM somente até as proximidades de São Sebastião, como observado no painel esquerdo da Figura 3.28, que mostra dados observacionais da anomalia da TSM extraídos do Multiscale Ultrahigh-Resolution (MUR) (CHIN *et al.*, 2017) para o dia 13/02/2014 (esquerda), data na qual foi observada a corrente para nordeste no referido trabalho.

No presente estudo, foi observado que, em novembro de 2009, a TSM esteve mais elevada na região do Rio de Janeiro (Figuras 3.22 e 3.23), se estendendo até Cabo Frio. Esse aumento da TSM poderia ser fruto de uma OCM, tendo em vista a ocorrência de um aquecimento anômalo (painel direito da Figura 3.28) com duração superior a uma semana. Nesse período, foi observado, por mais de 5 dias consecutivos, o desenvolvimento de uma corrente costeira para leste, mesmo com um campo de vento predominantemente de nordeste, ou seja, desfavorável à ocorrência dessa corrente para leste, que poderia ser justificada, assim como ocorreu no trabalho do SILVA e DOTTORI (2021), como sendo consequência da alteração da estrutura termohalina provada por uma eventual OCM.

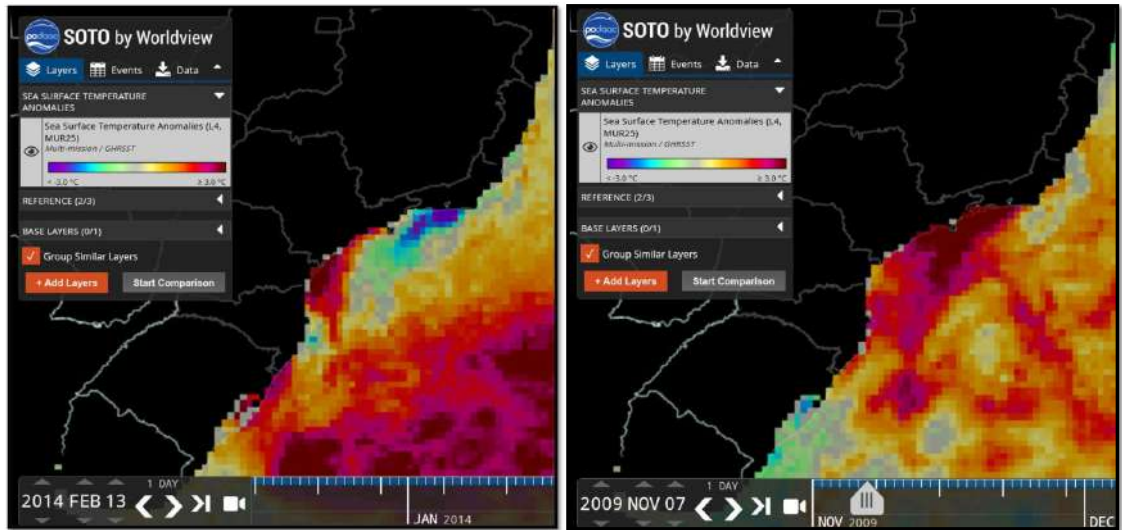


Figura 3.28: Dados observacionais de anomalia da TSM do Multiscale Ultrahigh Resolution (MUR) para os dias 13/02/2014 (esquerda) e 07/11/2009 (direita), extraído de <https://soto.podaac.earthdatacloud.nasa.gov>.

3.3.2 Cabo de São Tomé

Assim como feito para a seção de Cabo Frio, foram utilizadas a transformada de ondeleta para analisar a TSM e os transportes na região de Cabo de São Tomé. A Figura 3.29 (a) mostra o espectro de energia da transformada de ondeletas da série temporal da TSM retirada na região da ressurgência de Cabo de São Tomé (Figura 3.1), onde observa-se um padrão muito semelhante ao da seção de Cabo Frio. As maiores energias encontram-se na periodicidade anual (Figura 3.29 (b)), onde se constata uma variabilidade interanual, com o sinal menos expressivo entre junho de 2009 até junho de 2011 (Figura 3.29 (c)), período no qual foram observados menos dias com temperaturas inferiores à 20°C (Figura 3.4). Cabe ressaltar que esse resultado similar ao de Cabo Frio já era esperado, tendo em vista a boa correlação apresentada entre os dois centros de ressurgência com o segundo modo da EOF da TSM, que conseguiu capturar o sinal da ressurgência e a sua variabilidade interanual.

Analisando os resultados da transformada de ondeleta para a série temporal do transporte de Ekman (Figura 3.30), para o transporte devido ao bombeamento de Ekman (Figura 3.31) e para o transporte devido à aproximação da corrente (Figura 3.32), verifica-se que as variações interanuais dessas forçantes não se ajustam tão bem as variações interanuais da TSM (Figura 3.29), apesar da ondeletas da corrente apresentar uma queda de energia entre 2009 e 2012, como observado na TSM. Esse resultado indica que, além da atuação conjunta entre as forçantes, outro fator possa influenciar a ressurgência nessa região.

Como foi verificado na seção 3.2.3 deste estudo, que trata sobre a disponibi-

lidade da ACAS na plataforma continental, ao contrário da região de Cabo Frio, que possui disponibilidade permanente da ACAS ao longo do ano, o Cabo de São Tomé apresenta disponibilidade intermitente, o que pode estar afetando a ressurgência nessa região. Essa possibilidade vai de encontro com os resultados do trabalho do PALÓCZY *et al.* (2014), onde os autores constataram a importância do pré-condicionamento da massa d'água na plataforma para a ressurgência na região do Cabo de São Tomé. Eles verificaram que a presença de meandros ciclônicos favoreciam a intrusão da ACAS na plataforma e, dessa forma, era necessário menos impulso do vento para a ocorrência da ressurgência.

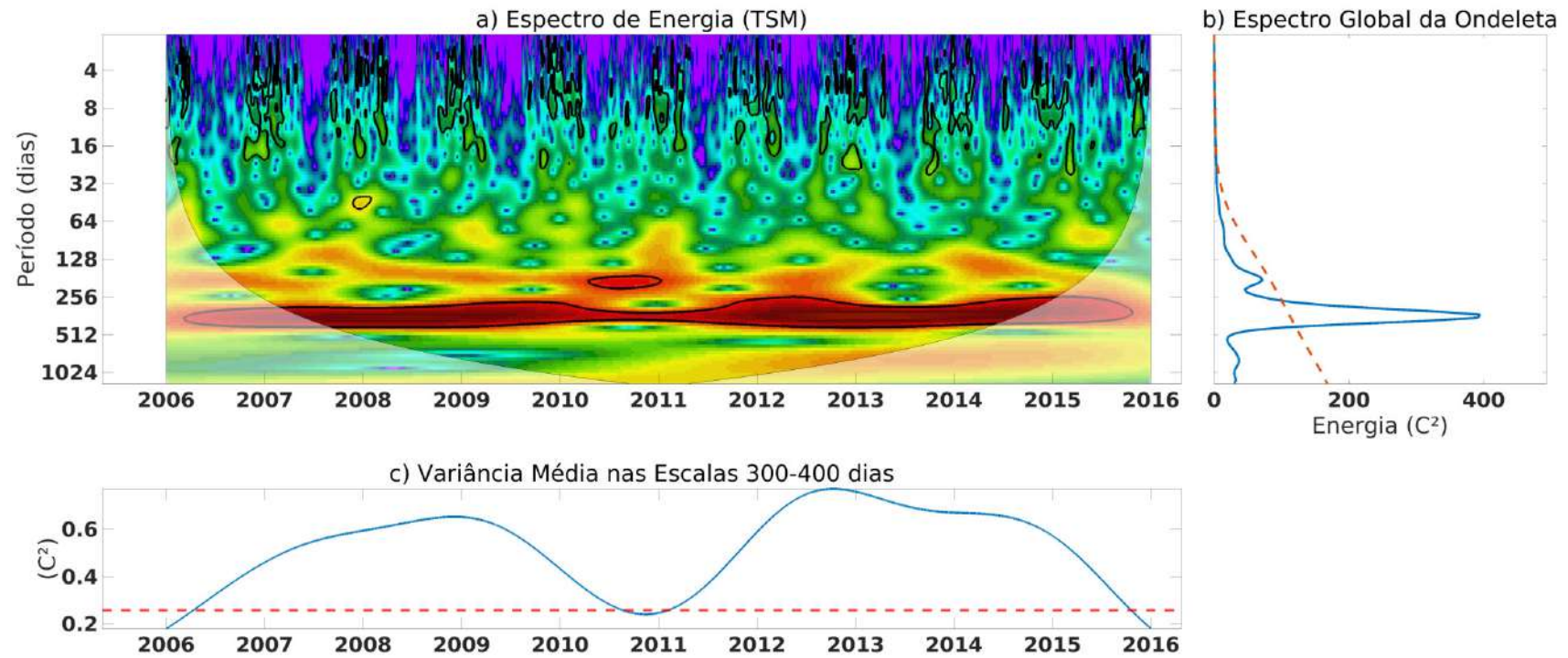


Figura 3.29: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região de Cabo de São Tomé (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

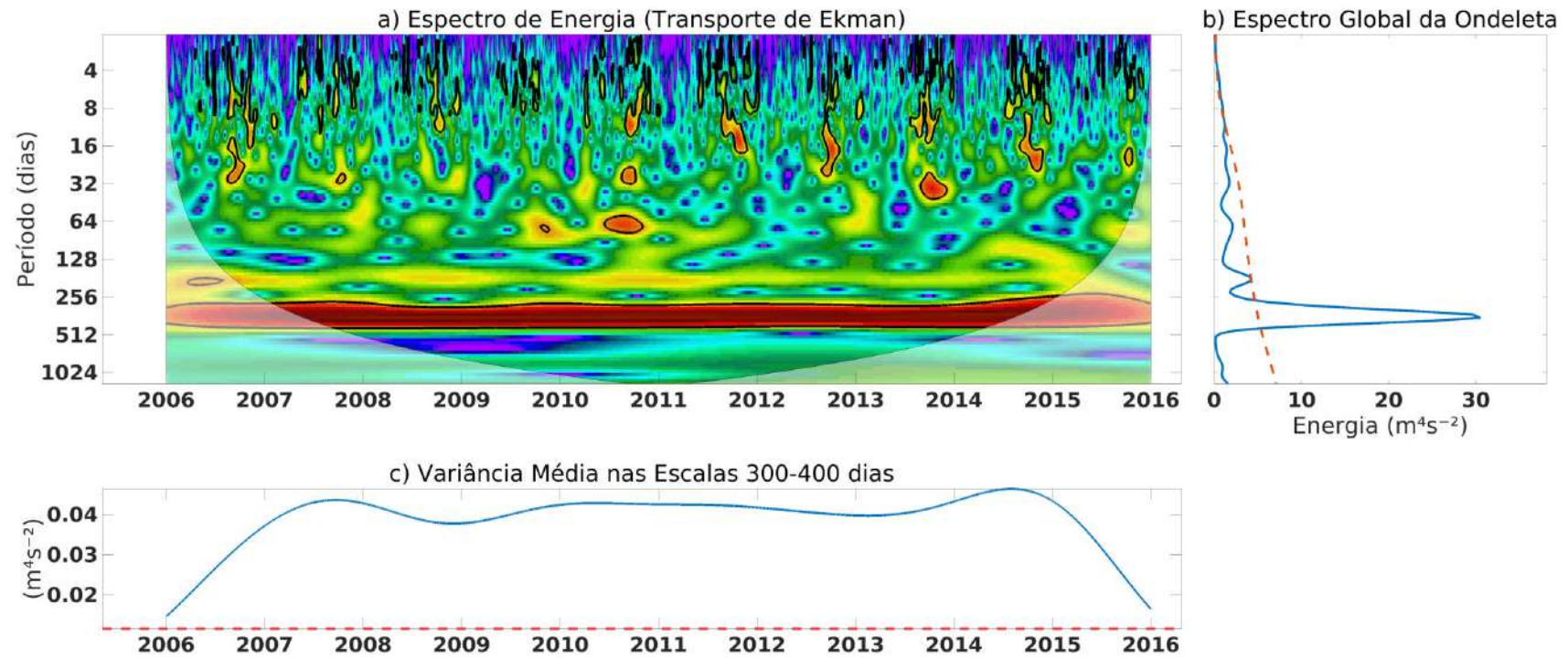


Figura 3.30: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

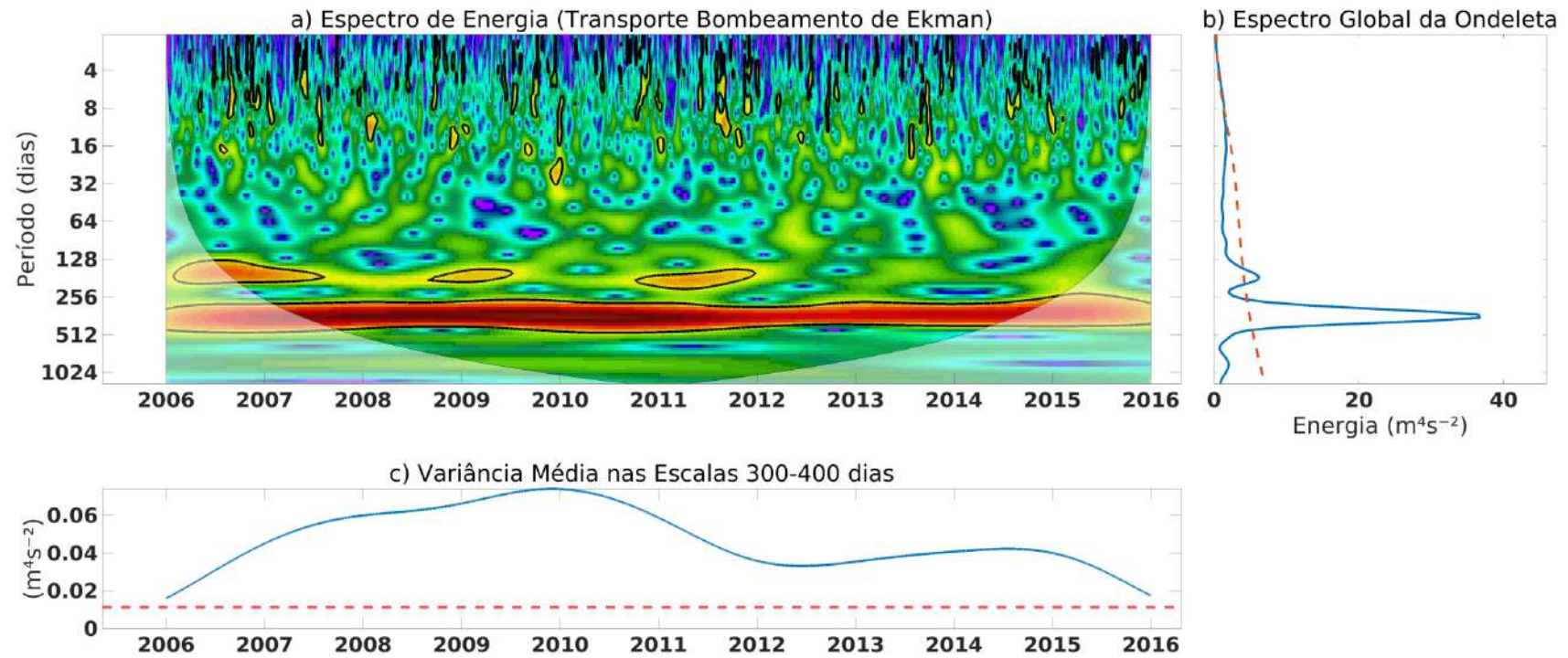


Figura 3.31: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

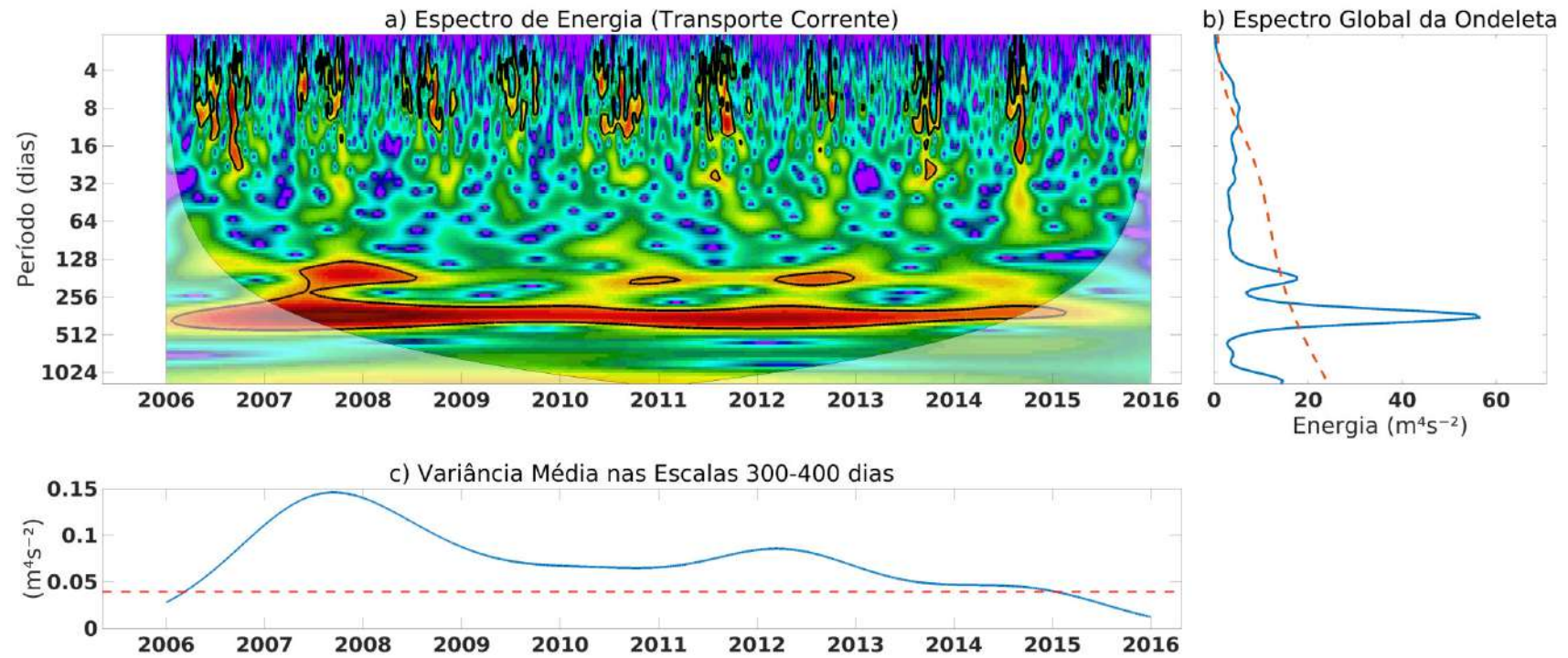


Figura 3.32: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção do Cabo de São Tomé (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

Para analisar o papel da disponibilidade da ACAS na variabilidade interanual da ressurgência em Cabo de São Tomé, foi retirada uma série temporal da temperatura de fundo média na região assinalada na Figura 3.33, que foi plotada junto com a TSM e com o transporte devido à corrente e ao vento (Figura 3.34).

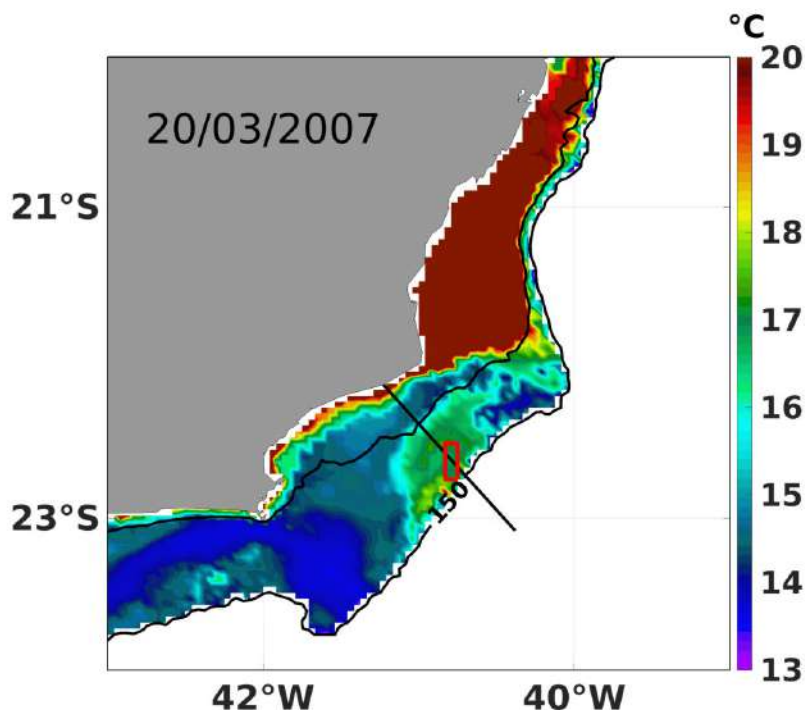


Figura 3.33: Região (retângulo vermelho) onde foi retirada a série temporal da temperatura média de fundo.

O painel superior da Figura 3.34 mostra a série temporal da variação da TSM (linha preta), da intensidade do transporte devido à corrente (escala de cores), onde os valores positivos são favoráveis à ressurgência, e da temperatura média de fundo (linha azul). As mesmas variáveis são mostradas no painel inferior, com exceção da escala de cores, que nesse caso, expressa a intensidade do transporte de Ekman. Ainda na Figura 3.34, são destacados três períodos distintos que mostram como a temperatura de fundo pode contribuir com a variabilidade da ressurgência. Cabe ressaltar que nesses três períodos, tanto o campo de vento quanto a corrente estavam propícios à ressurgência.

No primeiro intervalo, janeiro-fevereiro de 2011, observa-se um aumento da TSM e da temperatura de fundo. Em agosto de 2012, constata-se uma diminuição da TSM e da temperatura de fundo. E o terceiro intervalo analisado, fevereiro de 2013, verifica-se que a temperatura de fundo permanece estagnada em cerca de 19°C e a TSM diminui, se aproximando da temperatura de fundo.

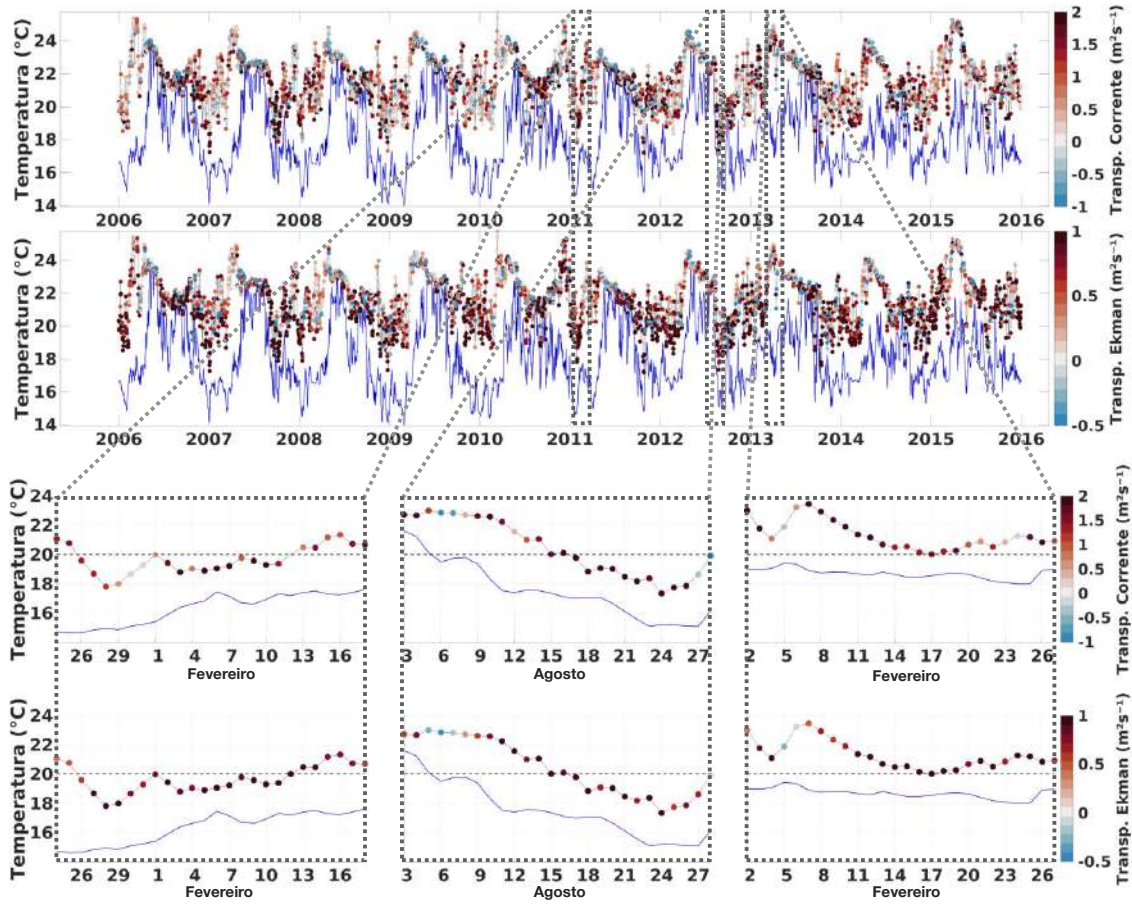


Figura 3.34: Série da variação da TSM com o transporte devido à corrente (painel superior) e com o transporte de Ekman (painel inferior), além da ampliação de três cenários distintos. A escala de cores indicam a intensidade do transporte, onde valores positivos correspondem a eventos favoráveis à ressurgência. A linha azul representa a temperatura de fundo na região assinalada na Figura 3.33.

As Figuras 3.35 até 3.40 mostram as sequências de seções a cada três dias, que contemplam velocidade *along-shore*, temperatura da água e velocidade *cross-shore*, e campos de tensão do vento, velocidades horizontais das correntes superficiais e temperatura de fundo para os três períodos supracitados. Para o intervalo de 2011, observa-se que a partir do final de janeiro, perante condições favoráveis à ressurgência, a água aflorada se torna gradativamente mais quente (Figuras 3.35 e 3.36, seções a.1 até a.8), o que pode ser explicado por uma diminuição progressiva na disponibilidade de água fria na plataforma continental (Figuras 3.35 e 3.36, seções a.1 até a.8 e campos d.1 até d.8). Portanto, nesse período, o processo de ressurgência está ocorrendo simultaneamente ao aquecimento da água de fundo, elevando os valores da temperatura da água ressurgida, contribuindo com a variabilidade interanual da ressurgência quando se tem a TSM como indicador desse fenômeno.

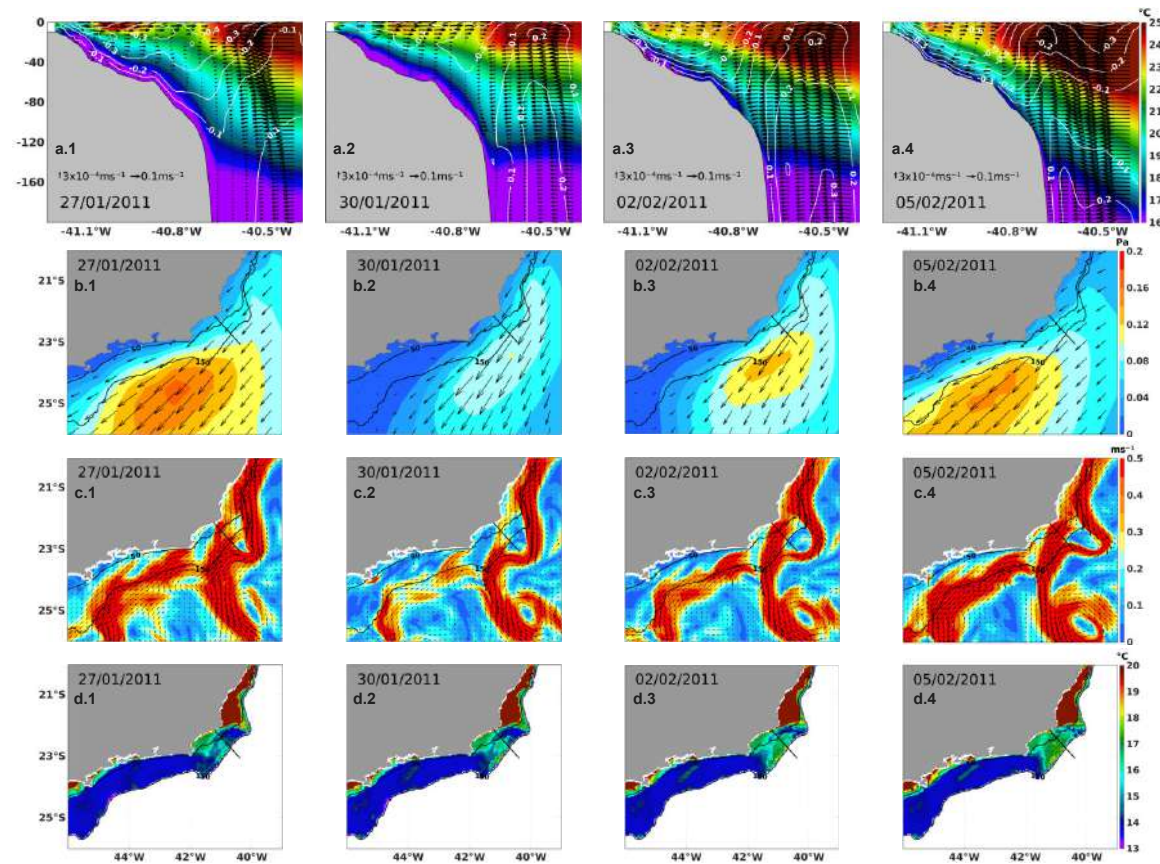


Figura 3.35: Os campos a.1 até a.4 mostram a variação a cada três dias da temperatura (escala de cores), da corrente *along-shore* (isolinhas brancas) e da corrente *cross-shore* (setas pretas) ao longo da seção do Cabo de São Tomé (representada nas Figuras b, c e d). As Figuras b.1 até b.4 apresentam os campos de tensão do vento, onde também estão representadas as isóbatas de 50 e 150 m e a seção do Cabo de São Tomé. Idem para as Figuras c.1 até c.4 e d.1 até d.4, que mostram, respectivamente, os campos de corrente superficial e de temperatura de fundo. O período analisado encontra-se destacado na Figura 3.34.

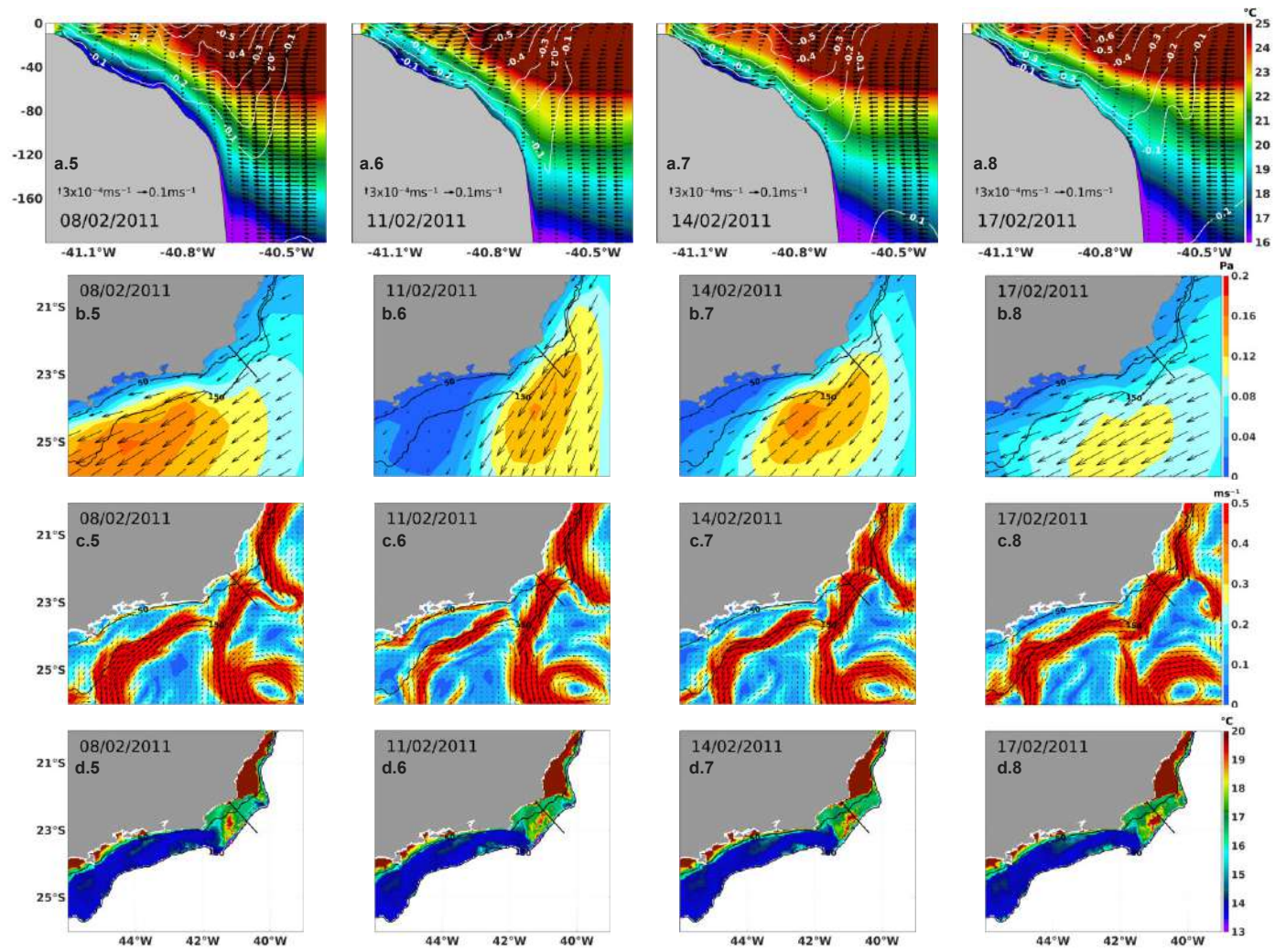


Figura 3.36: Idem Figura 3.35 para o período de 08/02/2011 a 17/02/2011.

Ao contrário do que ocorreu no intervalo de 2011, em agosto de 2012, foi observada uma progressiva diminuição da TSM acompanhada de um aumento da disponibilidade de água com temperatura inferior à 16°C na plataforma continental (Figuras 3.37 e 3.38).

Em fevereiro de 2013, observou-se uma estagnação da temperatura de fundo em cerca de 19°C na plataforma continental, e, apesar da TSM diminuir sucessivamente sob condições propícias à ressurgência, a água aflorada manteve uma diferença de um pouco mais de 1°C em relação à temperatura de fundo, nesse caso, mesmo acontecendo o ressurgimento de água mais profunda, a indisponibilidade de água mais fria na plataforma foi determinante para limitar a intensidade da ressurgência (Figuras 3.39 e 3.40).

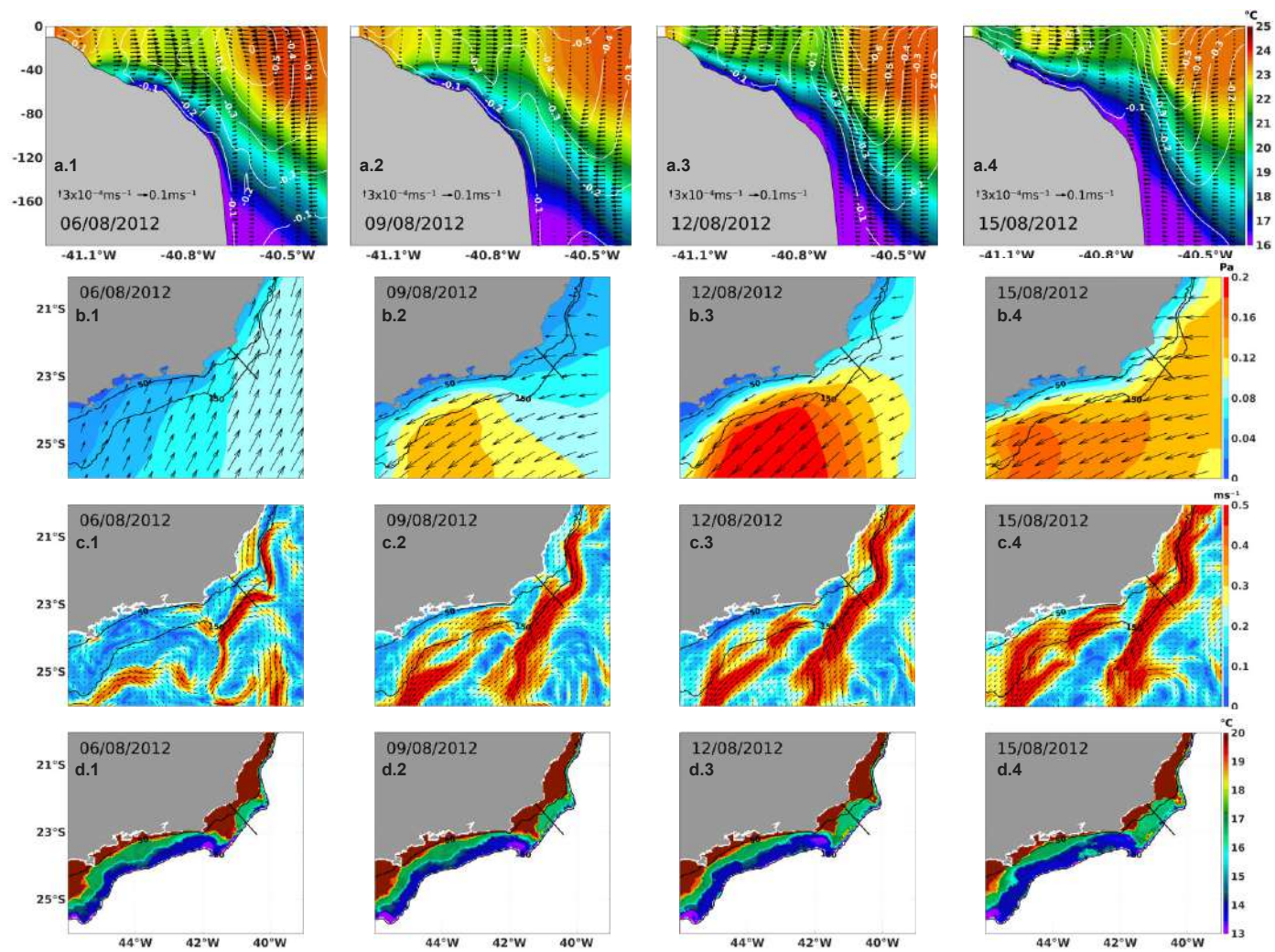


Figura 3.37: Idem Figura 3.35 para o período de 06/08/2012 a 15/08/2012.

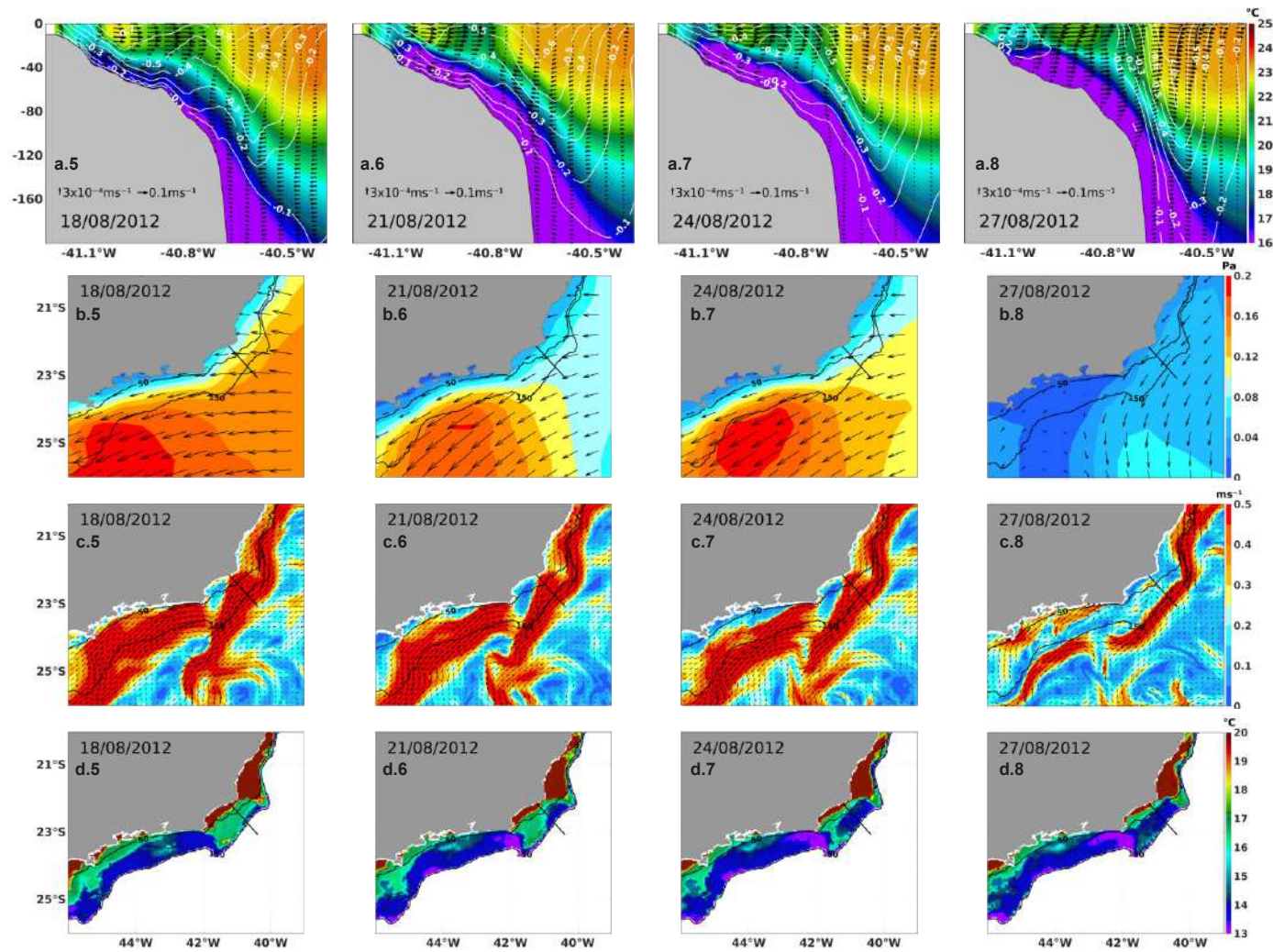


Figura 3.38: Idem Figura 3.35 para o período de 18/08/2012 a 27/08/2012.

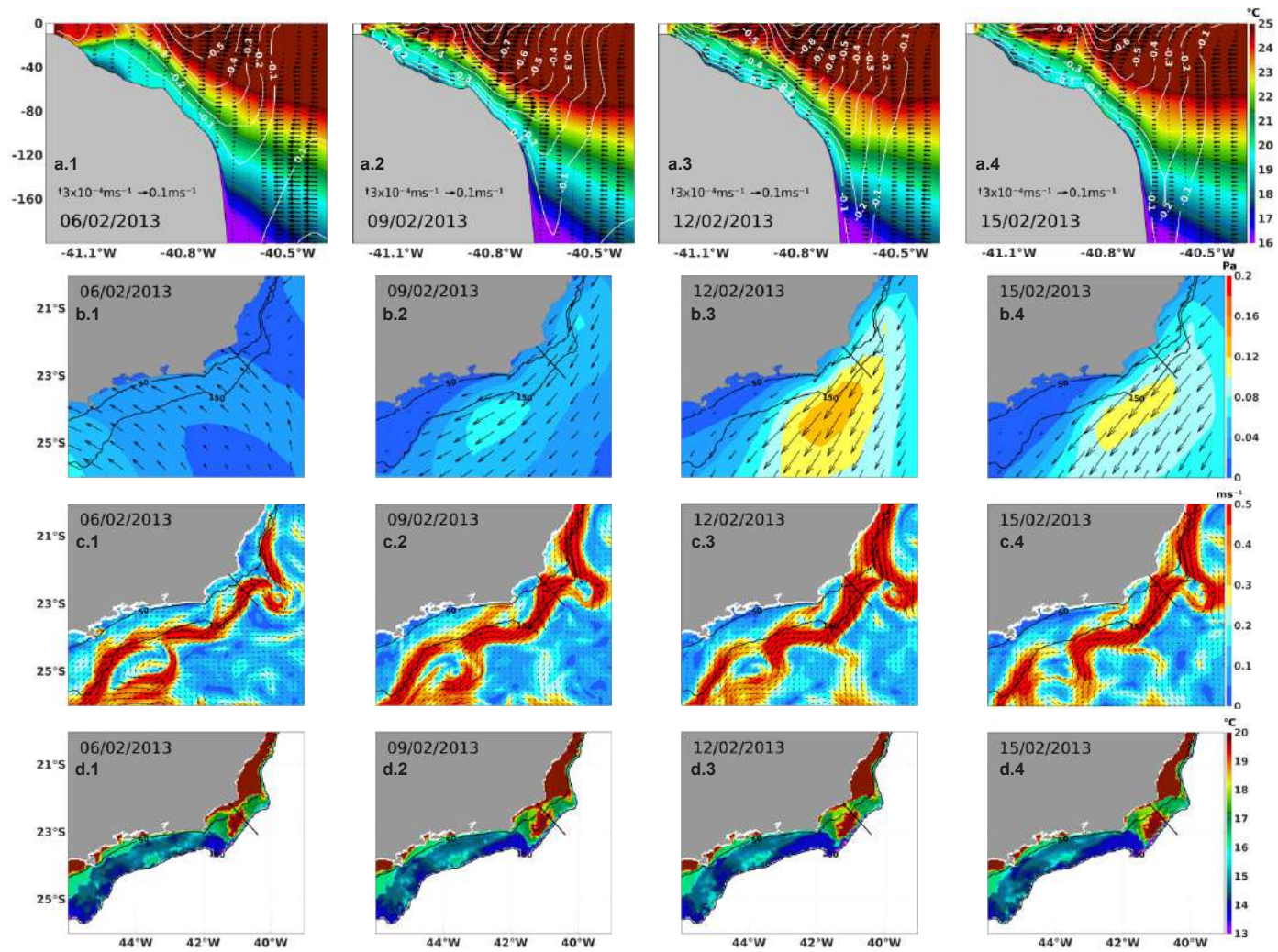


Figura 3.39: Idem Figura 3.35 para o período de 06/02/2013 a 15/02/2013.

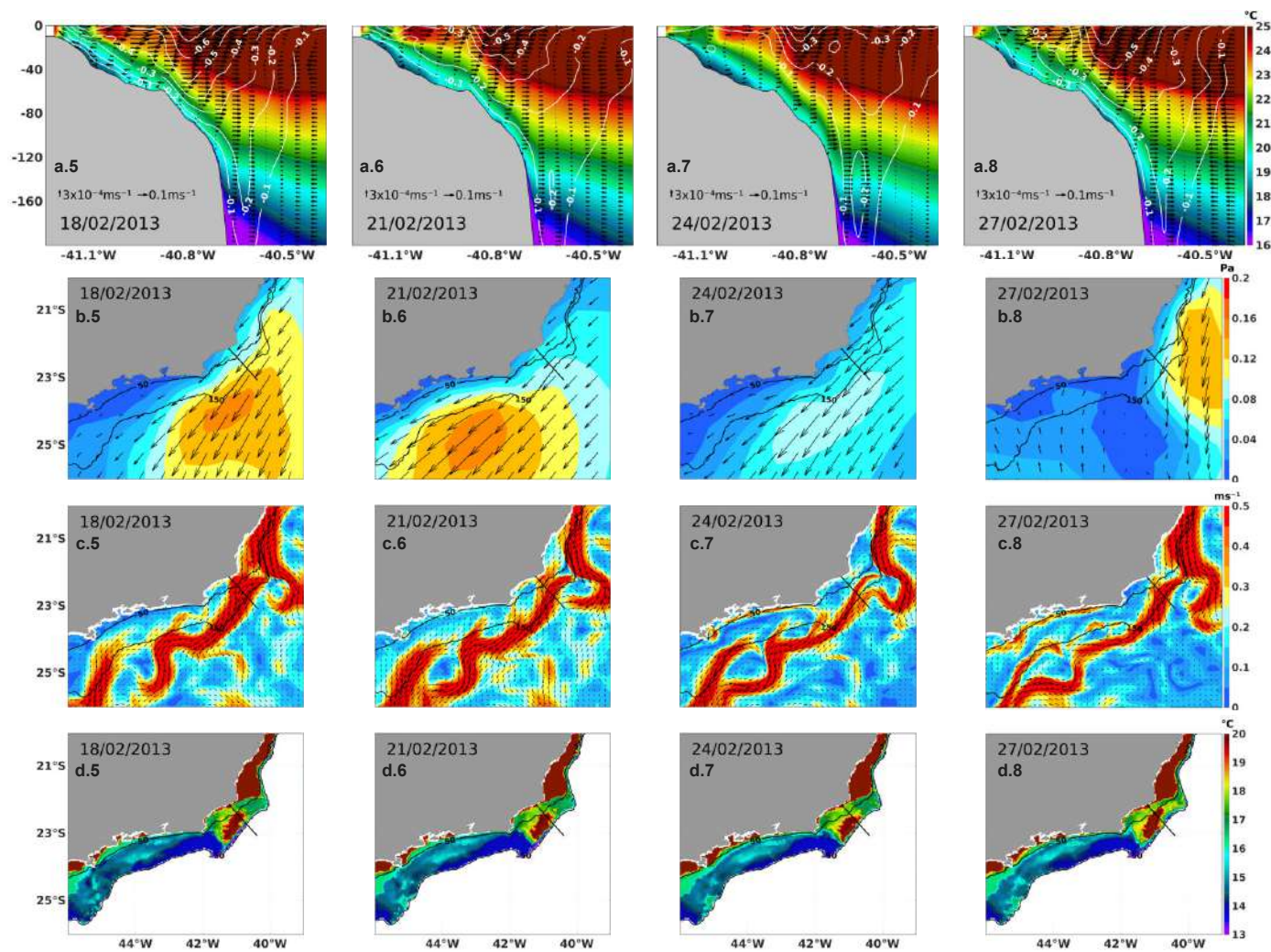


Figura 3.40: Idem Figura 3.35 para o período de 18/02/2013 a 27/02/2013.

É interessante observar a presença de um meandramento ciclônico da Corrente do Brasil nos dois períodos em que houve um aquecimento da água de fundo na borda externa da plataforma. Nesse caso, é possível que a porção sul desse meandro tenha levado a água mais quente da corrente para a plataforma, desfavorecendo a disponibilidade de ACAS. Entretanto, da mesma forma como foi constatado no trabalho do PALÓCZY *et al.* (2014), foi verificado a formação de meandros ciclônicos favorecendo a intrusão de ACAS na plataforma, como ocorreu em março de 2012 (Figura 3.41). Nesse período, observa-se que a ressurgência do Cabo de São Tomé foi a mais intensa da região sudeste.

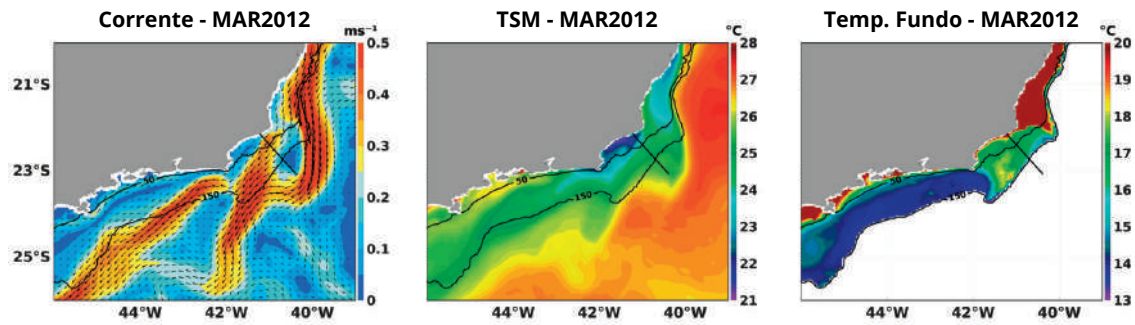


Figura 3.41: Campos médios da corrente, da TSM e da temperatura de fundo no período de março de 2012.

Portanto, além das forçantes analisadas, a temperatura de fundo na plataforma da região de Cabo de São Tomé parece ter um importante papel na ressurgência do Cabo de São Tomé. E o resultado encontrado neste estudo sugere que a formação de meandros ciclônicos, além de atuar favorecendo a intrusão da ACAS na plataforma, pode atuar desfavorecendo a sua intrusão, a medida que a porção sul do meandro pode levar a água mais quente da Corrente do Brasil para a plataforma.

3.3.3 Espírito Santo

Após a utilização da transformada de ondeletas na região do Espírito Santo (Figuras 3.42, 3.43, 3.44 e 3.45), constatou-se que o transporte de Ekman e o transporte devido à intrusão da corrente na plataforma atuam em conjunto na modulação da variabilidade interanual da ressurgência. No geral, no início da série temporal se observou uma maior concordância da variabilidade da TSM (Figura 3.42 (c)) com o transporte de Ekman (Figuras 3.43 (c)), próximo de 2012, verificou-se que o transporte devido à corrente teve o protagonismo (Figura 3.45 (c)), e a partir desse ano, pareceu que ambas as forçantes atuaram em conjunto. Esse resultado ratifica a conclusão da análise de EOF realizada neste estudo, que indicou que a variação da intensidade da Corrente do Brasil contribui com a ressurgência na região sudeste brasileira como um todo. Ainda, está de acordo com a análise da ressurgência de

Vitória realizada no trabalho do MARTINS (2015). Onde este autor constatou que ventos mais intensos não geram necessariamente ressurgências mais intensas. Após uma investigação de outros possíveis mecanismos que pudessem atuar como forçante da ressurgência em Vitória, MARTINS (2015) observou que era a intensificação da Corrente do Brasil que atuava em conjunto com o campo de ventos na modulação da intensidade da ressurgência em Vitória.

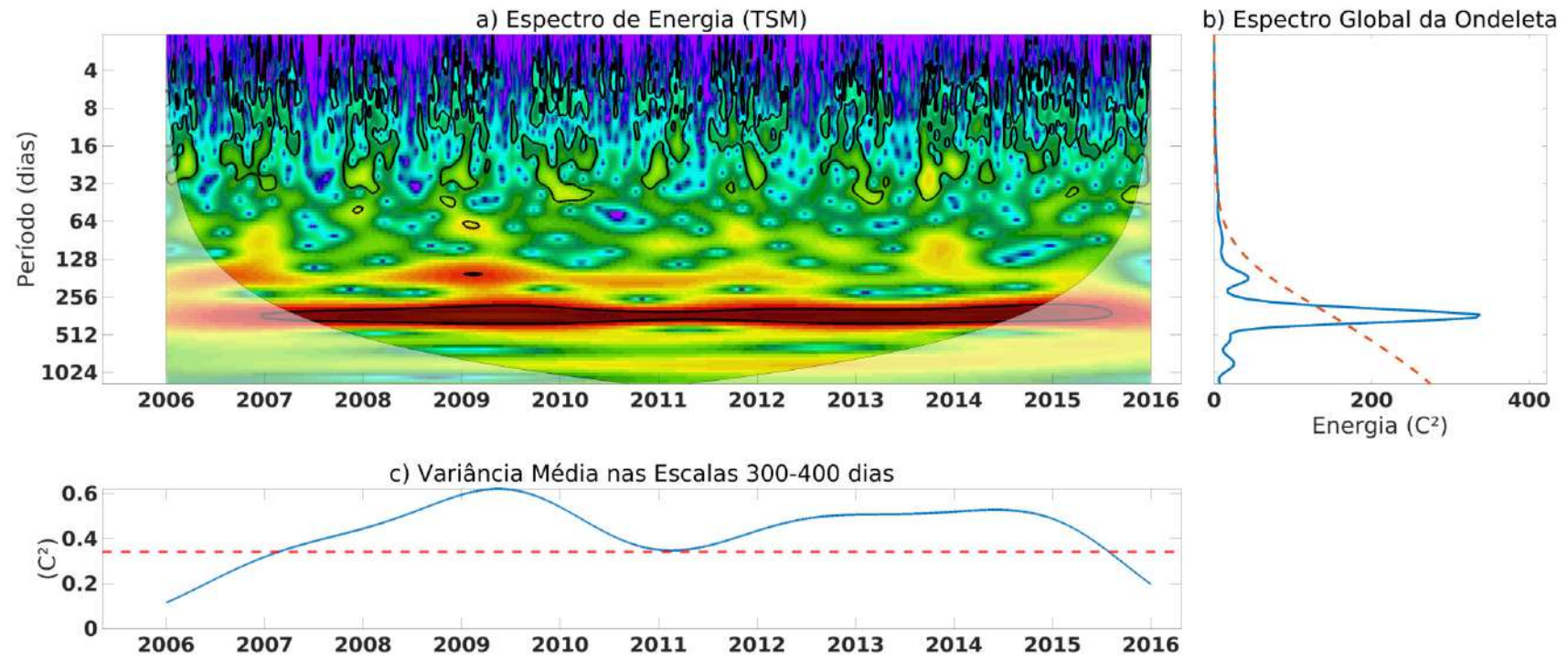


Figura 3.42: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal da TSM na região do Espírito Santo (Figura 3.1), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. c) Variância média nas escalas de 300 a 400 dias. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

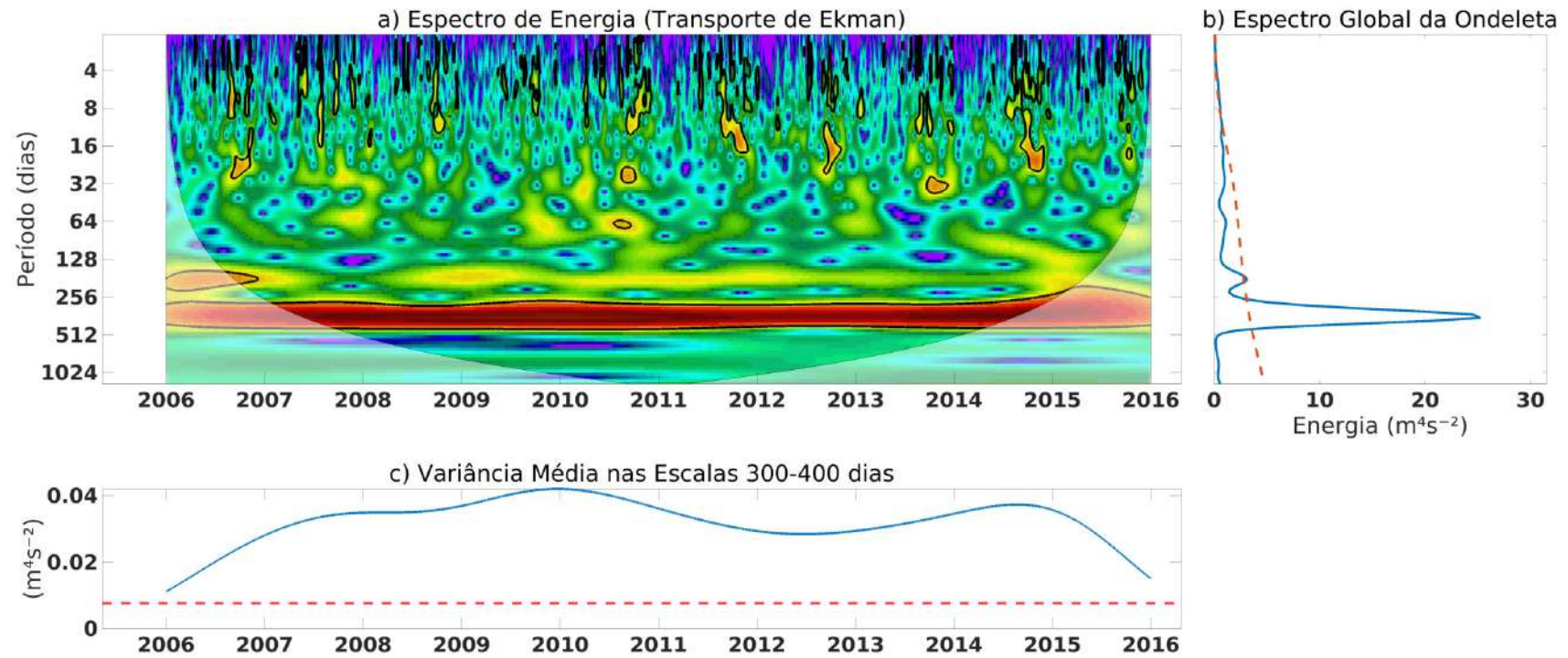


Figura 3.43: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman na seção do Espírito Santo (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

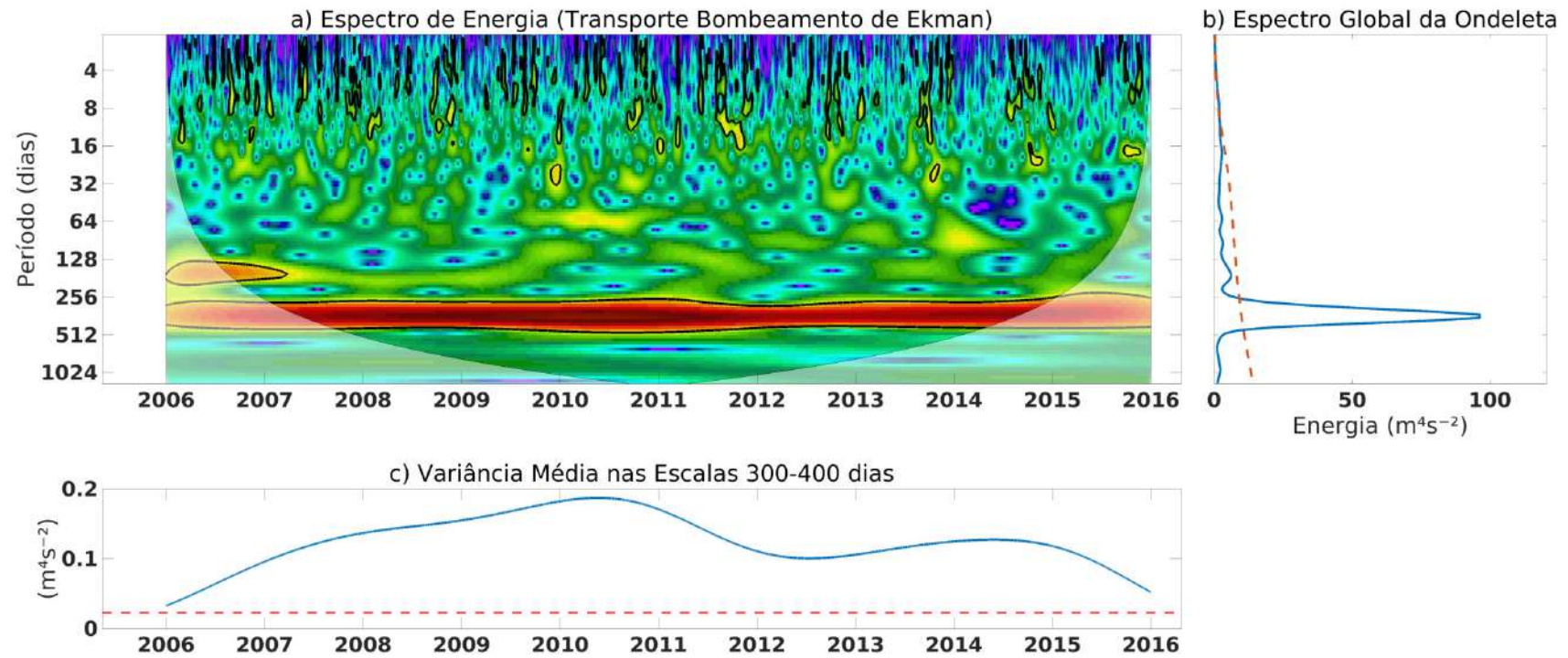


Figura 3.44: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte devido ao bombeamento de Ekman na seção do Espírito Santo (Figura 2.2), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

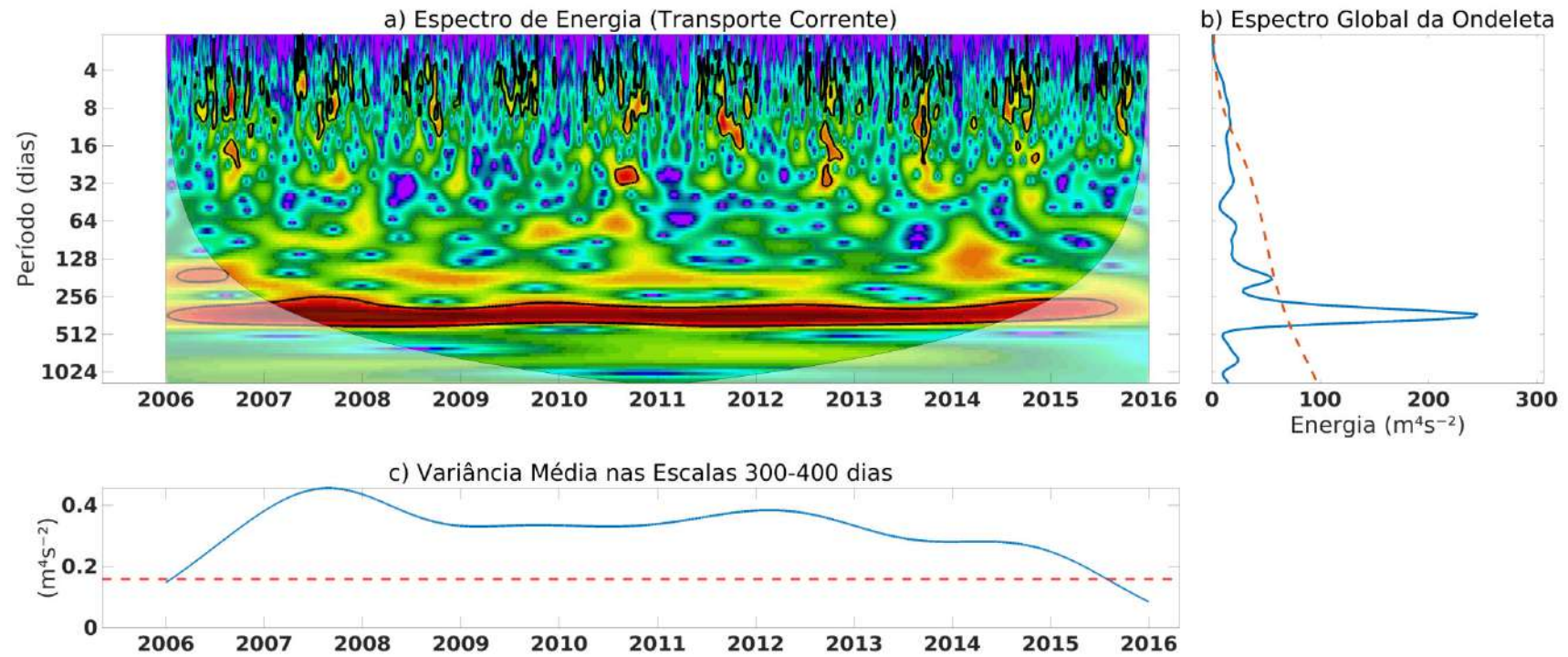


Figura 3.45: a) Espectro de energia da transformada de ondeleta (Morlet) da série temporal do transporte de Ekman de fundo, induzido pela corrente, na seção do Espírito Santo (Figura 2.3), normalizado pela variância, a energia aumenta das cores frias para as quentes e os contornos pretos indicam os níveis de 95% de confiança estatística. A região com a escala de cores suavizada e delimitada por linhas pretas no início e final da série indicam o cone de influência. b) Espectro global de energia. Em b) e c) a linha tracejada vermelha representa o nível de confiança estatística de 95%.

Capítulo 4

Conclusões

Ao analisar a maior série observacional de TSM, aproximadamente 20 anos, que pudesse ampliar o conhecimento sobre a ressurgência de Cabo Frio, CALIL ELIAS (2009) constatou que considerar apenas a ação dos ventos não é suficiente para explicar a sua variabilidade interanual. Estudos realizados na Austrália evidenciaram que o transporte na camada limite de fundo devido à intrusão da corrente na plataforma exerce um importante papel como forçante da ressurgência naquela região. Considerando as características semelhantes da Corrente do Brasil (CB) com Corrente Leste da Austrália, este estudo parte da premissa que CB é responsável pela modulação da variabilidade interanual da ressurgência na região sudeste brasileira, propondo uma investigação sobre o transporte na camada limite de fundo, associado a intrusão da CB na plataforma, como forçante da ressurgência.

Para isso, foram utilizados 10 anos de resultados da base hidrodinâmica LSE24, uma reanálise oceânica desenvolvida pela equipe do Laboratório de Oceanografia Física-LOF/COPPE utilizando simulações com o modelo HYCOM, dentro do projeto REMO. A análise dessa base hidrodinâmica possibilitou observar uma variabilidade interanual na intensidade da ressurgência, semelhante àquela observada por CALIL ELIAS (2009), nas três regiões estudadas, Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Espírito Santo, sendo que a de Cabo Frio foi a que apresentou as maiores amplitudes de variação da TSM.

Por meio da análise de EOF, foi identificado o padrão espacial e temporal da TSM associado à ressurgência na região sudeste. Este padrão se mostrou bem correlacionado com as três regiões analisadas, em especial com Cabo Frio e Cabo de São Tomé. Esses dois centros de ressurgência apresentaram núcleos bem definidos de ascensão da água fria e as extensões das suas plumas se mostraram condizentes com a literatura. Na região do Espírito Santo, não foi identificado um núcleo bem definido, indicando uma maior variabilidade na posição de ascensão da água fria, também, em concordância com estudo prévio realizado na região. Dessa forma, verifica-se que esse padrão espacial e temporal simulado da ressurgência possui uma

boa representatividade para a região sudeste como um todo.

Ainda utilizando EOF, foram encontrados os principais modos de variabilidade espacial e temporal da tensão do vento e do seu rotacional, sendo constatado que ambos apresentam uma sazonalidade condizente com a literatura, com períodos favoráveis à ressurgência ocorrendo na primavera e verão. Esses modos apresentaram uma correlação de cerca de 0,5 com o modo da TSM associado à ressurgência.

O primeiro modo da EOF da intensidade da Corrente do Brasil mostrou que, assim como constatado no trabalho de AGUIAR *et al.* (2014), a variação da intensidade não ocorre de modo uniforme ao longo da plataforma, possuindo regiões preferenciais, como observado em Cabo Frio, que possui as maiores amplitudes de variações acontecendo a oeste da Ilha do Cabo Frio (42°W). Essa foi a mesma região em que a série de dados da TSM analisada por CALIL ELIAS (2009) foi coletada, evidenciando, dessa forma, que a variação da intensidade da corrente pode ter tido um importante papel na variabilidade interanual da ressurgência observada por CALIL ELIAS (2009).

Com a finalidade de descobrir o peso que cada forçante possui na variabilidade interanual da ressurgência em cada região específica, foi quantificado o transporte de Ekman na camada superficial, devido à ação do vento, na camada de fundo, devido a intrusão da corrente na plataforma, e do bombeamento de Ekman. E com auxílio da transformada de ondeletas foi possível identificar e analisar as variações de energia na banda sazonal associadas a TSM e as suas forçantes.

Dessa forma, para a seção de Cabo frio, foi verificado que tanto a corrente quanto o vento apresentaram uma queda de intensidade no período de 2009-2011, intervalo em que foi observado as menores ocorrências de TSM abaixo de 18°C. No entanto, o pico mais expressivo da TSM, que foi entre 2012-2013, que representou um período intenso de ressurgência, com 105 dias com temperatura abaixo de 18°C, foi acompanhado pelo pico mais expressivo do transporte devido à corrente, enquanto que o pico mais expressivo das forçantes atmosféricas ocorreu em 2007-2008, período no qual foram observados 97 dias com temperatura abaixo de 18°C. Esse resultado indica que, para a região de Cabo Frio, a atuação conjunta do transporte na camada limite de fundo, devido a intrusão da corrente na plataforma, e do transporte associado as forçantes atmosféricas são suficientes para explicar a variabilidade interanual da ressurgência.

Na região do Cabo de São Tomé, as forçantes analisadas não foram suficientes para explicar a variabilidade interanual da ressurgência, indicando a atuação de outra forçante. Ao analisar a disponibilidade da ACAS na plataforma, foi observado que em fevereiro de 2011, sob condições de vento e corrente propícias à ressurgência, a água aflorada sofreu um progressivo aumento na sua temperatura em razão da elevação da temperatura da água de fundo na plataforma externa. Em fevereiro de

2013, caso semelhante foi observado, onde uma massa d'água mais aquecida permaneceu estagnada no fundo da plataforma externa, também sob condições favoráveis à ressurgência, limitando a temperatura da água aflorada. Nesses dois casos, foi observado que a porção sul de um meandro ciclônico adentrava na plataforma continental, podendo ter sido essa a causa do aquecimento observado na água de fundo. Ainda, assim como observado no trabalho de PALÓCZY *et al.* (2014), foi verificado que, em março de 2012, a formação de um meandro ciclônico favoreceu a intrusão da ACAS na plataforma, e nesse mês, a ressurgência do Cabo de São Tomé foi a mais intensa da região. Esse resultado indica que, para a região do Cabo de São Tomé, além das três forçantes analisadas, a disponibilidade da ACAS na plataforma, associada a atividade de mesoescala da CB, possui uma importante contribuição na variabilidade interanual da ressurgência.

Para a região do Espírito Santo, foi observado, de um modo geral, uma atuação conjunta das forçantes atmosféricas e do transporte devido à corrente na modulação da TSM. No entanto, como nessa região não existe um núcleo de ressurgência bem definido, a análise de ondeletas, que foi realizada em uma única seção, pode não ter sido representativa para a região como um todo.

Portanto, após a investigação sobre o papel das forçantes da ressurgência na região sudeste brasileira, os resultados da análise de EOF indicam que a variação da intensidade da Corrente do Brasil, que acontece sazonalmente em determinadas regiões ao longo da plataforma continental, pode ter uma importante influência como forçante da ressurgência na região como um todo. Depois de fazer uma análise mais específica do transporte na camada limite superficial e de fundo para cada região, foram encontrados fortes indícios que, para a região de Cabo Frio, a variação da intensidade da Corrente do Brasil, que acontece a oeste da Ilha do Cabo Frio, modula a variabilidade interanual da ressurgência.

Referências

- AGUIAR, A., CIRANO, M., PEREIRA, J., et al., 2014, “Upwelling processes along a western boundary current in the Abrolhos–Campos region of Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 85, pp. 42–59. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.04.013>.
- AGUIAR, A., CIRANO, M., MARTA-ALMEIDA, M., et al., 2018, “Upwelling processes along the South Equatorial Current bifurcation region and the Salvador Canyon (13°S), Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 171, pp. 77–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.10.001>.
- ALLARD, P., 1955, “Anomalies dans le temperature de l’eau de la mer observees au Cabo Frio au Bresil”, *Bull. Inf. Com. Oceanogr. Etude Cotes*, v. 7, pp. 58–63.
- ARGO, 2019. “Argo float data and metadata from Global Data Assembly Centre (ARGO GDAC).” SEANOE, doi: <https://doi.org/10.17882/42182>.
- BJÖRNSSON, H., VENEGAS, S., 1997, “A manual for EOF and SVD analyses of climatic data”, *CCGCR Report*, v. 97, n. 1, pp. 112–134.
- BOWDEN, K., 1983, *Physical Oceanography of Coastal Waters*. E. Horwood Limited. p. 469.
- CALADO, L., SILVEIRA, I., GANGOPADHYAY, A., et al., 2010, “Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil)”, *Continental Shelf Research*, v. 30 (06), pp. 1181–1188. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.03.007>.
- CALIL ELIAS, L., 2009, *Variabilidade Interanual da Ressurgência de Cabo Frio-RJ*. M.Sc. dissertation, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. p. 110.
- CAMPOS, E., VELHOTE, D., SILVEIRA, I., 2000, “Shelf break upwelling driven by Brazil Current Cyclonic Meanders”, *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 6 (03), pp. 751–754.

- CAMPOS, E. J., GONÇALVES, J., IKEDA, Y., 1995, “Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight: Summer of 1991”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 100, n. C9, pp. 18537–18550.
- CASTELAO, R., BARTH, J., 2006, “Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl”, *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 3 (02), pp. L03602. <https://doi.org/10.1029/2005GL025182>.
- CASTELAO, R. M., CAMPOS, E. J. D., MILLER, J. L., 2004, “A Modelling Study of Coastal Upwelling Driven by Wind and Meanders of the Brazil Current”, *Journal of Coastal Research*, v. 20, n. 3, pp. 662 – 671.
- CHIN, T. M., VAZQUEZ-CUERVO, J., ARMSTRONG, E. M., 2017, “A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature”, *Remote Sensing of Environment*, v. 200, pp. 154–169. ISSN: 0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>.
- CUSHMAN-ROISIN, B., BECKERS, J.-M., 2011, *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*. Academic press. p. 786.
- DE CASTRO, B., LORENZETTI, J., DA SILVEIRA, I., et al., 2006, “Estrutura termohalina e circulacao na regioao entre o Cabo de Sao Tomé (RJ) e o Chui (RS)”, *O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Regiao Sudeste-Sul do Brasil*. Edusp, pp. 11–120.
- EMERY, R., THOMSON, W., 2014, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography 3rd edn*, 728. Elsevier. p. 729.
- EMÍLSSON, I., 1961, “The shelf and coastal waters off southern Brazil”, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 11, n. 2, pp. 101–112.
- FERREIRA, T. P., 2022, *O papel da mesoescala nas trocas entre plataforma e talude em uma região de ressurgência costeira*. M.Sc. dissertation, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. p. 43.
- FRANZ, G., GARCIA, C. A., PEREIRA, J., et al., 2021, “Coastal ocean observing and modeling systems in Brazil: initiatives and future perspectives”, *Frontiers in Marine Science*, v. 8, pp. 681619. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681619>.
- GELARO, R., MCCARTY, W., SUÁREZ, M. J., et al., 2017, “The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2

- (MERRA-2)", *Journal of Climate*, v. 30, n. 14, pp. 5419 – 5454. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- HANNACHI, A., 2004, "A primer for EOF analysis of climate data", *Department of Meteorology, University of Reading*, v. 1. p. 29.
- HIDAKA, K., 1972, "Physical oceanography of upwelling", *Geoforum*, v. 3, n. 3, pp. 9–21. doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(72\)90082-6](https://doi.org/10.1016/0016-7185(72)90082-6).
- HOBDA, A. J., ALEXANDER, L. V., PERKINS, S. E., et al., 2016, "A hierarchical approach to defining marine heatwaves", *Progress in Oceanography*, v. 141, pp. 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>.
- HOURLY, S., DOMBROWSKY, E., MEY, P. D., et al., 1987, "Brunt-Väisälä Frequency and Rossby Radii in the South Atlantic", *Journal of Physical Oceanography*, v. 17, pp. 1619–1626.
- IKEDA, Y., DE MIRANDA, L., ROCK, N., 1974, "Observations on stages of upwelling in the region of Cabo Frio (Brazil) as conducted by continuous surface temperature and salinity measurements", *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 23, pp. 33–46.
- KÄMPF, J., CHAPMAN, P., 2016, *Upwelling systems of the world*. Springer. p. 443.
- LENTZ, S., WINANT, C., 1986, "Subinertial currents on the southern California shelf", *Journal of Physical Oceanography*, v. 16, n. 11, pp. 1737–1750.
- LIMA, J. A. M., MARTINS, R. P., TANAJURA, C. A. S., et al., 2013, "Design and implementation of the Oceanographic Modeling and Observation Network (REMO) for operational oceanography and ocean forecasting", *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 31, n. 2, pp. 210–228.
- LORENZ, E. N., 1956, *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*, v. 1. Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology Cambridge. p. 52.
- LORENZZETTI, J., STECH, J., FILHO, W., et al., 2009, "Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures", *Continental Shelf Research*, v. 29 (09), pp. 2061–2068. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.07.011>.

- MARTINS, B. S., 2015, *A Ressurgência de Vitória*. M.Sc. dissertation, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. p. 62.
- MIRANDA, L. B. D., 1985, “FORMA DA CORRELAÇÃO TS DE MASSAS DE ÁGUA DAS REGIOES COSTEIRA E OCEÂNICA ENTRE O CABO DE SÃO TOMÉ (RJ) E A ILHA DE SÃO SEBASTIÃO”, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 33, n. 2, pp. 105–119.
- OKE, P., MIDDLETON, J., 2000, “Topographically Induced Upwelling off Eastern Australia”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 30, n. 3, pp. 512–531. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<0512:TIUOEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<0512:TIUOEA>2.0.CO;2).
- OKE, P. R., MIDDLETON, J. H., 2001, “Nutrient enrichment off Port Stephens: the role of the East Australian Current”, *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 6, pp. 587–606. doi: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00127-8).
- PAIVA, A. M., BUENO, L., GABIOUX, M., et al., 2019. “Modelagem Numérica da Circulação do Oceano Atlântico Sul e Equatorial e Estudos de Processos Oceanográficos no Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ para Atender a Demandas da Industria de Petróleo: Relatório Técnico 05. Termo de cooperação: 0050.0094389.14.9. Projeto COPPETEC no.: 18573.” p. 170.
- PALÓCZY, A., DA SILVEIRA, I., CASTRO, B., et al., 2014, “Coastal upwelling off Cape São Tomé (22 S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes”, *Continental Shelf Research*, v. 89, pp. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.09.005>.
- PERLIN, A., MOUM, J., KLYMAK, J., et al., 2007, “Organization of stratification, turbulence, and veering in bottom Ekman layers”, *Journal of Geophysical Research*, v. 112, pp. C05S90.
- POLLARD, R. T., RHINES, P. B., THOMPSON, R. O. R. Y., 1973, “The deepening of the wind-Mixed layer”, *Geophysical Fluid Dynamics*, v. 4, n. 4, pp. 381–404.
- RODRIGUES, R. R., LORENZZETTI, J. A., 2001, “A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling”, *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 4, pp. 371–394. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00094-7).

- RODRIGUES, R. R., TASCHETTO, A. S., SEN GUPTA, A., et al., 2019, “Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic”, *Nature Geoscience*, v. 12, n. 8 (jul.), pp. 620–626. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>.
- ROUGHAN, M., MIDDLETON, J. H., 2002, “A comparison of observed upwelling mechanisms off the east coast of Australia”, *Continental Shelf Research*, v. 22, n. 17, pp. 2551–2572. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00101-2).
- ROUGHAN, M., MIDDLETON, J. H., 2004, “On the East Australian Current: Variability, encroachment, and upwelling”, *Journal of Geophysical Research*, v. 109, pp. C07003. <https://doi.org/10.1029/2003JC001833>.
- SCHAEFFER, A., ROUGHAN, M., WOOD, J., 2014, “Observed bottom boundary layer transport and uplift on the continental shelf adjacent to a western boundary current”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 119, n. 8, pp. 4922–4939. <https://doi.org/10.1002/2013JC009735>.
- SILVA, D. A., DOTTORI, M., 2021, “The atmospheric blocking influence over the South Brazil Bight during the 2013–2014 summer”, *Regional Studies in Marine Science*, v. 45, pp. 101815. ISSN: 2352-4855. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101815>.
- SMITH, R. L., 1968, “Upwelling”, *Oceanogr. Mar. Biol.*, v. 6, pp. 11–46.
- TORRENCE, C., COMPO, G. P., 1998, “A practical guide to wavelet analysis”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 1, pp. 61–78.