

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA



BERNARDO ROSALINSKI RUSSOMANO

**A RELEVÂNCIA DA VARIABILIDADE OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA PARA
O TRANSPORTE DE PARTÍCULAS AO SUDESTE DO BRASIL**

MONOGRAFIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Niterói, RJ

2022

BERNARDO ROSALINSKI RUSSOMANO

**A RELEVÂNCIA DA VARIABILIDADE OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA PARA
O TRANSPORTE DE PARTÍCULAS AO SUDESTE DO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientadores:

Prof. Afonso de Moraes Paiva
Prof. José Antônio Baptista Neto

Niterói, RJ

2022

**Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e
Instituto de Computação da UFF**

Observação: A ficha catalográfica deve ser impressa no verso da folha anterior e não deve ser incluída no número total de páginas do Trabalho de Conclusão de Curso.

BERNARDO ROSALINSKI RUSSOMANO

**A RELEVÂNCIA DA VARIABILIDADE OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA PARA
O TRANSPORTE DE PARTÍCULAS AO SUDESTE DO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovado em: __ / __ / __ pela banca examinadora abaixo:

Prof. Afonso de Moraes Paiva, PhD. (Orientador)

LOF / COPPE / UFRJ

Prof. José Antônio Baptista Neto, PhD. (Orientador)

LAGEMAR / GGU / UFF

Prof. Marcio Cataldi, DSc.

LAMMOC / TGH / UFF

Luana Ferraz Bueno, MSc.

LOF / COPPE / UFRJ

Niteroi, RJ

2022

Aos meus queridos pais, Cláudia e Fábio,
por todo carinho e incentivo ao
longo de toda a vida.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Cláudia, e ao meu pai, Fábio, por todo apoio, incentivo, cuidado e amor durante essa jornada que nunca consegui imaginar concluir com tamanha realização. Obrigado mãe e pai, por tudo.

Ao meu orientador Afonso por ter me acolhido no LOF em um momento que eu não conseguia me encontrar sozinho. Obrigado também pelas horas e horas de orientação com muito muito aprendizado e um pouco pouco de musicalidade. Obrigado, Afonso!

Um agradecimento muito especial, também, à Ana, por ter sido minha professora pela última vez no 5o ano do fundamental e mesmo assim se manteve presente em minha vida. Coincidência ou não, não saberia eu que, 11 anos depois, ela me apresentaria o Afonso. Por ter sido uma das melhores pessoas que me formou como pessoa e como aluno, obrigado por tudo Ana!

Ao meu professor José, por ter sido meu orientador desde meu segundo ano na UFF. Graças a ele, escolhi o caminho certo. Obrigado, Zé!

Aos meus outros professores da Escola Parque, que me ajudaram a me formar como ser humano, desde a primeira série do ensino fundamental. Um agradecimento especial ao Marco e Renatinho, por terem me incentivado na minha escolha desde a primeira carona para a UFF.

Aos meus amigos da Escola Parque, Beto, Brenno, Gomes, Igor, Jade, Gabriel, Renan, Helena, Emma, Wand e Miguel pelas risadas até chorar, acolhimento e companhia quando precisei.

Aos meus amigos de Caronas UFF, que nunca imaginei me tornar tão próximo conhecendo apenas no caminho para a universidade. Obrigado Brendon (Letras), Sanma (Amb), Gui (Comp) e Ste (Geof).

Aos meus amigos da Geofísica, pelos trabalhos de campo marcantes tanto pelas pernas cansadas quanto pelas boas risadas. Obrigado Be, Hugo, Fabrício, João, Thiago, Lu, Ursula, Paulo, Mauricá, Rodrigo, Henrique. Obrigado também pela ajuda em cálculo!!! Espero ter ajudado nas disciplinas de física!

Aos meus amigos da Statkraft, Ju, Leo, Dê, Renan, Marina, Nestor por toda a orientação na minha primeira experiência em ambiente corporativo. Obrigado por todo o ensinamento e risadas, pessoal. Obrigado, também, pela oportunidade fundamental para minha formação. E ao professor Cataldi, pela indicação surpresa. Sou grato a todos vocês por isso.

Aos meus amigos do Laboratório de Oceano da UFRJ, Fernando, Aro, Ana, Luana, Tay, pela enorme ajuda no aprendizado da oceanografia, da programação científica e pelo ambiente amigável e leve. Obrigado, galera!

Aos meus amigos festeiros, Steb, Totti, Ale, Klaus, Luis, João, Felipe, Capetini, Leon, Igor, Lu, pela companhia e diversão aos finais de semana.

À todos os meus familiares, meus irmãos, primos, tios e tias, padrinho e madrinha. Obrigado família! Enfim!

Isso inclui Hannah, de onde estiver! E Petô, Petrolina!

Por fim às minhas avós Jandyra e, principalmente, à Nair, que no momento em que agradeço, está vivendo o final de sua vida. Além de todo o cuidado desde o meu nascimento, sem você eu não teria superado a barreira da distância para a UFF. Espero que eu tenha retribuído um pouco do seu acolhimento, sempre com muito prazer, com alguns dias de companhia para o jantar e para ver o jogo. Você disse que ia esperar eu me formar, mas você pode me ver de onde estiver, vó. Fique com Deus.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise da variabilidade interanual dos ventos e correntes marinhas no Atlântico, ao sudeste do Brasil. O motivo se dá pelo fato de que, atualmente, empresas de consultoria ambiental vêm realizando o Estudo de Impacto de Ambiental, EIA, com uma deficiência técnica no que diz respeito ao comportamento do oceano e da atmosfera em diferentes anos, que pode impactar o processo de Avaliação de Impacto Ambiental exigido pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). Essa questão tem potencial para afetar, principalmente, a fase de modelagem probabilística de dispersão de óleo, fazendo-nos trazer à tona a questão de o quão relevante é a variabilidade interanual do oceano e da atmosfera para o transporte de partículas ao sudeste do Brasil.

A partir de dados de ventos gerados pelo modelo MERRA2 - *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (NASA), e correntes em superfície gerados pelo modelo HYCOM - *Hybrid Coordinate Ocean Model*, integrado para a região oeste do Atlântico Sul pelo Laboratório de Oceanografia Física - LOF/COPPE da UFRJ no escopo do projeto REMO, vimos que existem anos em que: 1, a ocorrência de eventos de frente fria intensa, que podem contribuir para o maior espalhamento do óleo, pode chegar a ser quase o dobro de outros anos; 2, o número de dias com ventos do quadrante Leste-Sul, que contribuem para levar o óleo em direção à costa, pode apresentar mais que 20% de diferença entre diferentes anos; 3, a Corrente do Brasil, responsável pelo espalhamento tanto meridional quanto zonal do óleo, pode apresentar uma variação interanual significativa de sua variabilidade de mesoescala. Dessa forma, os anos mais anômalos foram escolhidos para a realização de experimentos com o modelo lagrangeano de dispersão de partículas, Lagramp, a fim de obtermos uma resposta para o problema em questão.

PALAVRAS – CHAVE: correntes; ventos; modelagem lagrangeana.

ABSTRACT

The present work has by main objective the analysis of the interannual variability of winds and marine currents in Atlantic, southeastern of Brazil. The reason is based in the fact that, currently, environmental consulting companies are making Environmental Impact Study (in portuguese, EIA) with a technical deficiency regarding the behavior of the ocean and the atmosphere in different years, which may impact the process of Environmental Impact Assessment required by IBAMA (Brazilian Institute for the Environment and Renewable Natural Resources). This topic has potential to affect, mainly, the phase of probabilistic oil dispersion modeling, motivating us bringing up the question about how relevant is the interannual variability of the ocean and atmosphere to particles transport southeastern of Brazil.

With wind data generated by the model MERRA2 - *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (NASA), and surface currents generated by the model HYCOM - *Hybrid Coordinate Ocean Model*, integrated for the region of west South Atlantic by UFRJ's Physical Oceanography Laboratory - LOF/COPPE, during the REMO project, we saw some years in which: 1, the occurrence of events of intense cold front, that may contribute to a larger oil dispersion, may be almost two times other years; 2, the number of days with winds from the East-South quadrant, that contribute to push the oil to Brazil's coast, may show more than 20% of difference between different years; 3, the Brazil Current, responsible for the oil scattering both meridional and zonal, may produce a significant interannual variation of its mesoscale variability. Therefore, the most anomalous years were chosen for evaluation of the experiments with the lagrangian model for particles dispersion, Lagramp, with the aim of acquiring an answer for the problem we brought.

KEYWORDS: currents; winds; lagrangian modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática dos sistemas de baixa e alta pressão do SAMS, segundo VERA et al., 2006. Hm = alta pressão migratória, Hs = alta subtropical, L = baixa pressão migratória, LT = cavado atmosférico.

Figura 2 - Rosa dos ventos média de 2006 a 2015 para o Atlântico sudoeste ao sudeste do Brasil, em 27°S - 44°W.

Figura 3 - Evento de frente fria do SAMS registrado pelo MERRA-2. Os contornos indicam pressão em superfície, em hPa, e os vetores e a escala de cor indicam o vento em 10 metros de altitude. Os ventos em sentido anti-horário, da alta pressão migratória, são acelerados pela baixa pressão, com núcleo em 50°S - 37°W. A frente é a curva direcionada para sudeste-sul, de 25°S - 50°W até o núcleo da baixa pressão.

Figura 4 - Representação das principais correntes oceânicas e do Giro Subtropical do Atlântico Sul. Retirado de SILVEIRA et al., 2015.

Figura 5 - Regime de correntes marinhas ao longo da margem leste e sudeste brasileira. Retirado de SILVEIRA et al., 2015.

Figura 6 - Representação esquemática dos vórtices de Vitória (VV), Cabo Frio (VCF) e Cabo de São Tomé (VCST), feições ciclônicas recorrentes encontradas ao sudeste Brasil. Retirado de [MILL et al. \(2015\)](#).

Figura 6B - Campo instantâneo de correntes em superfície do modelo LSE24, painel superior, e campo médio para o ano de 2010, painel inferior. Grande variabilidade de mesoescala observada no painel superior.

Figura 7 - Domínio da modelagem das simulações ATL12, utilizado como condição de contorno para o LSE24, demarcado pelo retângulo em vermelho. Retirado de PAIVA et al., 2019.

Figura 8 - Batimetria da área de estudo, pelo modelo LSE24, e seções avaliadas nesta monografia. Os pontos em roxo são poços de exploração retirados de: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/>. Acesso em 15/07/2022.

Figura 9 - Análise espectral da componente V dos ventos ao longo da seção em 30°S. Destaca-se a similaridade na distribuição de frequências entre os pontos da seção e os harmônicos associados às frentes, além do harmônico fundamental associado ao período de 180, explicando a sazonalidade. O eixo y indica energia, enquanto o eixo x indica o período em dias (inverso da frequência).

Figura 10 - EOF de pressão em superfície, em hPa, que capta 68% da variabilidade do histórico.

Figura 11 - Correlação espacial de Pearson para pressão e vento (V) no Atlântico sudoeste a sudeste do Brasil.

Figura 12 - Observação do *lag* das séries temporais de vento e pressão ao longo de todos os pontos da seção em 30°S, indicando a similaridade.

Figura 13 - Série final de vento conforme metodologia para representação do Atlântico ao sudeste do Brasil.

Figura 14 - Metodologia para contabilidade de frentes frias para o histórico analisado (2006 a 2015).

Figura 15 - Metodologia para contabilidade de frentes frias intensas para o histórico analisado (2006 a 2015).

Figura 16 - Rosa dos ventos para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2014 na área de estudo. Intensidade do vento em m/s.

Figura 17 - Construção do filtro digital do tipo *butterworth lowpass* utilizado para identificação da posição da Corrente do Brasil nas seções. A convolução do filtro com o sinal da posição da CB possibilita a atenuação das oscilações cujo período é menor que 20 dias.

Figura 18 - Diagrama Hovmöller com sinal da posição da Corrente do Brasil filtrado destacado em preto.

Figura 19 - Sinal da posição da Corrente do Brasil filtrado em unidades de quilômetros: distância da CB para a costa.

Figura 20 - Metodologia para cálculo da pluma de probabilidade com 19 simulações.

Figura 21 - Variabilidade interanual de frentes frias ao sudeste do Brasil.

Figura 22 - Variabilidade interanual de frentes frias intensas (maiores que 5 m/s) ao sudeste do Brasil.

Figura 23 - Variabilidade interanual de ventos do quadrante Norte-Leste ao sudeste do Brasil.

Figura 24 - Variabilidade interanual de ventos do quadrante Leste-Sul ao sudeste do Brasil.

Figura 25 - Desvio padrão interanual da posição da Corrente do Brasil em quilômetros, em Cabo de São Tomé (6) , Cabo Frio (9) e Bacia de Santos (10).

Figura 26 - Distância média da posição da Corrente do Brasil em quilômetros, em Cabo de São Tomé (6) , Cabo Frio (9) e Bacia de Santos (10).

Figura 27 - Comparação dos experimentos para o ano de 2010 contra 2013, 2014 e 2009. O vermelho indica maior alcance em 2010. Plumas de diferença de probabilidade.

Figura 28 - Comparação dos experimentos para o ano de 2012 contra 2014. O vermelho indica maior alcance em 2012. Plumas de diferença de probabilidade.

Figura 29 - Comparação dos experimentos para o ano de 2013 contra 2012 e 2014. O vermelho indica maior alcance em 2013. Plumas de diferença de probabilidade.

Figura 30 - Resultado dos experimentos para os anos de 2009, 2010, 2012, 2013 e 2014. Plumas de probabilidade.

Tabela 1 - Principais características dos experimentos realizados com o modelo Lagramp.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAMS - Regime de Monções da América do Sul, *South America Monsoon System*

ACAS - Água Central do Atlântico Sul

AIA - Água Intermediária Antártica

ASAS - Anticiclone (Alta) Subtropical do Atlântico Sul

ASPS - Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul

AT - Água Tropical

BNOA - Baixa do Noroeste Argentino

BC - Baixa do Chaco

CB - Corrente do Brasil

CBM - Confluência Brasil-Malvinas

CCA - Corrente Circumpolar Antártica

CCI - Corrente de Contorno Intermediária

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala

CCO - Corrente de Contorno Oeste

CNB - Corrente Norte do Brasil

CSE-S - Corrente Sul Equatorial, ramo sul

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

JBN - Jato de Baixos Níveis

MDP - Modelo de Dispersão de Partículas

SNB - Sub-corrente Norte do Brasil

VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

VCST - Vórtice do Cabo de São Tomé

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	14
1.2 Objetivo	15
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DA CIRCULAÇÃO OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA AO SUDESTE DO BRASIL	16
2.1 - Regime de Monções da América do Sul (SAMS)	16
2.2 - Corrente do Brasil	20
CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA	26
3.1 - MERRA2	26
3.2 - Modelo HYCOM	26
3.3 - Modelo Lagramp	28
3.4 - Metodologia	29
3.4.1 - Picos: contabilidade de frentes frias	36
3.4.2 - Rosa dos ventos	38
3.4.3 - Hovmöllers e identificação da Corrente do Brasil	39
3.4.4 - Distância para a costa e desvio padrão da Corrente do Brasil	42
3.4.5 - Simulações lagrangeanas	43
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	45
4.1 - Ventos - Variabilidade Interanual	46
4.2 - Correntes - Variabilidade Interanual	49
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO	50
5.1 - Interpretação dos dados ambientais	50
5.2 - Modelagem de dispersão de partículas	54
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE A - Componente atmosférica	67
APÊNDICE B - Componente oceânica	83
APÊNDICE C - Comparação de plumas sem adição da advecção direta pelos ventos	87

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A Avaliação de Impacto Ambiental é um instrumento da política ambiental exigido pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, o IBAMA, necessário para a concessão da Licença Ambiental (LA). Isso é, para empreendimentos que possam ser potenciais poluidores do meio em que vivemos, é obrigatório a realização de um detalhado Estudo de Impacto Ambiental (EIA), para que possam ser conhecidos os possíveis impactos gerados pela instalação e operação do empreendimento, além dos planos propostos para a mitigação e redução desses impactos, nos meios físico, biológico e socioeconômico ([SANCHEZ, 2020](#)).

Um dos requerimentos do EIA necessário para a exploração de óleo e gás *offshore* é a realização da modelagem de dispersão de óleo. A modelagem de dispersão de óleo é uma etapa estatística em que são levados em consideração o regime de ventos e correntes marinhas na região do empreendimento, e são analisados os cenários de probabilidades do óleo alcançar determinada região ou distância em casos de desastre. No caso das empresas que atuam na Amazônia Azul, a porção oceânica do nosso país, a modelagem pode ficar comprometida em decorrência de uma limitação puramente técnica, a de que as empresas só conseguem utilizar um ano de dados ambientais na realização da modelagem.

Ainda não existem estudos presentes na literatura que comprovem que a integração de apenas um ano de dados é suficiente para representar a Terra em suas camadas oceânica e atmosférica. Sendo assim, esta monografia foi motivada a encontrar uma possível relevante variabilidade na dinâmica das correntes e dos ventos no Atlântico sudoeste, que indiquem dissemelhanças no transporte de partículas nos diferentes anos e respondam às perguntas: o quanto a Corrente do Brasil, principal corrente do oceano brasileiro, variou sua posição ao longo dos anos? O quanto ela se perturbou da sua posição média em cada ano? O quanto sua intensidade variou? Em que anos os ventos poderiam influenciar mais no transporte de substâncias no mar? Como se dá a variabilidade de sistemas frontais a cada ano? A variabilidade interanual das correntes e dos ventos é significativa para o transporte de poluentes?

1.2 Objetivo

Nossos objetivos para o presente trabalho foram definidos a fim de encontrar as respostas sobre a dinâmica do oceano e da atmosfera que podem influenciar o transporte de substâncias no Atlântico sudoeste. Sendo assim, foi proposto o estudo da variabilidade das correntes oceânicas e do regime de ventos em superfície na margem sudeste brasileira, por meio de métodos estatísticos e de processamento de sinais que nos ajudasse a caracterizar a região de estudo. Foram realizadas, portanto, análises para escolher séries temporais que representassem o grande volume de dados de vento e correntes, para que, a partir dessas, pudéssemos destacar a variabilidade em escala interanual e encontrar as respostas para as perguntas da motivação. Após essa análise, a fim de investigar as hipóteses de variabilidade interanual, o trabalho foi complementado com experimentos de modelagem lagrangeana de dispersão de partículas. Em resumo, os objetivos definidos foram:

1. Estudar a região do Atlântico sudoeste e identificar séries temporais de corrente e ventos que representassem a região como um todo;
2. Investigar as séries temporais, por métodos estatísticos e de processamento de sinais, a fim de identificar uma possível variabilidade interanual;
3. Realizar experimentos de modelagem de dispersão de partículas que nos ajudassem a concluir sobre a importância da variabilidade interanual para o transporte de poluentes.

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DA CIRCULAÇÃO OCEÂNICA E ATMOSFÉRICA AO SUDESTE DO BRASIL

2.1 - Regime de Monções da América do Sul (SAMS)

Antes de dar início às análises deste trabalho, é importante entender as feições da atmosfera sobre o Atlântico sudoeste já descobertas e analisadas pela literatura. Segundo [VERA et al. \(2006\)](#), regimes de monções são caracterizados por sistemas meteorológicos que se desenvolvem em resposta às variações sazonais no gradiente de calor entre o continente e o oceano adjacente. Dessa forma, para entendermos a variação interanual dos ventos na área de estudo, precisamos reconhecer como eles se desenvolvem.

Como feição semipermanente, encontramos o (a) Anticiclone (Alta) Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que se forma pela convergência em superfície do ramo subsidente da célula de Hadley ($0^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{S}$). O ASAS alimenta, primeiramente, a ZCIT, com o transporte de umidade por meio dos ventos alísios em direção ao equador, e, em seguida, a América do Sul. Ao adentrar o continente, ainda com advecção de umidade do Atlântico equatorial, os ventos alísios retornam formando o ramo oeste da ASAS ao encontrarem a Cordilheira dos Andes ([AMARO, 2015](#)). Nesse momento, ao encontrar o ar úmido da floresta amazônica, os ventos levam mais umidade para sul, dando origem ao Jato de Baixos Níveis (JBN), bem identificado na camada de pressão de 850 hPa. Em seu trajeto, o JBN encontra a região da Baixa do Chaco (BC), onde comumente se desenvolve uma baixa térmica que pode refletir até nos altos níveis da troposfera, principalmente no verão, quando se identifica com clareza a Alta da Bolívia (AB, $15^{\circ}\text{S} - 65^{\circ}\text{W}$). A AB é uma região de anticiclone em 250 hPa, enquanto a BC é uma região de convergência. A primeira também proporciona a identificação do Vórtice do Nordeste, ou Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), região de convergência e subsidência de ar para superfície, proporcionando tempo seco no Nordeste brasileiro e contribuindo para a circulação do ASAS e do JBN. Durante o verão austral, mas com início nos meses de Novembro ou Outubro, a combinação dessas feições comumente dá origem ao corredor de umidade que, quando se mantém presente por mais de 3 dias, recebe o nome de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): uma grande banda de nuvens de

chuva que se forma sobre a região de mais atividade convectiva na porção central da AS, e se estende da Amazônia ao Sudeste do Brasil, até o oceano Atlântico adjacente.

Durante o outono da América do Sul, tem início a fase de decaimento do SAMS, quando o regime de precipitação migra para noroeste, ao equador, e, durante o inverno, a precipitação ao longo do nordeste brasileiro se estabelece até Junho ([VERA et al., 2006](#)).

Sobre a mesoescala do SAMS, destacam-se os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs). Especialmente durante Dezembro e Janeiro, entre 20° e 40°S, os CCMs se formam a partir de intensa atividade convectiva, característica dessa época do ano, durante a tarde e atingem seu tamanho e intensidade máxima após a meia-noite. CCMs abrangem uma área de 500.000 km² e chegam a durar 12 horas.

Quanto à sinótica do SAMS, a mais importante para o objetivo deste trabalho, devemos nos atentar, também, aos sistemas transientes que cruzam os Andes, vindos do Pacífico sudeste. Observando-se o fluxo de oeste que vem do Pacífico, encontra-se uma importante diferença em baixos e médios níveis: enquanto em baixos níveis as baixas pressões têm sua extensão meridional limitada pelo Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, ASPS, em médios níveis observa-se a passagem de cavados (fig. 1) adentrando a América do Sul, resultando na Baixa do Noroeste Argentino, BNOA. Essa se une com a BC, bem definida pelo regime de monções, favorecendo o transporte de umidade, alimentando tempestades severas como CCMs e se aprofundando ainda mais à medida que viaja para leste até o Atlântico ([VERA et al., 2006](#)). Quando o sistema transiente mencionado ocorre, com a união da BC com a BNOA, proporcionada pelos cavados em médios e até altos níveis vindos do Pacífico, podemos dizer que teremos condições propícias para um evento de ventos intensos no Atlântico sudoeste. Esse tipo de sistema, em geral, é associado a um sistema de alta pressão seco a sul, que também viaja para o Atlântico, e se une ao ASAS. Esse encontro de alta pressão migratória com baixa pressão migratória viajando para leste caracteriza os eventos de frente fria do SAMS (fig. 1), principal sistema na análise atmosférica deste trabalho.

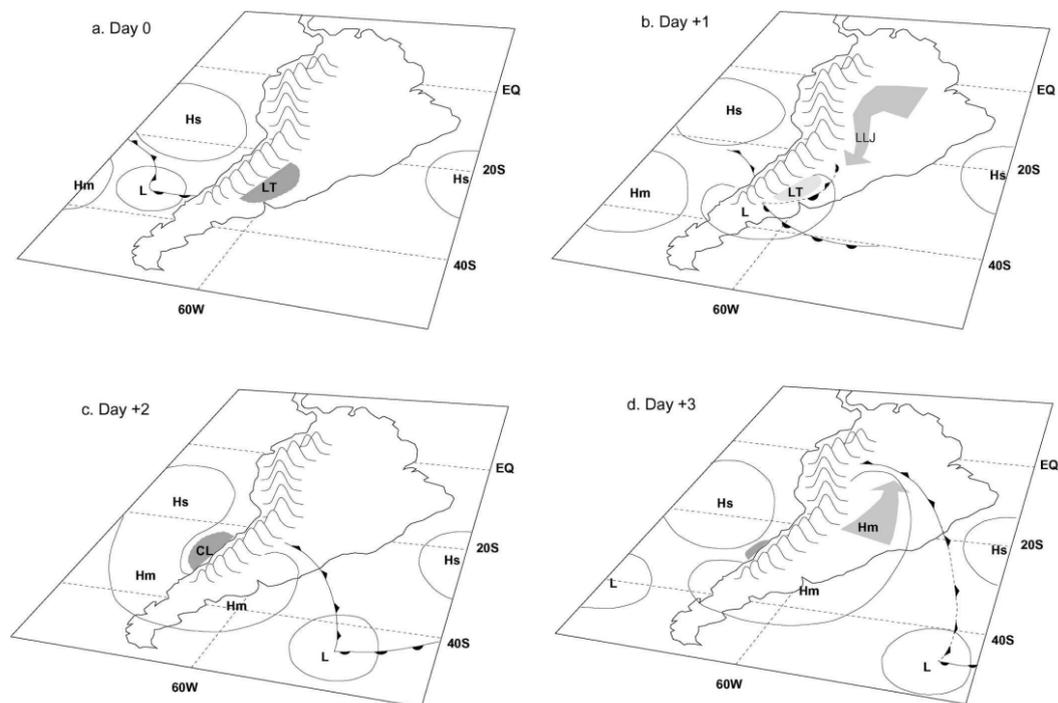


Figura 1 - Representação esquemática dos sistemas de baixa e alta pressão do SAMS, segundo [VERA et al., 2006](#). Hm = alta pressão migratória, Hs = alta subtropical, L = baixa pressão migratória, LT = cavado atmosférico.

Especificamente sobre as frentes frias do SAMS, deve-se ficar claro como elas podem contribuir para variações interanuais no regime de ventos. Por esse motivo, é importante ressaltar que as condições atmosféricas da Terra em cada ano podem variar tanto em função de índices de teleconexão¹ quanto de anomalias de temperatura no solo ou no mar². Como esta monografia se restringe ao estudo do regime de ventos no Atlântico sudoeste, é necessário, logo, destacar a importância dos ventos nessa região, proporcionados principalmente pelo ASAS e pela passagem de frentes frias. Pela figura 2, é possível notar a predominância do anticiclone semipermanente, pela maior porcentagem de ventos de leste-nordeste. Nesse sentido, em condições de bom tempo para a região Sudeste do Brasil, o ASAS atua limpando a troposfera, impedindo a ascendência de ar e a formação de nebulosidade. Entretanto, o regime de ventos predominante é intercalado com a chegada dos sistemas de escala sinótica, as frentes

¹ Índices de teleconexão são indicativos da Terra amplamente estudados na literatura que influenciam uma região relativamente distante no globo. Como principal exemplo devemos citar os índices que indicam El Niño, como o Índice de Oscilação Sul, SOI, o El Niño Oscilação Sul, ENOS, o Índice Multivariado do ENOS, MEI. Todos esses índices podem causar relativas variações da atmosfera e do oceano em várias regiões do globo.

² Anomalias de temperatura também são indicativos da Terra. Em geral, as anomalias são calculadas subtraindo-se o valor registrado em determinado instante de tempo para uma determinada região da sua média climatológica de ao menos 30 anos de dados.

frias, que invertem a orientação do vento na área de estudo, principalmente no inverno e primavera (fig. 3). Segundo [Amaro \(2015\)](#), no verão o ASAS se encontra um pouco mais ao sul e a leste, enquanto no inverno é mais intenso e deslocado para oeste, mais perto do continente.

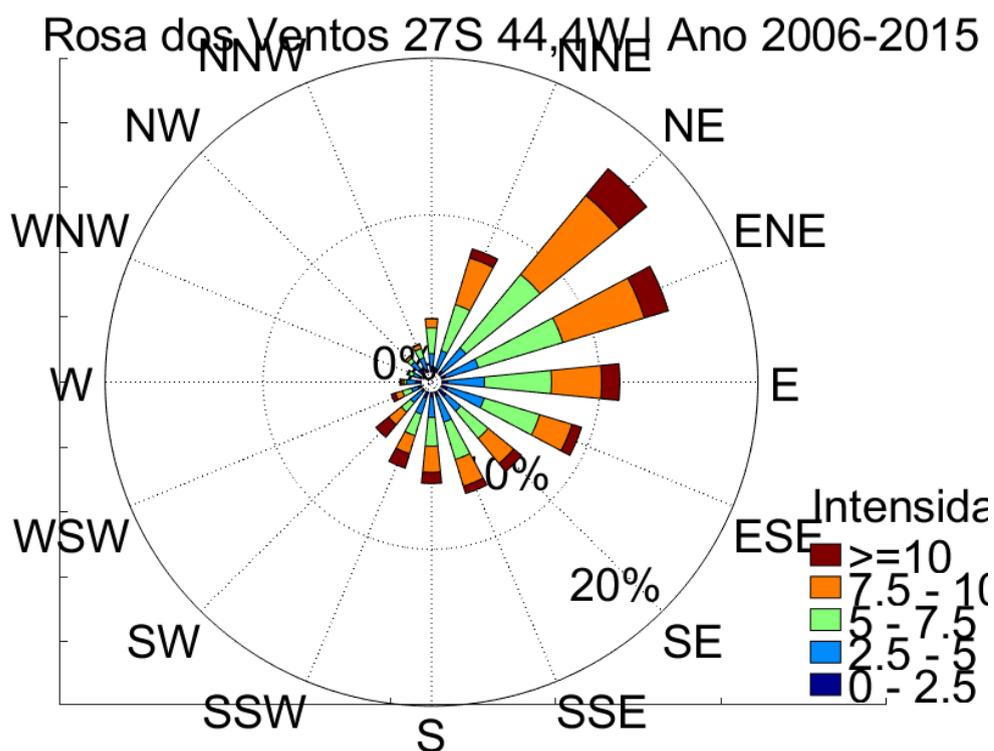


Figura 2 - Rosa dos ventos média de 2006 a 2015 para o Atlântico sudoeste ao sudeste do Brasil, em 27°S - 44°W.

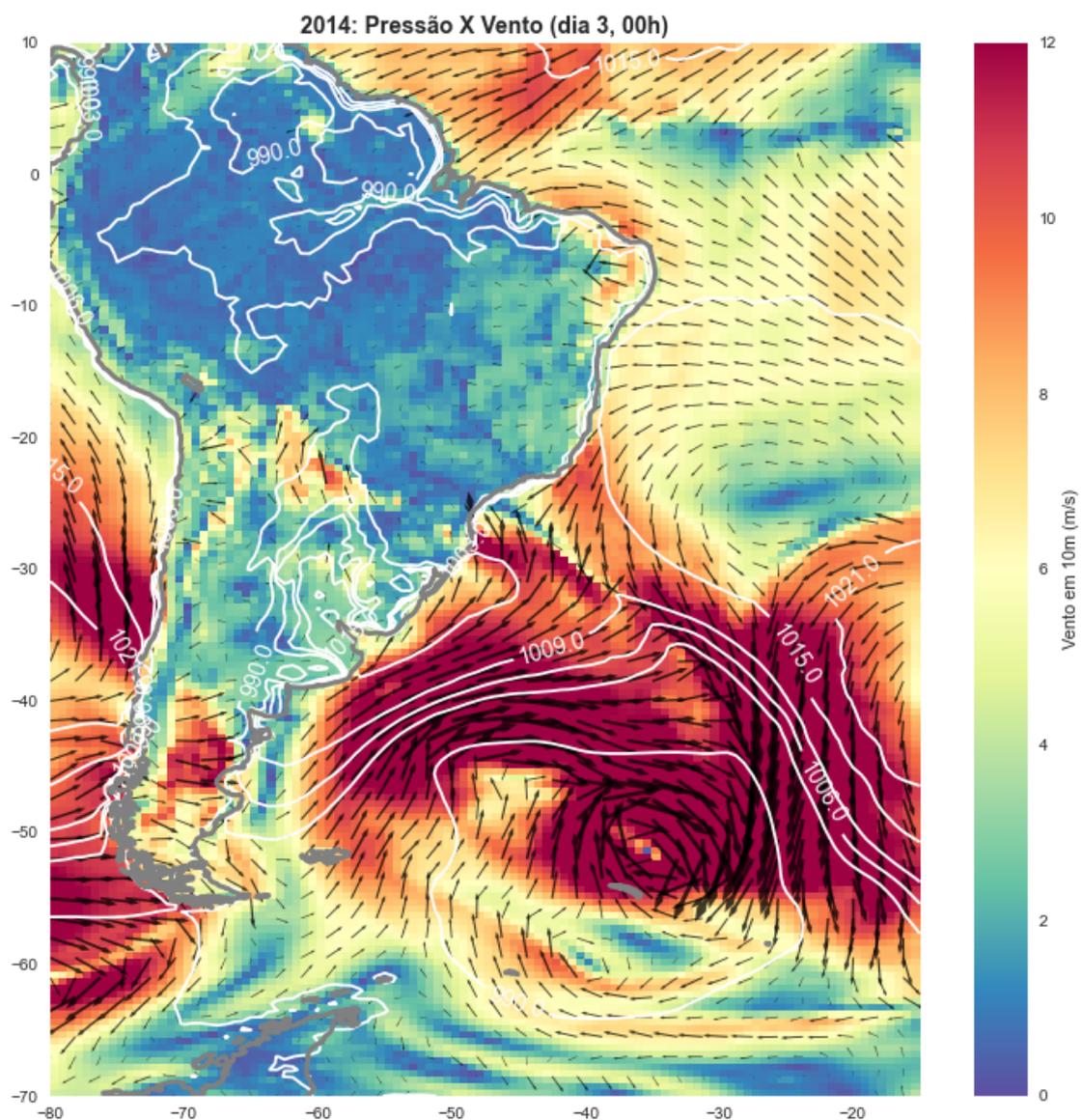


Figura 3 - Evento de frente fria do SAMS registrado pelo [MERRA-2](#). Os contornos indicam pressão em superfície, em hPa, e os vetores e a escala de cor indicam o vento em 10 metros de altitude. Os ventos em sentido anti-horário, da alta pressão migratória, são acelerados pela baixa pressão, com núcleo em 50°S - 37°W. A frente é a curva direcionada para sudeste-sul, de 25°S - 50°W até o núcleo da baixa pressão.

2.2 - Corrente do Brasil

Assim como foi feito para o regime de ventos, a descrição do regime de correntes também é de suma importância para o entendimento da discussão deste trabalho. Nele, demos foco à Corrente do Brasil (CB), que é a corrente de contorno oeste que determina em grande parte as condições oceanográficas em superfície no

Atlântico sudoeste. A Corrente do Brasil é uma feição oceânica bem característica do sistema que recebe o nome de Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS) ([SILVEIRA et al., 2015](#)). Ela é classificada como Corrente de Contorno Oeste (CCO), pois faz parte do grupo de correntes forçadas pelos anticiclones subtropicais semipermanentes que dão origem aos giros subtropicais. Como mencionado no subcapítulo sobre o SAMS, o ASAS, anticiclone do Atlântico Sul, é o principal responsável pela advecção das águas superficiais que compõem o GSAS ([MANO 2007](#), [CATALDI, 2008](#)). A CB, logo, se forma a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial ramo sul (CSE-S), identificada em torno de 14°S na figura 4, e que também dá origem à Corrente Norte do Brasil (CNB): enquanto parte da CSE-S vai para norte, às margens das regiões Nordeste e Norte do país, outra parte vai para sudoeste, às margens da região Sudeste e Sul.

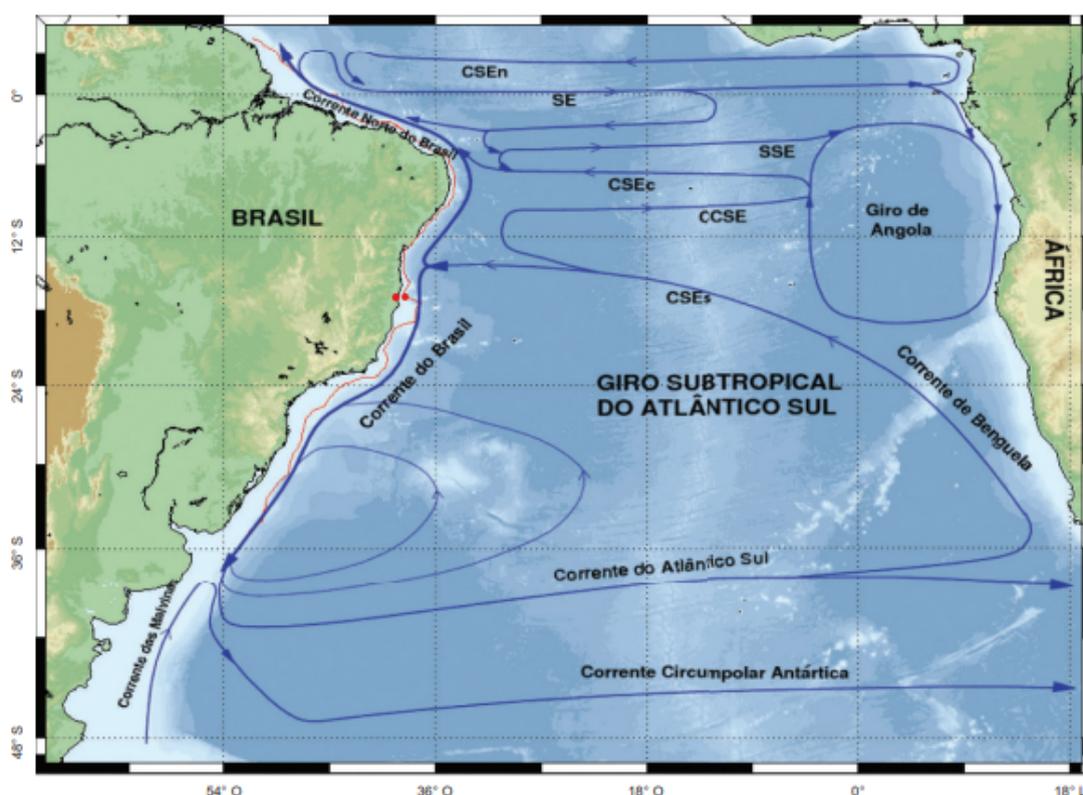


Figura 4 - Representação das principais correntes oceânicas e do Giro Subtropical do Atlântico Sul.

Retirado de [SILVEIRA et al., 2015](#).

Em sua trajetória em superfície, a CB carrega águas quentes e salinas, pelo talude continental, até 30°S no inverno ou 40°S no verão, onde encontra a Corrente das Malvinas (CM), que é caracterizada por baixa salinidade e temperatura ([GABIOUX, 2008](#), [PILO, 2013](#)). A CM é um ramo da Corrente Circumpolar Antártica (CCA), que se

desloca para nor-nordeste após a passagem pelo Estreito de Drake (55°S;60°W). O encontro dessas águas com grande gradiente de temperatura e salinidade recebeu o nome de Confluência Brasil-Malvinas (CBM), e é de suma importância para o SAMS ([CATALDI, 2008](#), [PILO, 2013](#)), visto que sua localização é caminho para os sistemas transientes das frentes frias.

Além da descrição superficial, a mais influenciada pelos ventos, é necessário entender também a especificidade em níveis mais profundos do oceano. Para isso, comumente é feita a divisão entre: camada superficial, até 150m de profundidade; pycnoclina, entre 150 e 500 m de profundidade; camada intermediária, de 500 a 1000 m de profundidade ([SOUTELINO, 2008](#)). Dessa forma, é possível diferenciar as águas de propriedades distintas e observar que, assim como acontece na superfície, a CSE-S também se bifurca nos níveis inferiores, contudo em latitudes mais altas. Esse reconhecimento é importante, pois, por esse motivo, a espessura da CB aumenta com a latitude. Ou seja, na pycnoclina, camada de grande gradiente vertical de densidade ([MANO, 2007](#)), a CSE-S se bifurca em 20°S, e em níveis intermediários ela se bifurca em 25°S, fazendo com que a CB ocupe praticamente todo o oceano superior. Enquanto isso, a outra direção do escoamento da CSE-S, que em superfície origina a CNB, nos níveis inferiores dá origem à Corrente de Contorno Intermediária (CCI) e à Sub-corrente Norte do Brasil (SNB) na pycnoclina (FIGURA XSILVEIRA2015).

As águas transportadas nos diferentes níveis da CB apresentam propriedades bem definidas, como mencionado nos parágrafos anteriores. Faz-se possível identificar, assim, a Água Tropical (AT), em nível superficial, a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), em nível pycnoclínico, e a Água Intermediária Antártica (AIA), em profundidades intermediárias ([SOUTELINO, 2008](#)) (fig. 5).

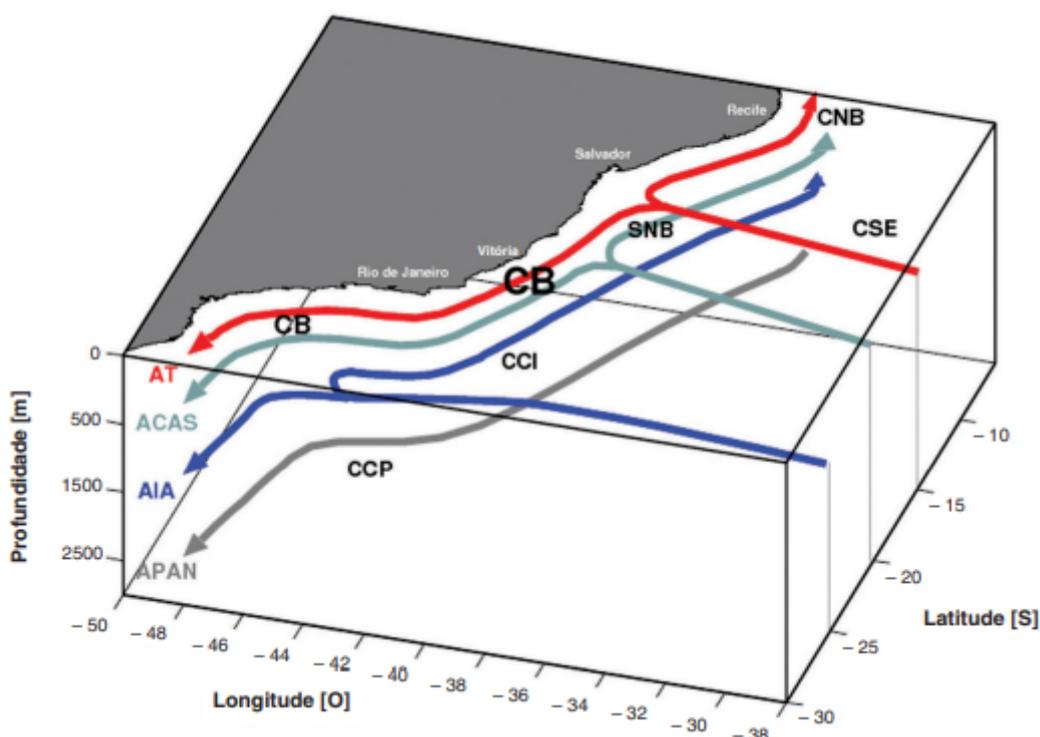


Figura 5 - Regime de correntes marinhas ao longo da margem leste e sudeste brasileira. Retirado de [SILVEIRA et al., 2015](#).

Percorrendo a margem leste da América do Sul, a CB está sujeita a uma intensa variabilidade de mesoescala, principalmente na região adjacente ao sudeste do Brasil, nas bacias sedimentares do Espírito Santo, Campos e Santos. Segundo [MILL et al \(2015\)](#), [MANO \(2007\)](#), [GABIOUX \(2008\)](#) e [PILO \(2013\)](#), ao se deparar com a cadeia submarina Vitória-Trindade ($20,5^{\circ}\text{S}$), e com a abrupta mudança na orientação da costa, entre Vitória, Cabo de São Tomé (22°S) e Cabo Frio (42°W), a CB sofre influência da geomorfologia propiciando o seu meandramento (fig. 6, 6B, 8). Ainda segundo os autores, a instabilidade baroclínica é vista como um dos principais responsáveis pela expansão dos meandros e formação, com desprendimento, dos vórtices de Vitória (VV), Cabo Frio (VCF) e Cabo de São Tomé (VCST). Esses podem apresentar centenas de quilômetros de diâmetro e perdurar por dezenas de dias, além de ocorrerem com frequência em torno de algumas dezenas de dias.

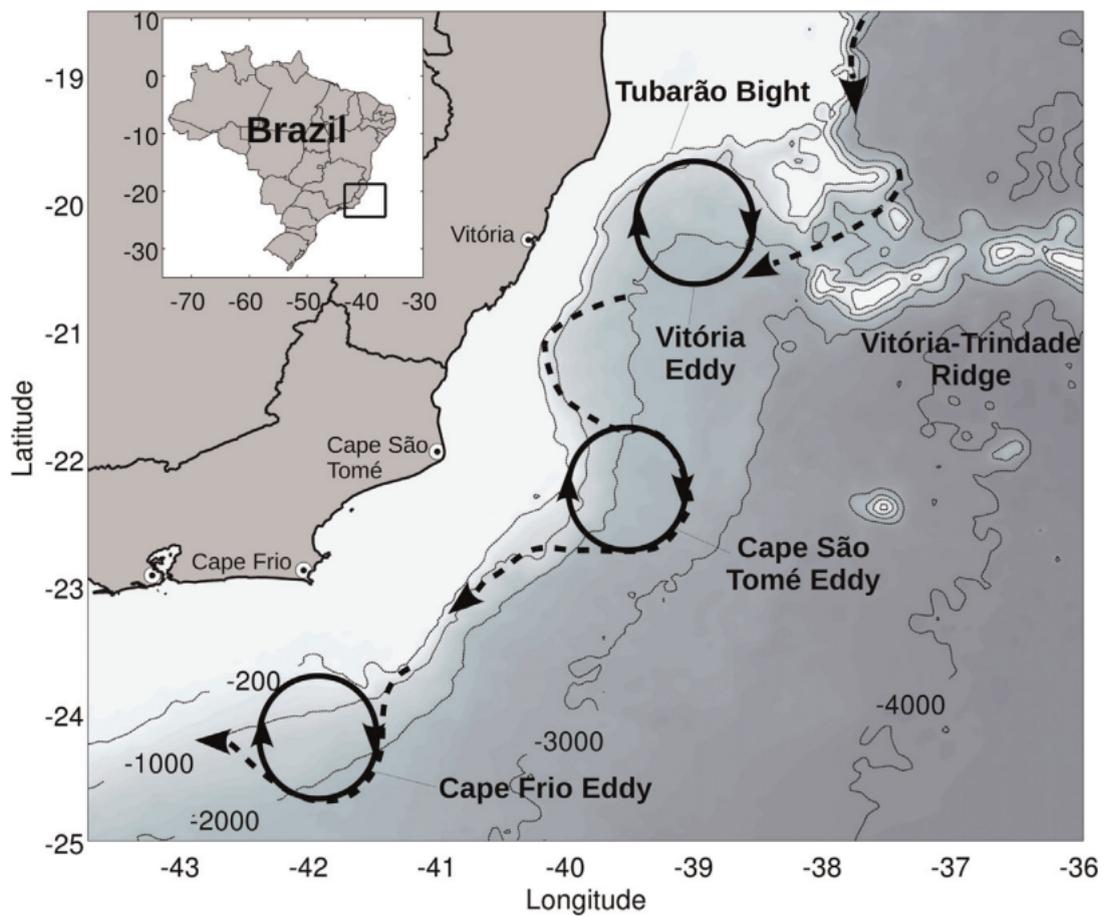


Figura 6 - Representação esquemática dos vórtices de Vitória (VV), Cabo Frio (VCF) e Cabo de São Tomé (VCST), feições ciclônicas recorrentes encontradas ao sudeste Brasil. Retirado de [MILL et al. \(2015\)](#).

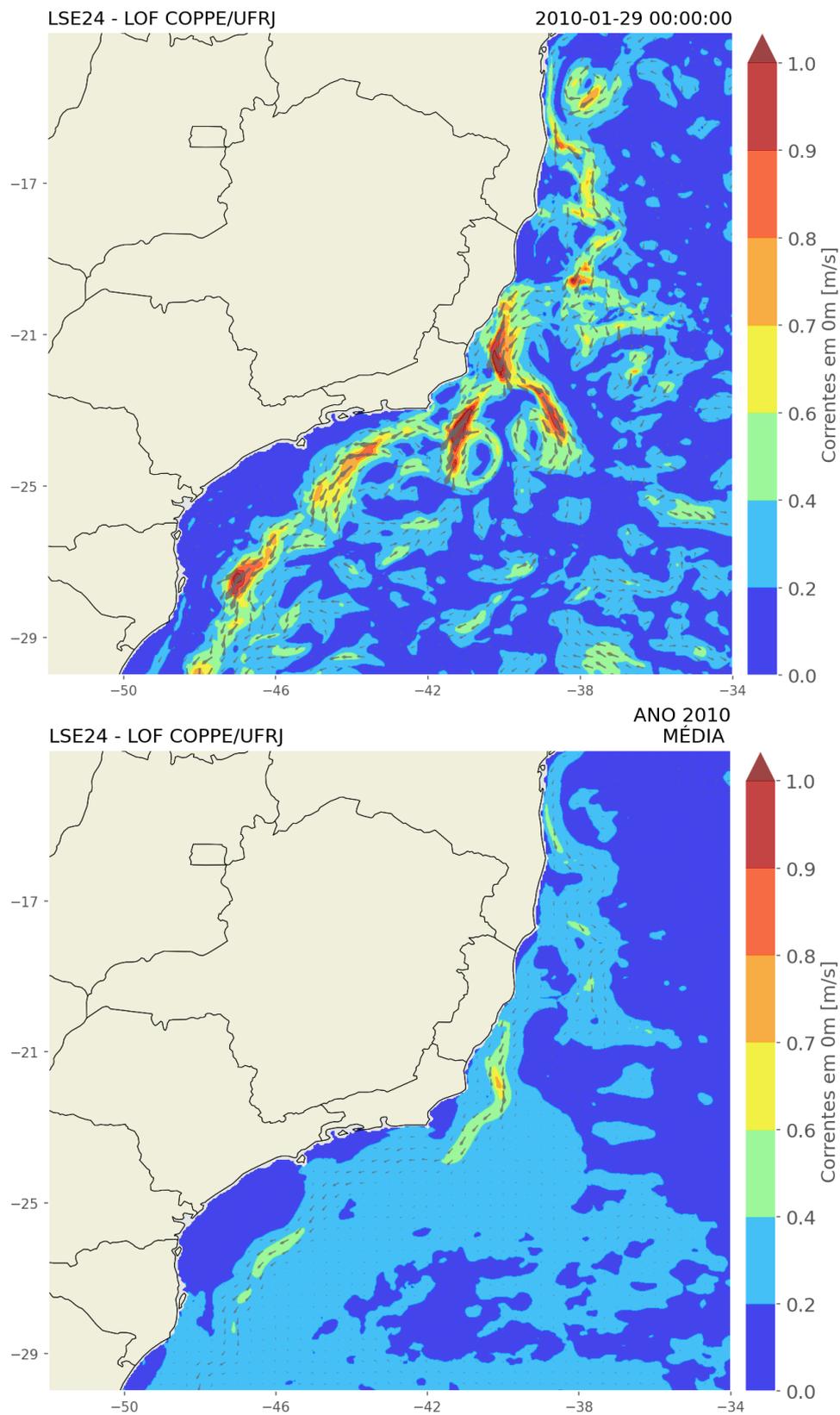


Figura 6B - Campo instantâneo de correntes em superfície do modelo LSE24, painel superior, e campo médio para o ano de 2010, painel inferior. Grande variabilidade de mesoescala observada no painel superior.

CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA

3.1 - MERRA2

Os primeiros dados utilizados na monografia foram os do modelo de reanálise [MERRA2 - Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2](#), do [Global Modelling Assimilation Office, GMAO - NASA](#). O MERRA2 é usado como forçante atmosférica da Base Hidrodinâmica Leste Sudeste, descrita na seção seguinte, e possui resolução espacial de 50 km e temporal de 1 hora³ (fig. 3).

Para essa monografia, foram utilizados os seguintes dados com amostragem diária a 00h para o período de 2006 a 2015:

- Vento em 10 m de altitude, componente V;
- Vento em 10 m de altitude, componente U;
- Pressão atmosférica em superfície.

3.2 - Modelo HYCOM

O modelo HYCOM - *HYbrid Coordinate Ocean Model* ([BLECK, 2002](#)) é um modelo hidrodinâmico desenvolvido a partir do MICOM - *Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model*. O HYCOM possui um sistema coordenadas híbridas, que permitem a mudança das coordenadas verticais, ora em isopicnais (curvas de nível de mesma densidade), ora em sigma ou geopotencial (ou coordenadas z). Ou seja, em regiões no interior do oceano, onde o meio é estratificado, o modelo utiliza as coordenadas isopicnais; em regiões rasas como as regiões costeiras, o modelo utiliza coordenadas sigma, que são coordenadas normalizadas pela profundidade; e em regiões pouco estratificadas ele é convertido para coordenadas z, como nas profundidades da camada de mistura⁴ ([GABIOUX,2008](#); [PAIVA et al., 2019](#); [BLECK, 2002](#)).

A Base Hidrodinâmica Leste Sudeste, ou LSE24, foi integrada pelo Laboratório de Oceanografia Física (LOF) da COPPE/UFRJ no escopo da Rede de Modelagem e

³ Animação dos dados de vento e pressão gerados pelo modelo MERRA2:  

⁴ A camada de mistura é a camada que se estende até a profundidade onde do oceano que ainda sofre influência direta do vento. É a camada que sente a interação oceano-atmosfera, possui algumas dezenas de metros de profundidade e seus níveis de temperatura e salinidade são bastante uniformes. Abaixo dela, encontram-se a termoclina, a haloclina e a pycnoclina, camadas de grande gradiente vertical dessas propriedades ([KANTHA, 2003](#), [MANO, 2007](#)).

Observação Oceanográfica (REMO) para a geração de um *hindcast* de 2006 a 2015. Ele utiliza o modelo HYCOM com assimilação de dados baseado no sistema T-SIS ([PAIVA et al. 2019](#)), e possui resolução horizontal de $1/24^\circ$, de 6 a 34°S (latitude) e 29 a 54°O (longitude), projeção de Mercator. Assim, a Base abrange o Atlântico adjacente ao litoral leste e sudeste brasileiro, discretizado em 32 camadas verticais. Devido a sua característica de alta resolução espacial, o modelo é capaz de representar com clareza fenômenos de mesoescala, muito importantes para a discussão deste trabalho.

O LSE24 produziu resultados de velocidade do escoamento, temperatura e salinidade para campos tridimensionais de três em três horas, e para campos superficiais com resolução temporal de uma hora. Como condição inicial, ele utiliza campos de massa e correntes da simulação ATL12-ASSIM, também integrado pelo LOF (fig. 7), correspondente a data 31/12/2005, e os valores dos campos de temperatura, salinidade e espessura das camadas verticais como condições de contorno lateral. Além dessas condições, o modelo utilizou como forçantes em superfície os campos atmosféricos da reanálise MERRA2, descrito na seção 3.1. Mais detalhes sobre a BASE-LSE24 podem ser lidos no relatório oficial, em [PAIVA et al. \(2019\)](#), e resumidamente em [GABIOUX, 2008](#) e [BAZONI, 2017](#).

Para essa monografia, foram utilizados os seguintes dados com amostragem diária a 00h, de 2006 a 2015, integrados pela geração de *hindcast* da REMO:

- Correntes em 50 m de profundidade, componente V;
- Correntes em 50 m de profundidade, componente U.

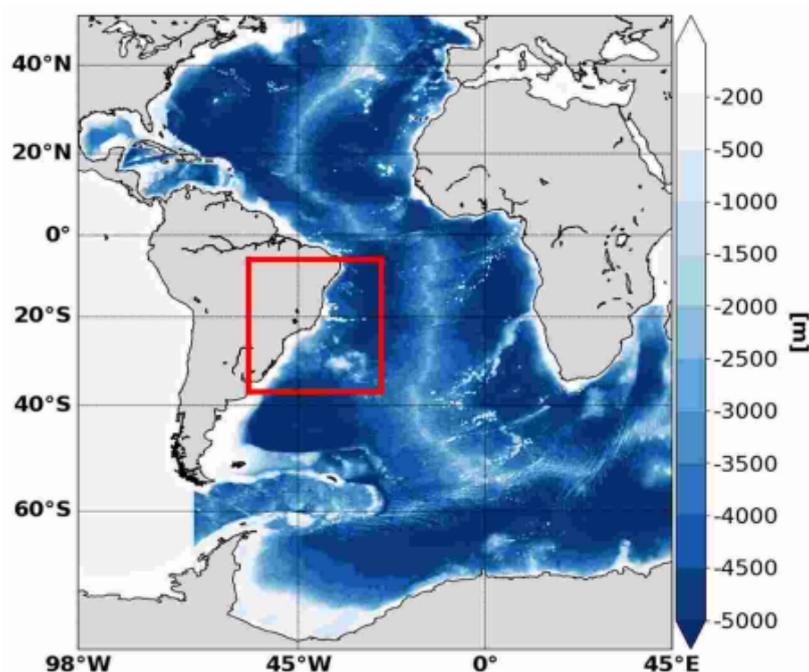


Figura 7 - Domínio da modelagem das simulações ATL12, utilizado como condição de contorno para o LSE24, demarcado pelo retângulo em vermelho. Retirado de [PAIVA et al., 2019](#).

3.3 - Modelo Lagramp

O modelo Lagramp é o modelo lagrangeano utilizado nesta monografia para a modelagem de dispersão de partículas. Criado no Laboratório de Oceanografia Física da COPPE/UFRJ, o Lagramp é um modelo que se baseia no transporte advectivo-difusivo em campos 2D de correntes marítimas. Isto é, as partículas lançadas estão sujeitas tanto à intensidade e direção das correntes, geradas pela soma das componentes U e V, quanto à turbulência do meio. Dessa forma, foram utilizadas a batimetria e os campos de superfície do modelo LSE24, descrito na seção anterior, além das componentes do vento, para efeito de advecção direta por este - uma questão ainda discutida pelo IBAMA⁵.

Referenciando [POLOVINA et al](#), [BAZONI \(2017\)](#) destaca as equações (1) da dispersão de partículas, sendo: t o tempo; x a posição no eixo x (longitude) e y a posição

⁵ Os modelos oceânicos utilizados para a modelagem de dispersão de partículas já estão sujeitos ao efeito do vento, visto que ele influencia diretamente o regime de correntes. Todavia, o IBAMA exige que os EIAs incluam o efeito de advecção direta pelos ventos. No Apêndice C, encontram-se alguns resultados gerados para essa avaliação.

no eixo y (latitude); ε o coeficiente de variação randômica característica (distribuição normal); K_x e K_y os coeficientes de difusão.

$$x_{t+\Delta t} - x_t = \frac{u \Delta t + \varepsilon \sqrt{(K_x) \Delta t}}{\cos(y_t)} \quad (1)$$

$$y_{t+\Delta t} - y_t = v \Delta t + \varepsilon \sqrt{(K_y) \Delta t}$$

Bazoni destaca em seu trabalho que não existe consenso na literatura sobre qual o coeficiente de difusão é o mais adequado para a modelagem de dispersão de partículas no oceano. Logo, na presente monografia, esse coeficiente não foi parâmetro de alteração, sendo utilizado o valor fixo de 100 m²/s como [BAZONI \(2017\)](#).

3.4 - Metodologia

A metodologia do presente trabalho foi dividida em duas etapas: na primeira, foi dado foco ao estudo da Corrente do Brasil e dos ventos na área de estudo, a fim de se investigar sua variabilidade interanual. Na segunda etapa, o foco foi dado aos experimentos com o Lagramp, a fim de concluir a discussão da etapa anterior, analisando-se os resultados de probabilidade de alcance das partículas.

Dando início à primeira etapa, foram escolhidas seções representativas da variabilidade oceânica e atmosférica da região, de forma que a variabilidade interanual observada nelas fosse representativa da variabilidade na região como um todo. No oceano, estas seções compreenderam a região costeira, a plataforma continental, a CB e a região *offshore* da Corrente, nas bacias sedimentares de Campos e Santos⁶ (fig. 8). Para capturar as áreas de maior variabilidade oceânica, foram consideradas as seguintes três seções: uma na região do Cabo de São Tomé, outra na região de Cabo Frio e a última na porção central da Bacia de Santos. Essas seções cortam transversalmente a direção climatológica da CB em cada local e foram numeradas com 6, 9 e 10,

⁶ bacias sedimentares de Campos e Santos: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/mapas-e-p/imag-mapas/>

respectivamente⁷. Já para a atmosfera, foram localizadas seções de forma a capturar a variabilidade do campo de ventos associada a formação de sistemas frontais, primeiramente.

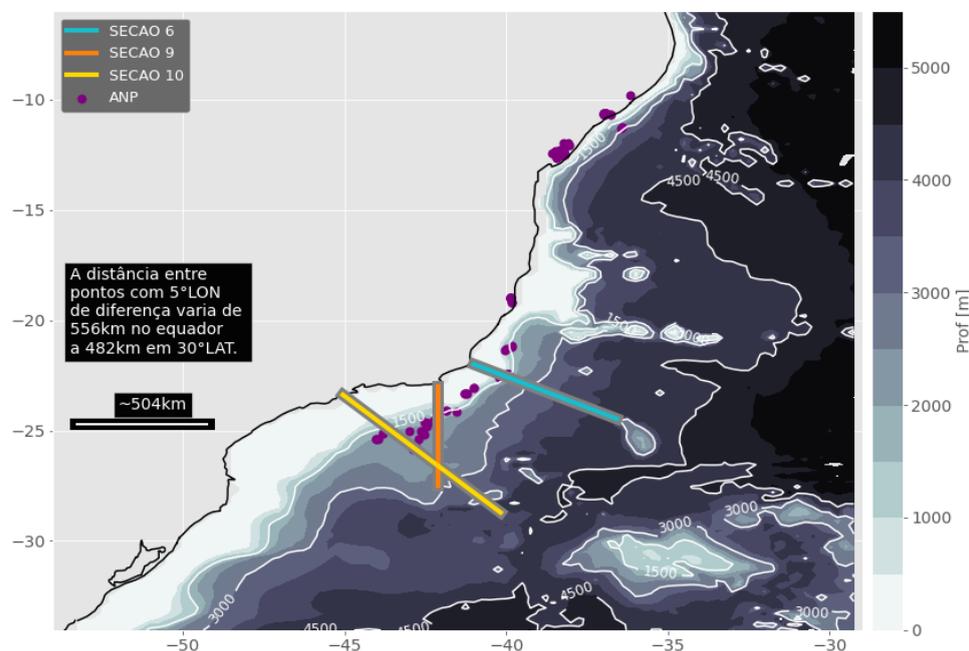


Figura 8 - Batimetria da área de estudo, pelo modelo LSE24, e seções avaliadas nesta monografia. Os pontos em roxo são poços de exploração, retirados de: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/>. Acesso em 15/07/2022.

A partir da análise dos campos de ventos e pressão em superfície da área de estudo, foi verificado que uma única série temporal em 27°S - 44°W era capaz de capturar a maior parte da variabilidade dos ventos na região. Para essa etapa, as análises feitas resultaram dos métodos de Função Ortogonal Empírica (EOF) (fig. 10), análise espectral - Transformada de Fourier (fig. 9), correlação de Pearson espacial (fig. 11), rosa dos ventos (fig. 2) e observação das séries temporais dos pontos ao longo de uma seção zonal em 30°S (fig. 12) e de uma meridional em 33°W.

Sobre o método de análise espectral, este é muito utilizado para estudo de sinais contínuos no tempo a partir da decomposição de uma série em senóides e cossenóides. A análise espectral é baseada na transformada de Fourier, e retorna a distribuição de energia por faixa de frequência. No eixo y do espectro (fig. 9) tem-se o módulo da

⁷ Baseado nos estudos do LOF que utilizaram a metodologia seções, outras foram destacadas, iniciando a numeração a partir da seção de número 1, como se pode ver na primeira figura do Apêndice B desta monografia. Entretanto, para esse trabalho, o foco foi dado às seções de grande variabilidade de mesoescala e que estão localizadas em bacias sedimentares muito exploradas por empresas brasileiras e estrangeiras.

transformada de Fourier do sinal, dada pela equação 2 ([DINIZ, 2014](#), [VIANA, 2020](#)), onde $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ é a frequência angular (em rad/s) e $e^{-jt} = \cos(t) - j\sin(t)$ é a exponencial complexa, e o eixo x representa as bandas de frequência.

$$F\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

Como o período é o inverso da frequência e nosso dado foi utilizado com amostragem diária, para melhor visualização, foi feito o espectro com o eixo x identificando o período em dias (fig. 9). A partir dele, feito para todos os pontos de longitude ao longo de 30°S no domínio da modelagem, é possível ver a presença do segundo e terceiro harmônicos em torno de 7 e 10 dias, respectivamente, indicando que para toda seção existe uma semelhança associada à trajetória do sistema frontal.

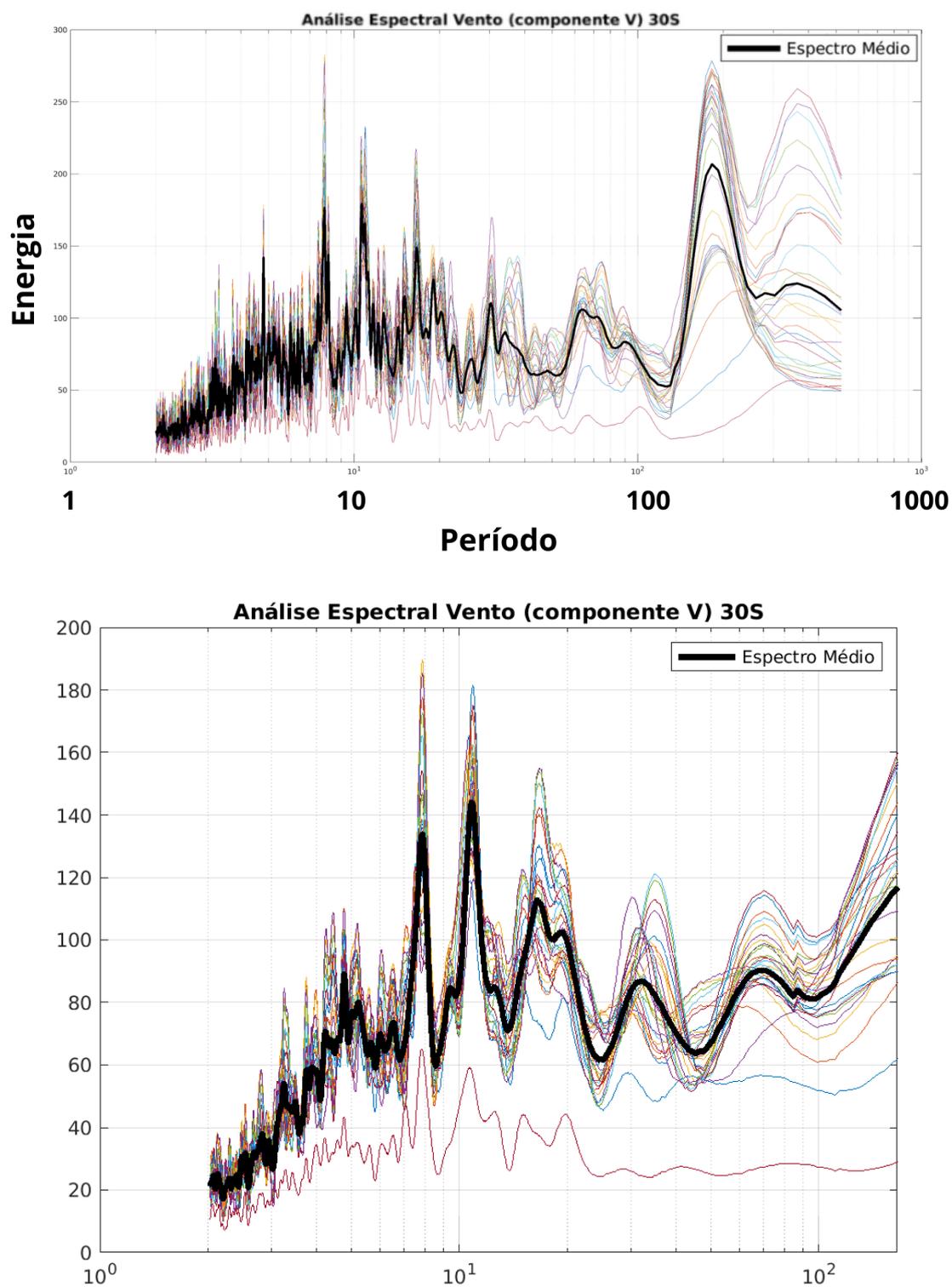


Figura 9 - Análise espectral da componente V dos ventos ao longo da seção em 30°S. Destaca-se a similaridade na distribuição de frequências entre os pontos da seção e os harmônicos associados às frentes, além do harmônico fundamental associado ao período de 180, explicando a sazonalidade. O eixo y indica energia, enquanto o eixo x indica o período em dias (inverso da frequência).

Pelo método de EOF, é possível destacar modos de variância espacial. Isto é, a decomposição em componentes para cada variável tem como retorno os principais modos de variabilidade da região. O EOF decompõe as séries em autovalores e autovetores, respectivos a cada modo de variabilidade, onde o primeiro modo capta a maior parte da variância total. Pode-se observar pelo primeiro EOF de pressão, que captou 68% da variabilidade, a grande similaridade espacial e sazonalidade (fig. 10). Já pelo mesmo modo para a componente U e V (Apêndice A), é possível identificar a variabilidade associada à passagem de frentes frias.

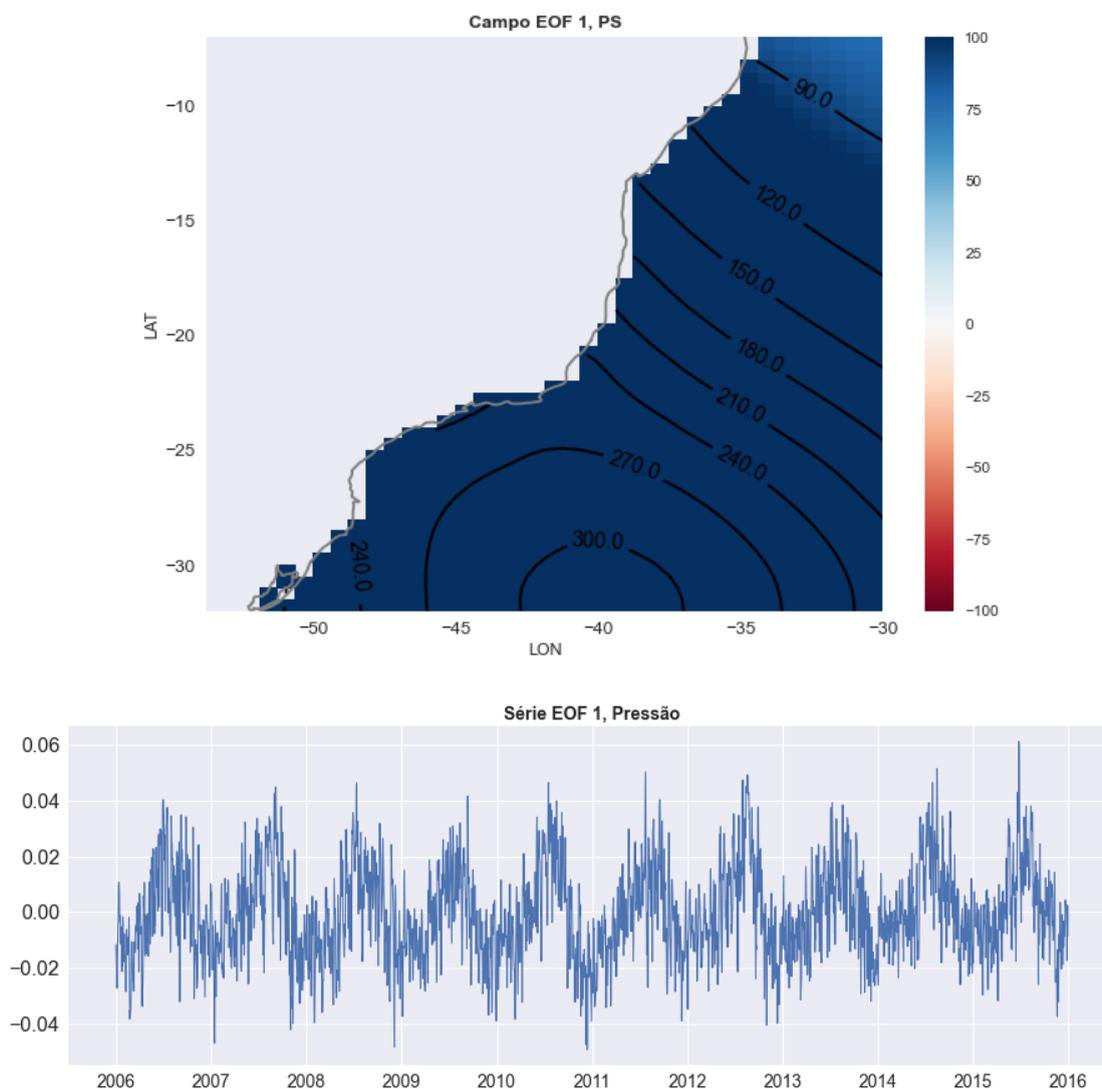


Figura 10 - EOF de pressão em superfície, em hPa, que capta 68% da variabilidade do histórico.

A partir da análise das séries temporais em todos os pontos da seção em 30°S, foi observado um *lag* (fig. 12), explicado pela trajetória da alta e baixa pressão migratória. Para validar essa escolha, foi utilizado o método de correlação de Pearson espacial (fig. 11) em torno do ponto 27°S - 44°W, dado pela equação 3.

$$Pearson = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3)$$

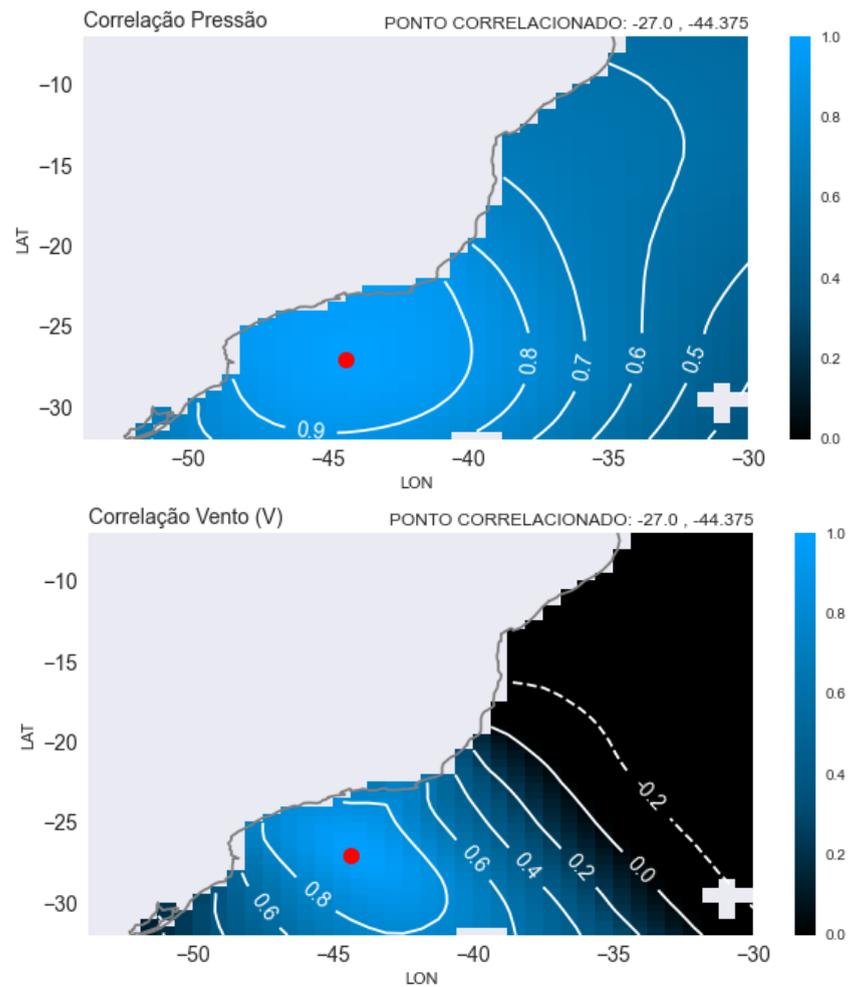


Figura 11 - Correlação espacial de Pearson para pressão e vento (V) no Atlântico sudoeste a sudeste do Brasil.

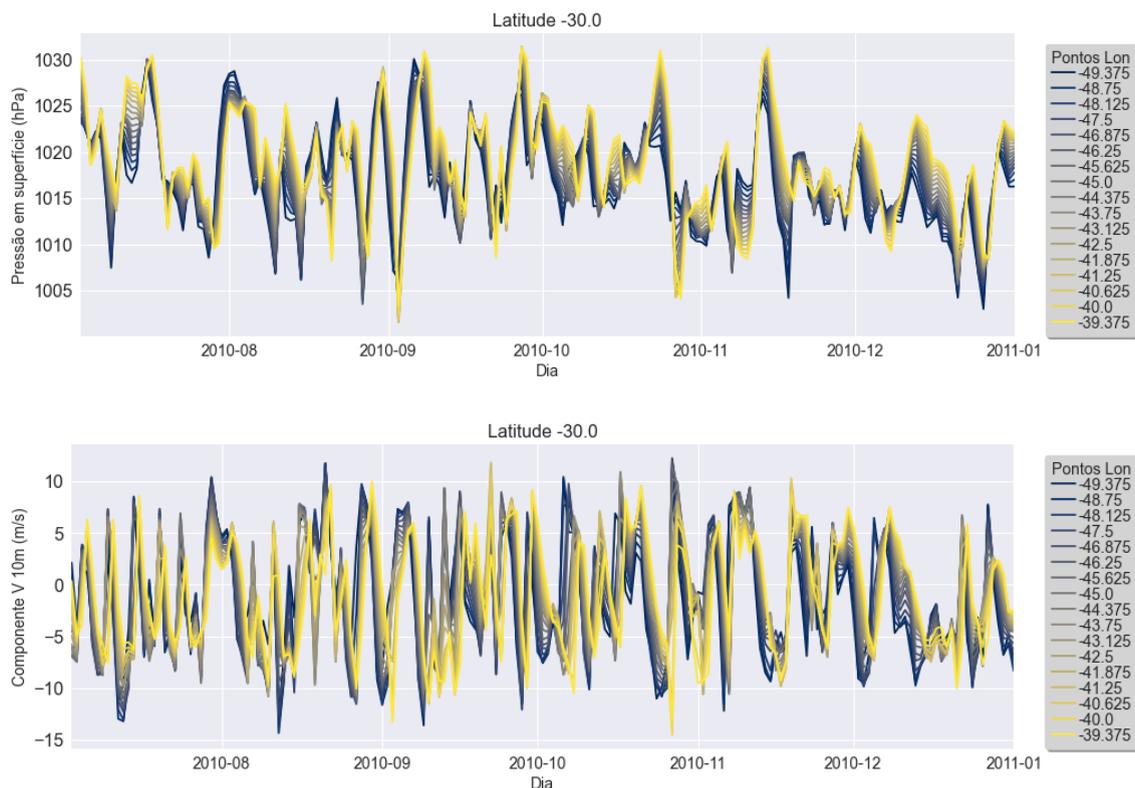


Figura 12 - Observação do *lag* das séries temporais de vento e pressão ao longo de todos os pontos da seção em 30°S, indicando a similaridade.

Ao final, foi possível obter a série temporal representativa da área de estudo como um todo (fig. 13). Foram utilizados, então, os dados da componente V do vento, uma vez que a passagem dos sistemas transientes proporciona valores positivos dessa componente quando estes passam pelo ponto correlacionado. Com o intuito de identificar ainda melhor esse indicador e analisar sua variabilidade, foi feita a rotação da direção do vento em 38°, para que a componente captasse a maior variância estatística.

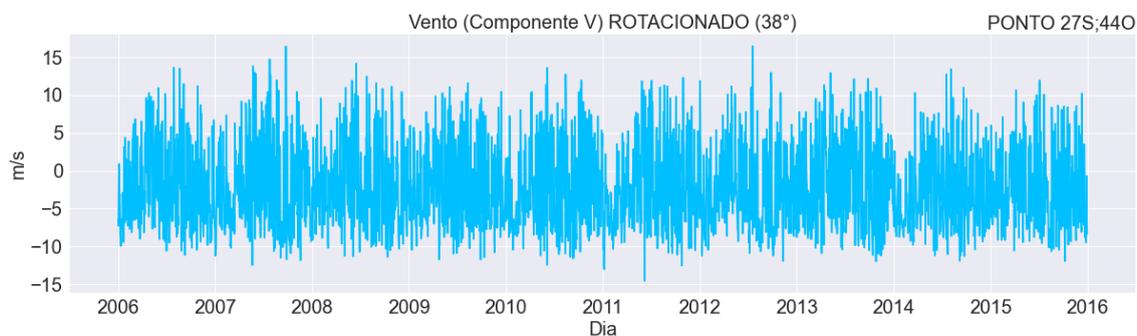


Figura 13 - Série final de vento conforme metodologia para representação do Atlântico ao sudeste do Brasil.

3.4.1 - Picos: contabilidade de frentes frias

Como primeiro método para identificação da variabilidade interanual dos ventos, foi realizada a contagem de eventos de frentes frias. Após a rotação da componente V, realizamos a contagem dos eventos de frente fria de forma que uma informação de valor positivo não seria considerada se houvesse outra ocorrência dentro de um período de 3 dias. Isto é, para que fossem contabilizados apenas os sistemas transientes típicos do SAMS, teve-se que considerar o período mínimo de 3 dias de intervalo entre uma frente e outra (em alguns anos e em diferentes épocas, a frequência de frentes pode variar, em geral, de 3 a 10 dias. Essa frequência depende de fatores como o ENSO, a CBM e outros índices climáticos e meteorológicos, ver figura 9). Além disso, o mesmo procedimento foi efetuado contabilizando apenas eventos com registros da componente maiores que 5 m/s, para identificar apenas os eventos mais intensos. Dessas contagens, foram gerados os resultados apresentados nas figuras 14 e 15, resumidamente, nas figuras 21 e 22, apresentadas no próximo capítulo, para analisar as diferenças interanuais.

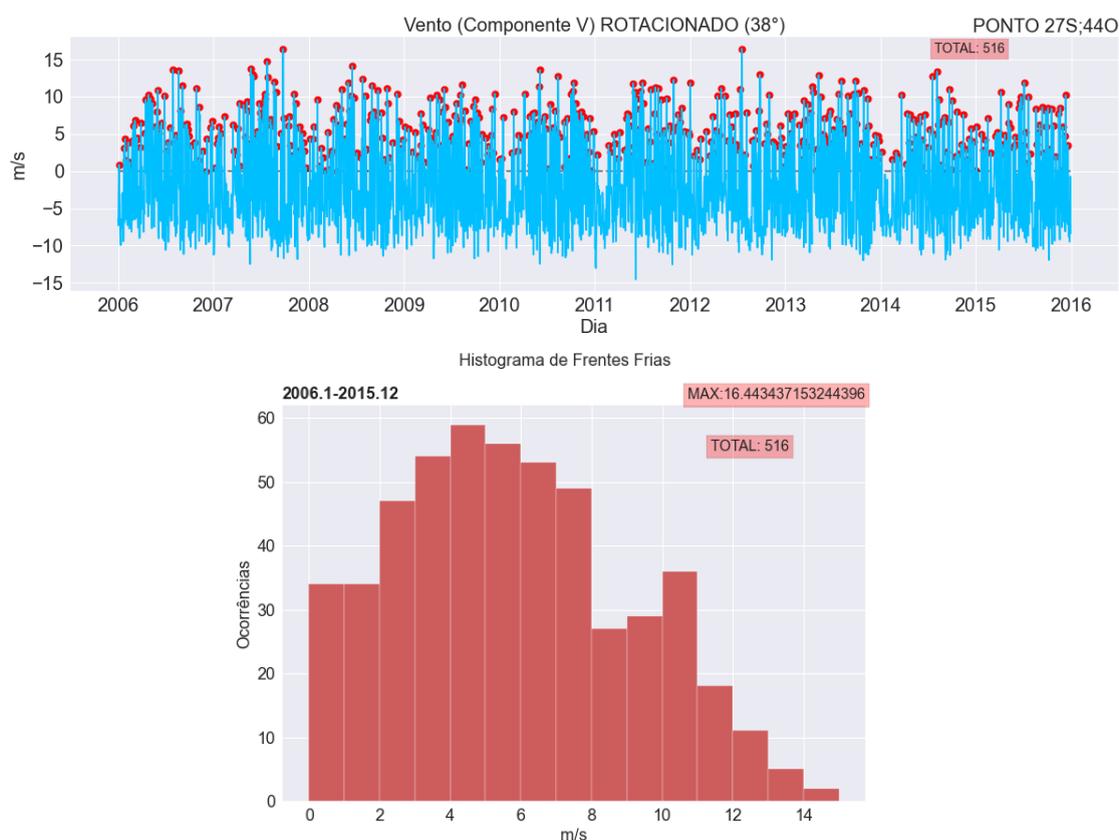


Figura 14 - Metodologia para contabilidade de frentes frias para o histórico analisado (2006 a 2015).

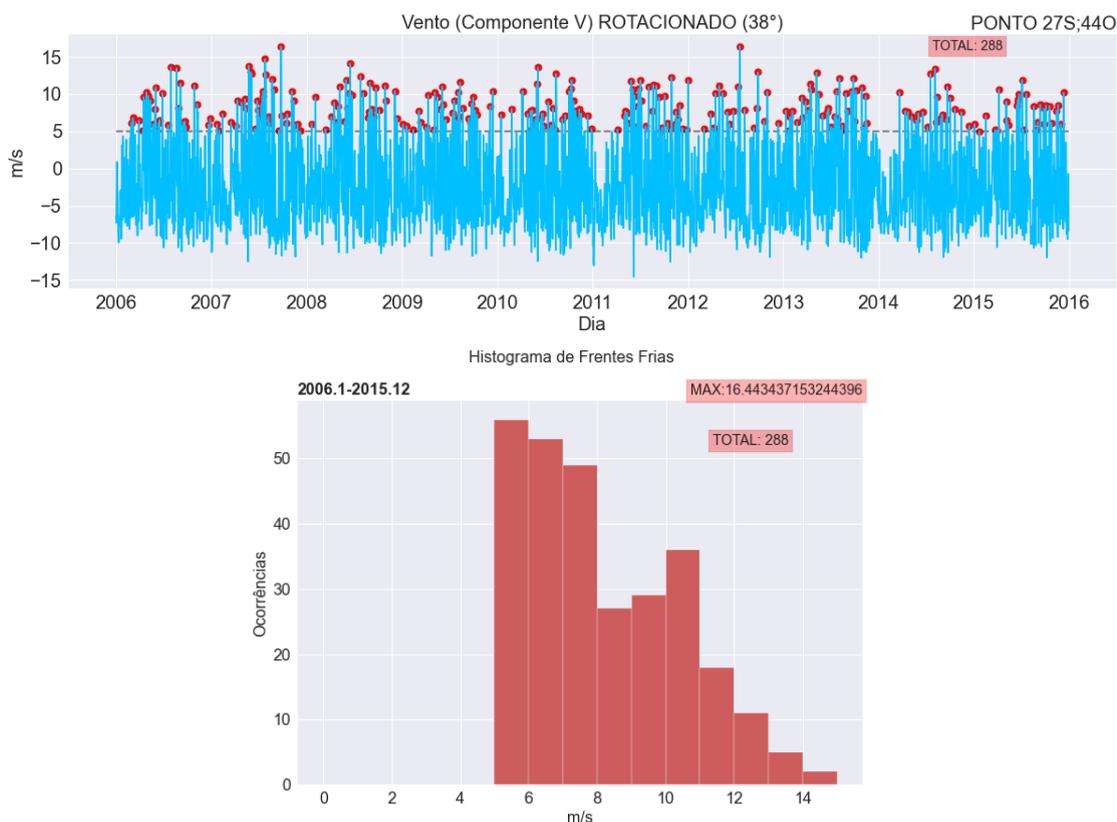


Figura 15 - Metodologia para contabilidade de frentes frias intensas para o histórico analisado (2006 a 2015).

3.4.2 - Rosa dos ventos

Além da contabilidade de eventos de frente fria, também foi realizada a contagem de dias por ano com ventos dos quadrantes norte-leste (N-L) e leste-sul (L-S). A partir da visualização da rosa dos ventos do ponto escolhido (fig. 2), foi observada a presença imponente do ASAS, que contribui para os valores mais altos e maior número de dias no quadrante N-L, por ser um sistema semi permanente (VERA, 2006). Dessa forma, a ASAS indicaria a climatologia da região, então os eventos que trouxessem ventos de outras direções seriam os que poderiam causar maior variabilidade e dispersão de partículas entre anos. Além disso, o quadrante L-S foi escolhido por ser o que incidiria de forma mais direta no transporte de partículas em direção ao litoral do Brasil (principalmente região Sudeste). A visualização das rosas de cada ano nos trouxe diferenças perceptíveis na predominância da ASAS e nos ventos de L-S, podendo serem observadas nas figuras 16 de 2007, 2008, 2009, 2014 e em resumo nas figuras 23 e 24.

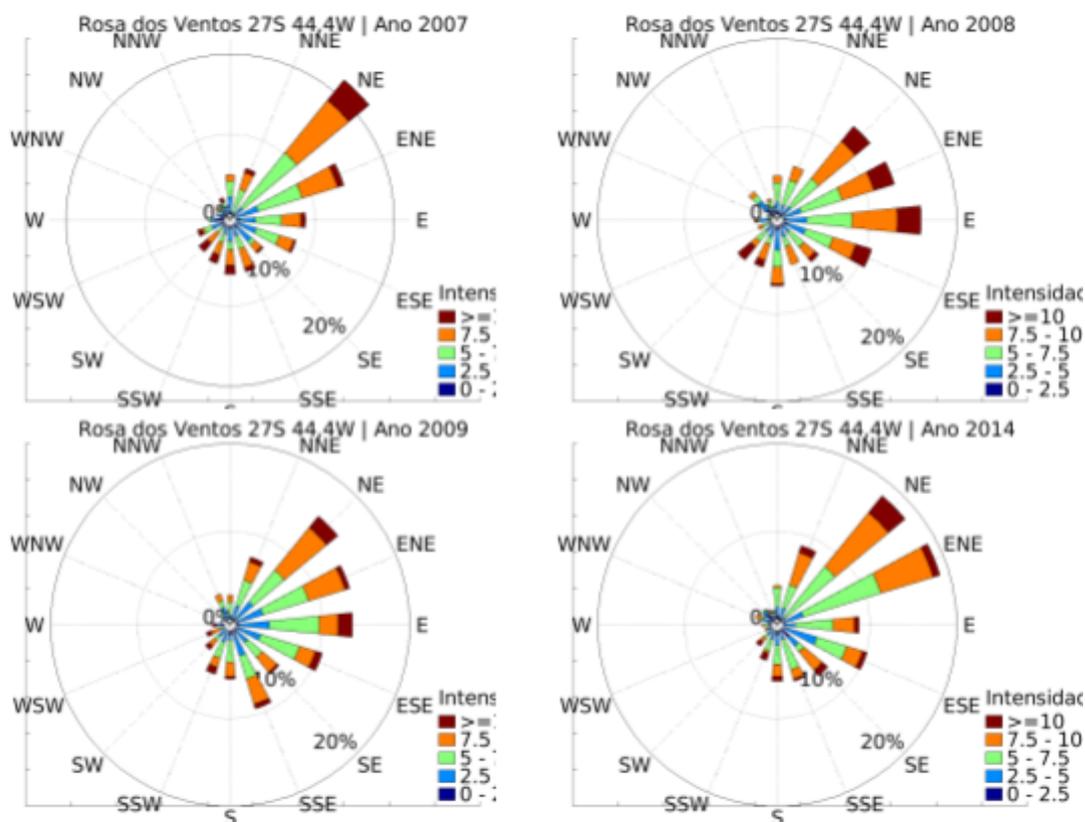


Figura 16 - Rosa dos ventos para os anos de 2007, 2008, 2009 e 2014 na área de estudo. Intensidade do vento em m/s.

3.4.3 - Hovmöllers e identificação da Corrente do Brasil

Como primeiro método da análise oceânica, utilizamos as seções destacadas na figura 8 para identificação da Corrente do Brasil a partir de diagramas hovmöller. A visualização de diagramas hovmöller é muito útil quando se quer estudar o comportamento de uma sequência de pontos de um campo no domínio do tempo, ou seja, descobrir como variam um conjunto de pontos com o passar do tempo ([DI LIBERTO, 2022](#), [HOVMÖLLER, 1949](#)). No nosso caso, ele foi fundamental, pois foi possível destacar os valores de máxima intensidade da Corrente transversal às seções, em m/s, em cada dia. Isto é, em cada dia do histórico, tínhamos um valor máximo de velocidade, que foi identificado como indicador da posição da CB naquele instante. A figura 18 apresenta os hovmollers resultantes das seções 6, 9 e 10 para todo o histórico analisado. Assim como feito na análise de ocorrências de frentes frias, para os diagramas também foi realizada a rotação das componentes das correntes, para capturar da melhor forma o fluxo médio da CB e para que facilitasse a identificação do valor de

intensidade máxima. A rotação, portanto, foi feita para que a componente V ficasse perpendicular a cada seção.

Após a identificação dos pontos de máximo representativos da CB, foi identificada a existência de pontos espúrios: valores que talvez não fossem indicadores da posição da Corrente, mas que eram de maior intensidade do que os da própria CB em outro ponto da seção, comprometendo o objetivo do método. Assim, a fim de melhorar nossa curva representativa da posição da CB, foi utilizado um filtro digital do tipo *butterworth low-pass*, passa-baixa⁸ (fig. 17), com período de corte de 20 dias: todas as oscilações que apresentassem tempo necessário para completar 1 ciclo em menos de 20 dias foram atenuadas, de forma que nossa curva final ficasse sem ruídos. Ou seja, os harmônicos de frequências maiores que 1/20 rotações por dia foram retirados. A escolha pelos 20 dias de período de corte se deu pela análise visual, comparando-se o resultado com os resultados gerados a partir de filtros com outros períodos de corte - 10, 15 e 30 dias - , além do conhecimento da frequência comum de formação de vórtices e meandros da CB. Já a ordem escolhida para o filtro foi de $n = 15$. Essa foi escolhida visualmente, pela figura 17, utilizando-se o filtro de maior ordem que não apresentasse o efeito do fenômeno de Gibbs. O resultado final, plotado sobre o hovmoller, pode ser visto na figura 18.

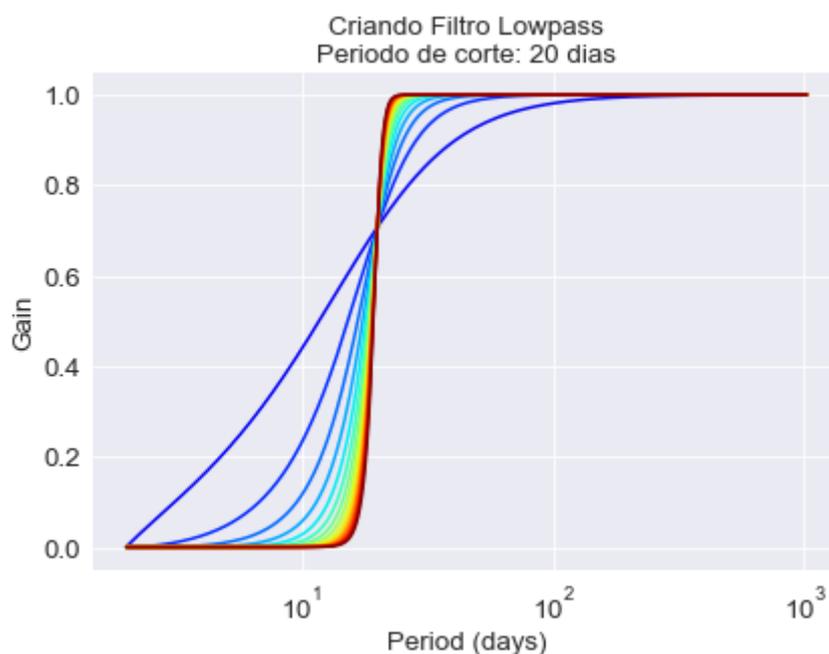


Figura 17 - Construção do filtro digital do tipo *butterworth lowpass* utilizado para identificação da posição da Corrente do Brasil nas seções. A convolução do filtro com o sinal da posição da CB possibilita a atenuação das oscilações cujo período é menor que 20 dias.

⁸ Demonstração filtro *butterworth* e observação no sinal e em seu espectro de frequências: [Demonstracao_Sinais-Espectro.mp4](#)

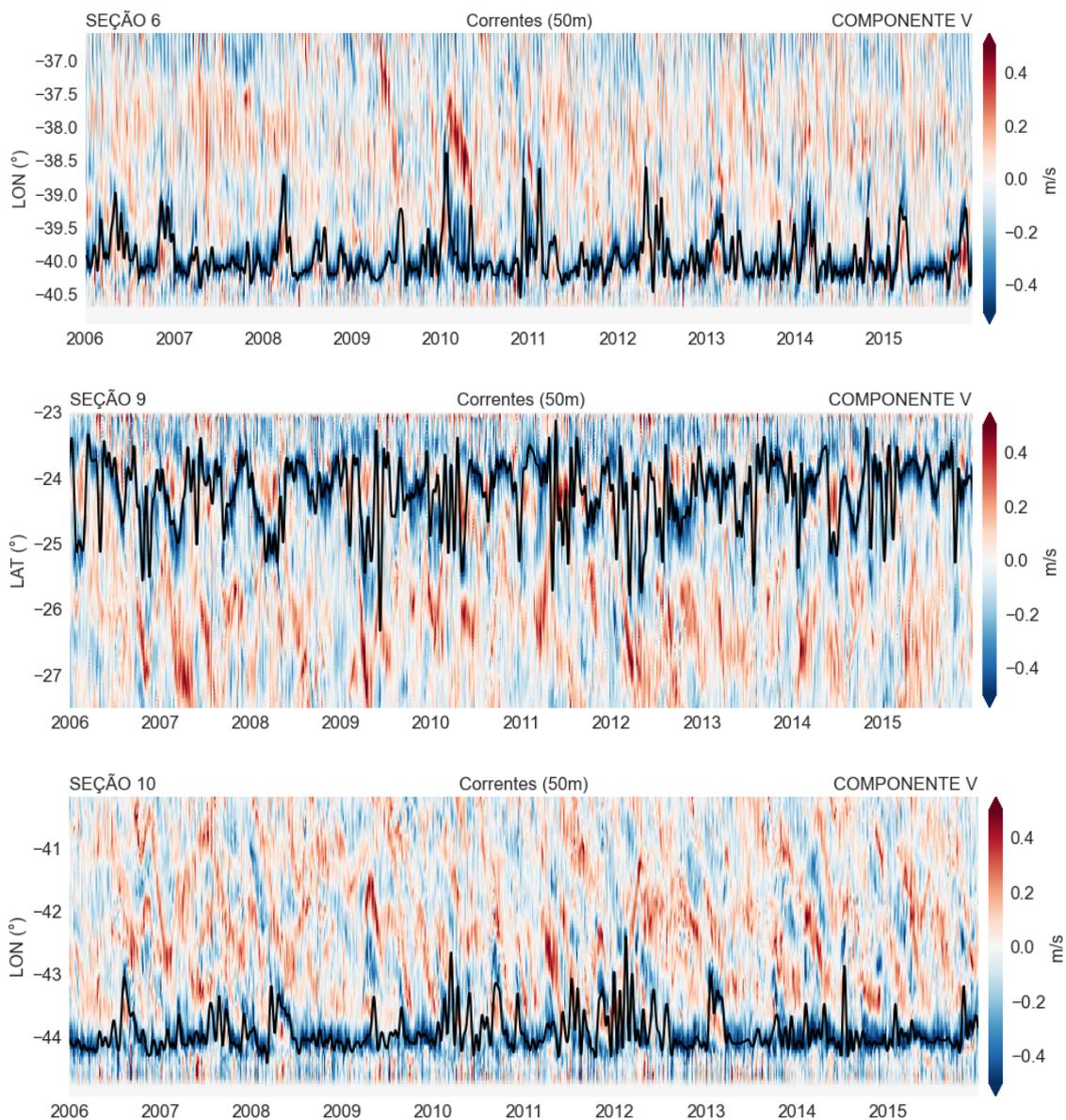


Figura 18 - Diagrama Hovmöller com sinal da posição da Corrente do Brasil filtrado destacado em preto.

3.4.4 - Distância para a costa e desvio padrão da Corrente do Brasil

Devido às variações de mesoescala da CB, mostrou-se mais interessante realizar a interpretação dos resultados da identificação da posição CB com base na distância para o continente. Foi realizada, então, a conversão de latitude e longitude para distância para a costa, em quilômetros. Inicialmente, a curva e o hovmöller estavam em tempo por latitude ou longitude. Entretanto, como algumas das seções são inclinadas e a

medida entre dois pontos de longitude diminui com o aumento da latitude, por causa da esfericidade da Terra, essa conversão foi necessária para a maior precisão da análise. Essa conversão também é importante para que seja possível dizer o quão distante as partículas lançadas nos experimentos chegariam, já que elas deverão ser muito influenciadas pelo transporte da CB.

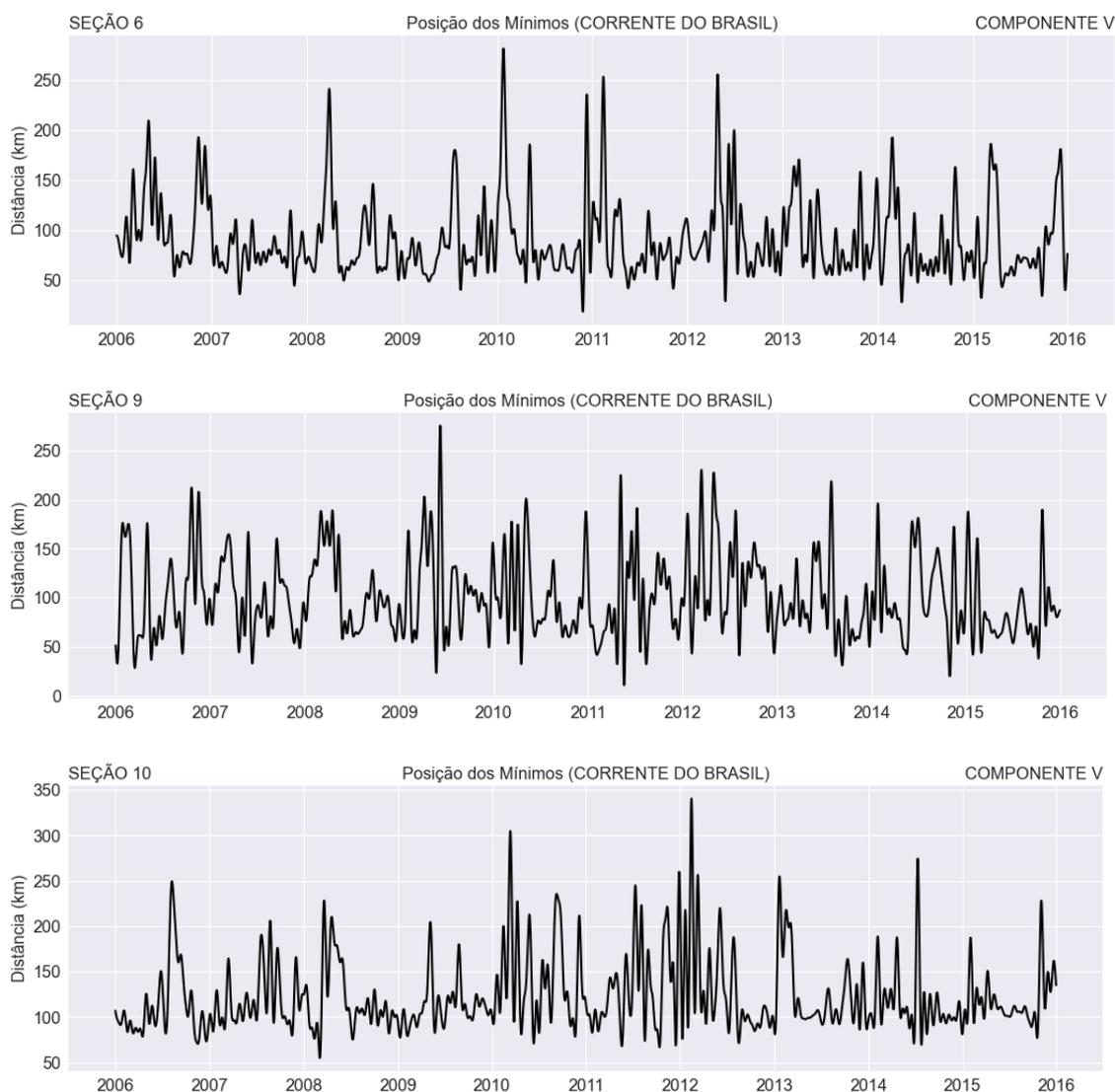


Figura 19 - Sinal da posição da Corrente do Brasil filtrado em unidades de quilômetros: distância da CB para a costa.

A partir das novas curvas, apresentadas na figura 19, foi realizado o cálculo do desvio padrão e média da distância da CB para a costa em cada ano (fig. 25, 26). Esse resultado foi um dos melhores indicadores para a discussão da dispersão das partículas, apresentada posteriormente no capítulo 5, pois responde, numericamente, uma das

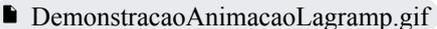
perguntas que motiva este trabalho: o quanto a posição da Corrente do Brasil difere entre cada ano, e o quanto ela saiu da sua posição climatológica.

3.4.5 - Simulações lagrangeanas

Para concluir a metodologia deste trabalho, foram realizados os experimentos com o modelo Lagramp. Após a análise das componentes oceânica e atmosférica da área de estudo, mostrou-se necessária a realização de alguns experimentos com o modelo de dispersão de partículas, a fim de comprovar a análise, apresentada posteriormente no capítulo 4, e as hipóteses, discutidas posteriormente no capítulo 5.

Para melhor compreensão do funcionamento e das configurações técnicas do Lagramp, alguns testes foram realizados com diferentes intervalos de lançamento e tempos de integração. Em seguida, foram geradas animações para facilitar a percepção do transporte das partículas⁹, que virão a ser discutidas no capítulo 5. Logo, para ajudar a responder a pergunta que motiva esta monografia, foi necessário o cálculo da pluma de probabilidade: em quantas simulações, dentro do período de um ano, a partícula p_n passou pelo ponto (x, y) . Por exemplo, se para 100 simulações realizadas ao longo de um ano, a partícula p_1 passa pelo ponto de grade $X^\circ W - Y^\circ S$ em 50 dessas simulações, logo, nesse ano, a probabilidade da partícula chegar nesse ponto é de 50%. A figura 20 mostra, como exemplo, como se dá essa configuração de “0 ou 1” referente a cada simulação.

Com esse objetivo, os experimentos se basearam na realização de 19 simulações para cada ano escolhido, integrando os dados de corrente e vento por 90 dias, e limitando o tempo de integração de cada partícula em 60 dias. A quantidade total de elementos lançados por simulação foi de 10 por dia, durante 30 dias, totalizando 300 partículas no mar por simulação. Por fim, cada rodada foi inicializada 15 dias após a anterior, começando do primeiro dia do ano, na simulação 1, e do 270º na última. Para 1 ano completo, foram lançadas 5700 partículas no mar, e a localização escolhida para os lançamentos foi 22°S - 44°W, na Baía de Campos, para que elas passassem pelas regiões do Cabo de São Tomé, Cabo Frio e Baía de Santos. Esta configuração está

⁹ Animação do transporte de partículas para uma simulação: 

apresentada, de forma resumida, na tabela 1. A escolha dos anos para a realização dos experimentos foi feita com base na discussão da seção 5.1.

Simulações por experimento/ano	Partículas lançadas por dia	Dias de integração com lançamento	Partículas lançadas por simulação	Dias de integração por simulação	Intervalo de dias entre simulações	Intervalo de dias para lançamentos	Dias de integração de cada partícula	Localização dos lançamentos
19	10	30	300 (30 · 10)	90	15	1	60	22°S - 44°W

Tabela 1: Principais características dos experimentos realizados com o modelo Lagramp.

Após a observação do transporte das partículas, ficou clara a influência da posição da CB e dos ventos. Dessa forma, ao final do trabalho, foi possível realizar a discussão do que esperava-se ver a partir dos resultados obtidos, e o que se confirmou, com as plumas de probabilidade, ambos no capítulo 5.



Figura 20 - Metodologia para cálculo da pluma de probabilidade com 19 simulações.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Antes da realização das simulações com o modelo lagrangeano, são apresentados os resultados adquiridos a partir das séries representativas finais de vento e corrente. Como métodos finais, mencionados no capítulo anterior, foram extraídos valores de: 1, ocorrências de frentes frias e, particularmente, de frentes frias intensas; 2, registro de dias de ventos do quadrante Norte-Leste e do quadrante Leste-Sul; 3, desvio padrão anual e distância média para a costa da CB nas três seções.

4.1 - Ventos - Variabilidade Interanual

Começando a análise dos resultados ambientais pela contabilidade de frentes frias, pode-se observar pela linha preta da figura 21, que durante o histórico estudado a média de ocorrências foi em torno de 52 frentes por ano. Considerando o espectro da figura 9, esse resultado é corroborado pela presença do segundo e terceiro harmônicos com períodos de 10 e 7 dias, se aproximando da frequência média de frentes por ano. Todavia, é perceptível a variabilidade interanual, principalmente nos anos consecutivos 2012, 2013 e 2014. Enquanto 2012 e 2014 registraram 6 e 5 frentes a menos que a média do histórico, 2013 registrou 7 frentes a mais, calculando-se assim uma diferença de 13 frentes de 2013 para 2012 e 12 frentes de 2013 para 2014.

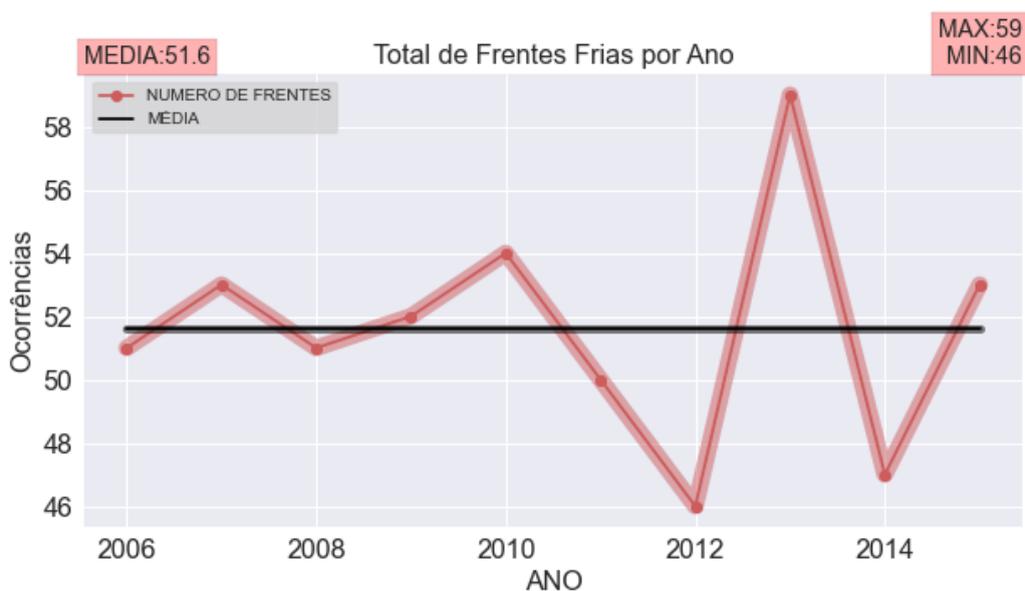


Figura 21 - Variabilidade interanual de frentes frias ao sudeste do Brasil.

Quando analisadas apenas as frentes intensas, segundo metodologia descrita na seção 3.4.1, também é perceptível a variabilidade interanual (fig. 22). É observado, ademais, uma diferença ainda maior entre os anos. Enquanto a média do período foi próxima de 29 frentes frias intensas por ano, 2012 e 2014 registraram apenas 19 e 20, respectivamente, ao passo que 2013 registrou 34.

Mais uma informação que podemos extrair do resultado de frentes frias intensas é a maior variância. Pode-se observar que, na figura 21 de ocorrências de frentes frias totais, de 2006 a 2011 e em 2015 não existe grande desvio padrão, no máximo 2 frentes a mais em 2010. Já na curva de frentes intensas da figura 22, a anomalia, ou desvio, é maior do que 5 em metade do histórico: 2007,2010,2012,2013,2014, possibilitando a consideração também de 2007 e 2010 como anos anômalos interessantes para o estudo.

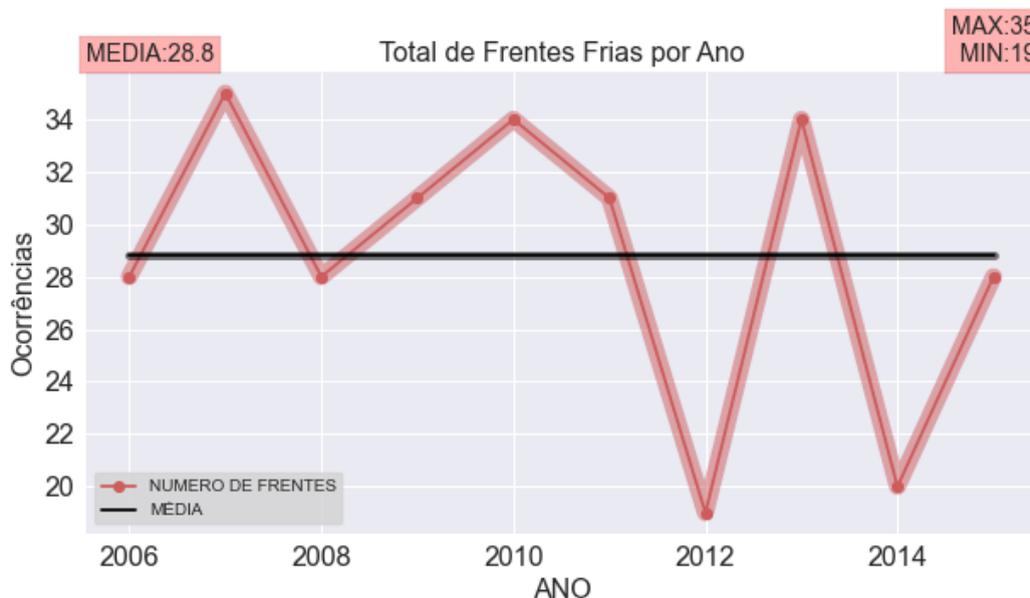


Figura 22 - Variabilidade interanual de frentes frias INTENSAS (maiores que 5 m/s) ao sudeste do Brasil.

Dando continuidade à análise dos resultados pela metodologia da rosa dos ventos, descrita na seção 3.4.2, observa-se pela figura 24 uma média de 145 dias de ventos do quadrante Leste-Sul, e 146 do quadrante Norte-Leste, pela figura 23. Ventos de Leste-Sul podem ser responsáveis pelo transporte de partículas para o litoral do Sul e Sudeste do Brasil, enquanto os de Norte-Leste contribuem para o alcance ao litoral da região Sul em latitudes mais altas.

Quanto à variabilidade interanual, observam-se valores maiores que 10 dias de desvio padrão e, em alguns casos, maiores que 20 dias, como em 2008 e 2014 na curva de N-L. Esses anos, por sua vez, registraram 118 e 168 dias com ventos do quadrante N-L, respectivamente, indicando uma diferença de quase 50% entre si.

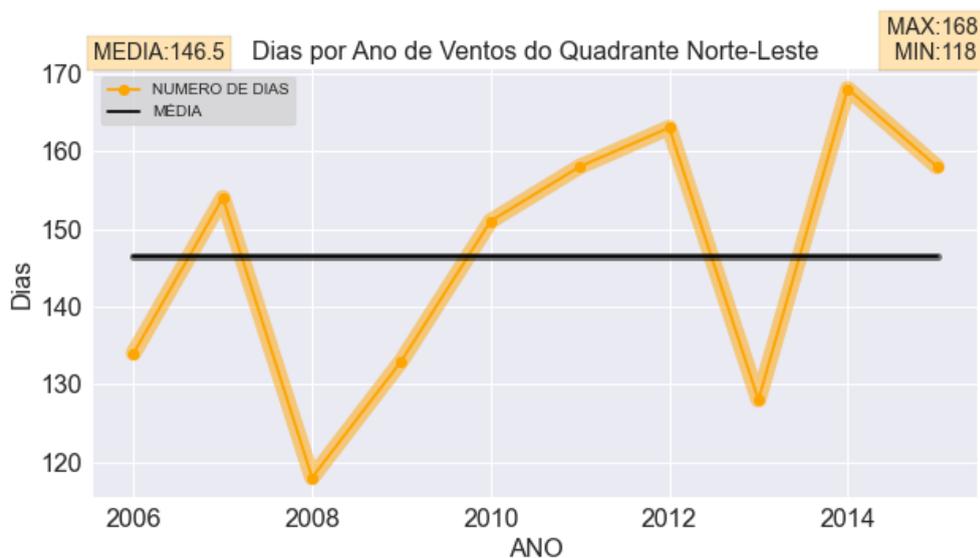


Figura 23 - Variabilidade interanual de ventos do quadrante Norte-Leste ao sudeste do Brasil.

Já na curva de L-S, é possível identificar o complemento à curva anterior. Nesta, 2008 foi o ano que apresentou o segundo maior registro de dias de ventos de L-S, 165, enquanto 2014 foi o segundo com menos dias, 137. Disso pode-se entender que a alta pressão migratória e o ASAS atuaram em latitudes mais altas em 2008 e mais baixas em 2014, mais próximas ao equador, visto que os ventos dos núcleos de alta pressão giram no sentido anti-horário (no hemisfério sul). Além disso, observa-se também um desvio significativo em 2013 e 2012 (fig. 23), que, assim como em 2014, está relacionado às ocorrências de frentes desses anos. Por fim, podemos verificar que na curva de L-S, 2007 e 2009 são os anos mais anômalos no que diz respeito a esse quadrante da rosa: enquanto 2007 registrou apenas 122 dias, 2009 registrou 165 dias, 35% a mais.



Figura 24 - Variabilidade interanual de ventos do quadrante Leste-Sul ao sudeste do Brasil.

4.2 - Correntes - Variabilidade Interanual

Sobre os resultados da variabilidade interanual da componente oceânica, foram obtidos o desvio padrão da distância da CB para a costa, assim como a distância média para a costa, nas três seções utilizadas. Ou seja, em cada ano foi registrada a posição média da CB, em unidades de quilômetros de distância para o continente, bem como o quanto ela variou contra essa média.

Pode-se observar pela figura 25 que a seção 6, responsável pela captura do Vórtice do Cabo de São Tomé, foi, em anos diferentes, a que mais e menos variou sua posição: enquanto em 2007 o desvio padrão dela foi de aproximadamente 15 km, em 2010 alcançou 50 km, o segundo maior desvio de todo o histórico entre as três seções. Ao mesmo tempo, ainda sobre a seção da Bacia de Campos, essa foi a que apresentou menor distância média para a costa em quase todos os anos, possibilitando a conclusão de que essa é a bacia mais significativa na análise da variabilidade da posição da CB - pois apresenta a menor posição média, mas um relevante desvio padrão.

Sobre a seção 9, a primeira da Bacia de Santos e a responsável pela captura do Vórtice de Cabo Frio, vê-se pela figura 25 que ela é a que apresenta a variabilidade mais comum. Isto é, embora ela tenha uma variação perceptível, como se destaca já na figura 18, essa variação é intraanual e recorrente ao longo dos anos, sendo, logo, melhor identificada que nas outras seções. Todavia, como a motivação se dá pela variabilidade interanual, a seção 9 não ganha tanto destaque, além dos seus anos de máximo e mínimo desvio padrão: 2006 e 2015, com 48 e 32 km, respectivamente. Por outro lado, analisando a posição média da CB pela figura 26, já se observa uma mudança mais interessante, principalmente após 2010: em 2011, a CB esteve, em média, 95 km distante da costa, enquanto em 2012 ela chegou a 120 km, e em 2015 alcançou a distância média mínima, de 85 km.

A partir dos resultados da seção 10, localizada na porção central da Bacia de Santos (fig. 8), observa-se, primeiramente, a maior distância média para a costa, pela figura 26. Nessa região, a Corrente chega a registrar uma distância média de 145 km, e o seu mínimo, 110 km em 2009, só perde para a máxima distância média da seção 9, em 2012. Isso mostra que, conforme a CB se aproxima e percorre Santos, ela tende a se distanciar do continente. Além disso, a posição da CB na seção 10 também se destaca na análise do desvio padrão, por apresentar o maior do histórico entre as três seções: 52

km em 2012. É interessante notar, além disso, que o ano menos anômalo foi o mesmo de menor distância média, 2012, com menos de 25 km de desvio padrão.

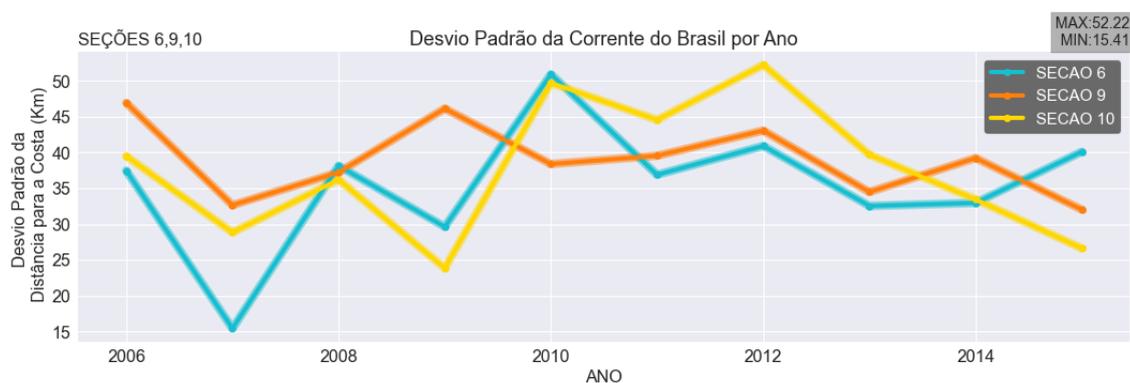


Figura 25 - Desvio padrão interanual da posição da Corrente do Brasil em quilômetros, em Cabo de São Tomé (6) , Cabo Frio (9) e Bacia de Santos (10).

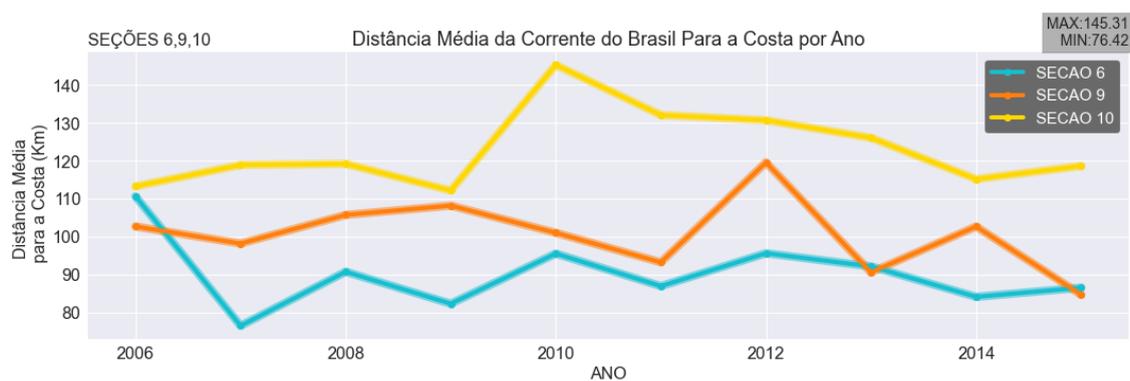


Figura 26 - Distância média da posição da Corrente do Brasil em quilômetros, em Cabo de São Tomé (6) , Cabo Frio (9) e Bacia de Santos (10).

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO

5.1 - Interpretação dos dados ambientais

Com base nos resultados de variabilidade interanual, podemos tirar conclusões sobre o que esperamos ver nos resultados gerados posteriormente pelo MDP. Ou seja, para a primeira parte da discussão, o foco é dado à física do oceano e da atmosfera na área de estudo em todos os anos analisados.

Pela ordem cronológica, começaremos pelo ano de 2006. Para este ano, vemos pela figura 26 que a distância da CB para a costa teve destaque na Bacia de Campos e também demonstrou relevante variabilidade da sua posição durante o ano na Bacia Santos. Com relação aos ventos, não observamos muitas diferenças para a média além de alguns dias a mais de transporte direcionado para a costa (fig. 24). Para nosso primeiro ano, então, deveremos ver um efeito interessante pela componente oceânica, de espalhamento nas duas bacias e alcançando maiores distâncias para a costa em Campos. Dessa forma, uma simulação nessa bacia poderia nos retornar uma pluma que alcance longitudes mais internas do Oceano Atlântico.

No segundo ano analisado, o ano de 2007, contabilizamos muitos eventos de frentes intensas (fig. 22), mas, ao mesmo tempo, os ventos de Norte-Leste foram mais presentes que a média neste ano (fig. 23), indicando a influência do ASAS por mais dias. Por esse lado, poderemos esperar que teremos mais transporte para sudoeste ao longo do ano, contudo, com a passagem de sistemas transientes muito intensos, o óleo poderá ter chances de chegar à costa por esses eventos isolados. Com relação à CB, podemos ver pela figura 25 que temos uma variabilidade observada pouco significativa nas três seções de estudo, sendo a menor na seção da Bacia de Campos. Isso nos diz que, em 2007, não foi observado muito meandramento e formação de vórtices pela Corrente, principalmente na Bacia de Campos. Com isso, espera-se ver, então, pouca variação do transporte de partículas causado pelas correntes em relação a outros anos. As partículas deverão ir com mais certeza para sudoeste, na trajetória próxima da climatologia da CB, e sofrer alguma mudança em decorrência dos sistemas atmosféricos intensos registrados. 2007 pode ser um dos anos com menor variação no transporte de partículas ao longo do ano.

Seguindo a discussão para o ano de 2008, podemos observar pela figura 25 que a CB apresentou variabilidade mediana nas três seções, e pela figura 21 que os registros

de eventos de frentes frias mantiveram um total muito próximo à média dos 10 anos. Entretanto, esse ano foi o que registrou menor número de dias com ventos vindos do quadrante Norte-Leste (fig. 23), indicando uma menor influência do ASAS e uma maior influência da alta migratória. A partir disso, espera-se que teríamos pouco transporte de partículas para o sudoeste ao longo do ano pelos ventos. Além disso, o segundo maior registro de ventos do quadrante Sul-Leste (fig. 24) deverá contribuir para transporte para que as partículas cheguem à costa. Não veríamos algo muito distante da média em 2008.

Sobre o ano de 2009, esse se destaca por ser o ano com mais ventos direcionados para o continente (fig. 24). Mas além da componente atmosférica, a Corrente na seção de Cabo Frio também pode ser importante para a dispersão de partículas, por ter apresentado considerável variabilidade sendo o segundo ano mais anômalo nesta região. Por outro lado, no mesmo ano observou-se a menor variação da CB na seção 10, localizada na mesma bacia sedimentar, a Bacia de Santos (fig. 25). Portanto, uma rodada do MDP com os dados de vento e corrente de 2009 poderá nos retornar chances importantes de alcance das partículas a costa, e, ainda, uma dispersão interessante na região do Vórtice de Cabo Frio ([MANO, 2007](#)).

No quinto ano do histórico de dados, 2010, deveremos ver um dos maiores espalhamentos das partículas: além de ser o segundo ano com mais eventos de frentes, principalmente de frentes intensas (fig. 21, 22), foi observado o ápice de variabilidade oceânica na seção da Bacia de Campos, identificando assim a maior diferença entre variabilidade de anos das seções (2010 menos 2007), e também a segunda maior variação na seção 10, a segunda da Bacia de Santos (fig. 25). Para essa última, também foi observado a maior distância média para a costa entre todos os anos e todas as seções (fig. 26). Dessa forma, pode-se esperar que, com os experimentos de modelagem de dispersão no ano de 2010, as partículas sofrerão muita influência de eventos de frente fria, com ventos que empurram as partículas e as correntes superficiais para o sentido contrário ao climatológico, causando muita perturbação na Bacia de Campos e Santos (principalmente porção central). Por outro lado, podemos esperar também o maior alcance zonal nesta última, pelo resultado da distância média da CB. Como experimentos, um lançamento no ponto de estudo dos ventos e outro na porção sul da Bacia de Campos podem ser interessantes se comparados com o ano de 2014, que registrou pouquíssimas frentes e pouca variabilidade da CB, ou com o ano de 2009, que teve baixa variabilidade da CB na Bacia de Santos central. Considerando-se apenas o

efeito das correntes, comparar o lançamento em Campos com o ano de 2007, o de menor variação da CB nessa região, também poderá trazer um resultado com diferenças relevantes. E pela semelhança na variabilidade oceânica, comparar 2010 com 2014 e depois 2013 pode ser, também, uma alternativa interessante para identificar a influência das frentes, mais frequentes em 2013 do que em 2014.

Para o ano de 2011, observamos que a variabilidade da posição da CB foi numericamente próxima ao ano de 2010 na Baía de Santos (o desvio padrão do ano foi próximo ao do anterior, assim como a distância média para a costa, fig. 25, 26) e, com relação a atmosfera, foi o segundo ano com mais ventos do quadrante Norte-Leste (fig. 23). Isso pode nos indicar que tínhamos mais transporte de partículas para sudoeste, considerando também a ocorrência de frentes abaixo da média (fig. 21), e, ao mesmo tempo, uma dispersão provocada pelo meandramento da Corrente principalmente em Santos.

Continuando para 2012, este foi ano com a menor ocorrência de frentes frias de todo o histórico de dados, e muito próximo numericamente a 2014 (fig. 21, 22). Pela direção dos ventos predominantemente de Norte-Leste (fig. 23, 24) e ocorrência de frentes frias em baixa, espera-se que 2012 seja um ano de muito transporte para sudoeste e muito semelhante a 2014, considerando apenas a componente atmosférica. Já pela componente oceânica, 2012 é importante principalmente na Baía de Santos, que registrou a maior variação da CB do histórico na seção da porção central e também a maior distância média para a costa na seção de Cabo Frio. Dessa forma, acredita-se que as partículas teriam espalhamento relevante na Baía de Santos e longe da costa, devido ao alcance da CB nessa região nesse ano (fig. 25), além do transporte bem direcionado para sudoeste em decorrência da predominância maior da ASAS (fig. 23, 24). Para essa avaliação, um lançamento de partículas na Baía de Santos pode ser interessante, principalmente se comparado com 2014, que foi um ano muito parecido na análise atmosférica mas muito diferente na oceânica.

Enquanto 2012 e 2014 foram os anos mínimos de ocorrência de frentes frias na área de estudo, 2013 foi o ano recorde (fig. 21), distanciando-se bastante da média do histórico e também registrando poucos ventos de Norte-Leste (fig. 23). Logo, acredita-se que tínhamos muito transporte em direção ao continente considerando a influência do vento, principalmente pela passagem de sistemas transientes. Já com relação a componente oceânica, não observamos ápice de variabilidade, o que contribuiria para um “espalhamento máximo”, mas apresentou alguma variação

considerável se comparado com 2007 e 2009, anos de menor variabilidade nas seções 6 e 10 (fig. 25). Pode-se dizer que teríamos mudanças causadas pelo vento se compararmos o resultado do MDP em 2013 com 2012 e 2014, ou, ainda, com 2007, que também sentirá uma diferença pela variabilidade oceânica principalmente em Campos.

Pelo fato de que 2014 e 2012 foram anos muito semelhantes na análise atmosférica, comparar uma MDP entre eles pode ser um dos caminhos mais interessantes. Ambos são anos de pouquíssimos eventos de frente fria e ventos direcionados para a costa brasileira (fig. 21-24), porém eles diferem significativamente na componente oceânica: enquanto 2012 registrou o ápice de variação na seção da Baía de Santos central, 2014 registrou variação próxima ou abaixo da média em todas as seções (fig. 25). Por isso, poderemos ver com certa clareza a diferença no transporte de partículas provocado pelas correntes sem a retirada do efeito do vento. Espera-se que as partículas não sofram espalhamento significativo diretamente pelo vento se comparado com anos de muitas frentes como 2013, 2010, 2007, e, ao mesmo tempo, relativamente pouca dispersão causada por meandros e vórtices da CB.

Por fim, o ano de 2015. O último ano analisado foi um dos anos que mais se aproximou da média se somarmos a influência das frentes com a variabilidade da CB (fig. 21, 25), e registrou um pouco mais de ventos do quadrante Norte-Leste (fig. 23). Provavelmente, o registro dos ventos desse quadrante indica a baixa variabilidade neste ano, por ser o padrão comum da ASAS. Todavia, 2015 chama atenção na diferença da distância média da CB para a costa, que apresentou valores baixos em Campos e Cabo Frio e um valor alto para Santos central (fig. 26). Por essa combinação, pode-se esperar que o transporte de partículas em Santos em 2015 tenha pouca diferença para a dispersão média, e um alcance zonal e meridional para sudoeste um pouco maior se comparado com outros anos, devido a baixa variabilidade da CB e pouca passagem de frentes.

5.2 - Modelagem de dispersão de partículas

A fim de concluir a discussão sobre a variabilidade interanual, é necessário a interpretação dos resultados das plumas lagrangeanas. Como mencionado na seção 3.4.5, os resultados foram gerados a partir do modelo Lagramp, com as especificações

dos experimentos mencionadas naquela, com as componentes oceânicas advindas do LSE24 e as forçantes atmosféricas do MERRA2.

A escolha final dos anos para comparação foi feita com base na discussão do subcapítulo anterior, por serem os anos com maiores chances de apresentarem discrepâncias. São elas:

- **2010** contra **2014**, **2009** e **2013**;
- **2012** contra **2014**;
- **2013** contra **2012** e **2014**.

Com relação a primeira comparação e com base na figura 30, pode-se perceber as diferenças entre a dispersão zonal em torno de 27°S a 23°S e o alcance à costa, principalmente do Rio de Janeiro (RJ). Como previsto, a modelagem de dispersão de partículas em **2010** sofreu importante influência da posição média e variação de mesoescala da CB, além dos eventos de frente fria, principalmente das intensas (fig. 22), acima da média. Em **2014**, **2009** e **2013**, é possível ver que a pluma apresenta um alcance meridional maior na Baía de Santos, em 42°O, porém, o transporte é mais bem definido acompanhando a posição climatológica da CB, para sudoeste (FIGURA XMEDIACBHYCOM). Por esse motivo, pode-se observar em todas as três plumas da figura 27 que há maiores probabilidades de chegada de substâncias em latitudes de 30°S a 34°S nos anos de **2014**, **2009** e **2013**, enquanto que em **2010** a pluma teve alcance maior em direção à costa e a longitudes à leste e sudeste, para o interior do oceano. Deve-se ressaltar que, mesmo **2009** tendo sido o ano com mais ventos do quadrante Leste-Sul (fig. 24), esse não foi um fator tão relevante para impulsionar partículas para a costa. Isso pode ser explicado, porque os ventos da passagem da alta migratória nesse quadrante podem ser não tão intensos quanto os que vêm de sudoeste, no início da passagem de sistemas frontais, acelerados pela baixa pressão. Da mesma forma, devido ao baixo número de dias de ventos de Norte-Leste, o alcance ao litoral sul de SP e região Sul foi menor em **2009** do que em **2010**. Dessa forma, conclui-se que **2010** foi um ano de maiores riscos ambientais pela ocorrência acima da média de frentes frias (principalmente intensas, fig. 22), contribuindo para uma diferença até 30% maior de chegada de partículas no litoral do RJ se comparado com **2009** e **2014** (fig. 27). Todavia, não foi observada a mesma diferença no alcance nesse litoral se comparado a **2013**, ano com o maior número de frentes. Além disso, devido a pouca variação da CB principalmente na Baía de Santos, em **2014** foi observada probabilidade até 30% maior

de alcance ao litoral do estado de São Paulo e região Sul do Brasil. Com base nisso, nota-se a predominância do sinal positivo (fig. 27) para o interior do oceano em todas as três plumas de diferenças, em decorrência do alto desvio padrão da Corrente em **2010**.

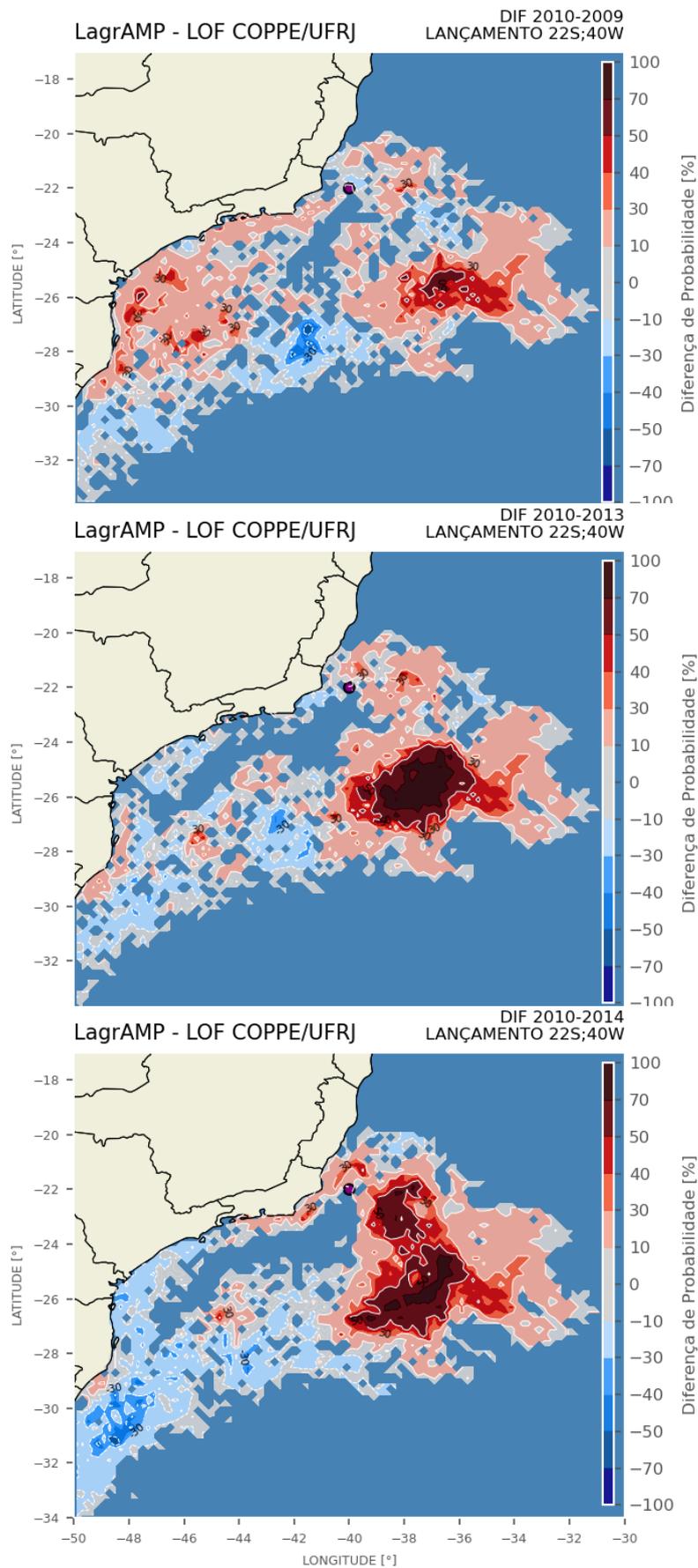


Figura 27 - Comparação dos experimentos para o ano de 2010 contra 2013, 2014 e 2009. O vermelho indica maior alcance em 2010. Plumas de diferença de probabilidade.

Como segunda comparação, foram escolhidos os anos de **2012** e **2014**. Como discutido na seção anterior, esperava-se ver uma relevante diferença por causa, apenas, da componente oceânica, sem a retirada do efeito de advecção direta pelos ventos exigida pelo IBAMA. Pela figura 30, ficou perceptível também nesta comparação o quanto a CB pode transportar mais partículas para sudoeste nos anos em que ela estiver mais próxima da sua posição climatológica. Dessa forma, o resultado da figura 28 apresentou diferenças significativas, maiores que 50%, no litoral norte de SP (Ubatuba, Ilhabela), explicados pela comparação de um ano, **2014**, com pouca variabilidade e distância da CB para a costa, contra um ano de muita variabilidade e distância, **2012** (fig. 25, 26). Também foram verificadas diferenças, pelo mesmo motivo, no alcance ao litoral do Paraná (PR) e Santa Catarina (SC). Pela figura 28, fica claro o sinal positivo proporcionado pela variabilidade de mesoescala da CB em **2012**, circundando as Bacias de Santos e Campos de $28^{\circ}\text{S} - 42^{\circ}\text{W}$ até $20^{\circ}\text{S} - 38^{\circ}$.

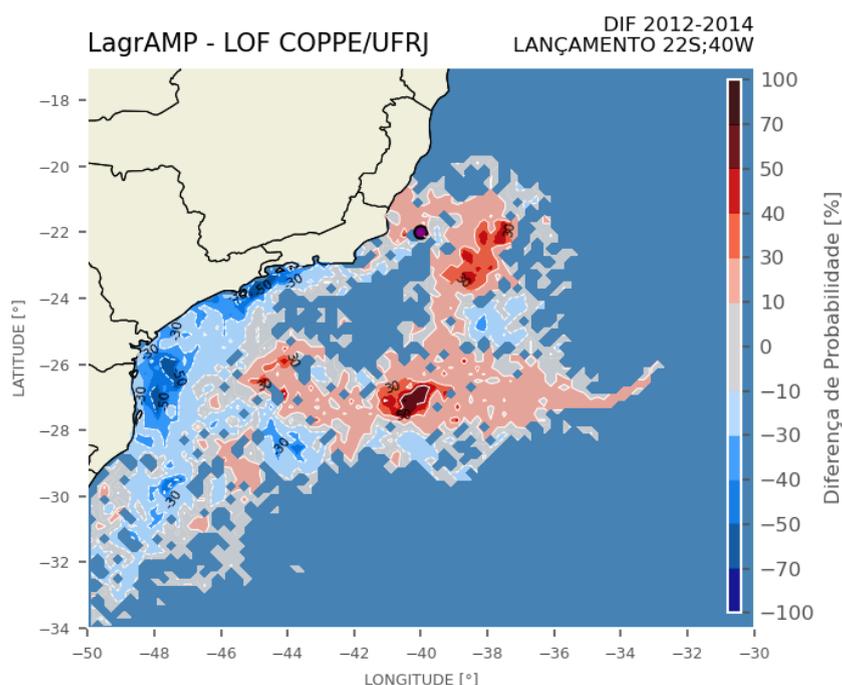


Figura 28 - Comparação dos experimentos para o ano de 2012 contra 2014. O vermelho indica maior alcance em 2012. Plumais de diferença de probabilidade.

A terceira comparação escolhida foi motivada pela grande diferença de ocorrências de eventos de frente fria registradas em **2012** e **2014** contra **2013** (fig. 21, 22). O ano de **2013**, assim como o ano de **2014**, teve pouca variação da CB, e essa semelhança é possível de se identificar pelo alcance da pluma de 90% (fig. 30), a qual bem indica a posição da CB próxima da climatologia. É interessante notar também o

maior alcance em direção zonal (até 34°W) e em direção à costa do RJ em **2013**, permitindo-se inferir a relevância das frentes frias do SAMS para o transporte de partículas. Deve-se reconhecer, também, a importância das componentes que, quando alinhadas, podem potencializar o transporte para alguma direção. Isto é, pela primeira pluma da figura 29, encontra-se o sinal positivo no litoral do RJ (superior a 50%), SP, PR e SC. Isso se deve ao fato de que, pela análise feita nos parágrafos anteriores, o direcionamento de partículas para o litoral do RJ e litoral norte de SP é muito influenciado pelas frentes frias, e o direcionamento para a região Sul do Brasil é muito influenciada por anos de pouca variabilidade da posição da CB. Por esse motivo, o sinal vermelho positivo está presente nesta comparação ao longo de quase toda a costa. Nesse sentido, a mesma inferência se consolida quando se observa a segunda pluma da figura 29, que indica o sinal positivo na costa do RJ, decorrente da diferença interanual de frentes frias. Além disso, as frentes também ajudam a advectar partículas para o oceano a leste do lançamento, como identificado na comparação anterior e também observado pelo sinal positivo da figura 29.

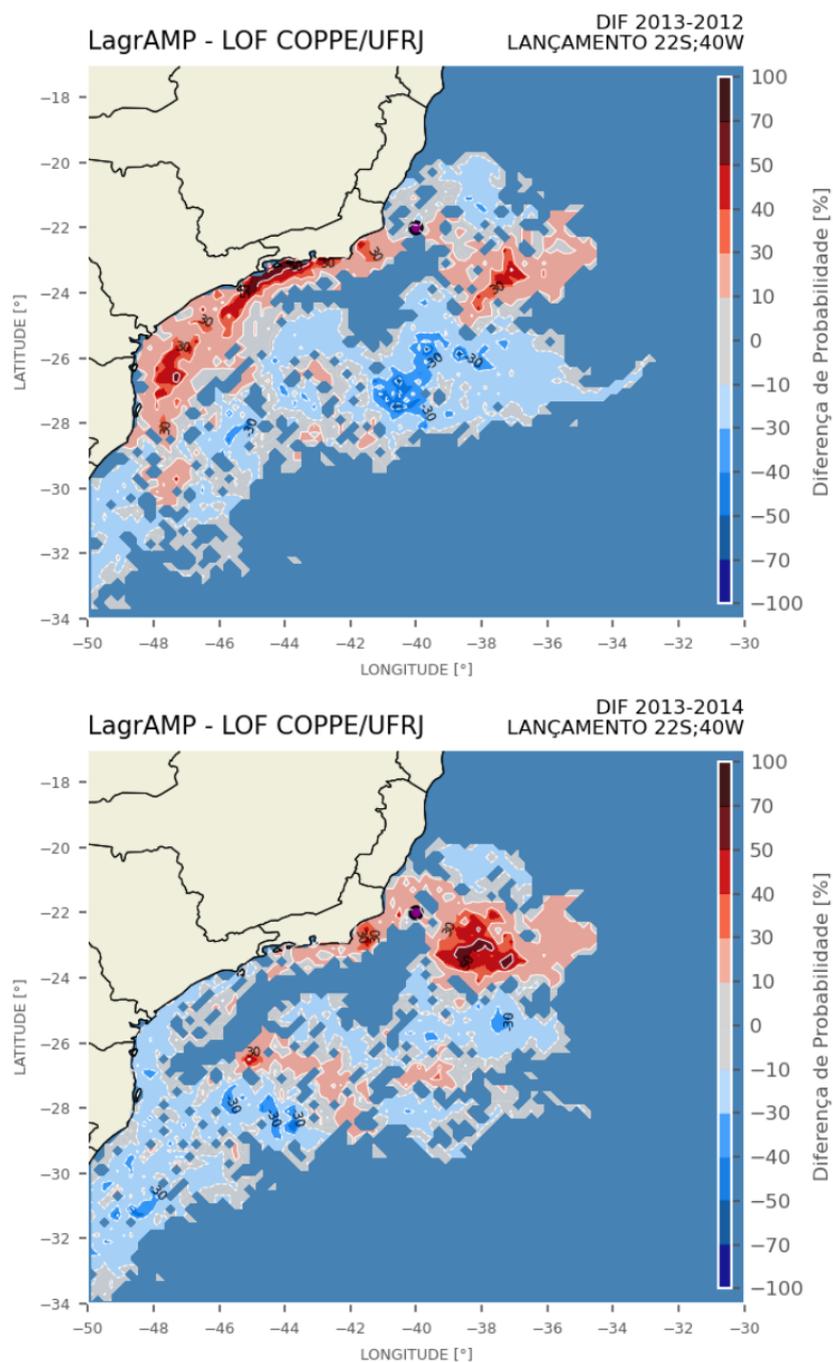


Figura 29 - Comparação dos experimentos para o ano de 2013 contra 2012 e 2014. O vermelho indica maior alcance em 2013. Plumões de diferença de probabilidade.

Concluindo-se as comparações interanuais, é interessante notar as semelhanças e as diferenças entre os anos de **2012**, **2013** e **2014**. Enquanto **2012** registrou poucas frentes frias, como **2014**, ele apresentou grande variação da CB, distante de **2013** e **2014**; Enquanto **2013** registrou muitas frentes, distante de **2012** e **2014**, ele apresentou pequena variabilidade da CB, como em **2014**, ambas as comparações em níveis bem próximos, como visto nas figuras 21 e 25. Dessa forma, torna-se importante a avaliação

dos resultados das diferenças de **2012** contra **2013** também. E, assim, fica possível a observação de consideráveis semelhanças nas duas comparações (fig. 28, 29). Enquanto **2012** teve a maior variância da CB entre esses, é identificado o sinal positivo vermelho de até 50% circundando as Bacias de Santos e Campos; Enquanto **2013** teve a maior ocorrência de frentes frias, há o sinal negativo azul de 50% na costa do RJ; E em **2014**, com pouca variação oceânica e atmosférica, o sinal negativo de 40% é observado no litoral da região Sul e também de SP e Costa Verde, no RJ.

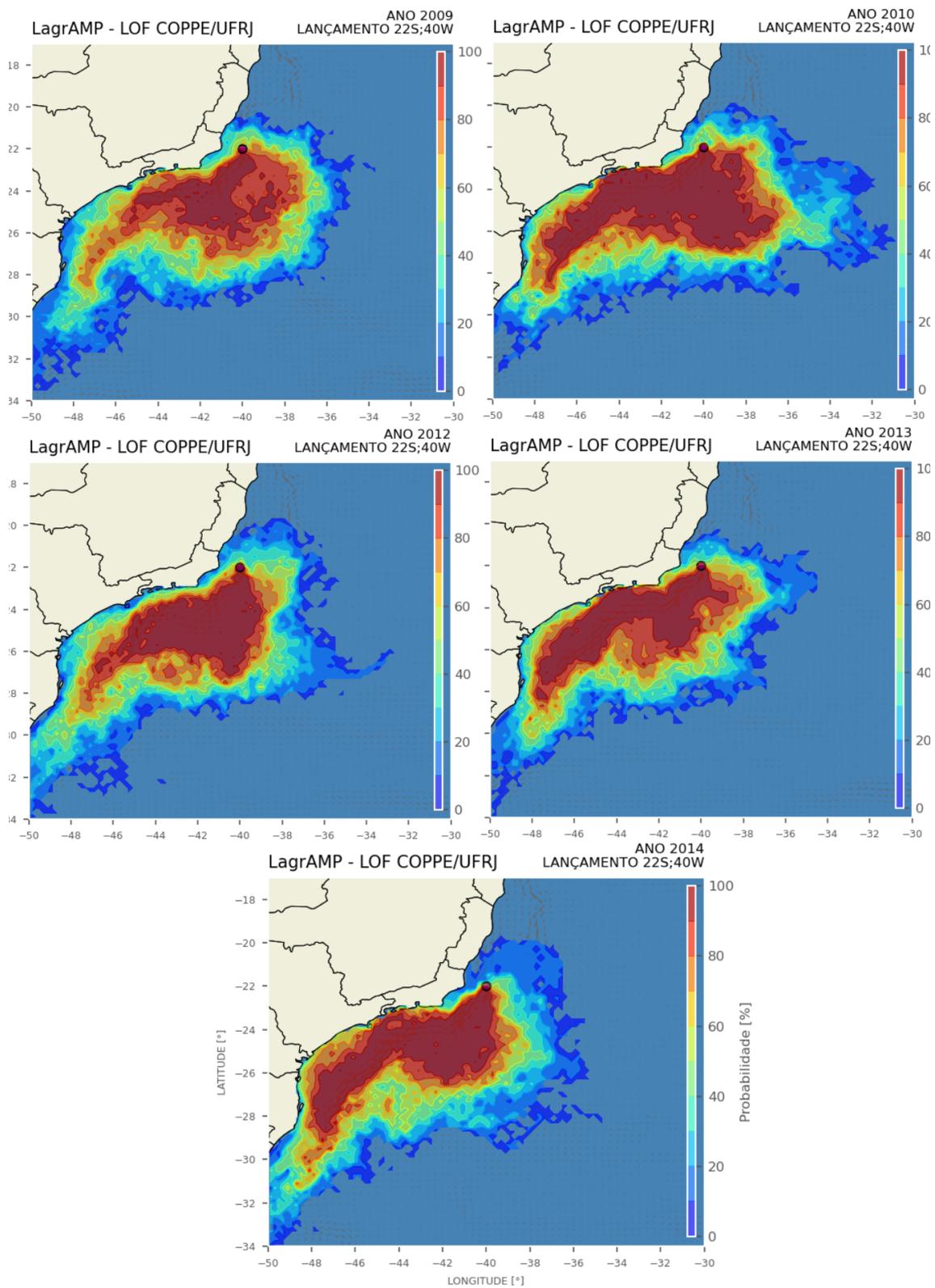


Figura 30 - Resultado dos experimentos para os anos de 2009, 2010, 2012, 2013 e 2014. Plumas de probabilidade.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

Com o objetivo de descobrir o quão relevante é a variabilidade interanual para o transporte de partículas ao sudeste do Brasil, foi realizado o estudo sobre o comportamento do oceano e da atmosfera em superfície, durante o período de 2006 a 2015, gerado pelo modelo HYCOM no LOF. A partir da análise do comportamento da Terra, foram discutidas hipóteses de possíveis aspectos nos diferentes anos que poderiam influenciar a dispersão de elementos no mar. Foram avaliadas, portanto, as principais diferenças estatísticas e espectrais na variabilidade de mesoescala da Corrente do Brasil e dos sistemas de frente fria que atuam na região, a fim entender como essas feições do oceano e da atmosfera podem ser relevantes nos experimentos de modelagem lagrangeana.

Após o estudo das componentes marítimas e atmosféricas, foi utilizado o modelo Lagramp para verificar a relevância da variabilidade interanual analisada, com simulações de lançamentos na porção sul da Bacia de Campos. Verificou-se que a variabilidade de mesoescala da Corrente do Brasil (CB), muito estudada na literatura principalmente pela formação de vórtices na região de estudo, se mostrou um fator determinante para a dispersão de poluentes. Foi observado que, quanto maior a variância da CB em relação a sua posição climatológica, maior é a dispersão de substâncias, para leste e sudeste do lançamento. Dessa forma, anos de muita variabilidade de mesoescala proporcionaram uma diferença superior a 50% na probabilidade de alcance de partículas nessas direções. Por outro lado, foi identificado que anos de pouca variância da CB causaram o alcance a latitudes mais altas à sudoeste do lançamento e ao continente, especificamente região Sul e São Paulo, identificando diferenças superiores a 50% no litoral norte de SP.

Ademais, foi observado que os eventos de frente fria, característicos do Regime de Monções da América do Sul, foram relevantes para o transporte de substâncias para o litoral do Rio de Janeiro e para leste do lançamento. Foram calculadas diferenças superiores a 50% no litoral do Rio, comparando-se anos de muitas e poucas frentes. Em contrapartida, não foi identificada relevância na variabilidade interanual de dias de ventos do quadrante Leste-Sul. Esses poderiam direcionar partículas para o continente, mas não o fizeram em decorrência da menor intensidade. Por outro lado, a influência de ventos do quadrante Norte-Leste, associados ao Anticiclone Subtropical do Atlântico

Sul, se mostrou mais relevante, favorecendo o transporte para o litoral sul de SP e região Sul do Brasil.

Portanto, a variabilidade interanual do oceano e da atmosfera pode influenciar significativamente o transporte de substâncias no mar, sendo uma reflexão importante para realização dos Estudos de Impacto Ambiental. Com o presente trabalho, comprovou-se a necessidade da realização da modelagem de dispersão de óleo que abranja anos de maior variância de mesoescala da CB e maior variabilidade de ocorrência de frentes frias, para que, assim, seja possível entender, prever, prevenir e mitigar da melhor forma os possíveis impactos ambientais associados à dispersão de poluentes no mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DI LIBERTO, Tom. *Hovmöller Diagram: A climate scientist's best friend*. Climate.gov, 2022. Disponível em <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/hovmoller-diagram-climate-scientist-s-best-friend>>. Acesso em: 13 de Julho de 2022.

HOVMÖLLER, Ernest. *The Trough-and-Ridge diagram*. Shorter contribution - Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Estocolmo, 1949. Disponível em: http://www.dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0523/2014_1oS_SIN2/DOL/hovmoller1949.pdf>. Acesso em: 13 de Julho de 2022.

CATALDI, Marcio. *Estudo numérico da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul Extratropical do Pacífico Equatorial no regime hidrometeorológico das regiões Sul e Sudeste do Brasil*. 203 p. cap. 2, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

MANO, Manlio Fernandes. *Assimilação de dados em modelo oceanográfico da bacia sudoeste do Atlântico para reproduzir e prever circulação superficial e feições de meso-escala*. 158 p. cap. 1, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

GABIOUX, Mariela. *Estudo numérico dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil entre 22°S e 30°S*. 138 p. cap. 2-3-6-7, Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

GMAO/NASA - GLOBAL MODELLING ASSIMILATION OFFICE. *MERRA-2*. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>>. Acesso em: 13 de Julho de 2022.

GMAO/NASA - GLOBAL MODELLING ASSIMILATION OFFICE. *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*. Greenbelt: GMAO, 2019. Disponível em: <https://goldsmr4.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opensap/MERRA2/M2I1NXASM.5.12.4>>. Acesso em: 13 de Julho de 2022.

AMARO, Tatiana Rocha. *Análise dos ventos à superfície na América do Sul e adjacências no clima presente e futuro*. 122 p. cap. 2, Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá. 2015.

BAZONI, Luciano Junior. *Influência de ventos, marés e mesoescala sobre os fluxos superficiais entre o talude e plataforma continental SSE do Brasil*. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

SOUTELINO, Rafael Guarino. *A origem da Corrente do Brasil*. 101 p. cap. 1, Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. 2008.

VIANA, Leonardo de Albuquerque Mello. *Um estudo introdutório sobre o efeito ghost: sua origem, seus impactos nas frequências e na resolução sísmica*. 49 p. cap. 3, Monografia (Bacharelado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2020.

KANTHA, L.; CLAYSON, C. A. Ocean Mixed Layer. *Boundary Layers*, Georgia: Elsevier, p. 291–293, 2003.

BLECK, Rainer. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, Novo México: Elsevier, v. 37, p. 55–88, 2002.

MILL, G. N.; COSTA, V. S.; LIMA, N. D.; GABIOUX, M.; GUERRA, L. A. A.; PAIVA, A. M. Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil. *Continental Shelf Research*, Rio de Janeiro: Elsevier, v. 106, p. 27–30, 2015.

PAIVA, A. M.; GABIOUX, M.; SIQUEIRA, B. P.; BUENO, L. F.; BARBERINI, F. D. T.; FREITAS, P. P.; CIRANO, M.; GRIJÓ, A. M.; FERREIRA, T. P.; LARA, A. C. R.; NUNES, F. C.; ZIELINSKY, G. M. *Base Hidrodinâmica Leste Sudeste*. 170 p. Relatório técnico, Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica - REMO, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. *Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos*. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. 496 p.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. *Processamento Digital de Sinais: Projeto e Análise de Sistemas*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 976 p. cap. 1, p. 33

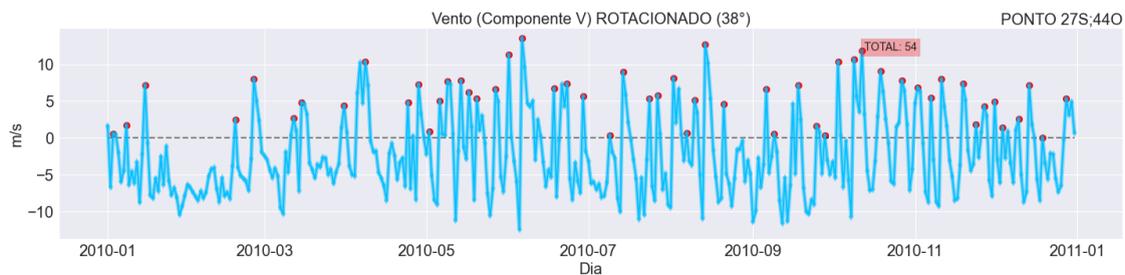
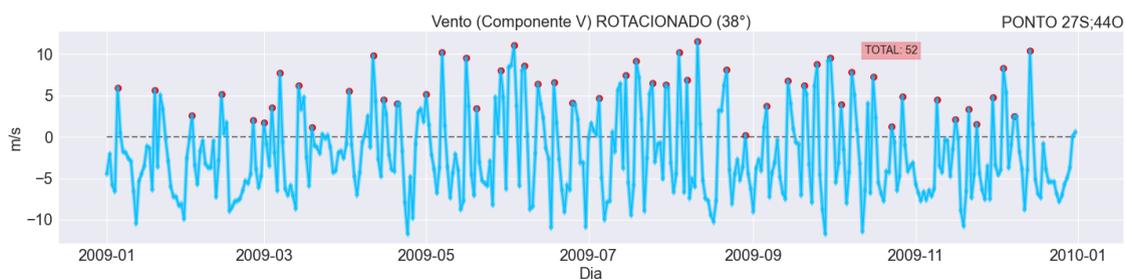
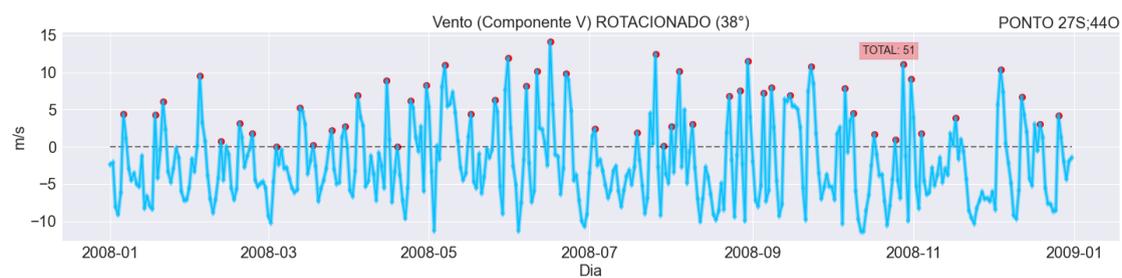
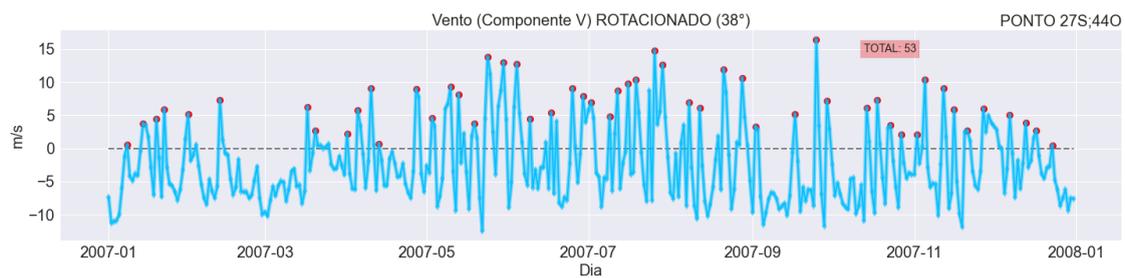
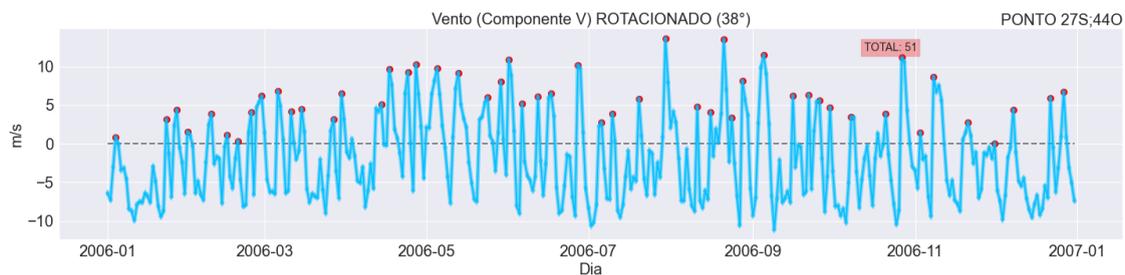
SILVEIRA, I. C. A.; NETO, H. F.; COSTA, T. P. et al. Caracterização da Oceanografia Física do Talude Continental e Região Oceânica da Bacia de Campos. *Meteorologia e Oceanografia*, Rio de Janeiro: Elsevier, v. 2, cap 4, p. 135–138, 2015.

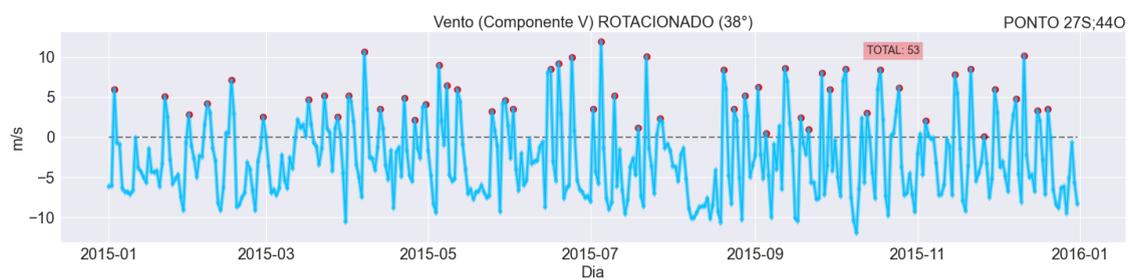
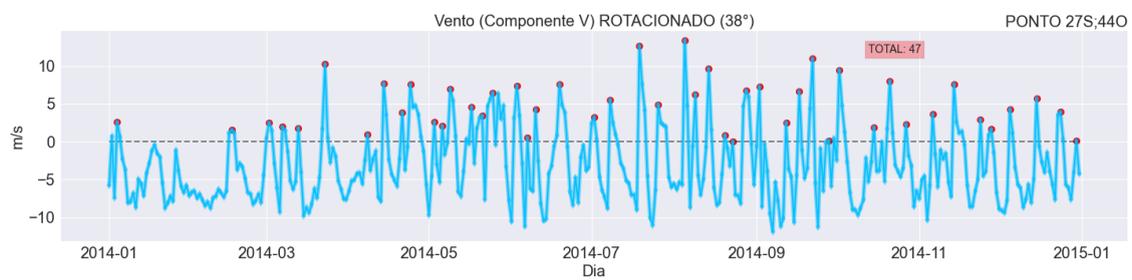
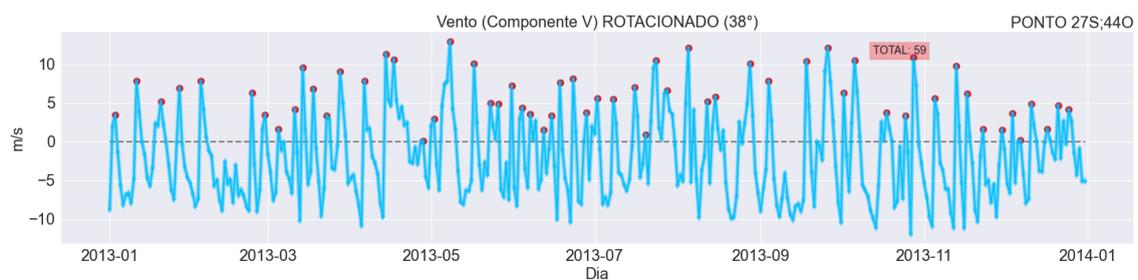
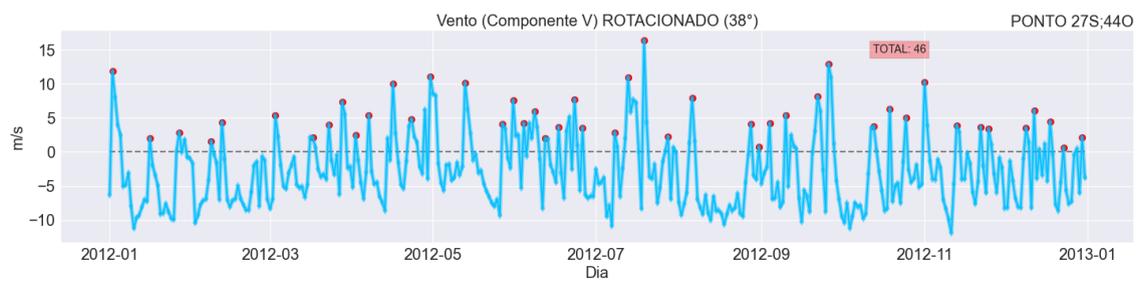
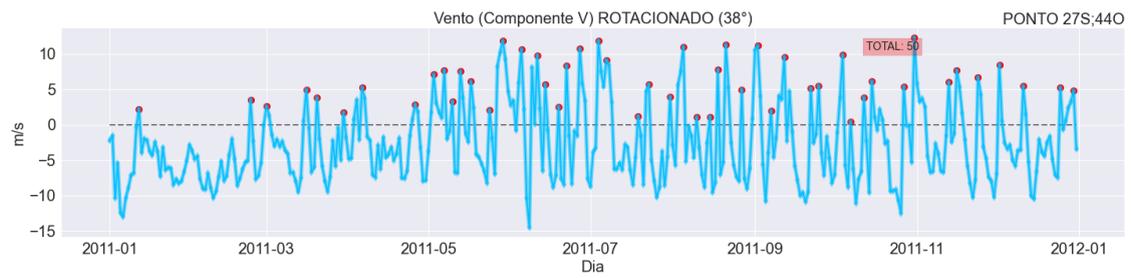
VERA, Carolina et al. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, Buenos Aires: American Meteorological Society, v. 19, p. 4977-4988, 2006.

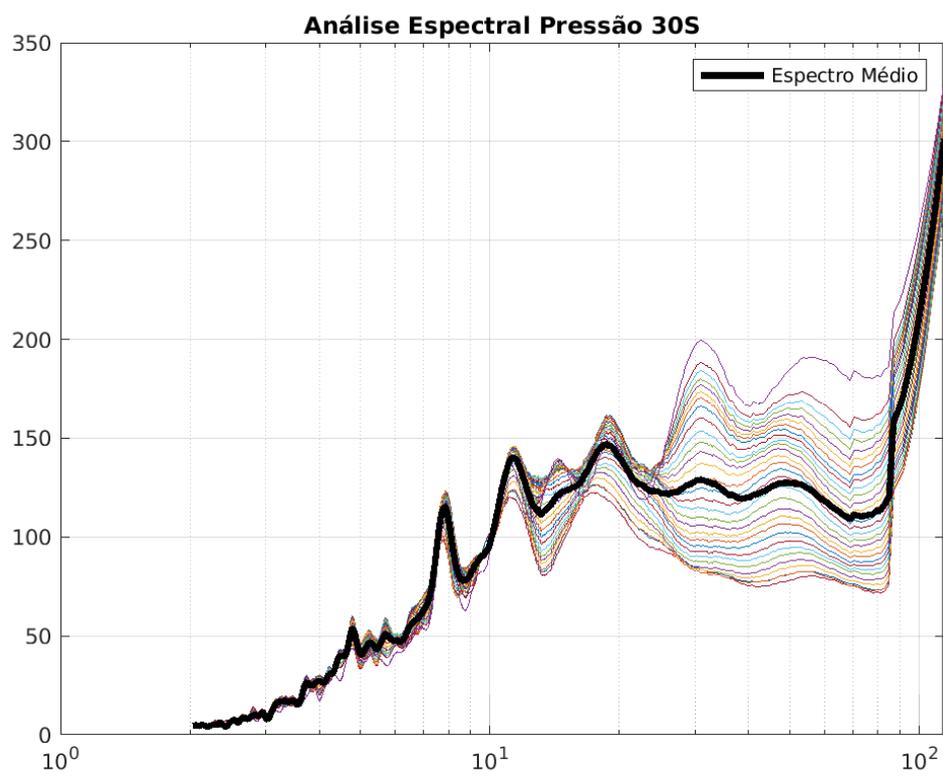
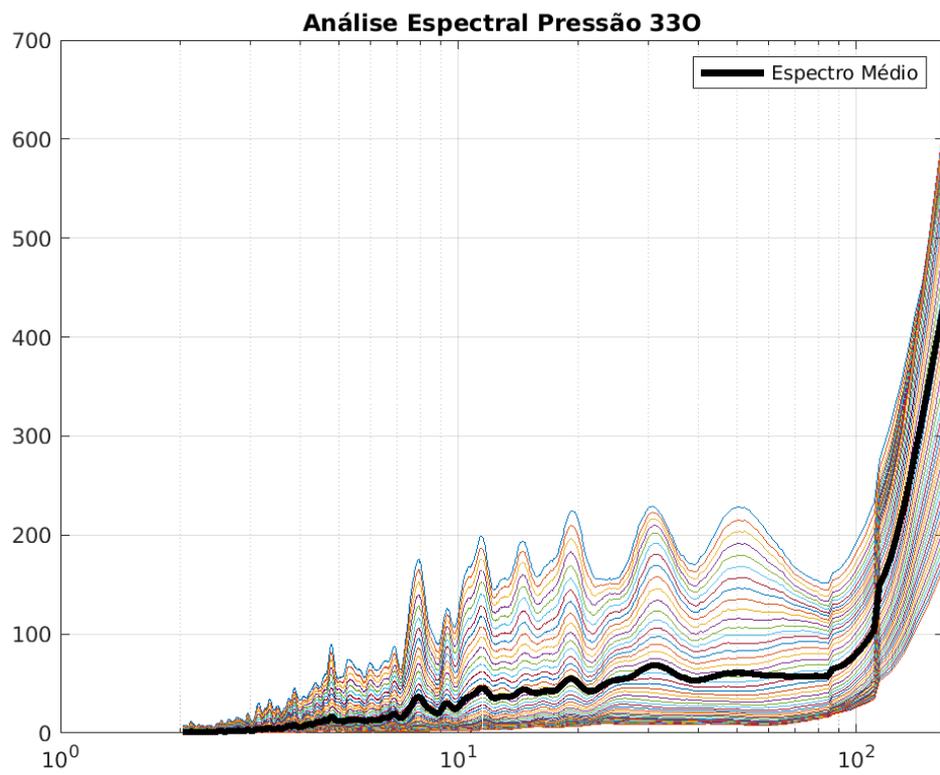
PILO, Gabriela Semolini. *Demografia de vórtices oceânicos em três sistemas associados a correntes de contorno oeste do Hemisfério Sul*. 72 p. cap. 1, Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande. 2013.

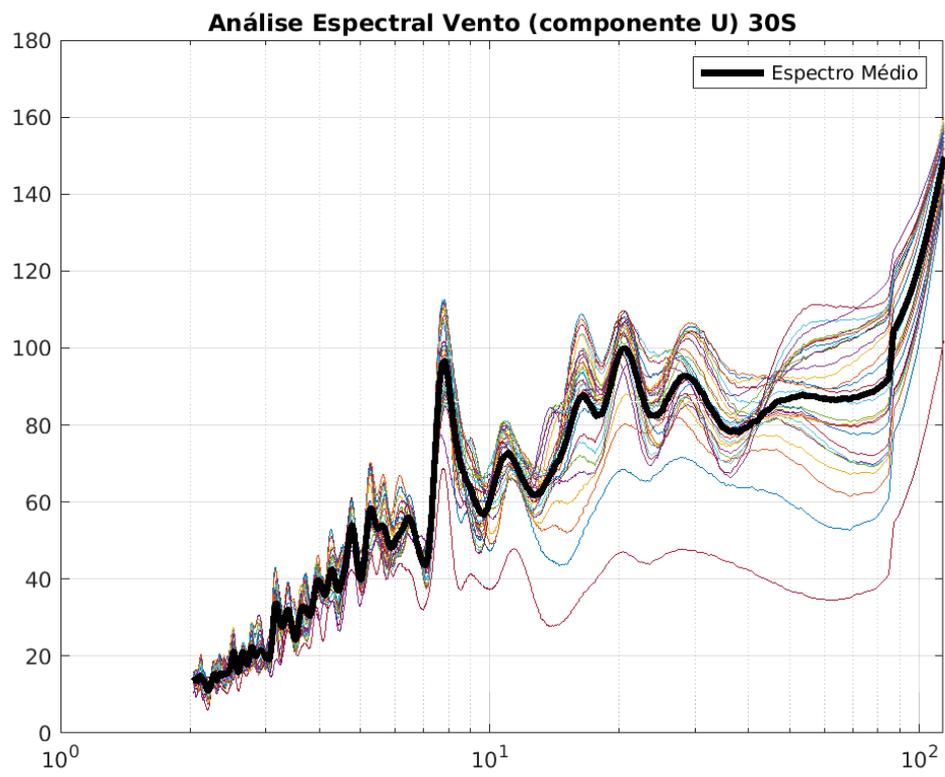
POLOVINA, J. J.; KLEIBER, P.; KOBAYASHI, D. R. Application of TOPEX-POSEIDON satellite altimetry to simulate transport dynamics of larvae of spiny lobster, *Panulirus marginatus*, in the Northwestern Hawaiian Islands, 1993–1996. *Fishery Bulletin*, Honolulu: National Marine Fisheries Service, v. 97, n. 1, p. 135–136, 1999.

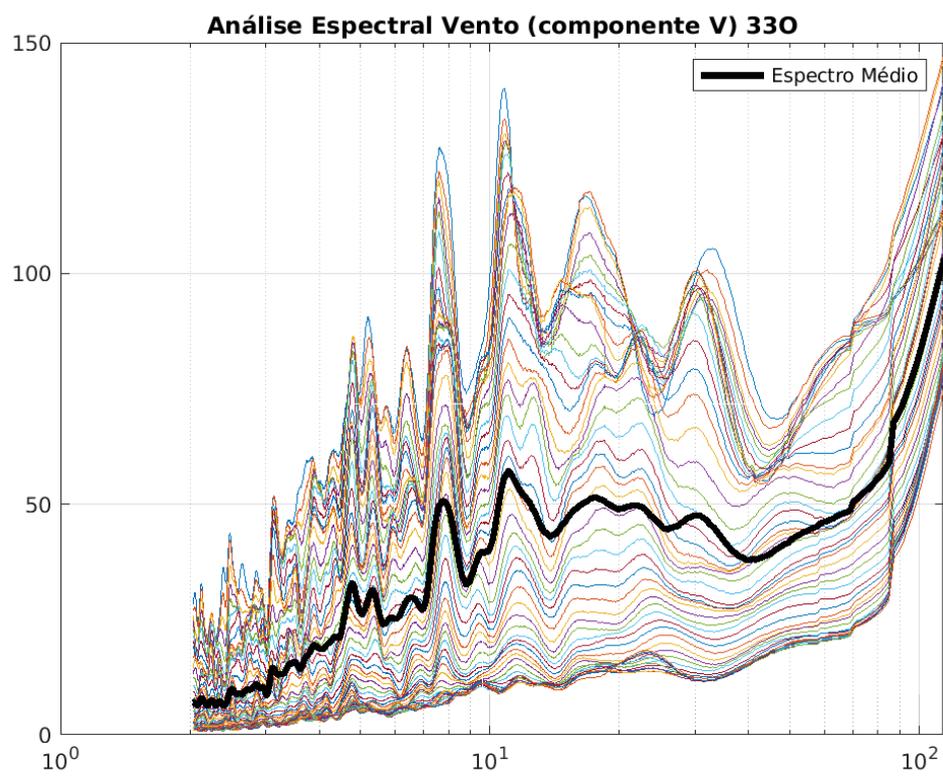
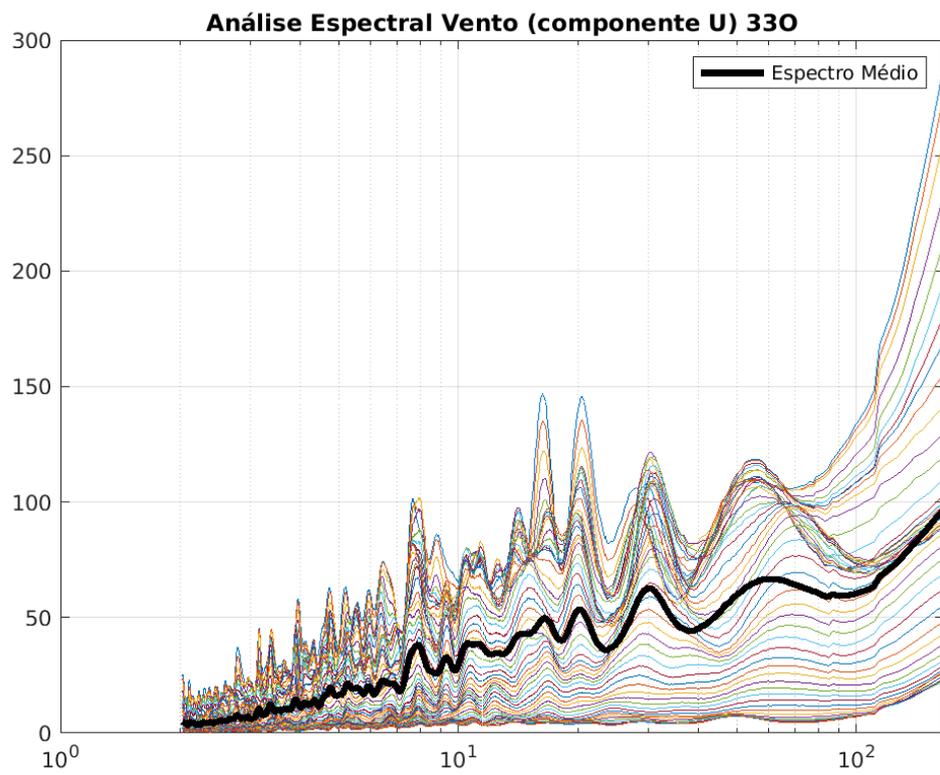
APÊNDICE A - Componente atmosférica

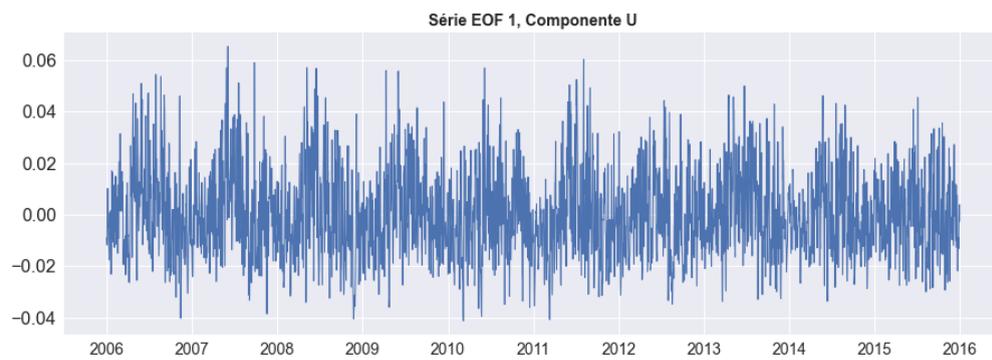
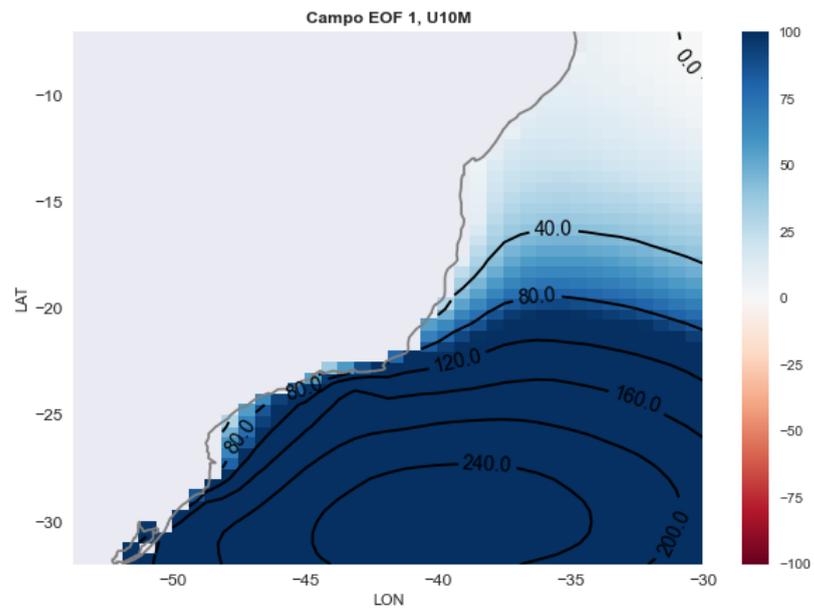


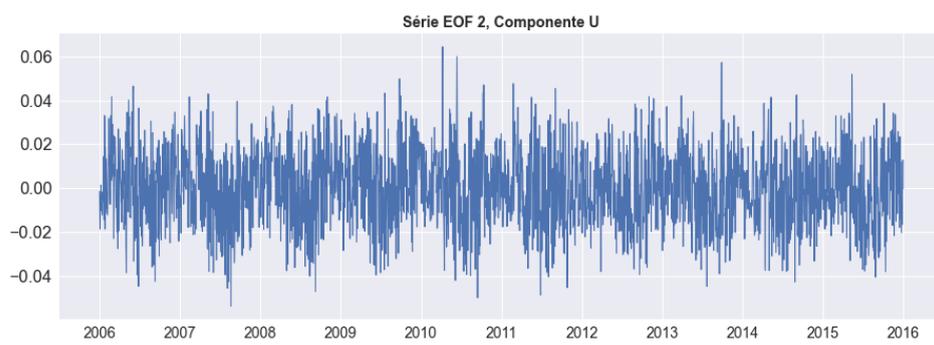
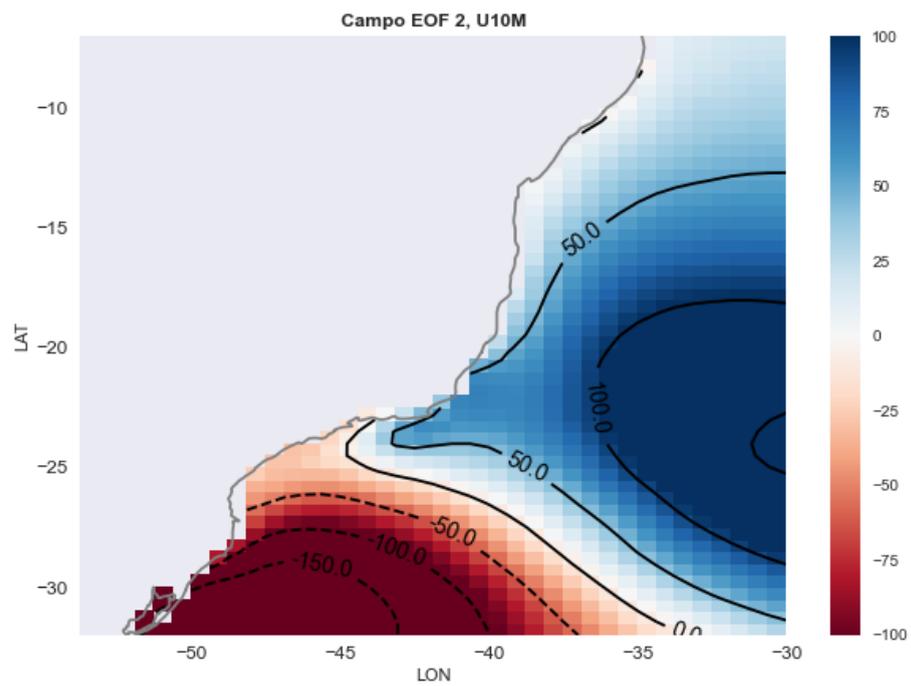


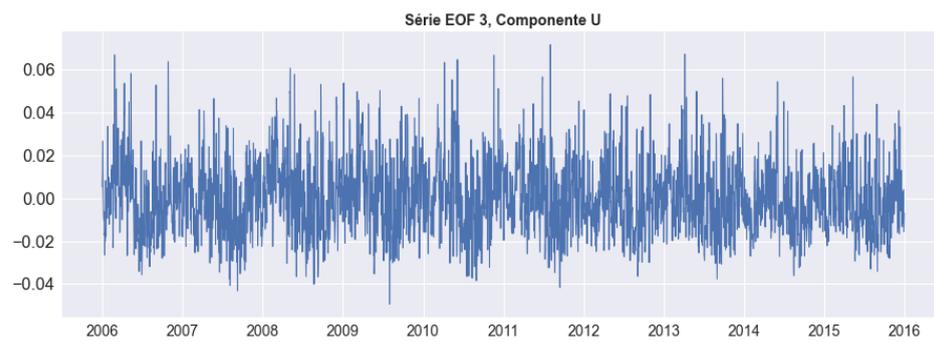
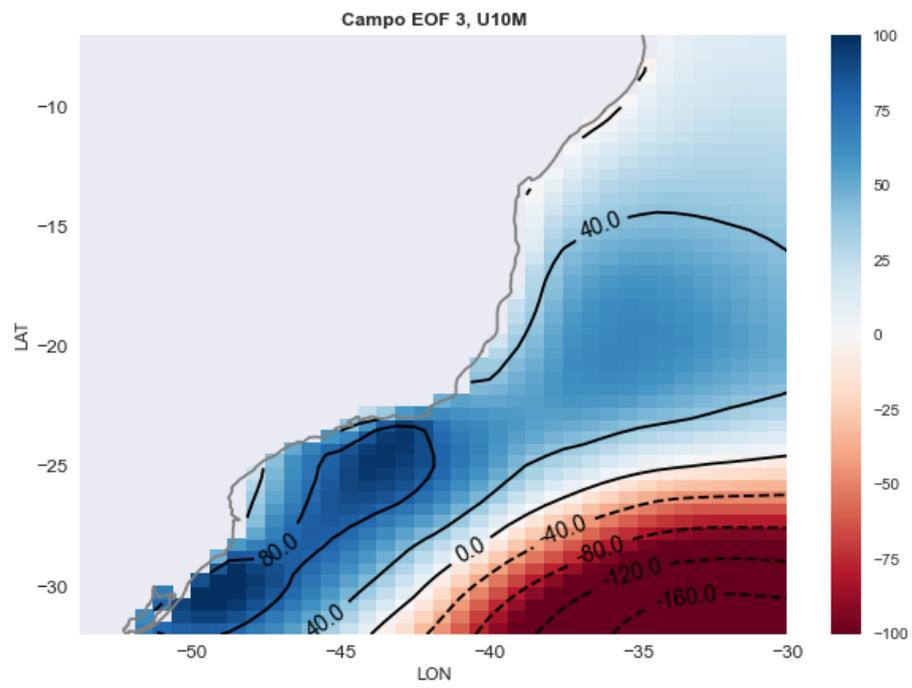


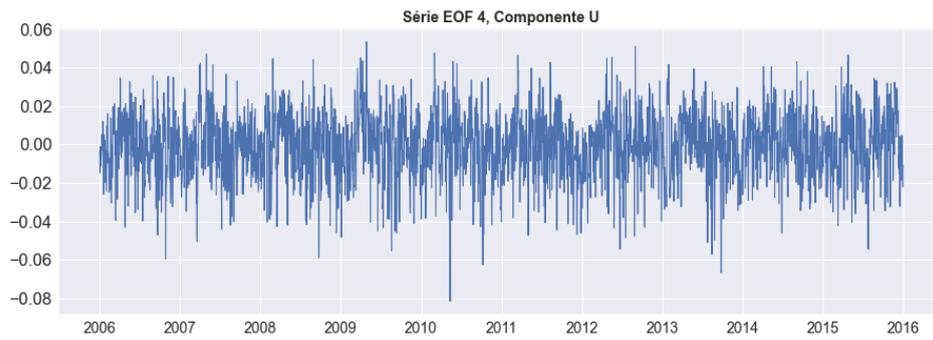
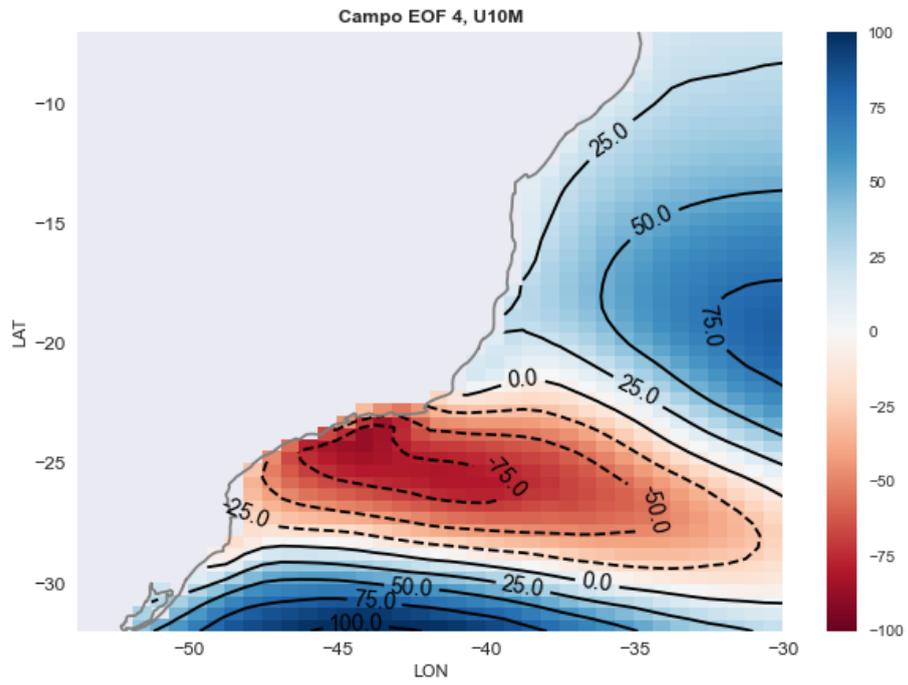


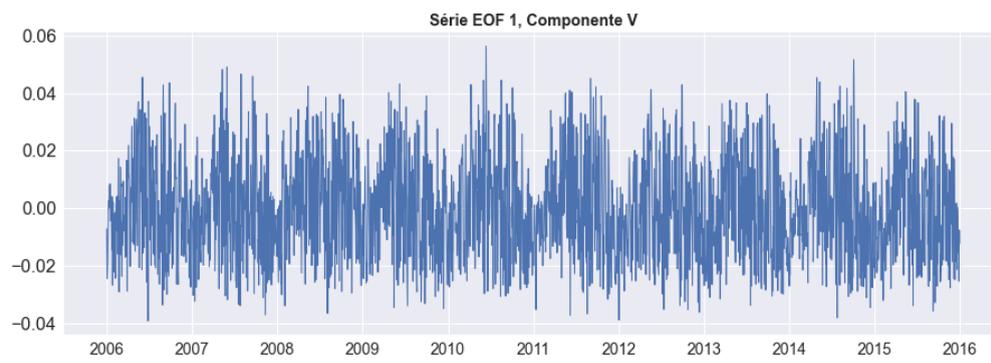
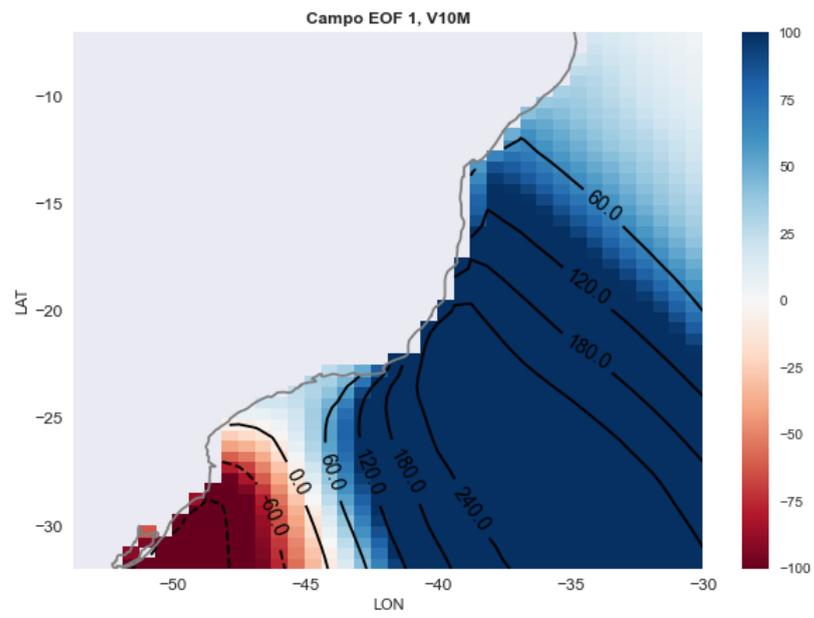


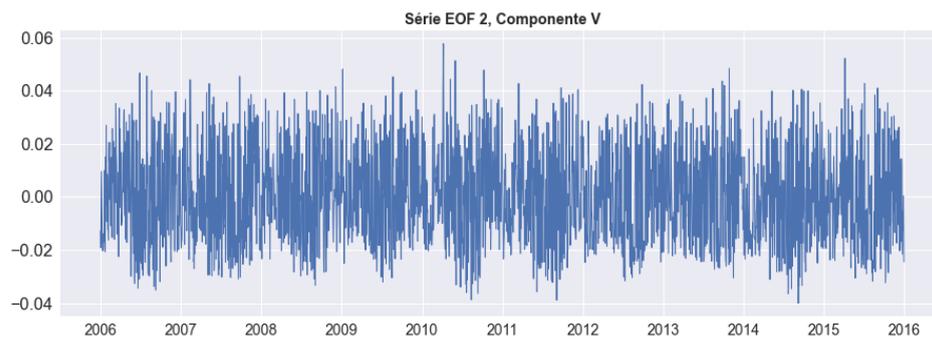
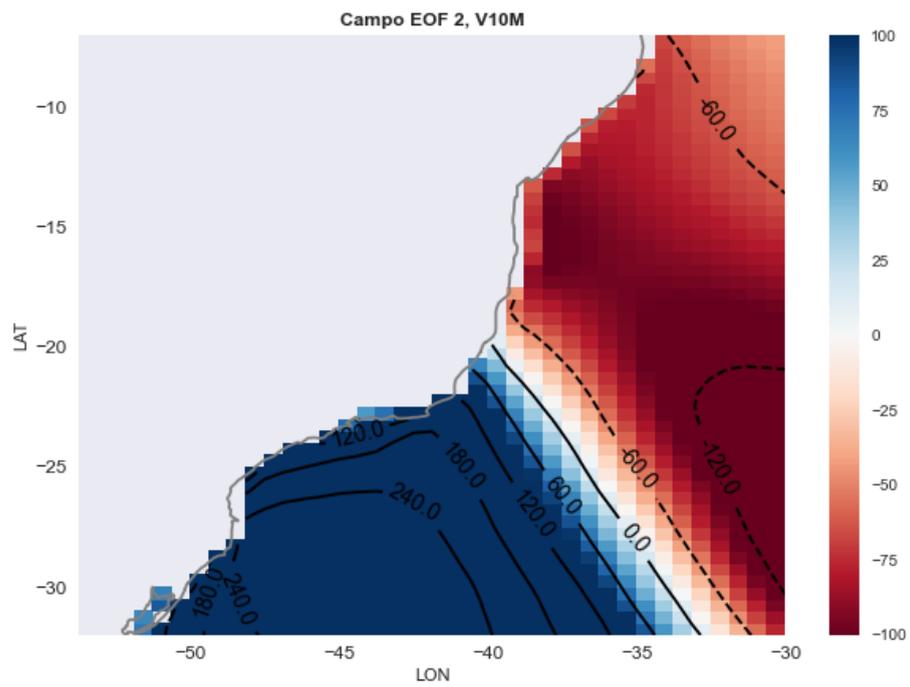


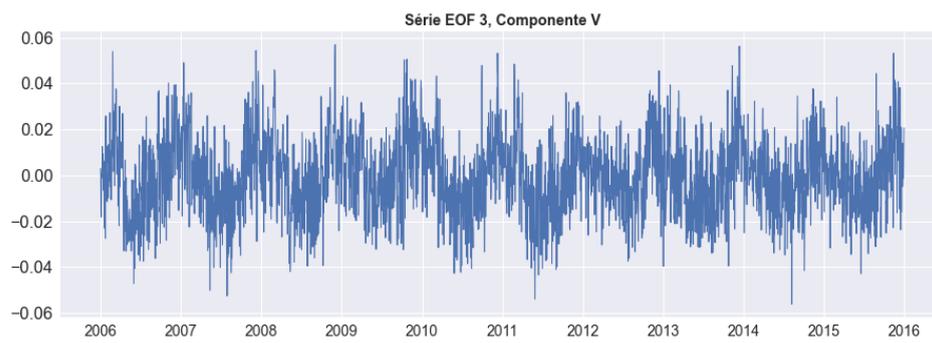
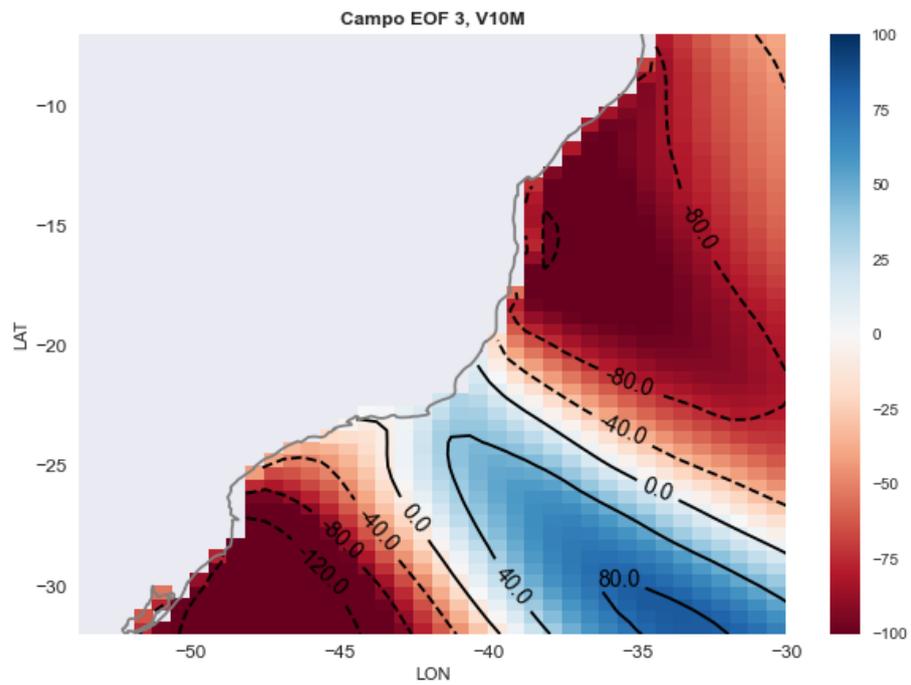


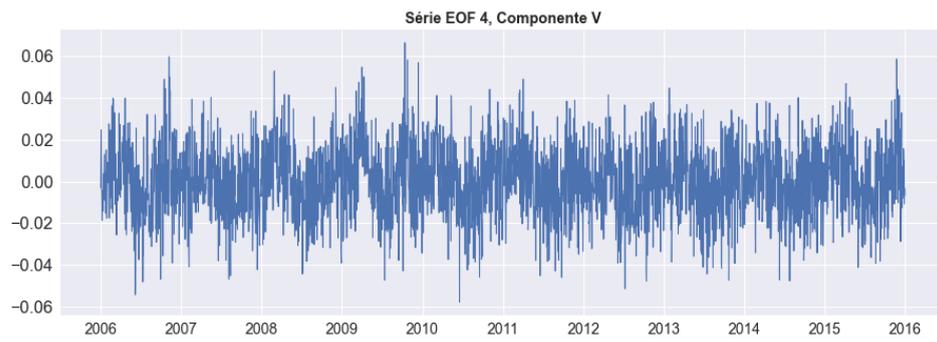
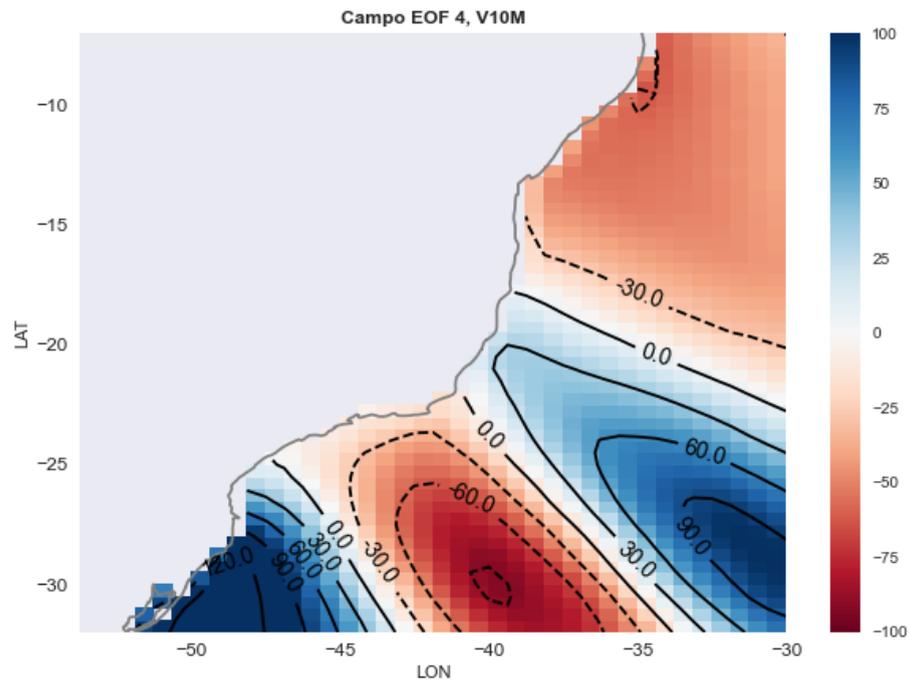


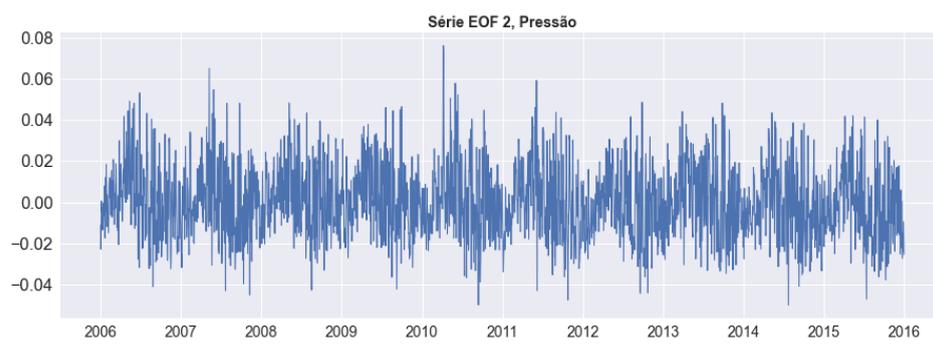
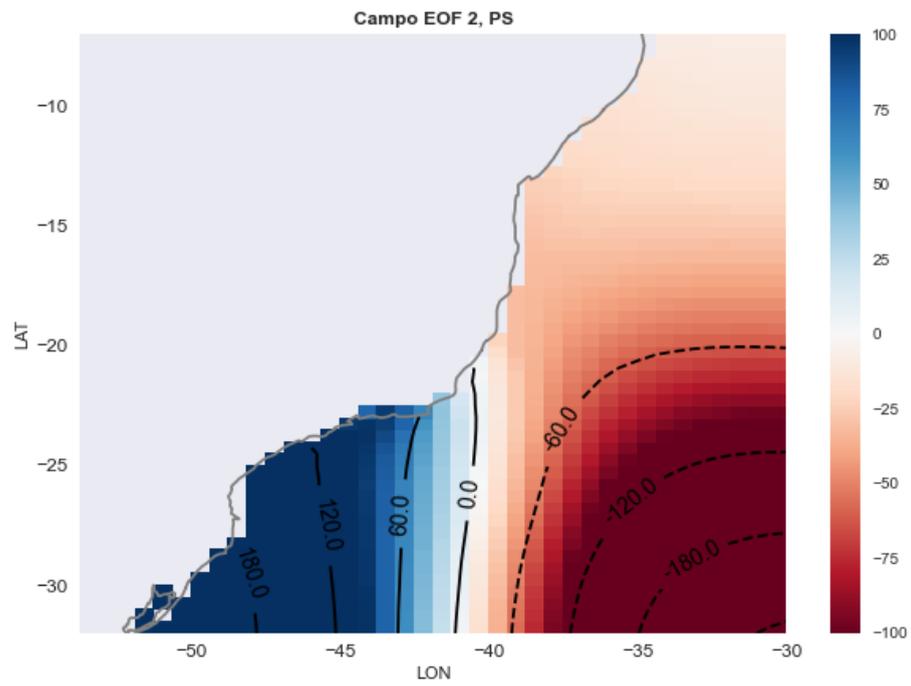


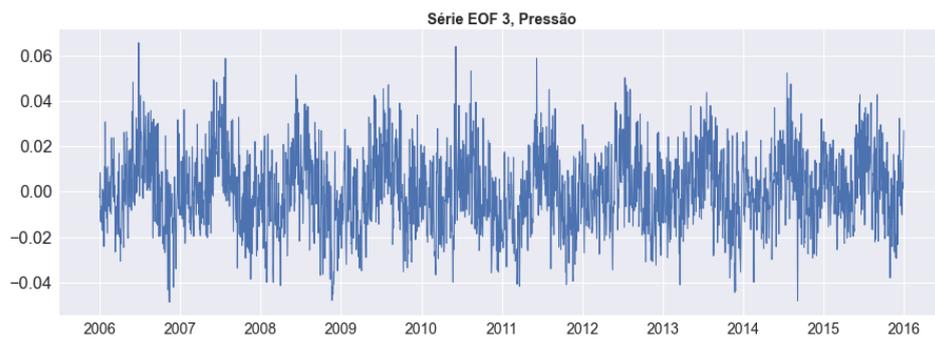
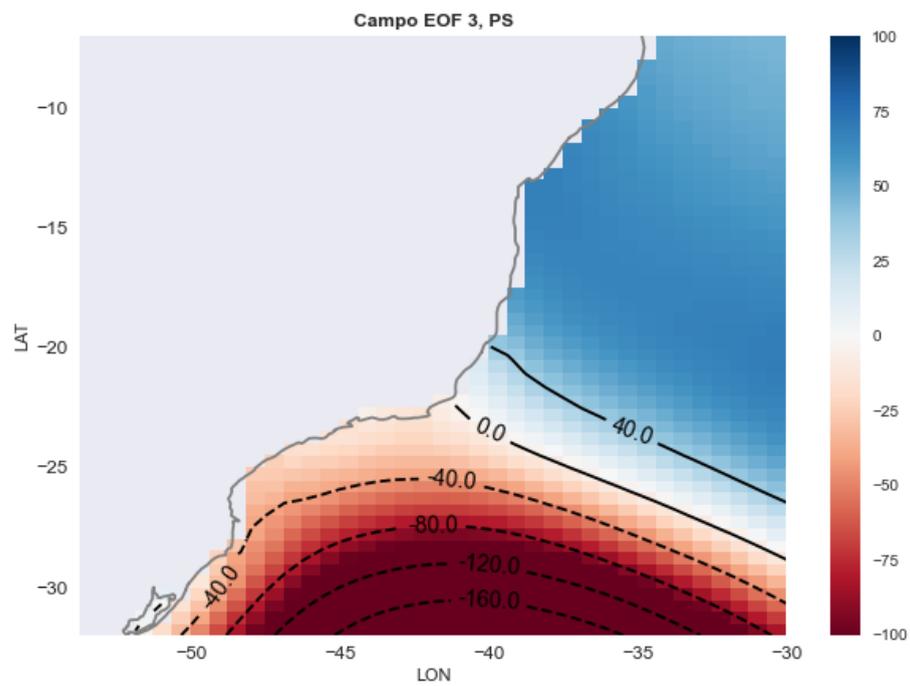


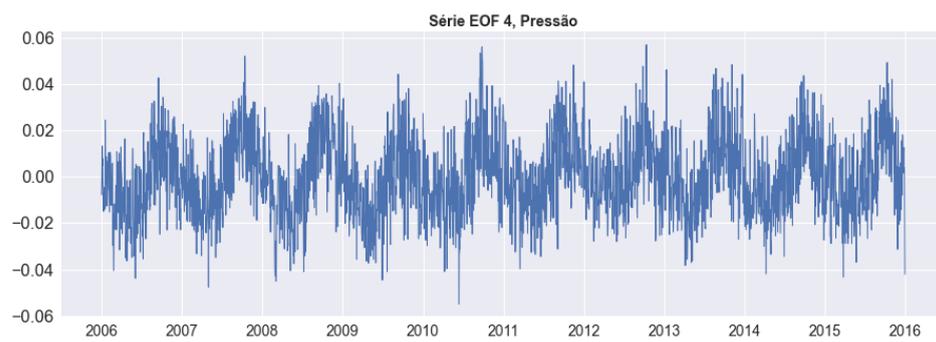
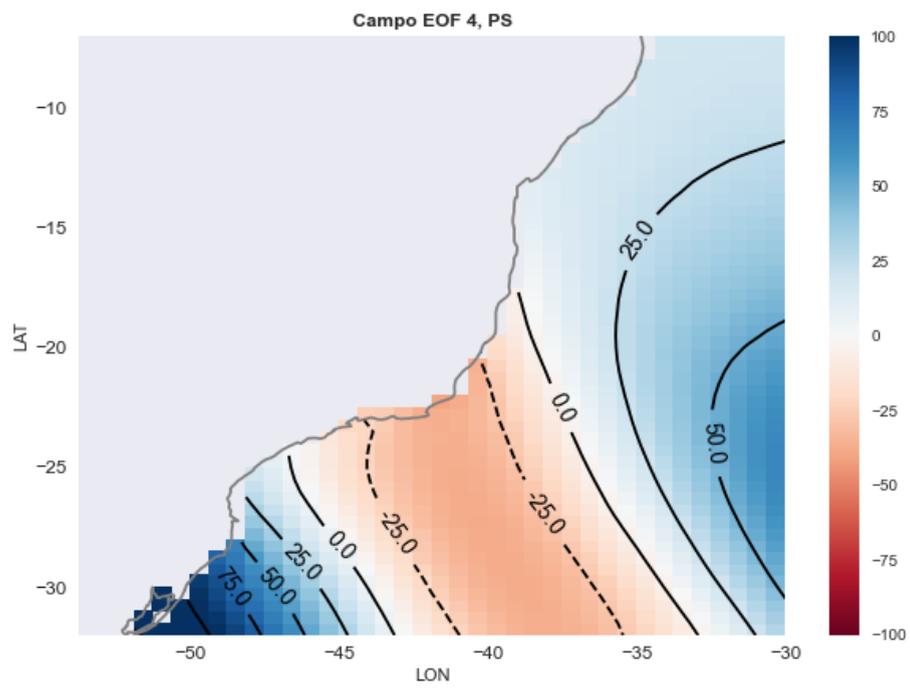


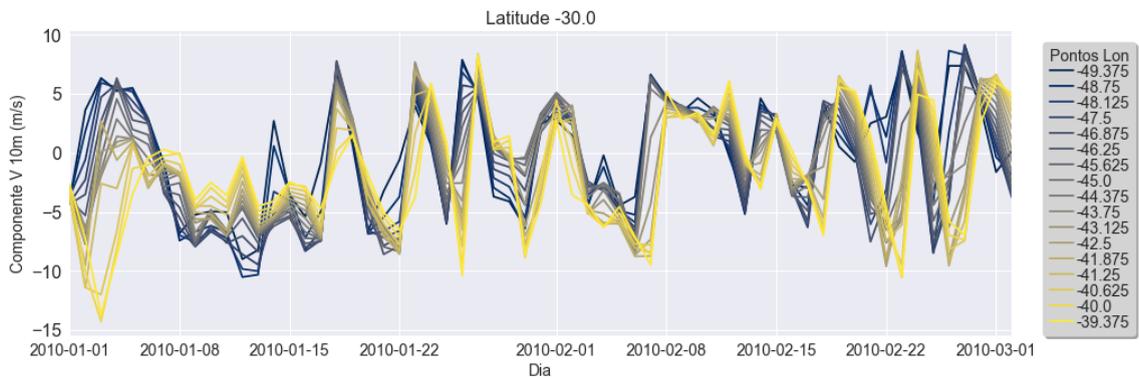
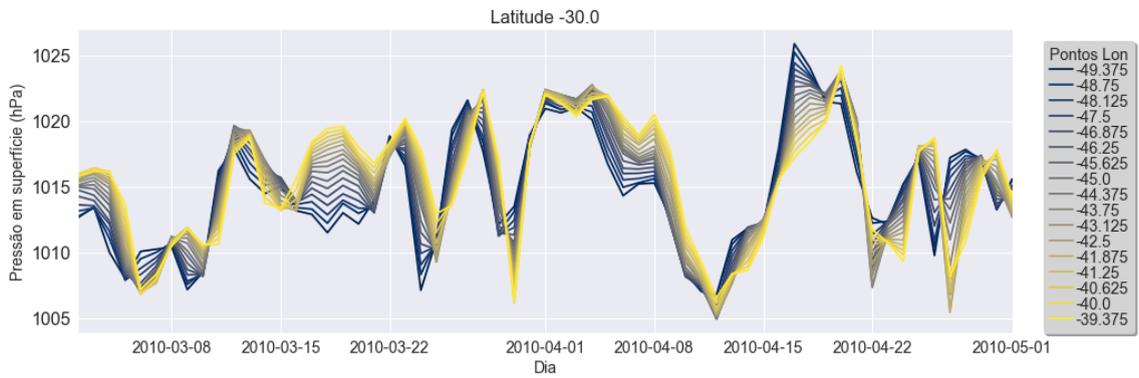
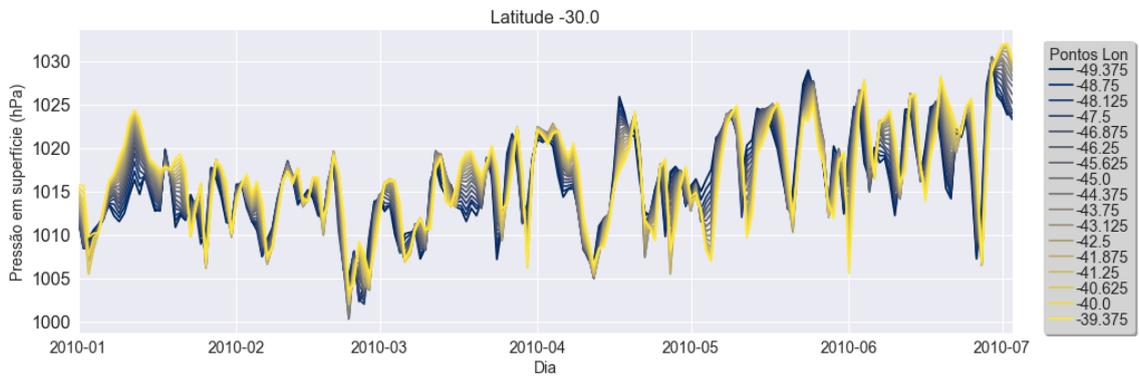
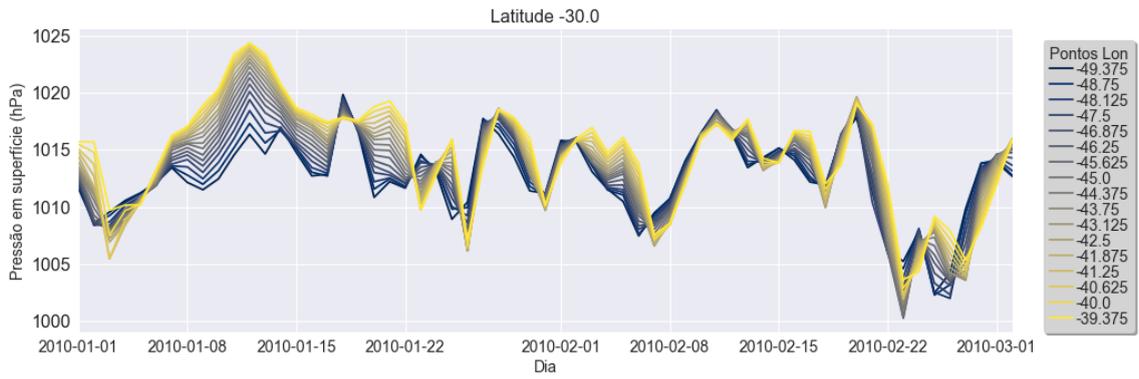


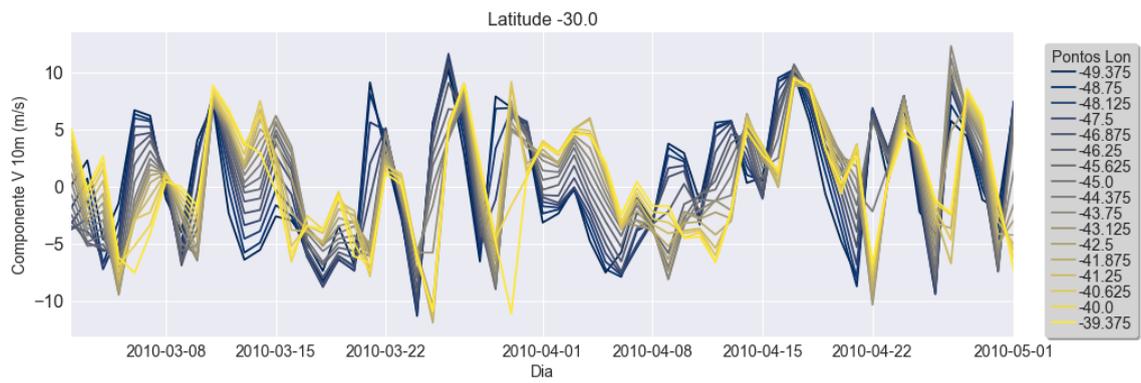
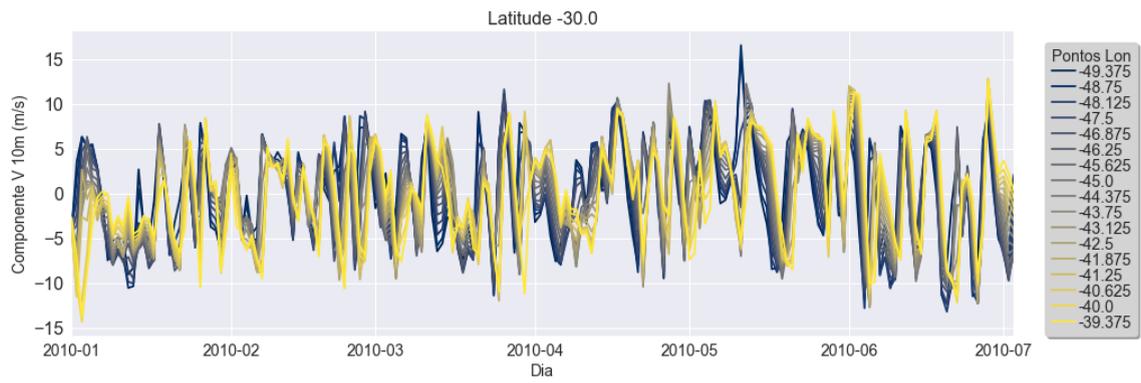




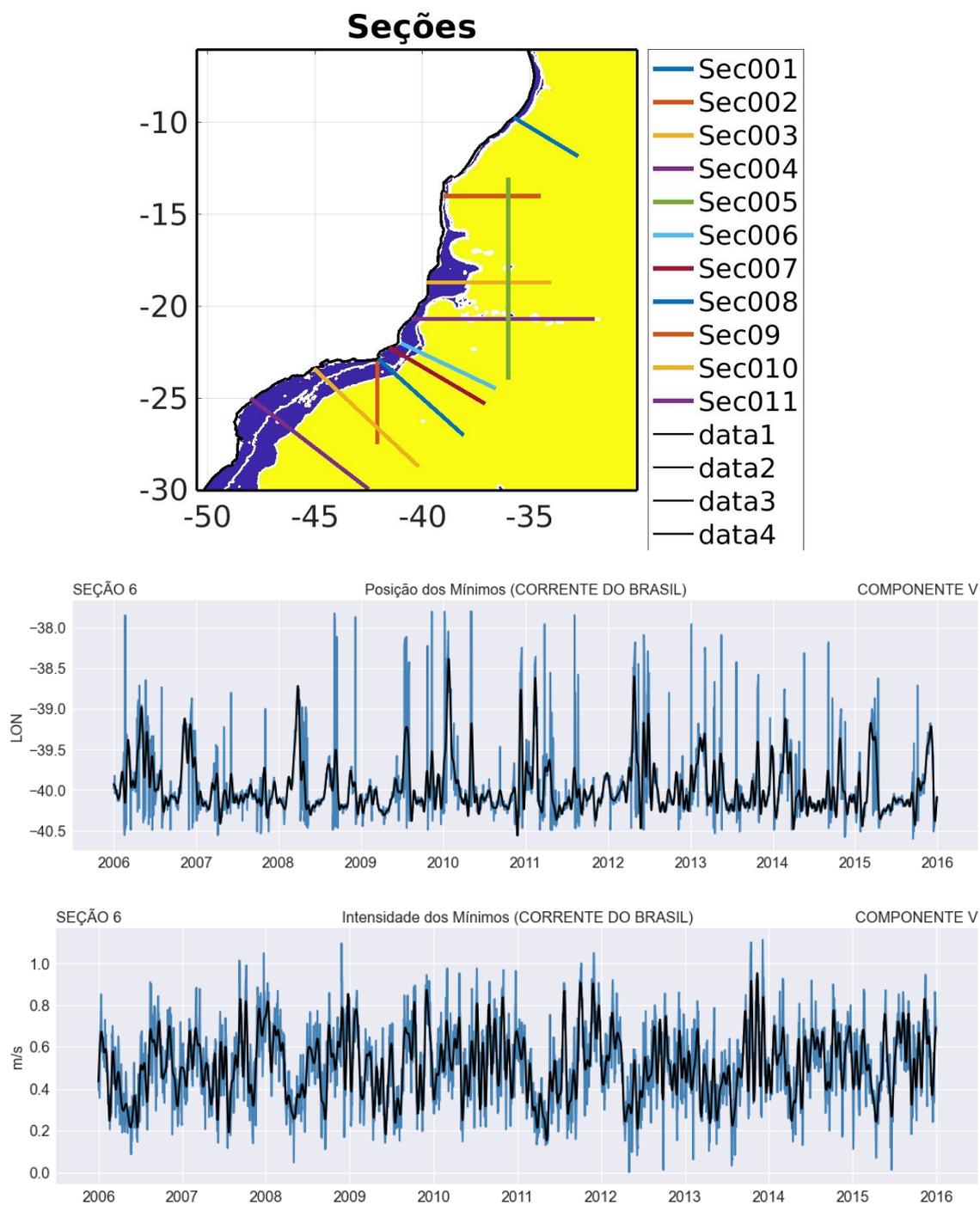


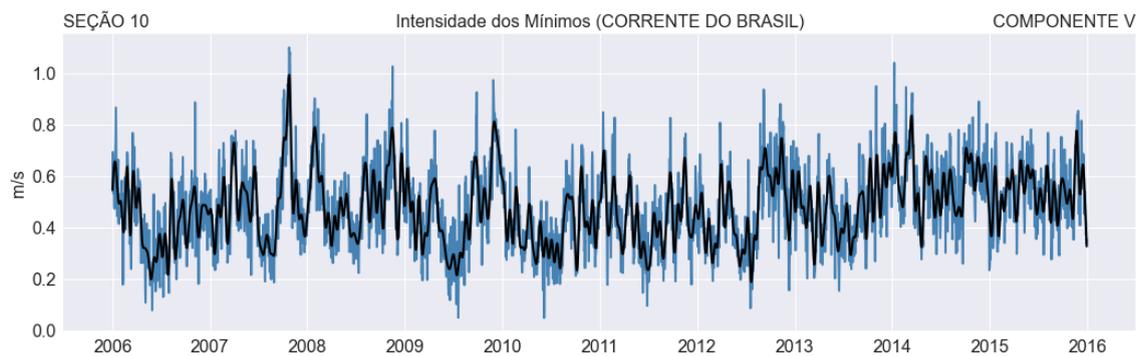
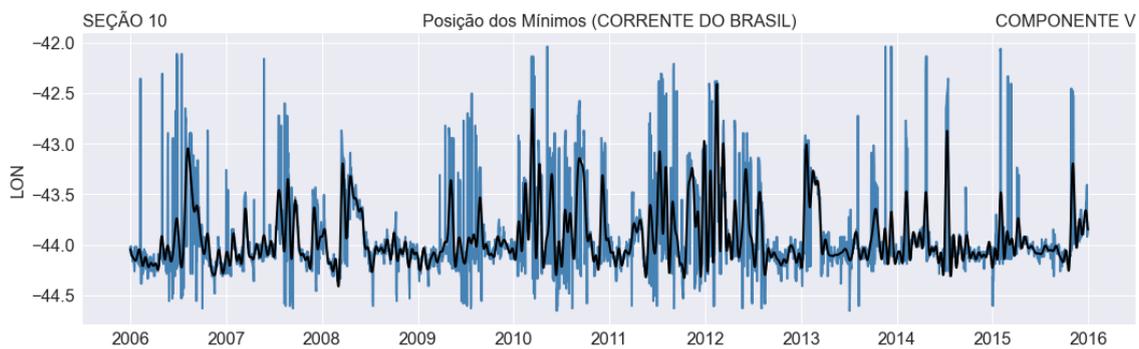
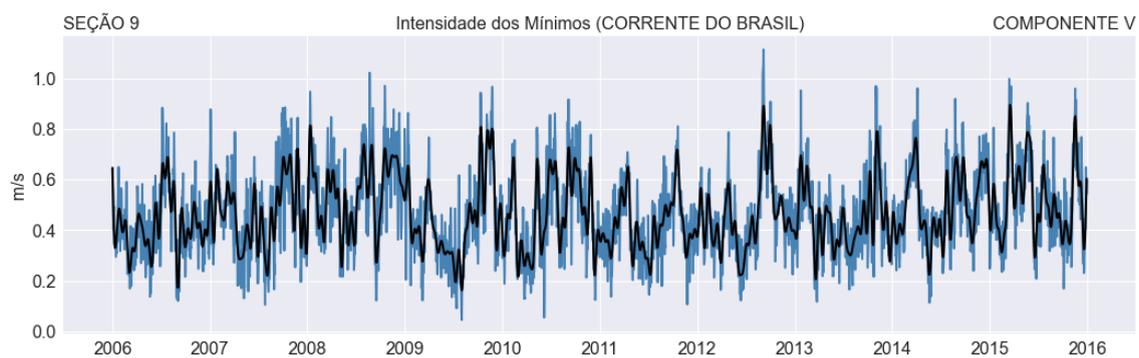
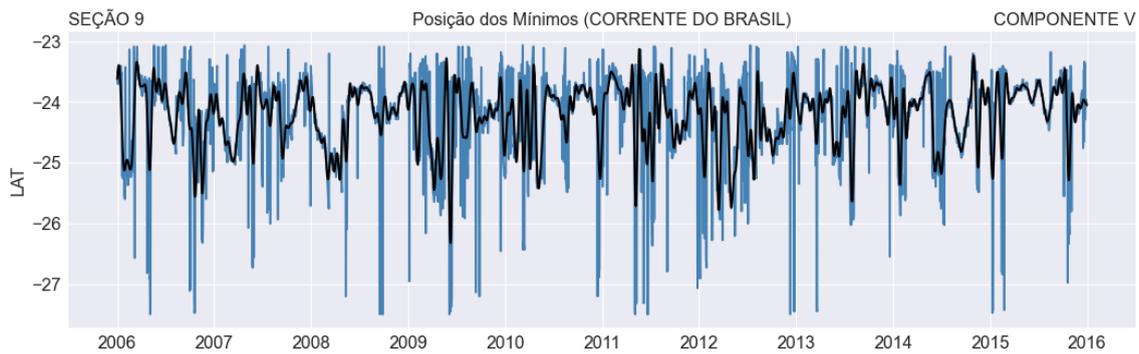


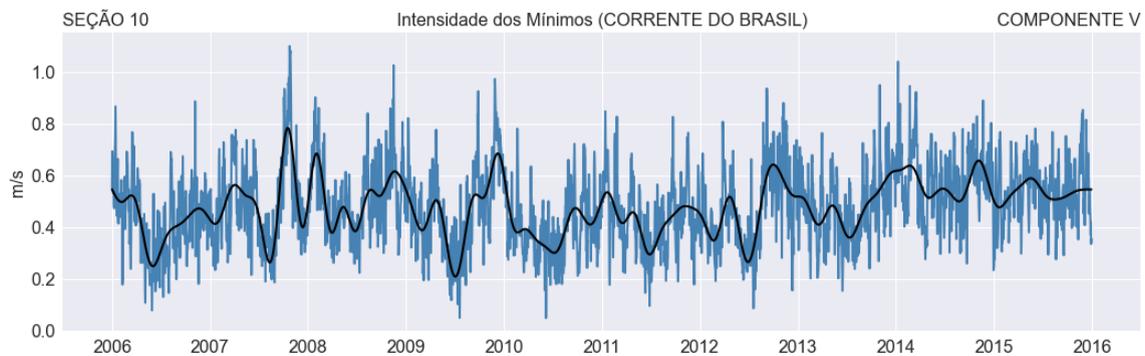
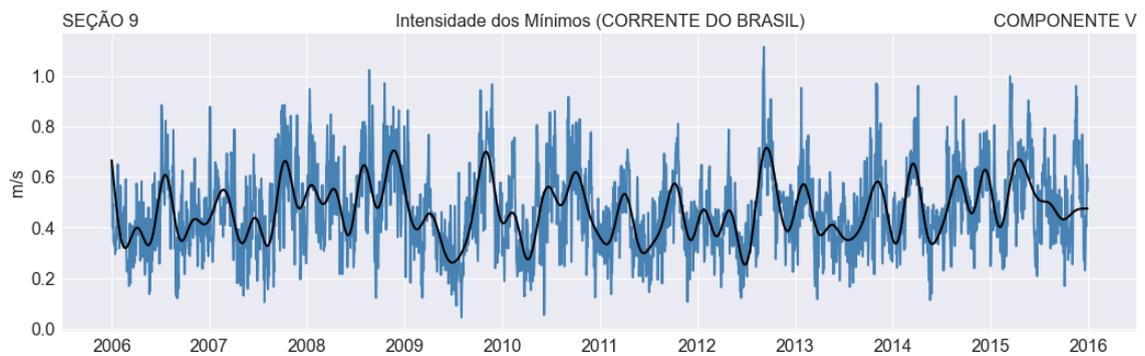
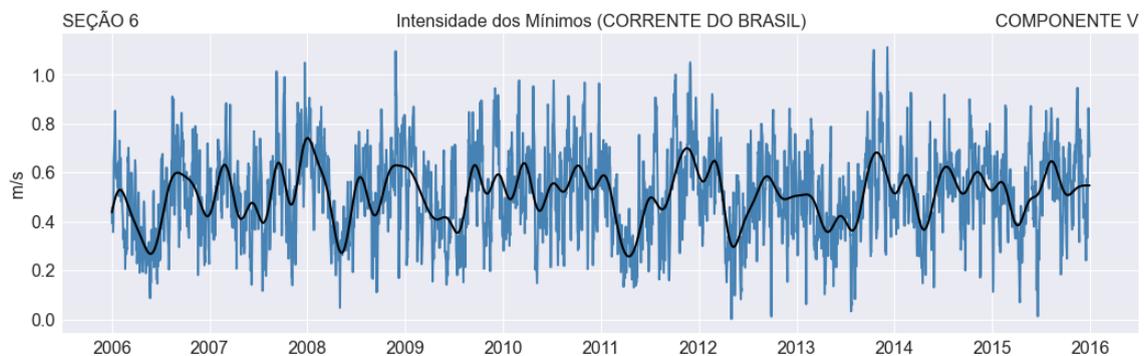
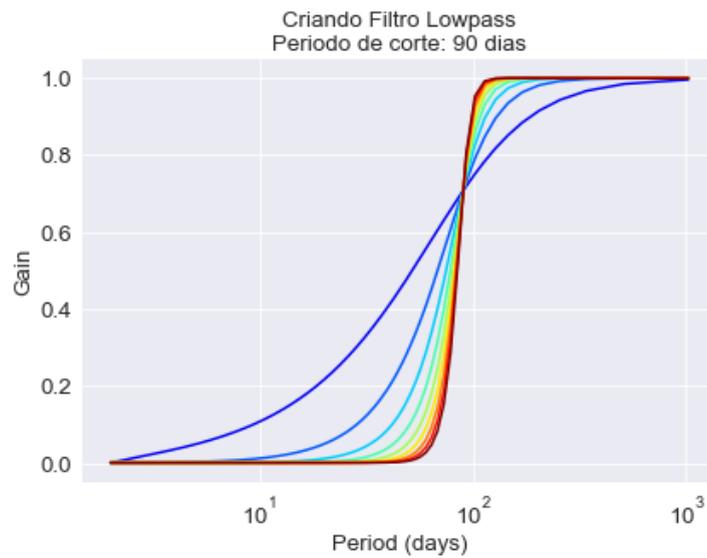


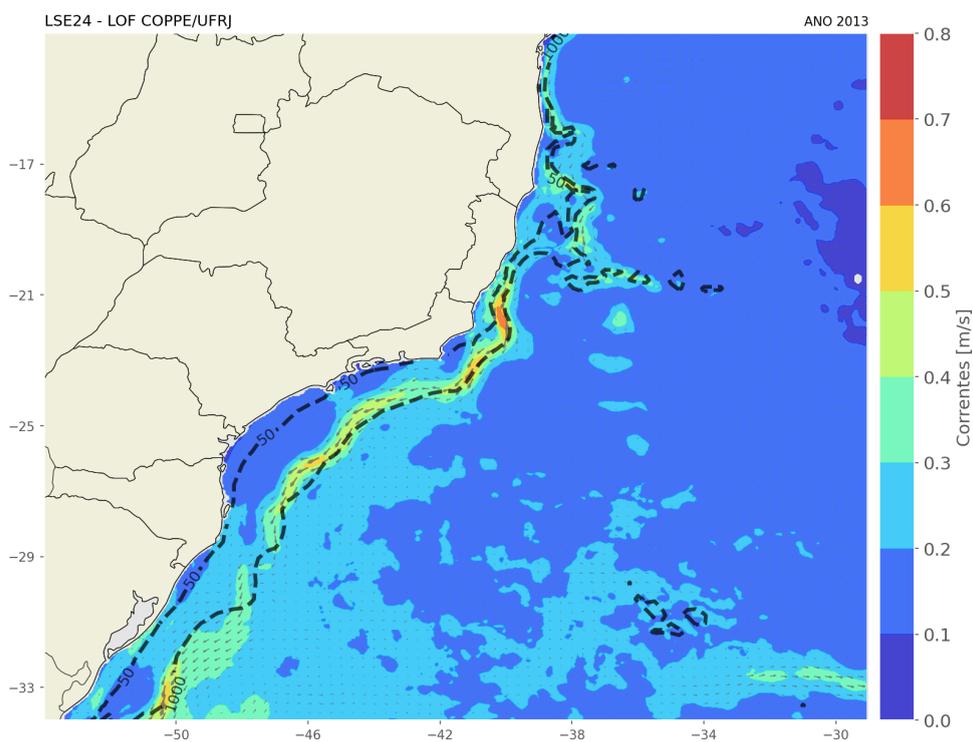
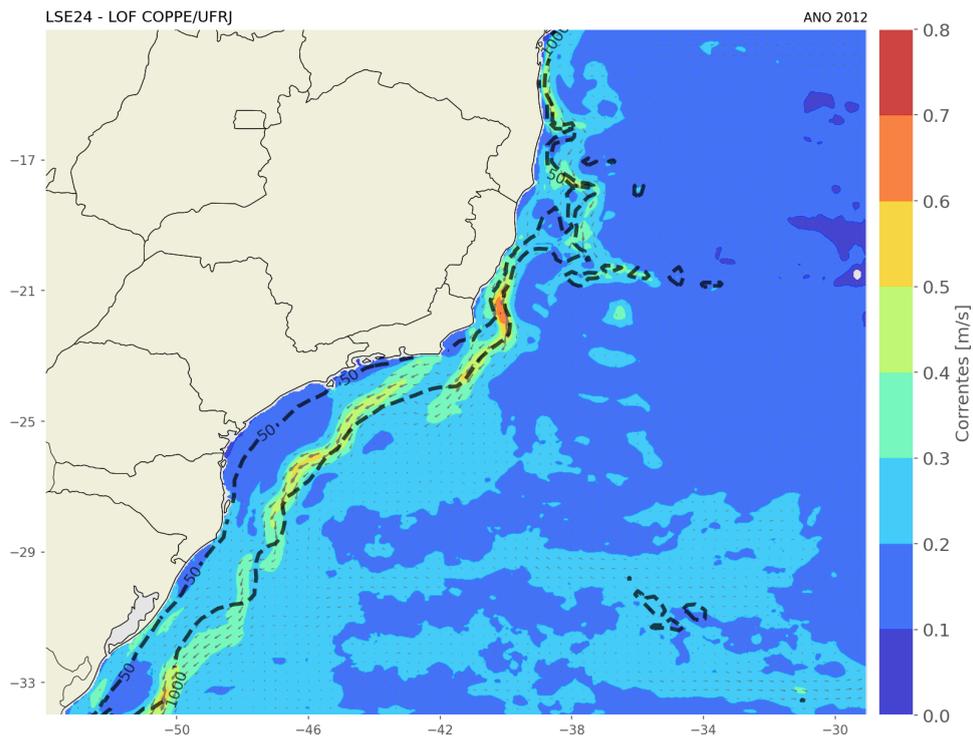


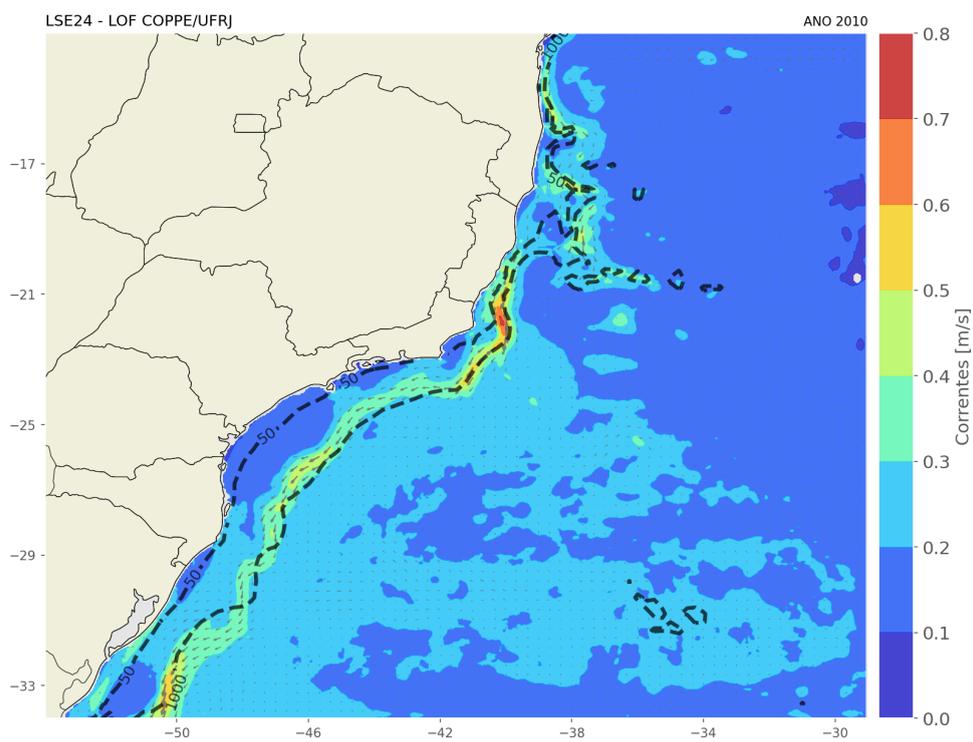
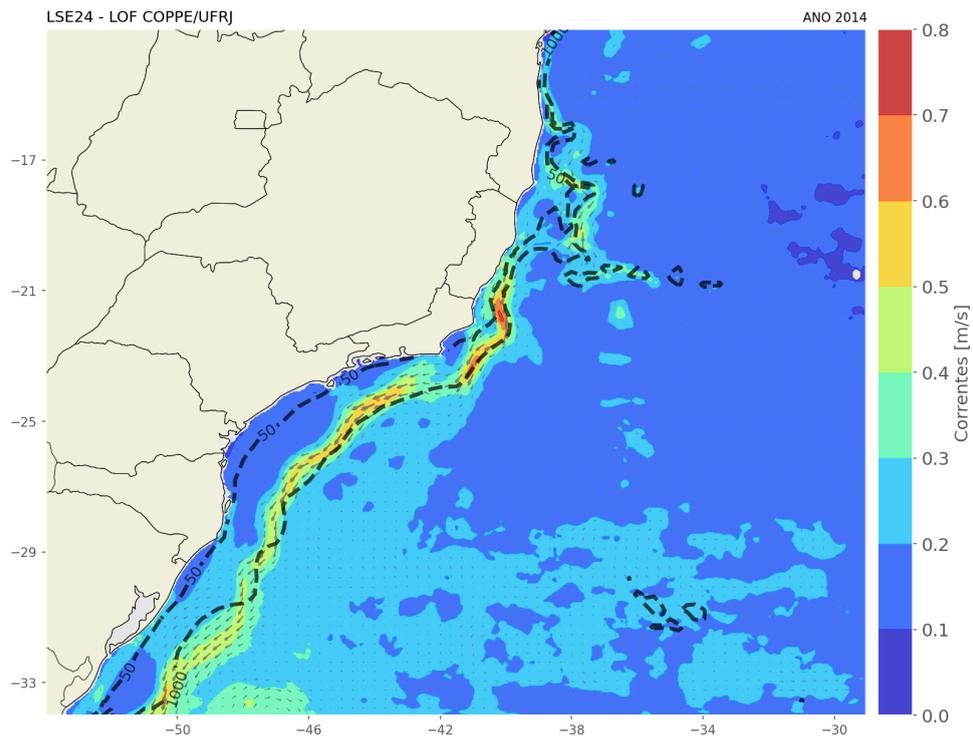
APÊNDICE B - Componente oceânica











APÊNDICE C - Comparação de plumas sem adição da advecção direta pelos ventos

