



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/08.18.20.41-TDI

**DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE  
LAGRANGIANO QUASE-ESTÁVEIS NO ATLÂNTICO  
SUDOESTE E SUAS IMPLICAÇÕES NO  
COMPORTAMENTO DE MANCHAS DE ÓLEO**

Mainara Biazati Gouveia

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, aprovada em 25 de agosto de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/434H23P>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/08.18.20.41-TDI

**DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE  
LAGRANGIANO QUASE-ESTÁVEIS NO ATLÂNTICO  
SUDOESTE E SUAS IMPLICAÇÕES NO  
COMPORTAMENTO DE MANCHAS DE ÓLEO**

Mainara Biazati Gouveia

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, aprovada em 25 de agosto de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/434H23P>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Gouveia, Mainara Biazati.

G745d Determinação dos padrões de transporte Lagrangiano quase-estáveis no Atlântico Sudoeste e suas implicações no comportamento de manchas de óleo / Mainara Biazati Gouveia. – São José dos Campos : INPE, 2020.  
xxxii + 105 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/08.18.20.41-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.  
Orientador : Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi.

1. Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas. 2. Padrões de transporte Lagrangiano persistente. 3. Barreira de transporte. 4. Força de atração climatológica. 5. Vórtices e meandros persistentes na Corrente do Brasil. I.Título.

CDU 528.8:551.465.5

---



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

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

A FOLHA DE APROVAÇÃO SERÁ INCLUIDA APÓS RESTABELECIMENTO DAS ATIVIDADES PRESENCIAIS.

Por conta da Pandemia do COVID-19, as defesas de Teses e Dissertações são realizadas por vídeo conferência, o que vem acarretando um atraso no recebimento nas folhas de aprovação.

Este trabalho foi aprovado pela Banca e possui as declarações dos orientadores (confirmando as inclusões sugeridas pela Banca) e da Biblioteca (confirmando as correções de normalização).

Assim que a Biblioteca receber a Folha de aprovação assinada, esta folha será substituída.

Qualquer dúvida, entrar em contato pelo email: [pubtc@inpe.br](mailto:pubtc@inpe.br).

Divisão de Biblioteca (DIBIB).



*“Faça ciência como uma garota!”*

FRASE VIRAL, DESDOBRAMENTO DO FEMINISMO ATIVISTA  
ONLINE (2014-2020)

*“Espero que a fumaça de bruxaria saia logo de nossas vistas.”*

MAURICE WILKINS (1953)



*Aos meus pais, Valdemundo Gouveia e Zilma  
Biazati, e João Luiz Biazati in memoriam.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a todos que acreditam no desenvolvimento científico e que dedicam anos da sua vida para contribuir com a sociedade. Neste momento histórico que estamos vivendo, no qual a ciência está desvalorizada, enaltecer o conhecimento científico e reconhecer quem o realiza passa a ser primordial. Portanto, obrigada a você que está em busca de conhecimento.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento do meu projeto sob o código de financiamento - 001.

A todos os professores que eu tive até hoje, sem vocês eu poderia chegar até aqui.

Ao departamento de Sensoriamento Remoto do INPE.

A todos que contribuíram, de alguma forma com o desenvolvimento deste trabalho, durante esses quatro anos, e que ajudaram na minha chegada até aqui.

Ao meu orientador, Dr. Douglas Gherardi, por compartilhar os últimos 8 anos da minha vida e me trazer muitos ensinamentos.

Ao meu "orientador de coração", Dr. Rodrigo Duran, pelas infinitas horas de paciência ao compartilhar comigo o mundo das Estruturas Coerentes Lagrangianas. E por sempre me oferecer palavras de apoios.

Ao Dr. Erik van Sebille, por ser sempre muito solícito.

Ao Dr. Francisco Beron-Vera, por compartilhar seu conhecimento sobre alguns de nossos resultados.

A Msc. Clarissa Endo, pela sua ajuda, fundamental, no meu segundo ano de doutorado.

Ao Dr. Luiz Landau, da COPPE/RJ, por me receber no Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia - LAMCE.

A Dr. Raquel Toste, por compartilhar seu conhecimento para implementação da forçante de maré no modelo ROMS.

A Dr<sup>a</sup>. Cristina Bentz e à Petrobras, pelas imagens dos vazamentos de óleo da operadora Chevron, em Novembro de 2011, e do Rebocador Costeiro, em Março de

2006.

Ao Msc. Francisco dos Santos, da Prooceano, por fornecer os dados das *iSpheres*, junto à PetroRio S.A.

Ao Dr. Arcilan Assireu, por compartilhar seu banco de dados de derivadores SVP.

Ao Dr. Luciano Pezzi, chefe responsável pelo Laboratório de Estudos do Oceano e Atmosfera - LOA, por me conceder o acesso ao *cluster* Kerana.

Ao IBAMA, pelos dados públicos fornecidos no acidente de óleo em 2019, ocorrido no Brasil.

A Msc. Luciana Lima, por compartilhar alguns dos seus arquivos pessoais.

Ao Msc. Giullian Reis, por fazer a primeira versão do *shape* da Chevron.

A Msc. Marceli Terra, por auxiliar na produção do mapa, utilizando os dados do IBAMA, de todas as regiões e a fauna atingida no acidente de óleo no Brasil em 2019.

A Msc. Andréa de Lima, da MOceanS - SERE, por compartilhar seu banco de dados de frentes frias.

Ao Dr. Carlos Lentini, por ter sugerido a temática do Expoente de Lyapunov para essa tese.

Ao Dr. Lorenzetti, pelas inúmeras discussões sobre os meus resultados encontrados nas Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas.

À resistência, sala 37 do SERE II, por todo o suporte, parcerias, estudos, discussões, risadas, conversas e choros compartilhados ao longo desses oito anos. Aproveito o momento para me desculpar pelo uso incansável do ar condicionado, inclusive no inverno.

Ao Dr. Marcelão Santini, por seus inúmeros churrascos, papos e parceria.

A Msc. Paula Campos, por ser minha base no início, e pela sua amizade.

A todos os atuais moradores, ex moradores e frequentadores da República das Caieiras, por manterem a minha sanidade mental em ordem.

Às Dr<sup>a</sup>. Elisabete Caria e Tereza Florenzano, pelos os seus incentivos.

Aos Dr. José de Souza Nogueira e a Marcelo Biudes, do Programa de Física Ambiental da UFMT, por me receberem para fazer a seleção do doutorado.

Aos meus amigos do MT, Ivani Acácio, Erinéia Fonseca e Shirley de Oliveira, por sempre me receberem de braços abertos, e por sempre estarem presentes, mesmo a 2000 *km* de distância.

Aos meus afilhados, Diogo Herinque e Admilson Junior, por sempre me visitarem e por me encherem de alegria e orgulho.

Ao Dr. Alber Sanchez, meu amigo e irmão, simplesmente por existir em minha vida, e também pelas inúmeras vezes em que me socorreu.

Aos meus amigos: Dr. Carina Macedo, Msc. Marcell Terra, Msc. Khalil "Terra", Cynthia Almeida, Murilo Catelan, Msc. Matheus Fagundes, Msc. Diego Gurjão, Ediane Correia, Stella Coelho, Msc. Giullian Reis, por sempre estarem presentes, e por não me deixarem desistir, principalmente, nessa reta final.

Ao meu irmão, Júlio Gouveia, por seu apoio incondicional.

À minha cunhada, Pamela Gouveia, por cuidar da minha família enquanto eu estiver longe.

Ao meu "pelanca", Miguel Gouveia, por manter minha esperança por dias melhores e sempre trazer sorrisos.

Aos meus pais, Valdemundo Gouveia e Zilma Biazati, os quais nunca mediram esforços para que eu realizasse esse objetivo. Sem o apoio de vocês, eu jamais teria chegado até aqui. Vocês são o meu norte.

E por fim, ao Msc. Carlos Batista, por ser o meu lar, e compartilhar comigo as boas e as más notícias.



## RESUMO

A Corrente Brasil (CB) é uma corrente de contorno oeste fraca, que flui ao longo do Oceano Atlântico Sudoeste. A CB é frequentemente descrita como um fluxo com uma intensa atividade de mesoescala e relativamente baixo transporte de volume, entre 5,0 a 10,0 Sv. Foi realizada uma simulação oceânica ao longo de 13 anos, a fim de investigar que a presença de meandros e vórtices persistentes estão relacionados a padrões de transporte Lagrangiano quase-estáveis, extraídos por meio das Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas (ECLc). As ECLc indicam que o eixo da CB posiciona-se ao longo da isóbata de 2000 m, em concordância com a temperatura da superfície do mar, obtida através do sensor de alta resolução e com a velocidade média Euleriana simulada. Os padrões de deformações das ECLc também respondem ao transporte transversal persistente à plataforma continental identificados com base na transição de valores positivos (altos), próximo à linha de costa, para valores negativos (baixos), entre as isóbatas de 200 a 2000 m, e positivos (altos), além da isóbata de 2000 m. Pares zonais de estruturas ciclônicas e anticiclônicas são incorporadas nessa transição, fazendo com que as ECLc se deformem em forma de "V", doravante chamadas de *chevrons*. Uma barreira de transporte é identificada próxima à isóbata de 200 m, confirmada pelo movimento limitado de flutuadores em direção à costa, e indicada por valores máximos de força de atração climatológica ao longo do talude. As estruturas persistentes ciclônicas e anticiclônicas também podem induzir transporte transversal na plataforma. Regiões com baixa força de atração climatológica coincidem com plataformas largas e com trajetórias estagnadas de flutuadores. As ECLc representam, com precisão, as trajetórias de derivadores sintéticos e derivadores rastreados por satélite iniciados no local do vazamento da Chevron (em Novembro de 2011) e com o contorno da mancha de óleo observada. Também há uma concordância entre as manchas de óleo que chegaram às praias brasileiras no evento ocorrido de Agosto de 2019 à Fevereiro de 2020 e a força de atração climatológica da região costeira. Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram determinar a influência de persistentes estruturas coerentes de mesoescala na dinâmica da circulação regional. A identificação e a descrição quantitativa das estruturas coerentes Lagrangianas climatológicas apresentam grande potencial para auxiliar no planejamento de respostas futuras de emergência à derramamentos de óleo, na elaboração de planos de contingência, operações de resgate, avaliação de conectividade larval e de peixes, estratégias para lançamentos de flutuadores, dispersão e destino de poluentes e lixo marinho.

Palavras-chave: Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas. Padrões de transporte Lagrangiano persistente. Barreira de transporte. Força de atração climatológica. Vórtices e meandros persistentes na Corrente do Brasil.



# DETERMINATION OF THE QUASI-STEADY LAGRANGIAN TRANSPORT PATTERNS IN THE SOUTHWESTERN ATLANTIC OCEAN AND THEIR IMPLICATIONS FOR OIL SPILL OCEAN SURFACE MOVEMENT

## ABSTRACT

The Brazil Current (BC) is a weak western boundary current flowing along the Southwestern Atlantic Ocean. It is frequently described as a flow with intense mesoscale activity and relatively low volume transport between 5.0 to 10.0 Sv. A 13-year eddy-resolving primitive-equation simulation was used to show that the presence of persistent meanders and eddies leads to quasi-steady Lagrangian transport patterns, aptly extracted through climatological Lagrangian Coherent Structures (cLCS). The cLCS positions the surface expression of the BC core along the 2000 *m* isobath, in excellent agreement with high resolution satellite sea-surface temperature and the model Eulerian mean velocity. The cLCS deformation pattern also responds to zonally persistent cross-shelf SSH transition from positive (high) values near coastline to negative (low) values between 200 and 2000 *m* and back to positive (high) offshore from the 2000 *m* isobath. Zonally-paired cyclonic and anticyclonic structures are embedded in this transition, also causing the cLCSs to deform into chevrons. A transport barrier is identified close to the 200 *m* isobath, which is confirmed by the limited inshore movement of drogued buoys and accurately indicated by an along slope maxima of climatological strength of attraction. We also show that the persistent cyclonic and anticyclonic structures may induce localized cross-shelf transport. Regions of low climatological strength of attraction coincide with large shelves and with stagnant synthetic trajectories. The cLCSs accurately depict trajectories initiated at the location of Chevron's spill (November 2011) as compared to synthetic and satellite trajectories, and the outline of the oil from that accident. There is also an agreement between the large-scale oil slicks reaching the Brazilian beaches (from August 2019 to February 2020) and the strength of climatological attraction at the coast. Our work also clarifies the influence of persistent mesoscale structures on the regional circulation. The identification and quantitative description of climatological Lagrangian coherent structures is expected to improve the effectiveness of future emergency response to oil spills, contingency planning, rescue operations, larval and fish connectivity assessment, drifter launch strategies, waste pollutant and marine debris dispersion and destination.

Keywords: climatology of Lagrangian Coherent Structures. Persistent Lagrangian transport patterns. Transport barrier. Climatological strength of attraction. Persistent eddy and meander at Brazilian Current.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Representação esquemática da circulação da superfície do oceano global.	2
1.2 Padrão de TSM, em graus Celsius, do conjunto de dados do <i>Multi-sensor Ultra-high Resolution</i> (MUR), distribuída pela <i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center</i> (PODAAC). O campo de TSM, com uma resolução espacial de $0,01^\circ$ , corresponde ao dia 30 de agosto de 2013. Em cor preta são indicadas as isóbatas de 200 e 2000 <i>m</i> de profundidade, representativas da localização do talude. . . . .	5
1.3 Galeria de fotos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) referentes ao vazamento ocorrido no Brasil em 2019. . . . .	8
1.4 Desastre ambiental ocorrido em 2019 em todo o litoral nordestino até o norte do estado do Rio de Janeiro e a quantificação da fauna atingida, tabela à direita. . . . .	9
2.1 Representação esquemática das escalas espacial e temporal de diversos processos oceânicos, físicos e biológicos. Em ovais, podemos observar os processos oceânicos e as suas respectivas escalas espaciais, no eixo das abcissas ( $x$ ), e temporais, encontradas no eixo das ordenadas ( $y$ ) . . . . .	15
2.2 Imagens em cores naturais de um <i>plankton blooms</i> (a) no Mar do Norte, adquirida em 05 de maio de 2018 pelo sensor OLI operando no satélite Landsat 8. A mesma floração, em (b), observada em 10 de maio de 2018 pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua da NASA. Em (c), em cores naturais, um vórtice confinando uma floração de plâncton, ampliado em (d), capturado pelo sensor MODIS a bordo do satélite Terra da NASA, em 26 de dezembro de 2011, a 800 <i>km</i> , ao sul da África do Sul. . . . .	17

2.3	Imagem em cores naturais do: (a) Vórtice de von Kármán sobre o Oceano Pacífico observada pelo espectrorradiômetro, MODIS, a bordo do satélite Terra da NASA, em 21 de junho de 2012; (b) vórtice em uma região de Júpiter, chamada de <i>north north north north temperate belt</i> , da sonda Juno, da NASA, em 3 de Novembro de 2019; (c) da imagem pseudo-colorida do oceano, em 12 de dezembro de 2001, derivada do MODIS, a bordo do Terra da NASA, com as ECLs parabólicas extraído da altimetria de satélite sobreposta à Corrente das Malvinas; (d) Registro de espiral de vórtices ao leste do mar Mediterrâneo oriental, registrado pelo oceanógrafo Paul Scully-Power, do Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos da América, em Outubro de 1984, durante o curso do STS 41-G, 13° voo do programa <i>Space Shuttle</i> . . . . .	18
2.4	Exemplos de aplicações de ECLs. Em: (a) Representação esquemática de uma operação SAR ( <i>Search and Rescue</i> ) baseada em TRAP, <i>TRansient Attracting Profiles</i> (Imagem ampla). A imagem menor inserida à direita é uma foto, obtida em 12 de abril de 2015, de um bote de imigrantes no Mar Mediterrâneo; (b) Imagens, em cores naturais, do sensor MODIS (imagem ampla) e do satélite GOES-16 (quadrante inferior direito), referentes aos impactos acarretados pela explosão da Deepwater Horizon em 2010, e suas atuais consequências, em 2020, respectivamente, na superfície do mar; (c) Imagem em cores reais, do vulcão <i>Eyjafjallajökull</i> e sua respectiva nuvem de cinzas em erupção. Imagem obtida em 19 de abril do 2010 pelo MISR ( <i>Multiangle Imaging SpectroRadiometer</i> ), a bordo do satélite Terra da NASA; (d) Imagens em cores naturais, do satélite WorldView-2, após a explosão da Unidade 3 da usina nuclear de Fukushima, em 14 de março de 2011. . . . .	19
2.5	Estruturas clássicas de sistemas dinâmicos em fluxos de fluido estáveis e periódicos. KAM é a abreviação de Kolmogorov-Arnold-Moser. . . . .	20
2.6	Representações esquemáticas de (a) uma superfície material ( $M(t)$ ) gerada no espaço de fase estendido pelo mapa de fluxo de uma superfície ( $M(t_0)$ ) de condições iniciais, e da (b) geometria da linearização do mapa de fluxo, $(\mathbf{F}_{t_0}^t)$ , ao longo de uma superfície material ( $M(t)$ ). . . . .	23
2.7	Representações esquemáticas de: (a) uma superfície material instável ( $M(t)$ ) durante o intervalo de tempo $[t_0, t]$ , e (b) de uma ECLs atratora numa superfície material dado um intervalo finito. . . . .	24

3.1	Médias mensais de Março (a) e de Agosto (b) de TSM a partir do conjunto de dados do MUR (mapa de cores), com resolução espacial de $0.01^\circ$ distribuídos pela PODAAC ( <i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center</i> ), sobrepostas pelas médias mensais das velocidades de superfície do oceano correspondente do ROMS (vetores pretos), e sobrepostas sobre as ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 <i>m</i> de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as barras coloridas são diferentes para cada mês. . . . .	30
3.2	Mapas de médias mensais de ECT (a e b), ECM (c e d) e EC (e e f) (mapas em cores) para Março (quadros à esquerda) e Agosto (quadros à direita), entre 2003 a 2015. Unidade de $m^2/s^2$ em escala logarítmica. ECLc mensais são representados por linhas brancas. Os contornos de profundidades de 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. . . . .	33
3.3	Força de atração climatológica, $c\rho$ (cores em escala logarítmica), calculadas pelas médias anuais (2003–2015) dos tensores de CG de 7 dias, que revelam: (a) locais com altos valores de médias anuais de $c\rho$ ( $> 1, 2, 7$ em unidade linear), e (b) regiões de atração fraca adjacentes à isóbata de 2000 <i>m</i> (pontos coloridos). Os contornos de profundidades de 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. . . . .	35
3.4	Médias mensais de força de atração climatológica ( $c\rho$ ) no AS. Observe uma distribuição meridional descontínua de valores altos de $c\rho$ (cor vermelha) entre as linhas de contorno de 200 e 2000 <i>m</i> de profundidade (linhas pretas). . . . .	37
3.5	<i>Squeezelines</i> climatológicas mensais (linhas brancas) de Março (a) a Agosto (b) plotadas sobre as médias mensais de ASM. Os retângulos pretos indicam regiões mostradas nos painéis de (c) a (f). Em (c) temos a região do Banco de Abrolhos (local 1 na Figura 3.3a); em (d) o Cabo de São Tomé (local 6 na Figura 3.3a); em (e) Cabo Frio (localização 7 na Figura 3.3a); e em (f) o Cabo de Santa Marta (Região 9 na Figura 3.3a). A presença de estruturas ciclônicas e anticiclônicas são destacadas por setas em formas de curvas. As setas retilíneas indicam a direção dos jatos costeiros nas regiões de ressurgências. Os meses de referências estão indicados no canto superior esquerdo de cada mapa. A escala vetorial se encontra no topo de cada mapa. Os contornos de 200 e 2000 <i>m</i> de profundidade são representados por linhas pretas. . . . .	39

3.6	Representação esquemática do transporte Lagrangiano persistente baseado nas médias anuais das ECLc, coloridas de acordo com as médias anuais de $c\rho$ . O mapa à esquerda mostra o domínio completo da região de estudo. O mapa à direita refere-se a um detalhamento ( <i>zoom</i> ) do retângulo tracejado. Os contornos de 200 e 2000 $m$ de profundidade são representados por linhas pretas. . . . .	41
3.7	Trajetórias selecionadas de derivadores SVP, rastreados por satélites, interpolados a cada 6 horas, distribuídos pelo GDP da NOAA; e trajetórias das <i>iSpheres</i> , distribuída pela Prooceano, com o consentimento da PetroRio. Todas as trajetórias estão sobrepostas à média anual de $c\rho$ . a) Derivadores aprisionados em vórtices e meandros próximos à cadeia submarina de Vitória-Trindade e ao monte submarino Almirante Saldanha; b) Derivadores aprisionados em regiões de fraca atração ou <i>inshore</i> à isóbata de 200 $m$ ; c) derivadores que se deslocam <i>inshore</i> à CB, entre as isóbatas de 200 e 2000 $m$ ; d) Derivadores que se deslocam <i>offshore</i> à isóbata de 2000 $m$ ; e) Derivadores que se deslocam <i>onshore-offshore-onshore</i> ; f) Derivadores que se deslocam <i>onshore-offshore-onshore</i> . Os contornos de profundidade de 200 e 2000 $m$ são representados pelas linhas pretas. O SVP de cada derivador está identificado na legenda, à direita inferior, de cada mapa. . . . .	44
3.8	Os valores de PDE (contornos coloridos) em (a) para todas as trajetórias encontradas durante o verão austral (de Janeiro a Março) plotado sobre a média do mês de Fevereiro de $c\rho$ (mapa em cores); (b) para todas as trajetórias encontradas durante outono austral (de Abril a Junho) plotado sobre a média do mês de Maio de $c\rho$ (mapas em cores); (c) para todas as trajetórias encontradas durante inverno austral (de Julho a Setembro) plotado sobre a média do mês de Agosto de $c\rho$ (mapas em cores); e (d) para todas as trajetórias encontradas durante primavera austral (de Outubro a Dezembro) plotado sobre a média do mês de Novembro de $c\rho$ (mapas em cores). Os contornos de 200 e 2000 $m$ de profundidades estão representados por linhas pretas. . . . .	46

- 3.9 a) Vazamento de óleo da operadora Chevron, conforme observado, em cores naturais, pelo sensor MODIS em 12 de Novembro de 2011 às 10:30 (UTC -3) no campo de Frade (cortesia da Petrobras). b) A extensão do derramamento de óleo (polígono preenchido na cor vermelha) plotado sobre as ECLc mensais de Novembro coloridas de acordo com *cp*. c) O derramamento de óleo (polígono preenchido de cor vermelha), as 30 trajetórias simuladas durante 60 dias, entre em 1 de Novembro a 31 de Dezembro de 2011, pelo modelo ROMS (linhas roxas) e as trajetórias dos 06 *iSpheres* (cortesia de Prooceano e PetroRio SA), lançados entre Novembro e Dezembro de 2011 (linhas nas cores magenta, laranja, azul, amarelo, cinza e ciano), plotados ao longo das *squeezelines* climatológicos anuais (linhas na cor cinza). As datas dos lançamentos e os IDs de cada *iSpheres* estão identificadas no canto superior à direita. d) Derramamento de óleo (polígono de cor azul) plotado sobre a média mensal de Novembro das: velocidades de superfície oceânicas do ROMS (setas pretas), dos dados de TSM do MUR (mapa em cores) e das ECLc (linhas brancas). e) Derramamento de óleo (polígono vermelho), plotado sobre a média mensal de Novembro de ASM do ROMS (mapa em cores) e das ECLc (linhas brancas). f) Derramamento de óleo (polígono azul), plotado sobre a média mensal de Novembro da ECT do ROMS (mapa em cores, em escala de log) e das ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 *m* de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. . . . . 49
- 3.10 Localização das praias, ao longo da costa brasileira, referente à nossa área de estudo, que foram oleadas pela primeira vez (pontos cor de rosa), e em que ocorreram as reincidências (pontos azuis) em: Novembro (mapas de a até d) e Dezembro (mapas de e até h) de 2019 e Janeiro (mapas de i até j) e Fevereiro (mapas de k até l) de 2020. Os contornos de 200 e 2000 *m* de profundidade estão representados por linhas pretas. Os locais oleados e re-oleados são sobrepostos às médias mensais de ECLc (linhas coloridas) e de *cp* (mapa em cores) para indicarem os padrões de transporte e os locais de máxima atração de partículas. . . . . 51

A.1	Médias sazonais de Verão (a) e inverno (b) de TSM a partir do conjunto de dados do MUR (mapa de cores), com resolução espacial de $0.01^\circ$ distribuídos pela PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), sobrepostas pelas médias mensais das velocidades de superfície do oceano correspondente do ROMS (vetores pretos), e sobrepostas sobre as ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 m de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as barras coloridas são diferentes para cada mês. . . . .	86
A.2	Detalhamento das linhas de material atradoras ( <i>squeezelines</i> , linhas brancas) deforma em chevrons (forma de v). Esse padrão de deformação são visualmente semelhantes às deformações encontradas nos gradientes de TSM obtidas dos dados do satélite MUR. . . . .	87
A.3	Médias sazonais de ECT (a e b), ECM (c e d) e EC (e e f) (mapas em cores) para o Verão (quadros à esquerda) e Inverno (quadros à direita), entre 2003 a 2015. Unidade de $m^2/s^2$ em escala logarítmica. ECLc sazonais são representados por linhas brancas. Os contornos de profundidades de 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. . . . .	88
A.4	Detalhamento do vazamento de óleo da operadora Chevron (polígono preenchido na cor vermelha) as 30 trajetórias simuladas durante 60 dias, entre em 1 de Novembro a 31 de Dezembro de 2011, pelo modelo ROMS (linhas roxas) e as trajetórias dos 06 iSpheres (cortesia de Prooceano e PetroRio SA), lançados entre Novembro e Dezembro de 2011 (linhas nas cores magenta, laranja, azul, amarelo, cinza e ciano), plotados ao longo das <i>squeezelines</i> climatológicos anuais (linhas na cor cinza). . . . .	89
A.5	Representações esquemáticas da (a) iSphere e do (b) derivador SVP. . . . .	90
A.6	Trajetoárias dos derivadores SVP plotados sobre a média anual de $c\rho$ (em escala logarítmica). a) Derivadores sob os números de SVP 43621, b) 45969, c) 46072 e d) 71895. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Os IDs dos derivadores estão localizados no canto inferior direito de cada quadro da imagem. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e pontos em azuis as suas posições finais. . . . .	91

A.7	Trajetórias dos flutuadores sintéticos ( <i>floats</i> ) sobre a média anual de $c\rho$ (em escala logarítmica). No lado esquerdo, encontram-se as trajetórias dos 30 <i>floats</i> lançados em 1 de Dezembro de 2013, com os destinos até 28 de Fevereiro de 2014. No lado direito, estão as trajetórias dos 30 <i>floats</i> lançados em 1 de Junho de 2006, com os destinos até 30 de Setembro de 2006. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e os pontos em azuis suas posições finais. . . . .	92
A.8	a) Derivador SVP 71891 plotado sobre $c\rho$ anual (em escala logarítmica). b) As trajetórias dos 30 <i>floats</i> lançados em 1 de Dezembro de 2013 com destino até 28 de Fevereiro de 2014. c) As trajetórias dos 30 <i>floats</i> lançados em 1 de Junho de 2006 com destino até 30 de Setembro de 2006. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e os pontos em azuis suas posições finais. . . . .	93
A.9	Médias mensais de ASM plotados (mapas em cores) sobre as médias mensais de velocidade de superfície simuladas (vetores pretos), e sobre as médias mensais de ECLc (linhas brancas). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.	95
A.10	Médias mensais de $c\rho$ (em escala logarítmica) plotado sobre as médias mensais de velocidades de superfície simuladas (vetores pretos). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. . . . .	96
A.11	Todas as trajetórias referentes ao verão (de Janeiro a Março) plotadas sobre $c\rho$ de Fevereiro (a). Todas as trajetórias referentes ao outono (de Abril a Junho) plotadas sobre $c\rho$ de maio (b). Todas as trajetórias referentes ao inverno (de Julho a Setembro) plotadas sobre $c\rho$ de Agosto (b). Todas as trajetórias referentes à primavera (de Outubro a Dezembro) plotadas sobre $c\rho$ de Novembro (d). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os valores de $c\rho$ estão em escala logarítmica. . . . .	97
A.12	Médias mensais de ECLc ( <i>squeezelines</i> ) da área de estudo coloridas de acordo com as médias mensais de $c\rho$ (em escala logarítmica). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. . . . .	98

A.13 Médias mensais de TSM com presença dos vórtices de Vitória, São Tomé, Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. Imagem referente a a) 22 de Abril de 2006; b) 08 de Agosto de 2013; c) 10 de Junho de 2007; d) 10 de Setembro de 2010. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 <i>m</i> estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as escalas de cores são diferentes para cada imagem. . . . .	99
A.14 Rastro de um derramamento de óleo de um rebocador costeiro, ocorrido em março de 2006, próximo a região costeira de Cabo Frio, plotado sobre a média mensal de $c\rho$ para o mês de Março. A mancha detectada com 27 $km^2$ estava a 16 <i>MN</i> (milhas náuticas) da costa, a de 32 $km^2$ estava a 13 <i>MN</i> , a de 5 $km^2$ estava a 5 <i>MN</i> , a de 30 $km^2$ estava a 8 <i>MN</i> , e por fim, a de 37 $km^2$ estava a 1,5 <i>MN</i> . Observe que as manchas de 27 $km^2$ (cor preta), 32 $km^2$ (cor vermelha) e 30 $km^2$ (cor magenta) estão contidas dentro de uma região estagnada ( $c\rho < 0,3$ ), mantendo o rastro do reboque contido nessa região. Enquanto a mancha de 37 $km^2$ (cor roxa) tende a ir para a região de alto valores de $c\rho$ ( $> 1$ ). . . . .	100
A.15 Mapa conceitual, resumido, da metodologia das ECLc. . . . .	101
A.16 Mapa conceitual, resumido, da metodologia das velocidades superficiais obtidas pela simulação. . . . .	101
A.17 Mapa conceitual, resumido, da metodologia das simulações dos flutuadores sintéticos. . . . .	102
A.18 Mapa conceitual, resumido, da metodologia das ECLs e ECLc. . . . .	103
A.19 Mapa conceitual, resumido, da metodologia da quantificação da EDP. . .	104
A.20 Mapa conceitual, resumido, da metodologia da quantificação da ECT, ECM e EC. . . . .	105

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Porcentagem de derivadores, com velas de 15 <i>m</i> , rastreados por satélites, distribuídos pelo GDP da NOAA, e de <i>iSpheres</i> que cruzaram a isóbata de 2000 <i>m</i> ao longo de uma região de fraca atração, como indicado na Figura 3.3b. O mesmo derivador pode ser contado mais de uma vez caso ele cruze mais de uma região de fraca atração. *A porcentagem está relacionada ao total dos 352 derivadores. . . . .	43
3.2 Constituintes de maré inseridas ao arquivo de forçante . . . . .	60



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCO	–	Corrente de Contorno Oeste
CSE	–	Corrente Sul Equatorial
CNB	–	Corrente Norte do Brasil
CB	–	Corrente do Brasil
CM	–	Corrente das Malvinas
GSAS	–	Giro Subtropical do Atlântico Sul
CCOI	–	Corrente de Contorno Oeste Intermediária
AT	–	Água Tropical
ACAS	–	Água Central do Atlântico Sul
AIA	–	Água Intermediária Antártica
APAN	–	Água Profunda do Atlântico Norte
ECLs	–	Estruturas Coerentes Lagrangianas
ECLc	–	Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas
LCSs	–	<i>Lagrangian Coherent Structures</i>
ROMS	–	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
TCG	–	Tensores de Cauchy-Green
$cp$	–	Força de Atração Climatológica
TSM	–	Temperatura da Superfície do Mar
ASM	–	Altura da Superfície do Mar
ECM	–	Energia Cinética do Escoamento Médio
ECT	–	Energia Cinética Turbulenta
EC	–	Energia Cinética Total
CG	–	Corrente do Golfo
PDF	–	Função de Distribuição de Probabilidade
TSM	–	Temperatura da Superfície do Mar
MUR	–	<i>Multi-sensor Ultra-high Resolution</i>
PODAAC	–	<i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center</i>
SAVE	–	<i>South Atlantic Ventilation Experiment</i>
OLI	–	<i>Operational Land Imager</i>
MODIS	–	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
AQUA	–	<i>Aqua Project Science</i>
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
SAR	–	<i>Search and Rescue</i>
ASM	–	Altura da superfície do mar
IBAMA	–	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
TCG	–	Tensor de Cauchy-Green
KAM	–	Kolmogorov–Arnold–Moser
ELTF	–	Expoente de Lyapunov de Tamanho Finito
PCL	–	Plataforma Continental Leste Brasileira
PCSE	–	Plataforma Continental Sudeste Brasileira

NGDC	–	<i>National Geophysical Data Center</i>
NOAA	–	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
GSHHG	–	<i>Global Selfconsistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database</i>
CFSR	–	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CFSv2	–	<i>Climate Forecast System version 2</i>
GFDL MOM	–	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model</i>
SODA	–	<i>Simple Ocean Data Assimilation</i>
AS	–	<i>Atlântico Sudoeste</i>
AT	–	<i>Água Tropical</i>
NEMO	–	<i>Nucleus for European Modelling of the Ocean</i>
HYCOM	–	<i>Hybrid Coordinate Ocean Model</i>
MUR	–	<i>Multi-scale Ultra-high Resolution</i>
GDP	–	<i>Global Drifter Program</i>
EDP	–	<i>Estimação de Densidade de Probabilidade</i>
PDF	–	<i>Probability Density Function</i>
PDE	–	<i>Probability Density Estimate</i>
KDE	–	<i>Kernel Density Estimation</i>
ETL	–	<i>Escala de Tempo Lagrangiana</i>
SVP	–	<i>Surface Velocity Project</i>
MN	–	<i>Milhas Náuticas</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$	–	força de atração
$S_v$	–	Sverdrup
$\mathbf{x}_0, \mathbf{x}$	–	posição
$t_0, t$	–	tempo
$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$	–	campo de velocidade
$\mathbf{F}_{t_0}^T$	–	mapa de fluxo
$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_0, t_0, t)$	–	<i>pathlines</i>
$M(t)$	–	linha/superfície material
$x_0 + x$	–	posição posterior
$t_0 + t$	–	tempo posterior
$M$	–	superfície bidimensional
$F^t$	–	fluxo estendido
$\nabla F(x_0)$	–	gradiente de deformação
$D\mathbf{F}_{t_0}^t$	–	Jacobiano
$\top$	–	matriz transposta
$\lambda_i$	–	autovalor
$\xi_i$	–	autovetor
$\mathbf{C}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0)$	–	tensor
$\mathbf{n}_0$	–	unidade normal
$[t_0, t]$	–	tempo finito
$T$	–	tempo retrógrado
$\rho_{t_0}^t(\mathbf{x})$	–	repulsão normal



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Hipóteses . . . . .	10
1.2 Objetivos . . . . .	10
1.3 Estrutura da tese . . . . .	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 O transporte advectivo e difusivo . . . . .	13
2.2 Sistema dinâmico não linear . . . . .	14
2.3 Estruturas Coerentes Lagrangianas . . . . .	20
2.3.1 Linhas e superfícies material . . . . .	21
<b>3 MEANDROS E VÓRTICES PERSISTENTES CONDUZEM OS PADRÕES DE TRANSPORTE LAGRANGIANO QUASE- ESTÁVEIS EM UMA CORRENTE DE CONTORNO OESTE FRACA</b> . . . . .	<b>27</b>
3.1 Introdução . . . . .	27
3.2 Resultados . . . . .	29
3.2.1 A estrutura principal da CB . . . . .	29
3.2.2 Variabilidade do fluxo de superfície por meio de derivadores . . . . .	42
3.2.3 O derramamento de óleo no campo de Frade . . . . .	47
3.2.4 A contaminação de petróleo em larga escala no nordeste do Brasil de origem desconhecida . . . . .	50
3.3 Discussões . . . . .	52
3.4 Sumário e conclusões . . . . .	58
3.5 Métodos . . . . .	59
3.5.1 Dados de velocidade do ROMS . . . . .	59
3.5.2 Simulações Lagrangianas . . . . .	60
3.5.3 As ECL climatológicas e $c\rho$ . . . . .	61
3.5.4 Trajetórias de superfície observadas e suas Estimativas de Densidade de Probabilidade (EDP) . . . . .	62
3.5.5 Dados auxiliares . . . . .	63
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>65</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>69</b>
<b>APÊNDICE A</b> . . . . .	<b>85</b>
A.1 Médias sazonais de Verão e Inverno de TSM. . . . .	86
A.2 Chevron . . . . .	87
A.3 Médias sazonais de Verão e Inverno de Energia Cinética . . . . .	88
A.4 Campo de Frade . . . . .	89
A.5 Derivadores . . . . .	90
A.6 Trajetórias dos derivadores SVP e sintéticos . . . . .	91
A.7 Médias mensais das velocidades superficiais da simulação . . . . .	94
A.8 Trajetórias por estações do ano . . . . .	97
A.9 Padrões de transporte Lagrangiano persistentes . . . . .	97
A.10 Temperatura da superfície do mar derivada do MUR . . . . .	99
A.11 Rebocador costeiro . . . . .	100
A.12 Mapas Conceituais . . . . .	101

# 1 INTRODUÇÃO

Cerca de 75% da superfície terrestre é coberta pelos oceanos. Estes ajudam a estabilizar a atmosfera e o clima, auxiliam na absorção dos gases de efeito estufa (TALLEY et al., 2011), sustentam importantes ecossistemas marinhos, fornecem rotas de navios para o transporte e são um dos principais fornecedores de alimentos para muitos países costeiros e insulares.

A dinâmica dos oceanos é regida por um amplo espectro de escalas temporais e espaciais (DICKEY, 2003). Devido a sua extensão, torna-se árduo e custoso o seu monitoramento através apenas de navios e boias. Desde a década de 1970, a disponibilidade de imagens de satélites representou um avanço grande nos estudos oceanográficos, para a avaliação de dados físicos obtidos com sensores e como um suporte aos levantamentos registrados por navios e boias (TALLEY et al., 2011).

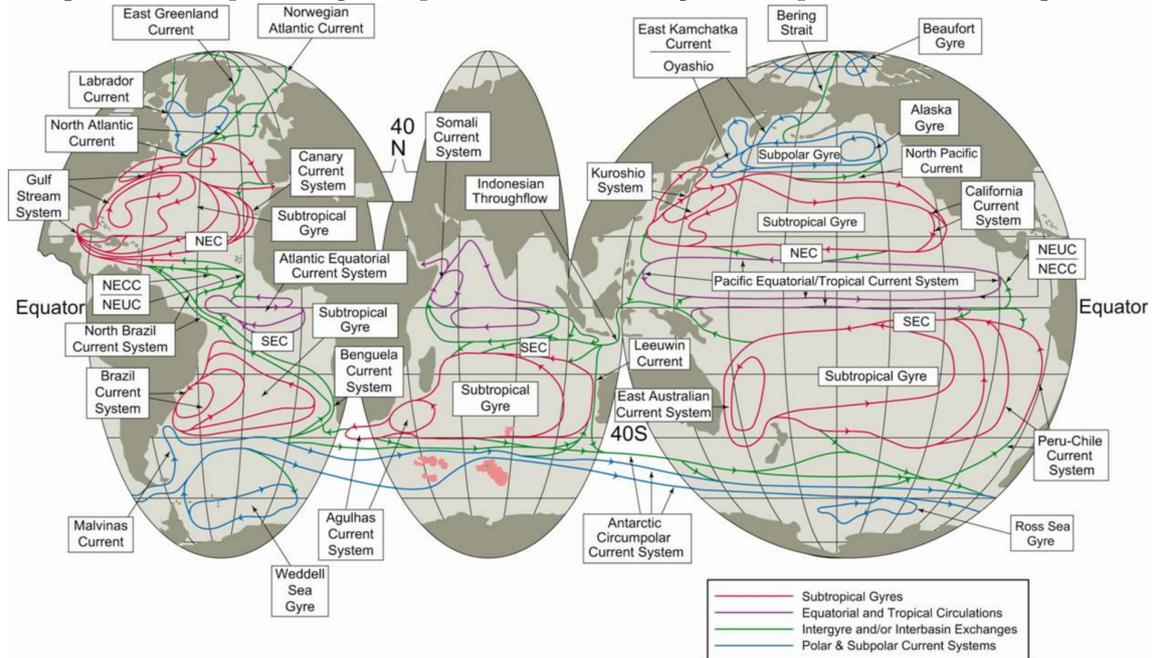
Diferentes sensores a bordo de satélites permitem a observação das características físicas e biológicas de grandes áreas oceânicas e costeiras. Estes abrangem uma extensa área oceânica e permitem aos cientistas a obtenção de medições instantâneas sobre uma grande área (GARRISON, 2016). Além disso, os satélites podem realizar várias passagens sobre a mesma área no curso de um dia e também documentar de forma sistemática as mudanças temporais. Atualmente, os satélites são equipados com uma variedade de sensores, incluindo transmissores e receptores de radar, refletores a laser, altímetros, e câmeras que detectam a luz visível, infravermelha e radiação por micro-ondas. Após processados e interpretados, os dados obtidos podem revelar, por exemplo, a temperatura e altura da superfície do mar, concentração de gelo marinho, turbidez da água, condições do vento de superfície e de ondas, correntes oceânicas e marés (PICKARD; EMERY, 2016).

A circulação de grande escala dos oceanos é composta por inúmeras correntes oceânicas. Em subsuperfície, abaixo dos 400 m de profundidade, as correntes são geradas por variações espaciais da densidade da água do mar (GARRISON, 2016). Já a circulação oceânica próxima à superfície, que representa cerca de 10% da água do oceano no mundo (GARRISON, 2016), é causada pelos ventos de larga escala, como por exemplo, os ventos alísios (STOMMEL, 1948; FU; CAZENAVE, 2000).

As correntes geostróficas, são correntes estacionárias que resultam de um equilíbrio entre um gradiente de pressão e a deflexão de Coriolis (TALLEY et al., 2011). As correntes em um giro oceânico, fluem paralelamente aos ventos zonais dominantes devido ao fluxo geostrófico (Figura 1.1). Existem seis grandes circuitos de correntes

no oceano mundial, dos quais cinco deles são referentes a giros geostróficos. Elas podem ser classificadas por sua posição no giro como correntes de contorno oeste, leste ou transversais (GARRISON, 2016; TALLEY et al., 2011).

Figura 1.1 - Representação esquemática da circulação da superfície do oceano global.



FONTE: Adaptado de Talley et al. (2011).

As correntes de contorno oeste (CCOs) são caracterizadas por fluxos intensos, estreitos e bem definidos fluindo ao longo de margens continentais oeste (SILVEIRA et al., 2000) das maiores bacias oceânicas do mundo (IMAWAKI et al., 2013). As CCOs são resultados da conservação de certas propriedades do escoamento do oceano, como o volume, a vorticidade e o calor. Essas correntes sustentam a recirculação dos grandes giros e podem estender-se para o oceano profundo (FU; CAZENAVE, 2000; IMAWAKI et al., 2013). Assim, a circulação nas bacias oceânicas em latitudes médias se organiza em Giros Subtropicais Anticiclônicos, movidos, principalmente, pela ação dos ventos na superfície (STOMMEL, 1948; FU; CAZENAVE, 2000) (veja a Figura 1.1, linhas representadas na cor vermelha).

A circulação oceânica de larga escala no oceano Atlântico Sul é fortemente influenciada pelo Giro Subtropical. O limite mais equatorial deste giro é composto pela Corrente Sul Equatorial (CSE), que flui para oeste (PETERSON; STRAMMA, 1991). Próximo à costa brasileira, em aproximadamente 14,5°S, o ramo sul da CSE (CSEs),

com um transporte de 16 Sv ( $1 \text{ Sv} = 106 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), a corrente se bifurca em dois ramos (SOUTELINO; SILVEIRA, 2008; SILVEIRA et al., 2008). Um volume em torno de 11 Sv flui para a direção norte, dando origem à Corrente Norte do Brasil (CNB) (STRAMMA, 1989; PETERSON; STRAMMA, 1991). Uma fração menor desse volume, em torno de 4 a 6,5 Sv (CASTRO et al., 2006), flui na direção sul-sudoeste, desde superfície até as profundidades intermediárias entre 400 e 500 m (SILVEIRA et al., 2008), originando a Corrente do Brasil (CB). A CB flui paralela à costa brasileira até encontrar-se com Corrente das Malvinas (CM), entre 33 e 38°S. A CB atinge esta região, denominada de Confluência Brasil-Malvinas, com um transporte de, aproximadamente, 17,5 a 19 Sv (STRAMMA, 1989; GORDON; GREENGROVE, 1986). Após a confluência, a CB se afasta e flui para direção leste, sendo denominada de Corrente do Atlântico Sul. Ao se aproximar do continente africano, esta é defletida na direção norte-nordeste dando origem à Corrente de Benguela, a qual, por sua vez, constituirá novamente a CSE, fechando o Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS) (PETERSON; STRAMMA, 1991).

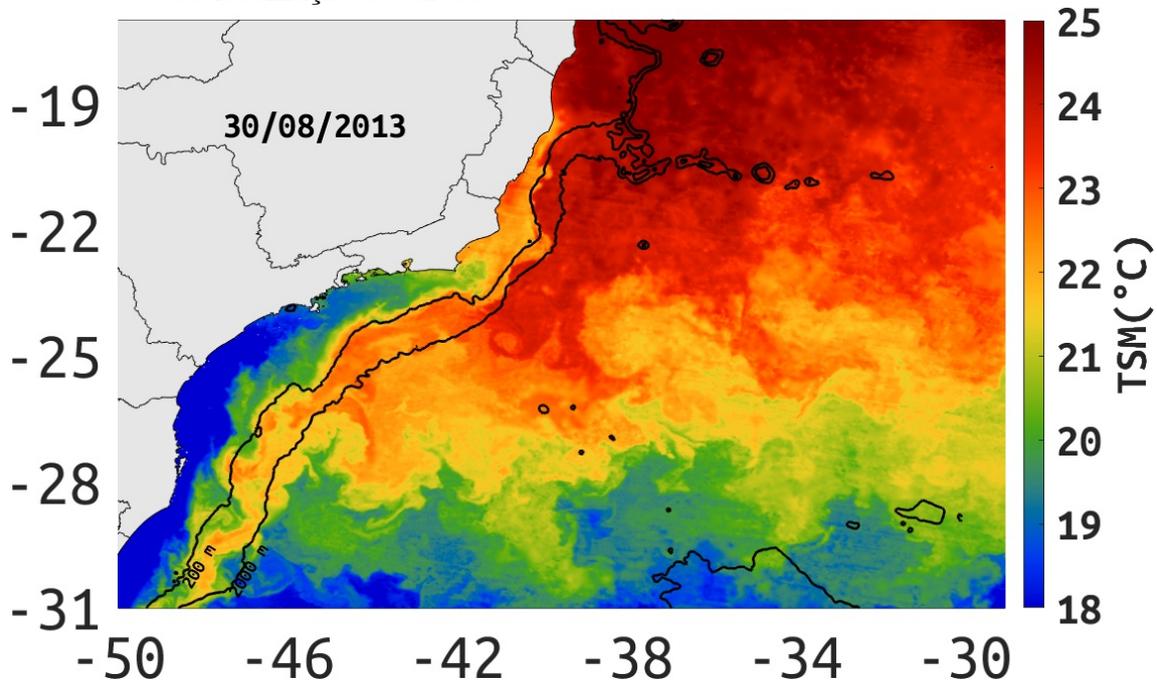
No talude continental, por onde flui a CB, nota-se um empilhamento de massas de água característica do Atlântico Sul (CASTRO et al., 2006). Ao Sul de 10S, a CB transporta, nos primeiros 200 m de profundidade, uma massa de água quente e salina, que flui predominantemente para sudoeste, identificada como Água Tropical (AT). Em seu trajeto para o sul, a AT mistura-se com águas de origem costeira mais frias e de menor salinidade (EMÍLSSON, 1961). Ao Sul de 20S, em nível picnoclínico, é encontrada a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), chegando até aproximadamente 750 m de profundidade (CAMPOS et al., 1995). Entre 25°S a 40°S, abaixo de 750 m de profundidade, as características da massa de água são referentes a Água Intermediária Antártica (AIA). Sua extensão vertical chega a alcançar cerca de 1200 m de profundidade (nível subpinoclínico) (CAMPOS et al., 1995; BOEBEL et al., 1999; SCHMID et al., 2000; SILVEIRA et al., 2004). Abaixo da AIA, a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) ocupa níveis de 1500 a 3000 m de profundidade, fluindo em direção ao sul ao longo do contorno oeste até 42S (REID, 1989).

Apesar de ser uma CCO, relativamente, fraca (5 a 10 Sv), estreita (100–120 km) e rasa Garfield (1994), a CB é energeticamente comparável com a corrente do Golfo (CG) (LORENZZETTI et al., 2009; CASTRO et al., 2006) na região jusante à Cabo Hatteras (SILVEIRA et al., 2008). Johns (1988) encontrou um modelo linear, unidimensional e de instabilidade baroclínica que prevê, consistentemente com dados observacionais, dois regimes de instabilidade para a CG, perto de 74W. Uma de baixa frequência com ondas de comprimento de 390km por um período de 28 dias.

E outra, com uma frequência mais alta, regime de ondas curtas (180–220 *km*), para um período de 5 a 7 dias. Essas afirmações mostram que os regimes instáveis estão associados a dois gradientes médios de vorticidade potencial, ocorrendo dentro e abaixo da termoclina com profundidades respectivas de 600 a 800 *m* e de 1300 a 1500 *m*. Já [Silveira et al. \(2008\)](#), analisando um conjunto de 51 imagens AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) sem a presença de nuvens, entre os anos de 1993 a 2001, na região de Cabo de São Tomé e de Cabo Frio, encontraram ondas instáveis, dispersivas e de propagação em direção ao sul-sudeste, com cerca de 235 a 275 *km* de comprimento e com uma taxa de crescimento em torno de 0,006 *dias*<sup>-1</sup>.

A intensa atividade de mesoescala da CB é frequentemente observada na costa sudeste do Brasil, especialmente, entre a região de Vitória (20°S) e Cabo Frio (23°S) ([CALADO et al., 2006](#)). Essa marcante característica da CB pode ser visualizada nas imagens da temperatura da superfície do mar (TSM), como ilustrado na Figura 1.2. [Silveira et al. \(2008\)](#) sugerem que o meandramento da CB se deve à abrupta mudança da orientação da linha de costa e do gradiente batimétrico que, por conservação de vorticidade potencial, gerariam uma onda de Rossby topográfica ao longo do talude continental. A natureza baroclinicamente instável da CB é causada pela presença da Corrente de Contorno Oeste Intermediária (CCOI), em nível subpicnoclínico, próximo a 25°S, fluindo em direção ao norte paralela à costa brasileira ([STRAMMA, 1989](#); [STRAMMA; ENGLAND, 1999](#); [BOEBEL et al., 1999](#)). O sistema CB–CCOI é dominado pelo processo de instabilidade baroclínica de primeiro modo, com uma única reversão de direção associado ao fluxo CCOI, em direção distinta para o norte-nordeste, em torno de 400 a 500 *m* de profundidade ([SILVEIRA et al., 2004](#)). A intensa atividade de mesoescala ao longo da CB, desde a sua origem na bifurcação da CSEs até a região da confluência Brasil-Malvinas, é caracterizada pela presença de meandros, estruturas ciclônicas e anticiclônicas, e de vórtices, que ocorrem de forma recorrente ou semi-permanente ([CAMPOS et al., 1995](#); [CAMPOS et al., 1996](#)). Alguns desses vórtices são ejetados da CB e/ou são reabsorvidos pelo fluxo da CB ([SILVEIRA et al., 2008](#)). A formação dessas estruturas também pode causar reversões no escoamento superficial, próximo à isóbata de 1000 *m* e, por conseguinte, causar alterações no transporte de Sverdrup ([LIMA et al., 2016](#)).

Figura 1.2 - Padrão de TSM, em graus Celsius, do conjunto de dados do *Multi-sensor Ultra-high Resolution* (MUR), distribuída pela *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC). O campo de TSM, com uma resolução espacial de  $0,01^\circ$ , corresponde ao dia 30 de agosto de 2013. Em cor preta são indicadas as isóbatas de 200 e 2000 m de profundidade, representativas da localização do talude.



FONTE: Produção da autora.

O transporte horizontal e os processos de misturas são fundamentais para os estudos das dinâmicas: física, química e biológica dos oceanos (BERON-VERA et al., 2019). A compreensão de ambos é relevante e crucial para uma série de questões práticas, como a dinâmica do plâncton e destino de poluentes. Nesse sentido, a teoria de sistemas dinâmicos não lineares corrobora com a descrição do transporte Lagrangiano e dos fenômenos de misturas (D'OVIDIO et al., 2004). O objetivo dessa teoria não contempla prever as trajetórias individuais de traçadores e/ou partículas. Ela visa a localização de padrões de trajetórias recorrentes na superfície do mar que evoluem lentamente em relação a uma escala de tempo lagrangiana típica, referente a cada região, capazes de organizar o transporte oceânico (DURAN et al., 2018).

Esses padrões de transporte permitem a identificação objetiva de superfície (linha) material que exercem a máxima influência em trajetórias próximas, denominadas de Estruturas Coerentes Lagrangianas (ECLs), do inglês *Lagrangian Coherent Structures* (LCSs) (HALLER, 2015). As descrições das ECLs, também conhecidas como

"o esqueleto oculto do fluxo, "*The hidden skeleton of fluid flows*", (FARAZMAND; HALLER, 2012; PEACOCK; HALLER, 2013), desempenham um papel importante no esclarecimento da interação espaço-temporal entre as CCOs e os giros anticiclônicos (SAMELSON, 2013). As ECLs fornecem informações novas e complementares à abordagem clássica de turbulência sobrepostas a um fluxo médio com importantes aplicações práticas para compreender o mecanismo de troca e de mistura entre uma CCO e os giros de recirculação de sub bacia (DEESE et al., 2002).

O estudo recente de Duran et al. (2018) demonstrou que é possível caracterizar o transporte superficial oceânico a partir do cálculo das Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas (ECLc). Esse cálculo baseia-se nas séries de tempo de longo termo dos vetores de velocidade superficial gerados por modelos oceânicos de alta resolução horizontal e temporal. Por intermédio dessa ferramenta é possível determinar padrões persistentes da dinâmica e da cinemática da circulação superficial oceânica. As ECLc restringem a circulação-média Lagrangiana a partir da climatologia diária das velocidades superficiais oriundas de modelagem numérica, evidenciando que uma velocidade climatológica pode preservar informações significativas do transporte Lagrangiano. Neste mesmo trabalho, Duran et al. (2018) exemplifica o uso das ECLc na extração de padrões de transporte observados durante o vazamento de petróleo da *Deepwater Horizon*, e do *Ixtoc*, ocorridos em 20 de abril de 2010 e 3 de junho de 1979, respectivamente, na CG.

Gough et al. (2019) apontou que as ECLc persistentes possuem a forma de um gancho (do inglês, *hook-like*) associadas à CG durante todo o ano. Os autores também identificaram padrões de mesoescala que caracterizam o transporte de superfície e estruturas que atuam como barreiras de transporte ao isolar a circulação da plataforma continental da circulação do oceano mais profundo. Maslo et al. (2020) forneceram evidências de que o giro ciclônico forma uma região fechada na CCO da CG ao delimitar o transporte entre o Golfo Oriental e o Ocidental, principalmente, restringe a corrente de contorno com a sua borda externa. Sua descoberta apresenta uma conectividade entre o giro ciclônico com as águas profundas da CG.

Compreender os padrões persistentes de transporte superficial Lagrangiano no oceano é importante para várias aplicações, em particular para poluentes flutuantes, como derramamentos de óleo. Esses padrões determinam como o material se move sob a ação de correntes oceânicas, o que auxiliará em estimativas rápidas para minimizar os danos socioeconômicos e ambientais consequente de um desastre ambiental. Um desastre ambiental sem precedentes (Figura 1.3), até o momento da redação

deste documento, causou impactos incalculáveis nas 1009 localidades atingidas (pontos em vermelho no mapa, Figura 1.4) e em sua biota marinha (inclusive no estado São Paulo, o qual não teve avistamento de mancha de óleo, mas ambientalistas do IPRC (2008) e do Save Brasil (2020) encontraram duas aves, que estavam migrando para o sul, contaminadas com vestígios do mesmo óleo (Figura 1.4, tabelas à direita). A extensão do acidente compreendeu 11 estados e 130 municípios, que vão desde a ilha de Caçueira (localizada no estado do Maranhão) até Grussaí (localizada no estado do Rio de Janeiro, Figura 1.4). A mancha de petróleo cru de alta densidade, com alta concentração de hidrocarbonetos poliaromáticos, substâncias altamente tóxicas, espalhou-se por praias, mangues e áreas marinhas protegidas (IBAMA, 2019b). Cerca de 5,3 mil toneladas de resíduos foram recolhidas, em sua grande parte, por mobilizações de moradores locais. A ausência de vestígios da mancha em alto mar e de um ponto de sua origem impediu prever quando as manchas aparaceriam novamente no litoral ou atingiriam outras praias ainda não oleadas. No caso de vazamento de petróleo, essa falta de previsões das grandes mudanças de curto prazo poderia ter sido suprida com as identificações objetivas (independente de quadro) das principais superfícies do material (variedade invariante no espaço de fase estendido em evolução) que impulsionam a mistura do traçador em dados instáveis de fluxo em tempo finito. A abordagem das ECLs fornece, portanto, informações sobre o transporte de partículas e/ou traçadores passivos a longo prazo (OLASCOAGA; HALLER, 2012), que são cruciais para planejamento e contingenciamento de um vazamento de petróleo.

Figura 1.3 - Galeria de fotos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) referentes ao vazamento ocorrido no Brasil em 2019.



(a) Alagoas, imagem obtida em 07/10/2019.



(b) Bahia, imagem obtida em 21/10/2019.



(c) Maranhão, imagem obtida em 09/10/2019.



(d) Pernambuco, imagem obtida em 21/10/2019.



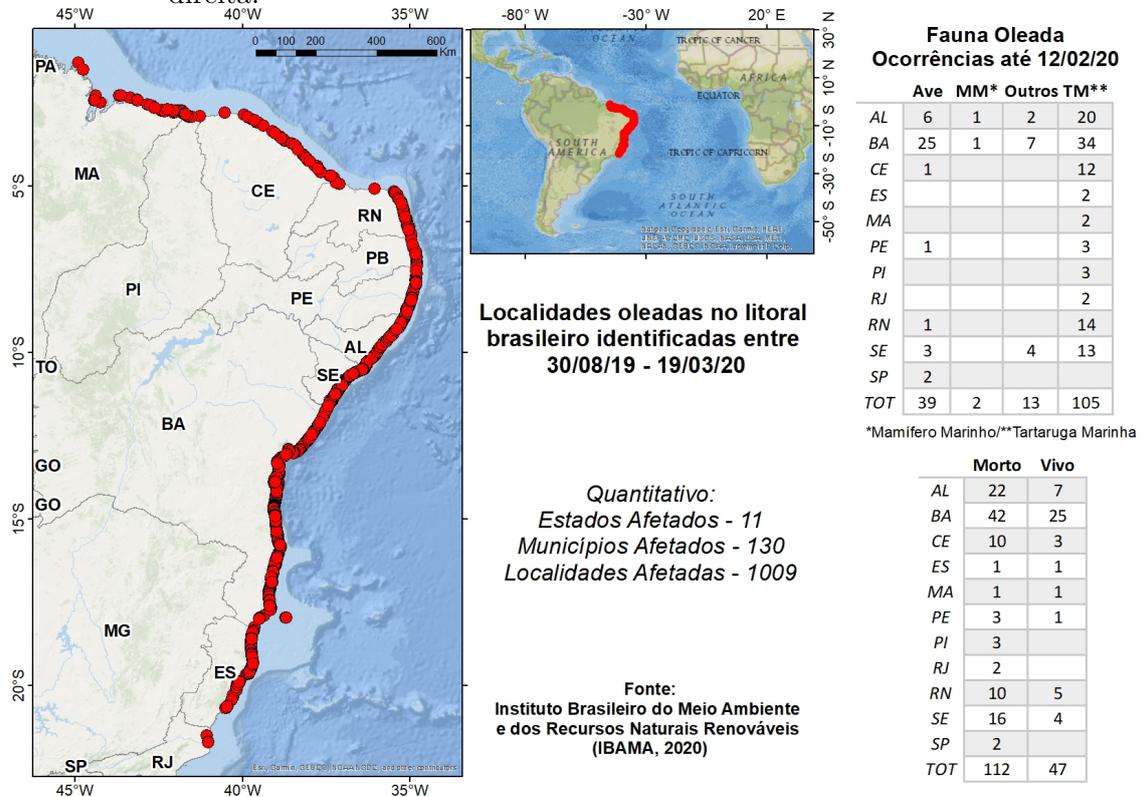
(e) Sergipe, imagem obtida em 09/10/2019.



(f) Rio Grande do Norte, imagem obtida em 14/09/2019.

FONTE: Adaptado de IBAMA (2019c).

Figura 1.4 - Desastre ambiental ocorrido em 2019 em todo o litoral nordestino até o norte do estado do Rio de Janeiro e a quantificação da fauna atingida, tabela à direita.



FONTE: Produção da autora.

Baseado no contexto até aqui exposto, este trabalho determina os padrões persistentes de transporte superficial Lagrangiano no Atlântico Sudoeste revelados com base nos cálculos das ECLc, desenvolvido por Duran et al. (2018), e discute o papel destas estruturas no transporte do óleo na superfície do oceano. Assim, no presente estudo, as ECLc são calculadas a partir das médias diárias das velocidades de superfície do mar fornecidas pela simulação numérica do *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2009). Com base nas médias diárias de velocidades superficiais, calcularam-se os Tensores de Cauchy-Green (TCG). Posteriormente, calcularam-se as médias mensais e anuais desses tensores (veja também a Figura A.15). A partir dessas médias, foram extraídas as ECLc mais atratoras (persistentes), que identificam objetivamente os padrões de transportes Lagrangianos, os quais governam os movimentos de partículas e/ou traçadores passivos no Atlântico Sudoeste.

Este estudo visa contribuir com a comunidade científica sobre o padrão persistente

do transporte superficial Lagrangiano, que visa contribuir com os estudos de exploração de petróleo, dispersão e destino de poluentes e lixos marinhos, planejamento e contingenciamento de derramamento de óleo, operações de resgate no oceano, avaliação nas conectividades de larvas e peixes e estratégias para regiões de lançamentos de derivadores SVP (*Surface Velocity Project*, (DATA BUOY CO-OPERATION PANEL, 2005)).

## 1.1 Hipóteses

Alicerçada na apresentação acima, a presente pesquisa se propõe a testar as seguintes hipóteses:

- Os padrões de transporte Lagrangiano superficiais persistentes podem explicar as anomalias do escoamento médio da CB.
- Existem tendências de deslocamento e agregação de partículas de poluentes na região costeira e na CB.
- A CB é uma barreira de transporte meridional quase-contínua entre as latitudes de 17 a 31°S.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é determinar os padrões de transporte Lagrangiano recorrentes e predominantes e como estes se relacionam com a intensa atividade de mesoescala e na dispersão de poluentes. Para atingir esse objetivo principal, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Determinar os padrões de transportes Lagrangianos recorrentes na região da CB e de seu entorno.
- Comparar as ECLc à estrutura média dos campos Eulerianos com base na comparação com dados de sensores orbitais, derivadores com velas e flutuadores sintéticos.
- Analisar a relação entre a recorrente atividade de mesoescala e os padrões persistentes Lagrangianos quase-estáveis na CB.
- Identificar regiões isoladas e regiões atratoras que influenciam a trajetória das manchas de óleo.

- Verificar a presença de barreira de transporte, meridional, na CB.
- Determinar como as ECLc contribuem para explicar os padrões de transporte observados em três eventos de vazamento de óleo.

### 1.3 Estrutura da tese

Após esta introdução, o documento segue a organização padrão referente a publicações de teses em formato alternativo: i) capítulo de fundamentação teórica; ii) capítulo que contempla o artigo submetido à *Scientific Reports*<sup>1</sup>; iii) as considerações finais; e iv) as referências bibliográficas. O material suplementar referente ao artigo submetido e as figuras adicionais a essa tese, podem ser encontrados no apêndice.

---

<sup>1</sup>Artigo submetido à Scientific Reports, sob o n<sup>o</sup> 6b4a0142-2447-496a-af23-0b72ec101468, em processo de revisão por pares. Um pré-print pode ser visualizado em: <https://arxiv.org/abs/2008.07620>



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O óleo, após ser derramado no mar, sofre inúmeras transformações em termos de massa e na sua estrutura físico-química. Essas transformações determinam a sua persistência e a possibilidade da sua remoção ambos na superfície do mar. O destino e a contaminação do ambiente marinho e costeiro dependem da quantidade de óleo derramado, suas características físicas e químicas iniciais e as condições climáticas e oceanográficas do local do derramamento. Os dados de sensoriamento combinados com a identificação de: i) padrões de trajetórias persistentes, estruturas que evoluem lentamente em relação a uma escala de tempo Lagrangiana, na superfície do mar; ii) regiões com maior risco de contaminação e; iii) áreas isoladas, onde é improvável que a poluição entre ou saia, permitem estimar de maneira acurada a deriva da mancha, os possíveis locais de destino no ambiente marinho e a condição de intemperização do óleo. Essas informações são fundamentais para a elaboração de ações e planejamento de respostas emergenciais a um derramamento de óleo.

### 2.1 O transporte advectivo e difusivo

A dinâmica dos fluidos geofísicos, evolução e a circulação do oceano e da atmosfera, é estudada como fenômenos hidrodinâmicos e termodinâmicos. Em muitas circunstâncias, a difusão molecular de calor, momento ou matéria é insuficiente para explicar o movimento das porções de água ou do ar como responsáveis pelos transportes majoritários desses fluidos (SAMELSON, 2013). Essa propriedade de transporte, oriunda do movimento de massa do fluido, é chamado de transporte advectivo ou advecção. Por sua vez, o transporte baseado na difusão molecular é denominado transporte difusivo (WIGGINS, 2005).

A dinâmica do transporte advectivo na atmosfera foi um conhecimento primordial para o desenvolvimento da previsão numérica do tempo (BAUER *et al.*, 2015). Da mesma forma, o progresso na compreensão da termoclina, no oceano, abaixo da camada limite da superfície, revelou que os efeitos difusivos podem ser pequenos em relação aos efeitos advectivos nas escalas de tempo de anos ou décadas. Embora a advecção seja frequentemente dominante nos fluxos geofísicos, há uma importante interação entre advecção e a difusão. A advecção pode aumentar as taxas médias de difusão, ampliando acentuadamente as magnitudes dos gradientes de pequena escala, como nos fluxos turbulentos (SAMELSON; VALLIS, 1997).

No entanto, apesar da importância da dinâmica do transporte advectivo, a estrutura teórica da dinâmica de fluidos está voltada a formular e resolver modelos ma-

temáticos de fluxos de fluidos (movimento de fluidos em geral), sem determinar as trajetórias de parcelas individuais de fluidos (SAMELSON, 2013). A dinâmica dos fluidos descreve o movimento dos elementos específicos da matéria. Em uma estrutura variacional, como por exemplo os vórtices de mesoescala, essa propriedade está relacionada à existência de uma quantidade de vorticidade material conservada (HALLER et al., 2016). Devido a essa estrutura, a descrição e a análise dinâmica dos escoamentos do fluido e das trajetórias associadas a suas parcelas individuais de fluido estão estreitamente relacionadas (HALLER; YUAN, 2000). Ou seja, ela descreve o movimento das parcelas e a sua relação com um campo de velocidade. Em muitos casos, essa abordagem pode ser suficiente, pois as características específicas das trajetórias individuais do fluxo de partículas são insignificantes no contexto da maioria das aplicações práticas (HALLER, 2015).

A teoria dos sistemas dinâmicos não lineares busca entender a evolução das trajetórias dos pontos do espaço de fase em que descrevem o estado do sistema e sua evolução espaço-temporal (HALLER, 2001). Aqui, as trajetórias das parcelas fluidas no espaço físico são o objeto de interesse. Pode haver distinção no comportamento qualitativo de diferentes trajetórias. Alguns podem circular infinitamente em uma pequena região, outros podem deixar rapidamente o domínio de interesse ou, eventualmente, passar pela vizinhança de todos os pontos de uma grande região (DURAN et al., 2018).

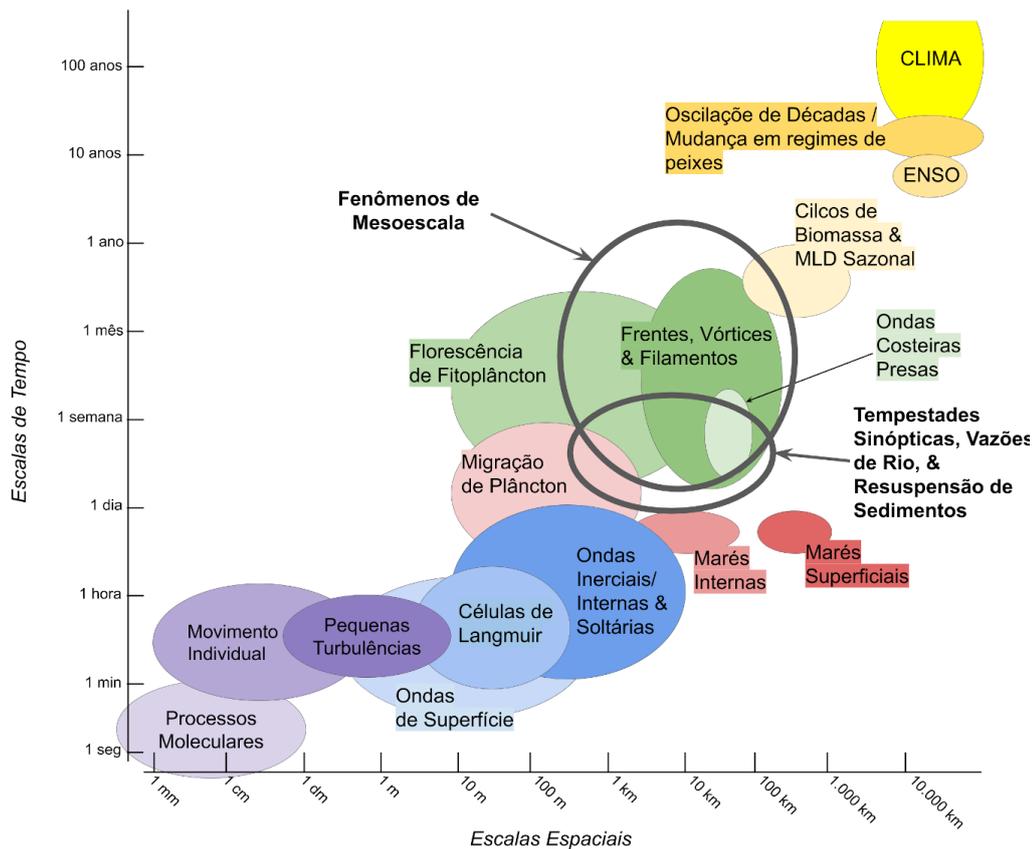
A teoria de sistemas dinâmicos não lineares foi originalmente desenvolvida para abordar as relações entre as localizações dessas estruturas e os seus movimentos organizados em regiões estendidas do espaço de fase. Essa ferramenta visa oferecer uma estrutura matemática, natural, para estudar o transporte Lagrangiano nesses fluxos.

## 2.2 Sistema dinâmico não linear

Um sistema dinâmico não linear é um sistema determinístico. Ou seja, segundo a Teoria do Caos (DONAHUE III, 1997), o seu comportamento futuro é previsível caso as condições iniciais do sistema sejam conhecidas. A alta sensibilidade às condições iniciais, no sistema não linear, acarreta características de instabilidades. Essas características, ocasionalmente, são confundidas com um sistema aleatório (DONAHUE III, 1997). A diferença entre ambos está atrelada ao comportamento futuro do sistema não linear ser determinado pelas condições iniciais conhecidas. O mesmo não ocorre com um sistema aleatório.

Uma inclusão recente na teoria de sistema dinâmico não linear são as Estruturas Coerentes Lagrangianas (ECLs) para fluidos com fluxos não autônomos (dependentes do tempo). As ECLs são entidades temporárias (instáveis) em um fluxo que permanece quase-estável à medida que o tempo evolui e ainda possui alguma troca com o seu entorno. Essas estruturas são predominantes na mecânica de fluidos observacional, experimental e computacional, e existem em toda a gama de escalas espaciais. Uma representação esquemática das escalas espacial e temporal de diversos processos oceânicos, físicos e biológicos podem ser observados na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Representação esquemática das escalas espacial e temporal de diversos processos oceânicos, físicos e biológicos. Em ovais, podemos observar os processos oceânicos e as suas respectivas escalas espaciais, no eixo das abcissas ( $x$ ), e temporais, encontradas no eixo das ordenadas ( $y$ )

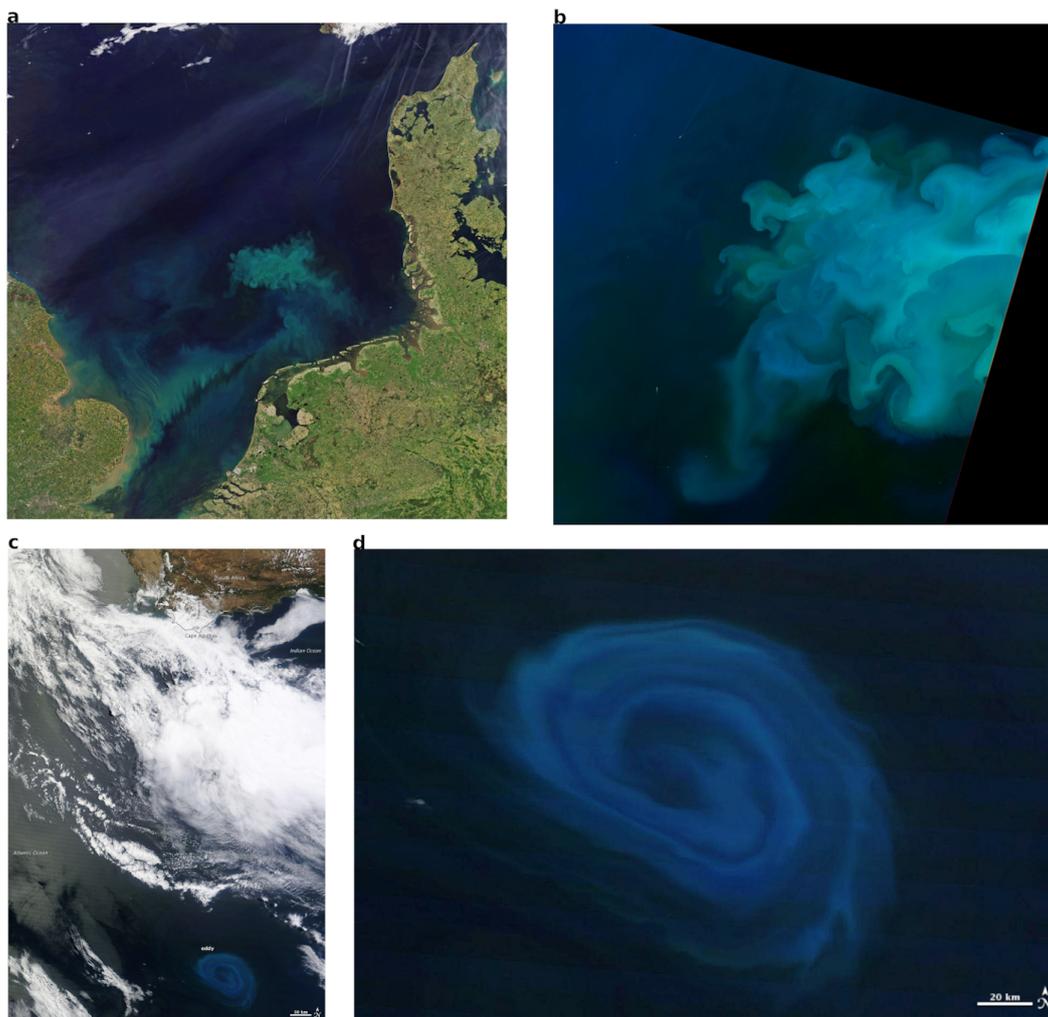


FONTE: Adaptado de Dickey (2003).

Exemplos de aplicações das ECLs incluem, a presença de vórtices oceânicos (BERON-VERA et al., 2008; AHARON et al., 2012; BERON-VERA et al., 2013; BERON-VERA et al.,

2015; SERRA; HALLER, 2017; KATSANOULIS et al., 2020) (e.g., Figura 2.2c e 2.2d), vórtices atmosféricos (TALLAPRAGADA et al., 2011; TANG et al., 2011a; TANG et al., 2011b; BOZORGMAGHAM; ROSS, 2015) (e.g., Figura 2.3a), vórtices em escalas espaciais intermediárias (BORGOGNO et al., 2011; REMPEL et al., 2011) (e.g., Figura 2.3b), jatos de cisalhamento coerentes (BRANICKI et al., 2011; BERON-VERA et al., 2012; GOUGH et al., 2016; BERON-VERA et al., 2020) (e.g., Figura 2.3c), movimentos de sub-mesoescala no oceano (BERON-VERA et al., 2019) (e.g. Figura 2.3d), operação de resgate (SERRA et al., 2020) (e.g., Figura 2.4e), conectividade com águas profundas (MASLO et al., 2020), floração de algas (HUHN et al., 2012) (e.g, Figura 2.2a e 2.2b), avaliação de impacto de poluentes (OLASCOAGA; HALLER, 2012; PENG; PETERSON, 2012; DURAN et al., 2018) (e.g., Figura 2.4f, 2.4g e 2.4h), e outras diversas aplicações.

Figura 2.2 - Imagens em cores naturais de um *plankton blooms* (a) no Mar do Norte, adquirida em 05 de maio de 2018 pelo sensor OLI operando no satélite Landsat 8. A mesma floração, em (b), observada em 10 de maio de 2018 pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua da NASA. Em (c), em cores naturais, um vórtice confinando uma floração de plâncton, ampliado em (d), capturado pelo sensor MODIS a bordo do satélite Terra da NASA, em 26 de dezembro de 2011, a 800 *km*, ao sul da África do Sul.



FONTE: Adaptado de NASA EO (2011), NASA EO (2018).

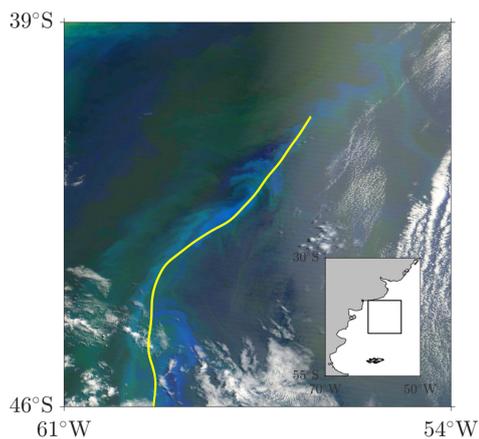
Figura 2.3 - Imagem em cores naturais do: (a) Vórtice de von Kármán sobre o Oceano Pacífico observada pelo espectrorradiômetro, MODIS, a bordo do satélite Terra da NASA, em 21 de junho de 2012; (b) vórtice em uma região de Júpiter, chamada de *north north north north temperate belt*, da sonda Juno, da NASA, em 3 de Novembro de 2019; (c) da imagem pseudo-colorida do oceano, em 12 de dezembro de 2001, derivada do MODIS, a bordo do Terra da NASA, com as ECLs parabólicas extraído da altimetria de satélite sobreposta à Corrente das Malvinas; (d) Registro de espiral de vórtices ao leste do mar Mediterrâneo oriental, registrado pelo oceanógrafo Paul Scully-Power, do Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos da América, em Outubro de 1984, durante o curso do STS 41-G, 13º voo do programa *Space Shuttle*.



(a) *Vórtice de von Kármán.*



(b) *Vórtice em uma região de Júpiter.*



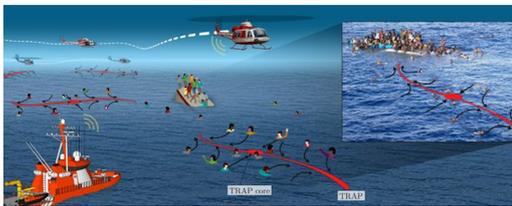
(c) *Imagem pseudo-colorida do oceano com as ECLs parabólicas na CM.*



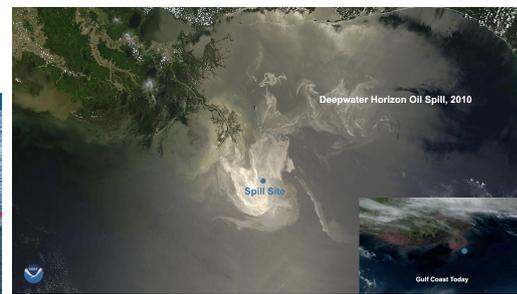
(d) *Vórtices ao leste do mar Mediterrâneo oriental.*

FONTE: Adaptado de NASA EO (1995), NASA (2019), Beron-Vera et al. (2020), Scully-Power (2019).

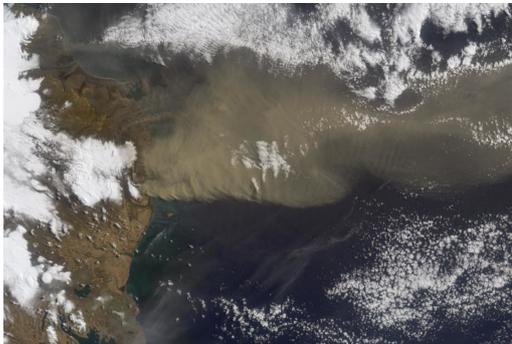
Figura 2.4 - Exemplos de aplicações de ECLs. Em: (a) Representação esquemática de uma operação SAR (*Search and Rescue*) baseada em TRAP, *TRansient Attracting Profiles* (Imagem ampla). A imagem menor inserida à direita é uma foto, obtida em 12 de abril de 2015, de um bote de imigrantes no Mar Mediterrâneo; (b) Imagens, em cores naturais, do sensor MODIS (imagem ampla) e do satélite GOES-16 (quadrante inferior direito), referentes aos impactos acarretados pela explosão da Deepwater Horizon em 2010, e suas atuais consequências, em 2020, respectivamente, na superfície do mar; (c) Imagem em cores reais, do vulcão *Eyjafjallajökull* e sua respectiva nuvem de cinzas em erupção. Imagem obtida em 19 de abril de 2010 pelo MISR (*Multiangle Imaging SpectroRadiometer*), a bordo do satélite Terra da NASA; (d) Imagens em cores naturais, do satélite WorldView-2, após a explosão da Unidade 3 da usina nuclear de Fukushima, em 14 de março de 2011.



(a) Operação SAR baseada em TRAP.



(b) Impactos e consequências da explosão da Deepwater Horizon.



(c) Erupção do vulcão Eyjafjallajökull.



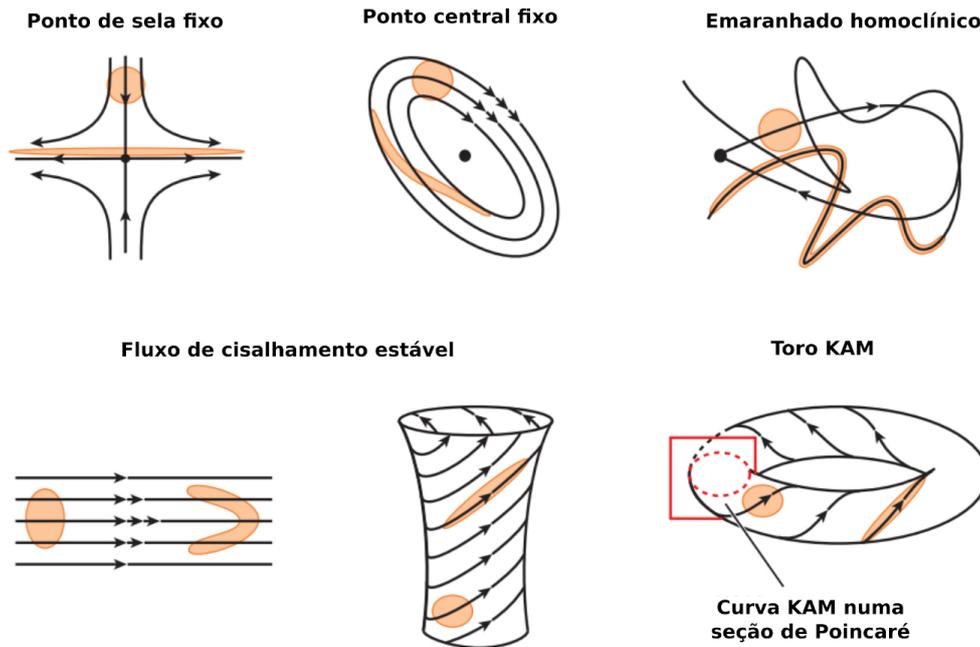
(d) Explosão da Unidade 3 da usina nuclear de Fukushima.

FONTE: Adaptado de Serra et al. (2020), NOAA (2020), NASA (2010) e SIC (2011).

A teoria dos sistemas dinâmicos não lineares oferece três abordagens básicas que auxiliam as observações de um fluxo realista para estruturas idealizadas (Figura 2.5). A primeira abordagem permite identificar as estruturas idealizadas, vistas na Figura 2.5, em um modelo analítico (estável, periódico ou quase-periódico) à estruturas similares no fluxo real. A segunda permite executar diagnósticos e apontar semelhanças entre o fluxo heurísticos com os padrões dos fluxos observados. E, por

fim, revelar as ECLs em fluxos periódicos e instáveis (fluxos geofísicos) (HALLER, 2015).

Figura 2.5 - Estruturas clássicas de sistemas dinâmicos em fluxos de fluido estáveis e periódicos. KAM é a abreviação de Kolmogorov-Arnold-Moser.



FONTE: Adaptado de Haller (2015).

O termo ECLs foi, originalmente, criado por Haller (2001), Haller e Yuan (2000) para descrever a natureza do transporte (de fluidos, de poluentes como petróleo ou cinzas vulcânicas, de organismos que fluem passivamente como plâncton, de energia térmica que implica no tempo e no clima, etc) do ponto de vista Lagrangiano. Isto é, associar o movimento das partículas no fluido em oposição à abordagem Euleriana. A descoberta de tais superfícies material, a partir de dados de fluxo experimentais e numéricos, permite uma compreensão geral do fluxo, e uma quantificação exata do transporte de material (HALLER, 2015).

### 2.3 Estruturas Coerentes Lagrangianas

O uso de métodos de sistemas dinâmicos e a análise do fluxo de uma perspectiva Lagrangiana podem auxiliar no estudo da mistura e no transporte de traçadores passivos no oceano (HALLER; YUAN, 2000). As ECLs são, localmente, as linhas/superfícies

de material que mais atrai ou repelem no fluxo e, como tal, têm uma forte influência na topologia do fluxo (SHADDEN et al., 2009). Esta influência pode variar, mas sempre produz um padrão de transporte organizado para o qual as ECLs subjacentes servem como o esqueleto oculto do fluxo (PEACOCK; HALLER, 2013). As ECLs podem atuar como um transporte de barreiras e, portanto, ajudam a visualizar a estrutura do fluxo, geralmente fornecendo informações não alcançadas pelas técnicas Eulerianas (SHADDEN et al., 2009). De fato, ao entender sua evolução, muitas vezes, são revelados mecanismos que transportam fluidos laminar e até turbulentos.

### 2.3.1 Linhas e superfícies material

A partir da perspectiva de sistemas dinâmicos não-autônomos (dependente do tempo), notamos que, conceitualmente, a advecção de fluidos, considerando um campo de velocidade bidimensional, é descrita pela Equação 2.1 (HALLER; YUAN, 2000):

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_0, t_0, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \quad (2.1)$$

em que,  $(\mathbf{u}(\mathbf{x}, t))$  é o campo de velocidade de um fluido, e  $(\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_0, t_0, t))$  descreve o movimento (denominadas de *pathlines*) de um elemento fluido <sup>1</sup>, tipicamente visualizadas como curvas no plano  $(\mathbf{x})$  ou equivalentemente a um ponto material, iniciado na posição  $(\mathbf{x}_0)$  e no tempo  $(t_0)$  (GRIGORIEV, 2012). As imagens posteriores, no tempo  $(t)$ , denotadas por  $(M(t))$ , são chamadas de linhas/superfície material (HALLER; YUAN, 2000).

O movimento dessas partículas  $(\mathbf{x}(t; t_0, \mathbf{x}_0))$  induzido pelo campo de velocidade, como trajetórias no espaço das variáveis  $(x, t)$ , que começam na posição  $(\mathbf{x}_0)$  e no tempo  $(t_0)$ , dado um tempo finito, são mais fáceis de visualizar no mapa de fluxo (Equação 2.2):

$$\mathbf{F}_{t_0}^t : \mathbf{x}_0 \mapsto \mathbf{x}(t_0 + t; t_0, \mathbf{x}_0) \quad (2.2)$$

O mapa do fluxo (Equação 2.2) relaciona às condições iniciais em  $(t_0)$  à sua posição posterior  $(x_0 + x)$  no tempo  $(t_0 + t)$ . Existe um fluxo estendido associado ao mapa

---

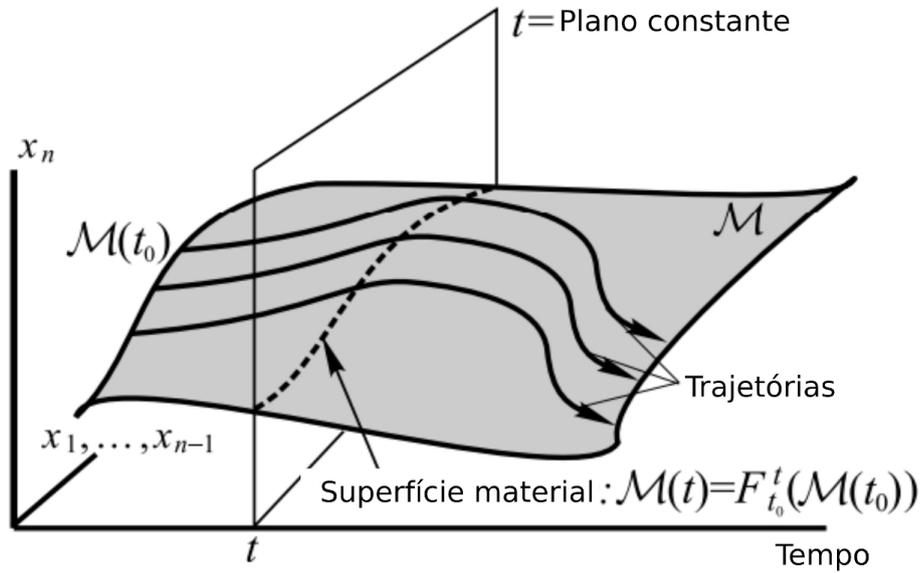
<sup>1</sup>O conceito de um elemento fluido é uma idealização, mas que é predominantemente usada em modelagem. Por exemplo, a equação de Navier-Stokes e a sua solução resultante (HALLER; SAPSIS, 2008)

de fluxo definido no espaço de fase estendido como:

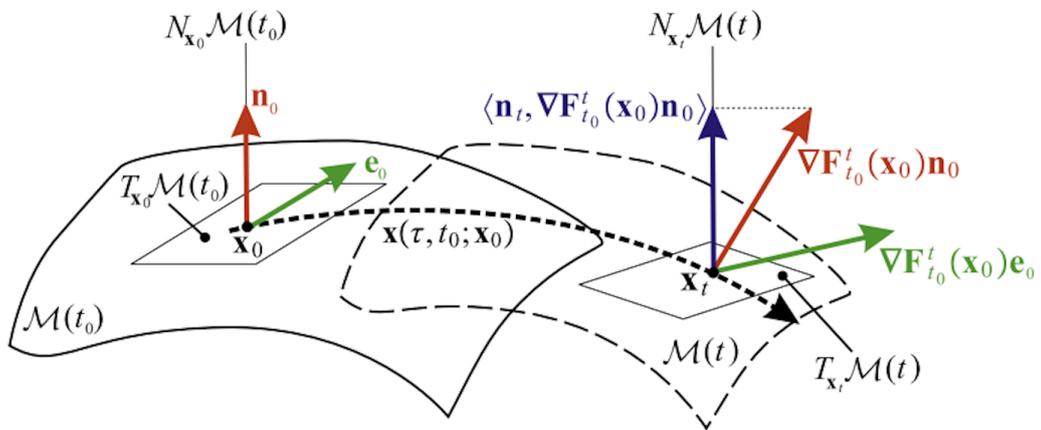
$$F^t : \begin{pmatrix} x_0 \\ t_0 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t_0 + t; t_0, \mathbf{x}_0) \\ t_0 + t \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Uma linha material deformada ( $M(t)$ ) abrange uma superfície bidimensional ( $M$ ) no espaço  $(\mathbf{x}, t)$  denominada de superfície material (Figura 2.6a) (HALLER; YUAN, 2000). O ponto central da visão Lagrangiana é o comportamento qualitativo geral dos conjuntos das trajetórias  $(\mathbf{x}(t, t_0, \mathbf{x}_0))$  a partir da condição inicial  $(\mathbf{x}_0)$  no tempo  $(t_0)$  (HALLER, 2011). Os conjuntos mais relevantes são os das trajetórias de codimensão 1 (um), porque dividem localmente o espaço de fase estendido em duas regiões entre as quais nenhum transporte é praticamente possível (HALLER, 2011). A estabilidade dinâmica da linha de material ( $M(t)$ ) caracterizada como um coletor invariável do sistema, pode então, ser estudada em termos da estabilidade de  $(M)$  no espaço de fase estendido, no tempo finito, gerado pela advecção de uma superfície, com  $n - 1$  dimensão, dada às condições iniciais  $(M(t_0))$  do mapa de fluxo  $(\mathbf{F}_{t_0}^t)$ .

Figura 2.6 - Representações esquemáticas de (a) uma superfície material ( $M(t)$ ) gerada no espaço de fase estendido pelo mapa de fluxo de uma superfície ( $M(t_0)$ ) de condições iniciais, e da (b) geometria da linearização do mapa de fluxo, ( $\mathbf{F}_{t_0}^t$ ), ao longo de uma superfície material ( $M(t)$ ).



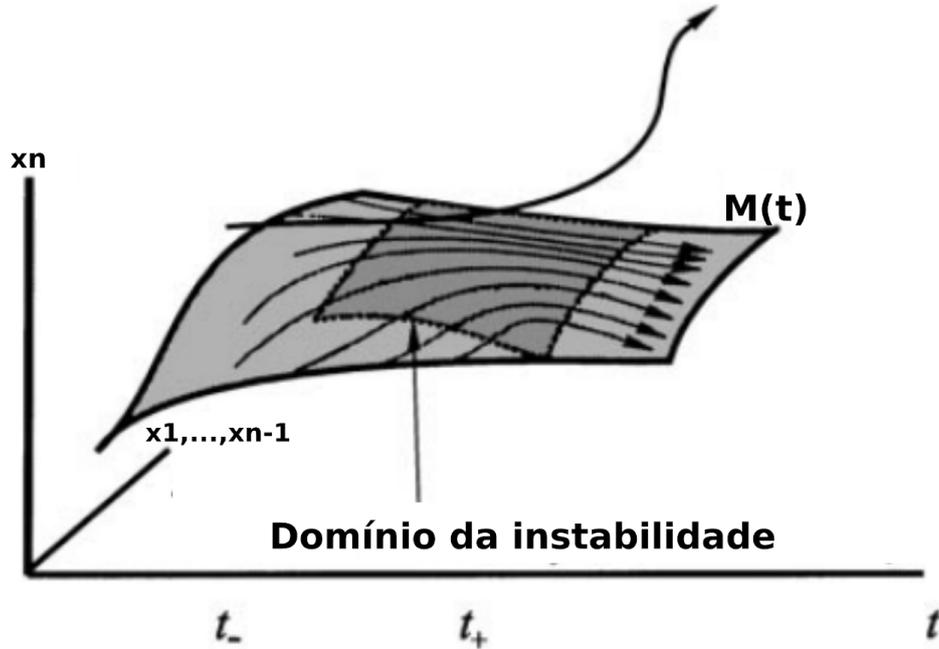
(a) *Superfície material.*



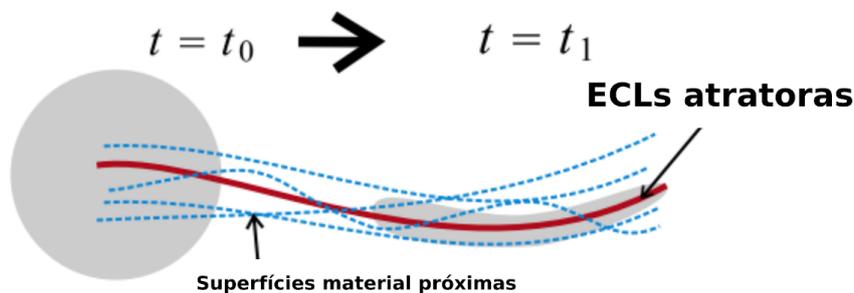
(b) *Geometria da linearização do mapa de fluxo ao longo de uma superfície material.*

FONTE: Adaptado de Haller (2011) e Haller (2001).

Figura 2.7 - Representações esquemáticas de: (a) uma superfície material instável ( $M(t)$ ) durante o intervalo de tempo  $[t_0, t]$ , e (b) de uma ECLs atratora numa superfície material dado um intervalo finito.



(a) Superfície material instável.



(b) ECLs atratora numa superfície material.

FONTE: Adaptado de Haller (2011) e Haller (2001).

Para descrever a estabilidade de  $(M)$ , é necessário linearizar o mapa de fluxo estendido ( $F^t$ ) ao longo de  $(M)$  (HALLER; YUAN, 2000). A localização das linhas de materiais responsáveis por criar a instabilidade local manifesta-se em direções normais a uma linha material  $(M(t))$  (HALLER; YUAN, 2000). A instabilidade normal será capturada no intervalo  $([t_0, t])$  pela linearização ao longo da superfície correspondente da superfície material  $(M(t))$ , onde todas as trajetórias próximas do fluido

(infinitesimalmente próximas) se separem de  $(M(t))$  a uma taxa exponencial, positiva ( $\lambda > 0$ ) (Figura 2.6b) (HALLER; YUAN, 2000). Ou seja, por incompressibilidade, qualquer parte linearmente instável de uma superfície de material deve conter trajetórias exponencialmente convergentes, a fim de garantir a preservação da área para o mapa de fluxo linearizado  $(\nabla F(x_0))$  (Figura 2.7a) (HALLER; YUAN, 2000).

Vários métodos de detecção de coerência Lagrangiana também se baseiam no gradiente de fluxo ou gradiente de deformação  $(\nabla F(x_0))$  a derivada do mapa de fluxo em relação à condição inicial  $(x_0)$  (HADJIGHASEM et al., 2017). O alongamento induzido pelo gradiente do fluxo é caracterizado pelo tensor de Cauchy–Green (TCG) (TRUESDELL; NOLL, 2004), definido por:

$$\mathbf{C}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0) := [D\mathbf{F}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0)]^\top D\mathbf{F}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0) \quad (2.4)$$

onde,  $(D\mathbf{F}_{t_0}^t)$  denota o Jacobiano de  $(\mathbf{F}_{t_0}^t)$ :

$$D\mathbf{F}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_0} & \frac{\partial x}{\partial y_0} \\ \frac{\partial y}{\partial x_0} & \frac{\partial y}{\partial y_0} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

E,  $(\top)$  refere-se à matriz transposta (HALLER, 2011). Esse tensor é simétrico e positivo por definição (TRUESDELL; NOLL, 2004). Os autovalores  $(\lambda_i)$  e os autovetores de unidade correspondentes  $(\xi_i)$  do tensor  $(\mathbf{C}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0))$  são definidos pelas seguintes relações  $\forall i = 1, 2$  (HALLER, 2011):

$$\mathbf{C}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0)\xi_i(\mathbf{x}_0) = \lambda_i(\mathbf{x}_0)\xi_i(\mathbf{x}_0) \quad (2.6)$$

$$|\xi_i(\mathbf{x}_0)| = 1 \quad (2.7)$$

$$0 < \lambda_1(\mathbf{x}_0) < \lambda_2(\mathbf{x}_0) \quad (2.8)$$

As ECLc hiperbólicas são determinadas por uma medida local de crescimento normal da unidade normal  $(\mathbf{n}_0)$  ao longo de uma linha de material no tempo  $(t_0)$  definida por (HALLER, 2011):

$$\rho_{t_0}^t(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_0) := \frac{1}{\sqrt{\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{C}_{t_0}^t(\mathbf{x}_0)^{-1} \cdot \mathbf{n}_0}} \quad (2.9)$$

Para esse estudo foram identificadas as ECLs mais atratoras (persistentes, Figura 2.7b), pois esses caminhos delineiam o transporte Lagrangiano (DURAN et al., 2018). As ECLs persistentes, atraem as partículas mais próximas ao longo de um intervalo de tempo finito  $([t_0, t])$  em que  $(t_1 = t_0 + T)$  e  $(T < 0)$  é um alongamento, *squeezelines* (OLASCOAGA et al., 2013), do TCG. Ou seja, a curva que atrai as ECLs (*stretchlines*,  $s \mapsto \mathbf{x}(s)$ ) é obtida como trajetórias da equação diferencial (ONU et al., 2015):

$$r' = \xi_i(r) \quad (2.10)$$

em que o termo à direita representa a diferenciação em relação aos parâmetros. As ECLs persistentes (*squeezelines*), no tempo de avanço, são aquelas com médias maiores de repulsão normal  $(\rho_{t_0}^t(\mathbf{x}))$  definida como (HALLER; BERON-VERA, 2012; FARAZMAND et al., 2014):

$$\rho_{t_0}^t(\mathbf{x}) = \sqrt{\lambda_2(x)} > 1 \quad (2.11)$$

onde  $(\lambda_2)$  é autovalor máximo da média do campo da velocidade para um fluxo incompressível.

Portanto, buscou-se nesta tese valores alongados (*stretching*) persistentes de  $(\rho_{t_0}^t(\mathbf{x}))$  (DURAN et al., 2018). Os valores máximos de  $(\rho_{t_0}^t(\mathbf{x}))$  permitem estimar onde as linhas de material, que atuam como barreiras e orientam o fluxo, são mais persistentes e, assim, estimar como elas organizam o fluxo médio.

### 3 MEANDROS E VÓRTICES PERSISTENTES CONDUZEM OS PADRÕES DE TRANSPORTE LAGRANGIANO QUASE-ESTÁVEIS EM UMA CORRENTE DE CONTORNO OESTE FRACA

#### 3.1 Introdução

<sup>1</sup> Correntes de Contorno Oeste (CCO) Subtropicais são um dos principais contribuintes para o transporte oceânico meridional de calor e sal (WIGGINS, 2005; ASSAD et al., 2009; IMAWAKI et al., 2013). Estas são geralmente representadas como fluxos superficiais contínuos e sua intensidade e persistência são consideradas como uma barreira dinâmica para o transporte de fluxo cruzado (STOMMEL, 1957), influenciando as trajetórias de poluentes e de larvas de peixes (MARTA-ALMEIDA et al., 2013; ROMERO et al., 2013; D'AGOSTINI et al., 2015; FRAGOSO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018). Entretanto, no Atlântico Sudoeste (AS), a Corrente do Brasil (CB) é considerada uma CCO fraca (PETERSON; STRAMMA, 1991). A CB transporta, na superfície (520 m) em direção ao sul (STRAMMA; ENGLAND, 1999), um volume relativamente pequeno de massa d' água (entre 4 a 6,5 Sv) (CASTRO et al., 2006). Uma forte atividade de mesoescala se desenvolve nas proximidades da CB, principalmente perto de 22°S com grandes meandros e vórtices frontais (SILVEIRA et al., 2008). Apesar de ser fraca em relação às outras CCOs, verificou-se que a CB exerce um controle significativo sobre o transporte Lagrangiano (GOUVEIA et al., 2017). Neste artigo, identificamos os padrões de transporte Lagrangiano persistentes em uma CCO com meandros e vórtices persistentes.

A natureza baroclinicamente instável da CB é causada pela presença da Corrente de Contorno Oeste Intermediária, que flui para o norte, entre os 800 e 1000 m de profundidade, abaixo da CB. Nos primeiros 500 m de profundidade, a CB transporta a Água Tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), ambas na direção sul (SILVEIRA et al., 2008). A formação de meandros e vórtices também pode localmente reverter o fluxo da CB além da isóbata de 1000 m, e causa mudanças no seu transporte (LIMA et al., 2016). A intensa atividade de mesoescala ao longo da CB inclui meandros, estruturas ciclônicas e anti ciclônicas, e vórtices, todos recorrentes ou semi-permanentes, desde a sua origem na bifurcação da Corrente Equatorial Sul, descendo até a região da confluência Brasil-Malvinas (CAMPOS et al., 1995; CAMPOS et al., 1996).

---

<sup>1</sup>Este capítulo contempla o artigo submetido à *Scientific Reports* sob o nº 6b4a0142-2447-496a-af23-0b72ec101468, em processo de revisão por pares. Um pré-print pode ser visualizado em: <https://arxiv.org/abs/2008.07620>

O método de identificação das Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas (ECLc) foi desenvolvido para extrair importantes padrões de transporte Lagrangiano de grandes séries temporais de velocidade (DURAN et al., 2018). A identificação de padrões inclui: 1) regiões isoladas onde trajetórias são improváveis tanto de sair como de entrar nelas; 2) regiões que atraem parcelas de água próximas e, portanto, são mais suscetíveis a impactos de poluentes; e 3) padrões de transporte recorrentes. Alguns estudos recentes têm mostrado a relevância das ECLc. Gough et al. (2019) apontaram a eficácia de algumas das ECLc como barreiras de transporte, usando flutuadores sintéticos advectados de velocidades instantâneas simuladas e usando 3207 trajetórias de flutuadores rastreados por satélite e monitorados por mais de duas décadas (1994 a 2016). A eficiência das ECLc na identificação de padrões de transporte predominante, em águas profundas (1500 m) do Golfo do México, conforme determinado pelas trajetórias de flutuadores RAFOS e trajetórias de flutuadores sintéticos, é ainda destacada por Maslo et al. (2020).

Nos trabalhos de Gough et al. (2019) e Maslo et al. (2020) são utilizados resultados de uma simulação de execução livre realizada com o NEMO (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*) e o ROMS (*Regional Ocean Modeling System*), respectivamente, enquanto Duran et al. (2018) usou os resultados simulados do HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*). Assim, em conjunto, esses três trabalhos mostram que as ECLc são robustas ao contornar a variabilidade inerente aos fluxos geofísicos, já que identificam de forma acurada os padrões de transporte predominantes. Procurar por estruturas que fossem capazes de contornar a natureza caótica do transporte, as quais extraem padrões de transporte predominantes de longas séries temporais de velocidades, foi a motivação no bojo do desenvolvimento das ECLc (DURAN et al., 2018).

Neste trabalho, mostramos que as ECLc também são eficientes em extrair a circulação predominante a partir de uma simulação numérica de execução livre, no cenário distinto de uma CCO, caracterizada pela presença de meandros e vórtices recorrentes e persistentes. Oferecemos ainda novas abordagens na interpretação das ECLc, relacionando-as às estruturas temporais dos campos Eulerianos, tais como: temperatura da superfície do mar (TSM), altura da superfície do mar (ASM), e as energias cinéticas: turbulenta, média e total (ECT, ECM e EC, respectivamente). Uma interpretação adicional às ECLc é baseada nas comparações com flutuadores rastreados por satélite e por trajetórias de flutuadores sintéticos. Os padrões de transporte associados com as estruturas Eulerianas persistentes incluem regiões com alta variabilidade Lagrangiana e de transporte *offshore*. É identificada uma

barreira de transporte através da plataforma continental, separando regimes dinâmicos distintos e padrões de recirculação persistentes na região de transição entre elas. Também demonstramos que as ECLc destacam os padrões de transporte que ajudam a explicar a deriva observada no derramamento de óleo da empresa Chevron (Novembro de 2011) e as recentes manchas de óleo observadas em larga escala nas praias brasileiras (de Agosto de 2019 a Fevereiro de 2020). Aqui, as ECLc são calculadas a partir das médias diárias das velocidades de superfície de uma simulação do ROMS durante 13 anos (2003 a 2015) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2009), com uma grade *eddy-resolving* de  $1/36^\circ$  ( $\approx 3 \text{ km}$ ) e 40 níveis verticais. Seguindo o método descrito em Duran et al. (2018), calculamos os Tensores Cauchy-Green (TCG) com uma janela deslizante de 7 dias, em tempo retrógrado, a partir da climatologia diária dos campos de velocidades. A partir desses TCG, calculamos a média mensal e anual dos TCG.

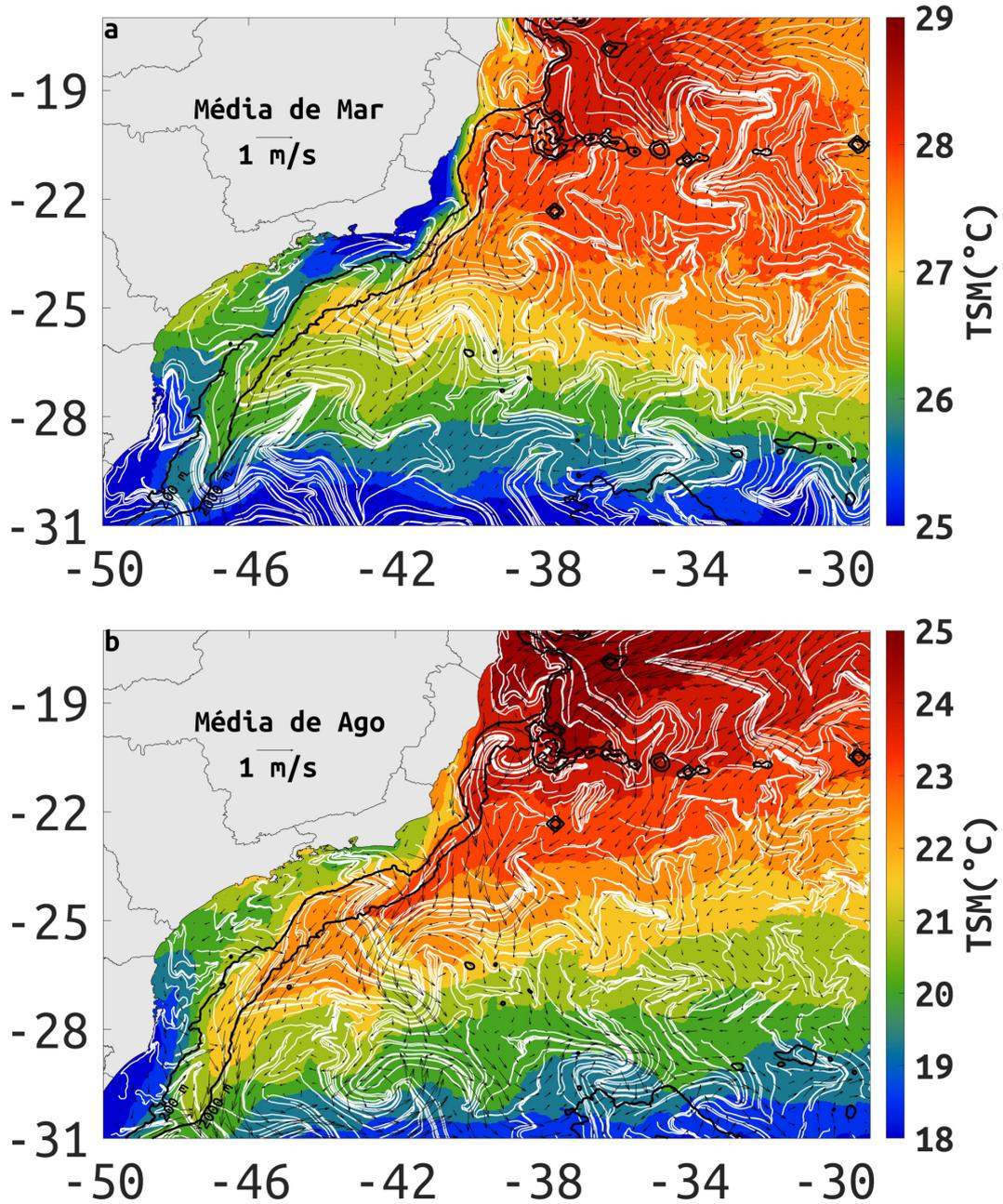
## 3.2 Resultados

As causas materiais das estruturas Lagrangianas atratoras quase-estáveis podem variar. Portanto, para o aporte à interpretação física das médias mensais de força de atração climatológica ( $c\rho$ ) e das ECLc é necessário o suporte do uso combinado de dados complementares. Neste estudo, usamos dados complementares de, satélite, observações *in situ* (derivadores SVP e iSpheres) e saídas de simulação numérica.

### 3.2.1 A estrutura principal da CB

A típica estrutura principal da CB, entre 22 e 31°S, é facilmente extraída pela média temporal dos campos Eulerianos. A média mensal do fluxo de superfície Euleriano da simulação alinha-se bem com os padrões de advecção das médias mensais de TSM extraídas do *Multi-scale Ultra-high Resolution* (MUR). Esses dados sugerem um fluxo superficial contínuo em direção ao sul ao longo da isóbata de 2000 m (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Médias mensais de Março (a) e de Agosto (b) de TSM a partir do conjunto de dados do MUR (mapa de cores), com resolução espacial de  $0.01^\circ$  distribuídos pela PODAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*), sobrepostas pelas médias mensais das velocidades de superfície do oceano correspondente do ROMS (vetores pretos), e sobrepostas sobre as ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 m de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as barras coloridas são diferentes para cada mês.



FONTE: Produção da autora.

No verão austral (Figura 3.1a), entre 17 a 20°S e 38 a 29°W, as ECLc sugerem um transporte Lagrangiano de leste para o oeste, correspondente ao prescrito pelas médias mensais Eulerianas (Veja também a Figura A.1a, no apêndice). Entre 20 a 22°S, o meandramento é comum próximo à cadeia submarina de Vitória-Trindade (20°S e 39 a 34°W), incluindo sobre a plataforma, em 20°S. Em 20°S o fluxo Euleriano médio e as ECLc mostram um meandro no mês de Março e um vórtice no mês de Agosto. Ao sul de 22°S, o eixo principal do fluxo da CB é geralmente orientado em direção ao sul, ao longo da isóbata de 2000 m, com linhas de material atratoras (*squeezelines*) deformadas em forma de "V" (do inglês e, doravante, *chevrons*), semelhante às deformações encontradas nos gradientes de TSM (veja também a Figura A.2, no apêndice).

Linhas material atratoras climatológicas (*squeezelines*) similares à deformação em *chevrons* também são encontrados nas regiões de ressurgências costeiras, indicadas por valores de TSM baixos próximo à costa no verão austral (Figura 3.1a). Nessa estação há uma intensificação das ressurgências costeiras, embora a circulação costeira, *inshore* a isóbata de 200 m, seja para o sentido norte. No inverno austral as formas de *chevrons* são observadas somente na região de ressurgência costeira de Cabo Frio (23°S e 42°W, Figura 3.1b, veja também a Figura A.1b, no apêndice).

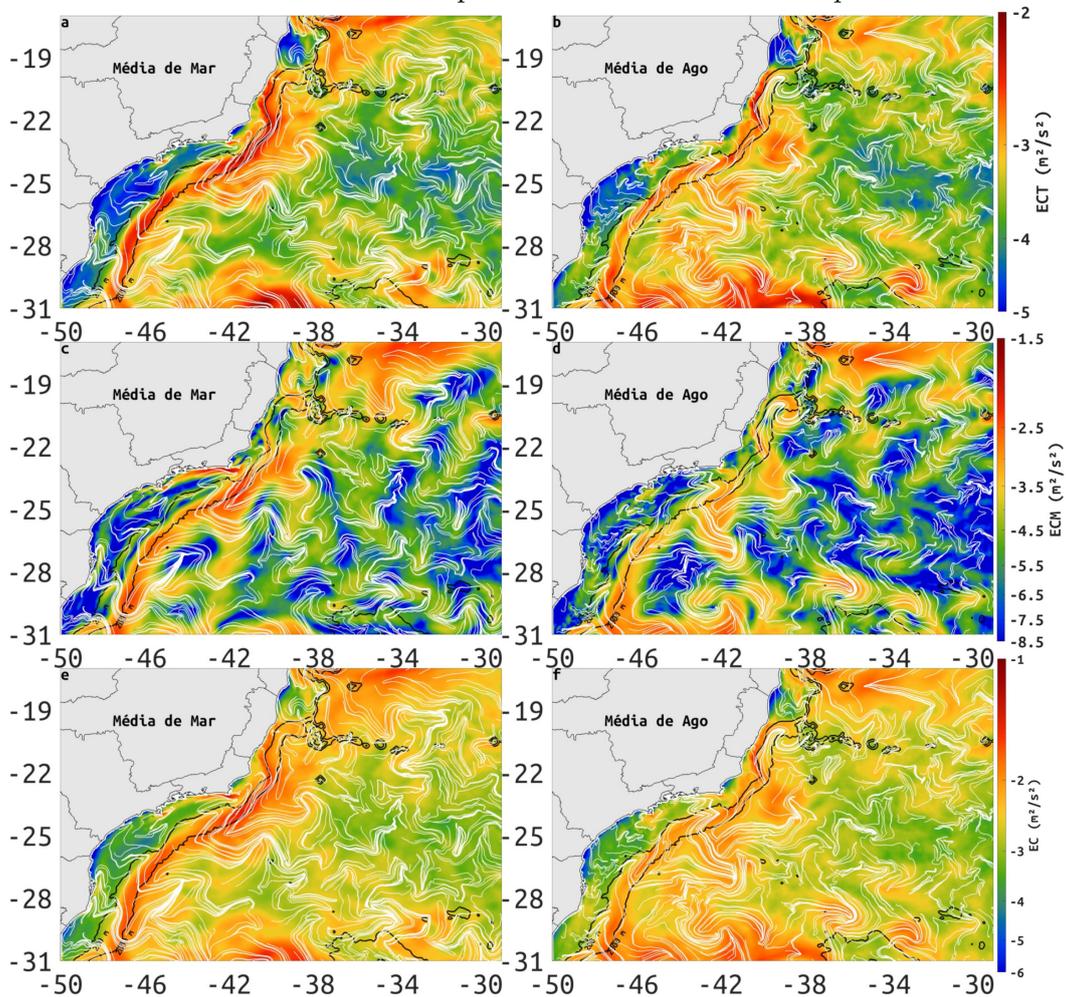
A advecção da AT na CB causa uma frente zonal com a água costeira fria e de baixa salinidade, entre 21 a 31°S, em ambas as estações (Figura A.1). Observamos a presença de frentes térmicas mais acentuadas no verão austral (Figura A.1a), devido à intensificação da ressurgência costeira de Cabo Frio (23°S) e de Cabo de Santa Marta (28°S). No mês de Março, a AT, entre 21 a 30°S, é caracterizada por água superficial com temperaturas acima de 26,5°C (Figura 3.1a), e no mês de Agosto, por temperaturas acima de 21°C (Figura 3.1b).

Um transporte advectivo *offshore* persistente é observada através das imagens de TSM, ECLc e das médias mensais de velocidades Eulerianas, durante o verão e inverno austral (Figuras 3.1a e 3.1b). No inverno, a média das velocidades de superfície Eulerianas mostram um fluxo *offshore* persistente em 19,5°S e 39°W, próximo a 23°S e 39°W, e entre 25 a 26,5°S e 42°W (Figura 3.1a). No verão, o transporte *offshore* está localizado de maneira semelhante, mas também pode ser visto em torno de 30°S e 47°W (Figura 3.1b). Muitas vezes, esses padrões *offshore* Eulerianos coincidem com as ECLc deformando-se em *chevrons*. No verão, eles coincidem com a advecção dos gradientes de TSM. No verão austral, a TSM é consistente com: a advecção *offshore* (e.g. em 26°S e 42°W) e com as ECLc em formas de *chevrons* (Figura 3.1a). Já

no inverno austral, a advecção *offshore* (e.g. em 26°S e 42°W) não coincide com a advecção *offshore* da ASM e as ECLc estão em conformidade com o fluxo *offshore* Euleriano (Fig 3.1b).

A variabilidade na CB é evidente no verão e no inverno austral quando há uma intensificação da energia cinética turbulenta (ECT), entre as isóbatas de 200 e 2000 *m*, ao sul de 23°S (Figuras 3.2a e 3.2b), veja também a Figura A.3, no apêndice). Ao longo da costa, a ECT máxima é disposta na máxima média da velocidade Euleriana da CB, que está próxima à isóbata de 2000 *m*. O pico da velocidade média Euleriana está de acordo com as ECLc em formato de *chevrons* (Figuras 3.2c e 3.2d). Ao longo da costa, ao sul de 22°S, entre as isóbatas de 200 e 2000 *m*, a ECT máxima está entre 0.1  $m^2/s^2$  (em unidade linear), e é um pouco mais energética durante o verão, no mês de Março (Figura 3.2a). Por sua vez, a ECM, ao longo da costa, ao sul de 22°S, na isóbata de 2000 *m*, é de cerca de 0.1  $m^2/s^2$  no verão (Figura 3.2c) e de 0.05  $m^2/s^2$  no inverno (Figura 3.2d).

Figura 3.2 - Mapas de médias mensais de ECT (a e b), ECM (c e d) e EC (e e f) (mapas em cores) para Março (quadros à esquerda) e Agosto (quadros à direita), entre 2003 a 2015. Unidade de  $m^2/s^2$  em escala logarítmica. ECLc mensais são representados por linhas brancas. Os contornos de profundidades de 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.



FONTE: Produção da autora.

No verão, a ECT máxima está localizada à *offshore* da isóbata de 2000 m, entre 17 a 20°S, *offshore* ao Banco Abrolhos (Figura 3.2a). Entre 21 a 26°S, a ECT máxima está localizada ao longo da costa, entre as isóbatas de 200 e 2000 m (Figura 3.2a). No inverno, a ECT máxima está localizada logo após a isóbata de 2000 m, entre 17 a 18°S, e perto de 22,5°S, 25,5°S e 30°S (Figura 3.2b).

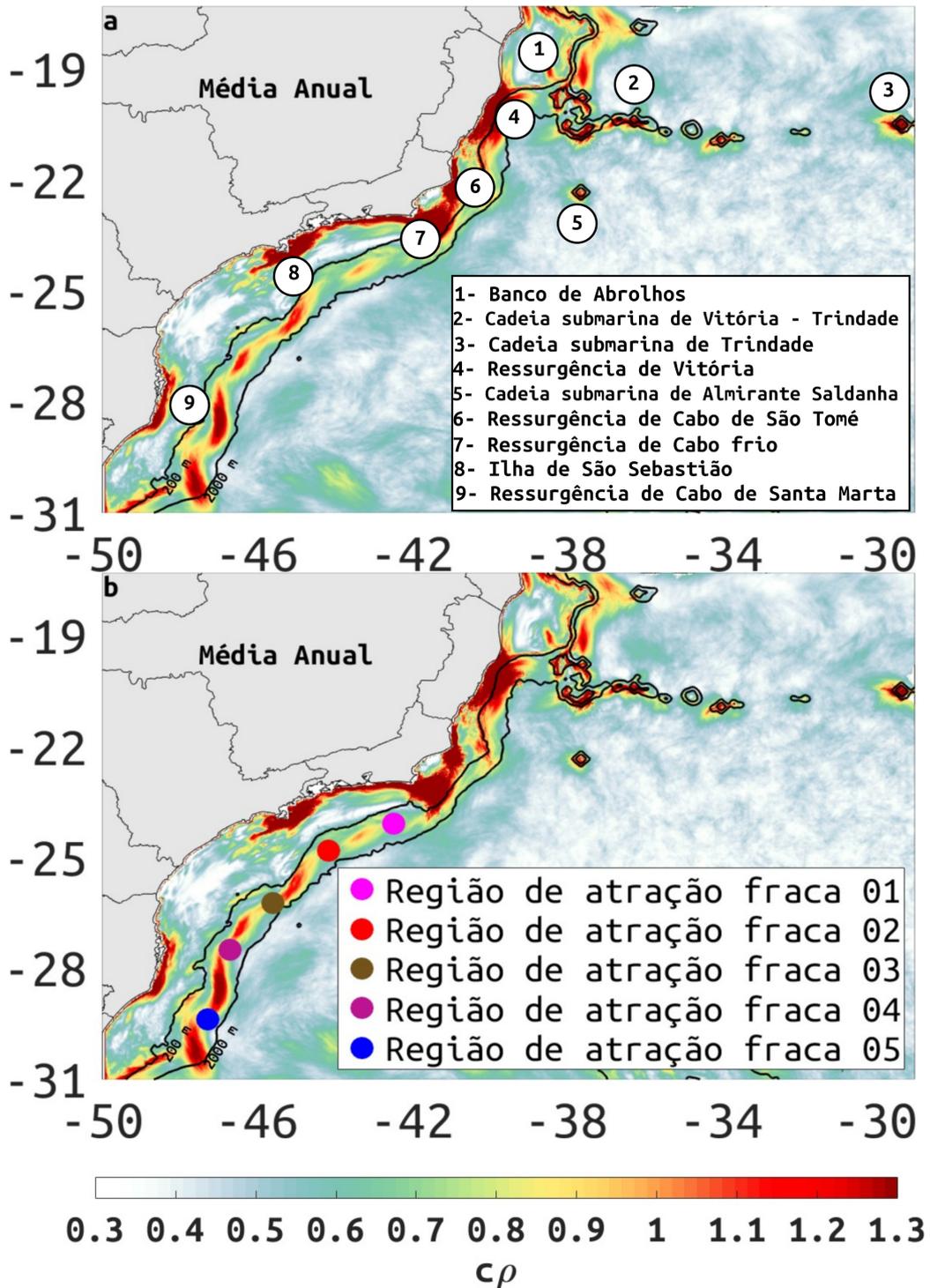
No inverno e no verão, as estruturas de ECM máximas que estão próximas à *offshore* da estrutura principal da CB também podem ser visualizadas próximas de 22,5 a 25°S (Figuras 3.2c e 3.2d). Essas localizações coincidem com o fluxo *offshore* das

velocidades Eulerianas médias (Figuras 3.1a e 3.1b).

Valores baixos de TSM, associados com a ressurgência costeira intermitente de Cabo Frio, durante o verão austral (23°S e 41 a 46°W, Figura 3.1a) coincidem com o jato costeiro na velocidade Euleriana média que deformam as ECLc como *chevrons* e podem ser vistas como ECM máximos. (Figura 3.2c). Veja também, no apêndice, para maior ilustração da sazonalidade as Figuras A.1 e A.3).

Valores de alongamento máximo ( $c\rho > 1$ , ou  $> 2,7$  em unidade linear) são encontrados perto de áreas de batimetria íngreme, como os montes submarinos (regiões localizadas em 1, 2, 3 e 5 na Figura 3.3a) e regiões de ressurgências costeiras (regiões 4, 6, 7 e 9 na Figura 3.3a). Valores de alongamento de médio a alto ( $c\rho > 0,7$ , ou  $> 2$  em unidade linear) são encontrados adjacentes ao núcleo da CB, entre as isóbatas de 200 e 2000 *m*, e entre 23 a 31°S, com regiões de forte atração intercaladas por regiões de atração fraca (Figura 3.3). Ao longo do talude, a máxima força de atração climatológica coincide com a máxima ECT, incluindo uma mínima próximo à região 1 (Figuras 3.2 e 3.3).

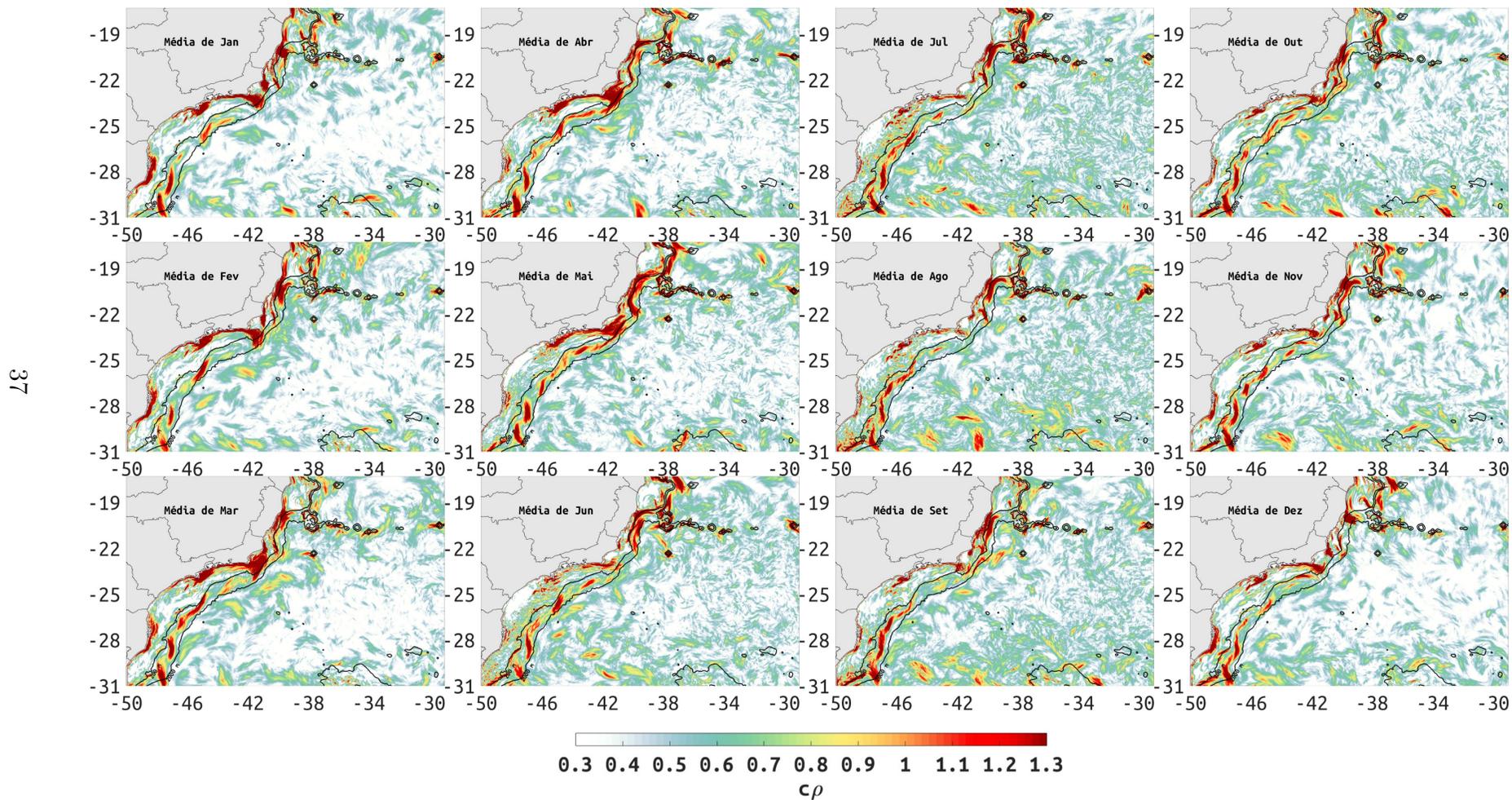
Figura 3.3 - Força de atração climatológica,  $c\rho$  (cores em escala logarítmica), calculadas pelas médias anuais (2003–2015) dos tensores de CG de 7 dias, que revelam: (a) locais com altos valores de médias anuais de  $c\rho$  ( $> 1, 2, 7$  em unidade linear), e (b) regiões de atração fraca adjacentes à isóbata de 2000 m (pontos coloridos). Os contornos de profundidades de 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.



FONTE: Produção da autora.

A força de atração climatológica,  $c\rho$ , mostrada na Figura 3.4, aponta uma variabilidade ao longo do talude (isóbatas de 200 a 2000 m), entre 23 a 31°S. Essa variação de  $c\rho$  sugere uma variabilidade de baixa frequência dos padrões de transporte Lagrangiano com uma tendência a algum transporte transversal ao talude, onde há predominância de valores baixos de  $c\rho$  (veja as Figuras A.6 e A.7). Em geral, a variabilidade temporal em baixa frequência sugerida pelos valores de  $c\rho$  sobre o talude, próximo as latitudes de 23,5 a 24,5°S e entre 26 a 27°S, é máxima durante os meses de Dezembro à Fevereiro. Em Março, Junho, Julho, Agosto e Setembro, os valores altos de  $c\rho$  podem ser vistos ao longo da maior parte do talude, ao sul de 23 a 25°S. Em contraste, nos outros meses, os valores mínimos estão intercalados com os valores máximos. A linha de costa e a plataforma mais rasa, entre 24 a 27°S, têm um  $c\rho$  mínimo durante todos os meses, às vezes contrastando com valores máximos ao longo da linha de costa ao norte de 24°S (por exemplo, de Janeiro a Maio). Os valores de  $c\rho$  mínimo no ambiente próxima à costa e na linha de costa, entre 24 e 27°S, identificam-se como uma região estagnada ao longo do ano (Figura A.8). Esta região poderia ser relativamente segura contra os derramamentos originados fora da região que possuem valores mínimos de  $c\rho$  (Figura A.8, painel do meio). No entanto, é improvável que qualquer poluição originada nesta região, incluindo a linha de costa, se disperse durante um acidente, causando, possivelmente, um impacto maior devido a uma concentração superior de contaminantes (Figura A.8, painel direito).

Figura 3.4 - Médias mensais de força de atração climatológica ( $c\rho$ ) no AS. Observe uma distribuição meridional descontínua de valores altos de  $c\rho$  (cor vermelha) entre as linhas de contorno de 200 e 2000 m de profundidade (linhas pretas).

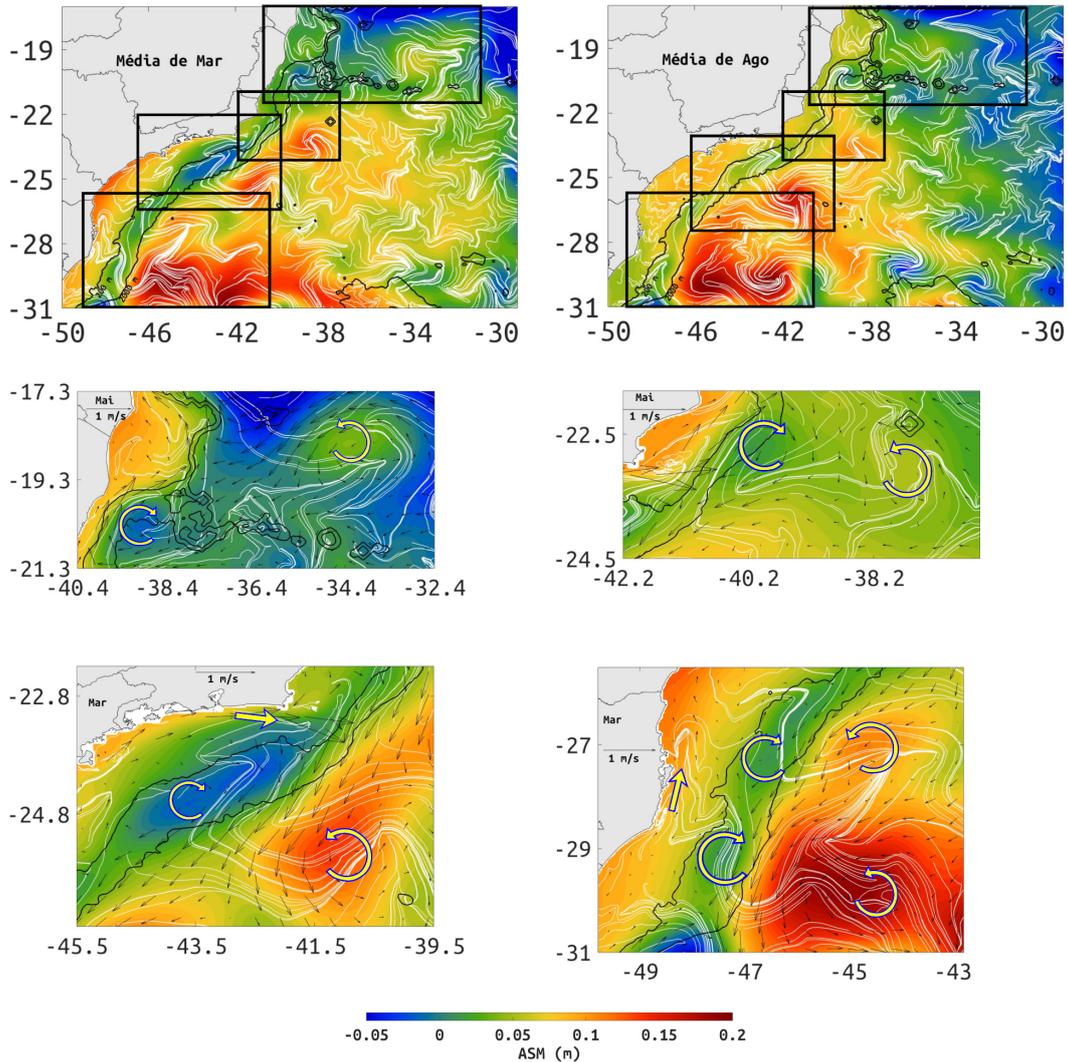


FONTE: Produção da autora.

Uma intensificação de  $c\rho$ , perto da região de ressurgência de Cabo Frio (região 7 na Figura 3.3a), é observada de Janeiro até Maio, dado o aumento na velocidade associada a um jato costeiro (Figura A.9), entre a Ilha de São Sebastião e Cabo Frio (regiões 8 e 7 na Figura 3.3a). Um  $c\rho$  máximo peculiar em forma de "U" pode ser visto nos meses de Abril e Maio, quando a velocidade superficial se curva ciclonicamente entre 23 a 24°S e de 44 a 41,5°W (Figura 3.4, veja também a Figura A.9).

Uma descrição da estrutura principal da CB é organizada em quatro regiões diferentes baseadas nas estruturas mensais de ASM simuladas pelo ROMS. Essa organização serve para ilustrar os processos de ressurgências costeiras e a atividade de mesoescala persistente e as suas associações com os padrões de transporte Lagrangiano persistentes, como visto nas ECLc (Figura 3.5).

Figura 3.5 - *Squeezelines* climatológicas mensais (linhas brancas) de Março (a) a Agosto (b) plotadas sobre as médias mensais de ASM. Os retângulos pretos indicam regiões mostradas nos painéis de (c) a (f). Em (c) temos a região do Banco de Abrolhos (local 1 na Figura 3.3a); em (d) o Cabo de São Tomé (local 6 na Figura 3.3a); em (e) Cabo Frio (localização 7 na Figura 3.3a); e em (f) o Cabo de Santa Marta (Região 9 na Figura 3.3a). A presença de estruturas ciclônicas e anticiclônicas são destacadas por setas em formas de curvas. As setas retilíneas indicam a direção dos jatos costeiros nas regiões de ressurgências. Os meses de referências estão indicados no canto superior esquerdo de cada mapa. A escala vetorial se encontra no topo de cada mapa. Os contornos de 200 e 2000 m de profundidade são representados por linhas pretas.



FONTE: Produção da autora.

A primeira região (Figura 3.5c) compreende um grupo de características topográficas semelhantes, perto de 20S, começando no Banco de Abrolhos, a oeste (localização 1

na Figura 3.3a); a cadeia de montes submarinos de Vitória-Trindade (localização 2 na Figura 3.3a); e o complexo de ilhas oceânicas de Trindade Martin Vaz (localização 3 na Figura 3.2a), a leste. Nessa região, uma importante característica oceânica persistente, capturada pelas ECLc é o vórtice ciclônico de Vitória, ao sul da plataforma de Abrolhos, em adição ao vórtice anticiclônico de Abrolhos, à leste, centrado em torno de  $34,4^{\circ}\text{W}$  (Figura 3.5c). O vórtice anticiclônico de Abrolhos translada da direção de leste para o oeste, próximo à cadeia montanhosa de Vitória-Trindade (Região 2 na Figura 3.3a), entre as latitudes de  $18$  a  $20^{\circ}\text{S}$  e longitudes de  $38$  a  $32^{\circ}\text{W}$  (veja a Figura A.10).

A segunda região, (Figura 3.5d), é caracterizada pela presença de uma ressurgência costeira perto do Cabo de São Tomé (local 6 na Figura 3.3a), identificada por valores baixos de TSM no verão austral (Figura 3.1a). Quase à *offshore* da ressurgência costeira existe uma estrutura ciclônica centrada em torno de  $22^{\circ}\text{S}$  e  $40,2^{\circ}\text{W}$ . Mais à *offshore* há uma estrutura anticiclônica centrada em  $23^{\circ}\text{S}$  e  $38^{\circ}\text{W}$ . Ambas as estruturas induzem o transporte Lagrangiano persistente observado através do alongamento da ECLc. Essa região também coincide com os valores máximos de ECT e de ECM (Figura 3.2) salientando a região *offshore*, a partir da isóbata de  $2000\text{ m}$ , e com uma velocidade média Euleriana (Figura 3.5d) tudo no qual sugere um transporte à *offshore*. Um experimento com flutuadores sintéticos confirma que as estruturas de mesoescala persistentes são a causa, provavelmente, do transporte transversal à plataforma continental (consulte a Figura A.7a e A.7b).

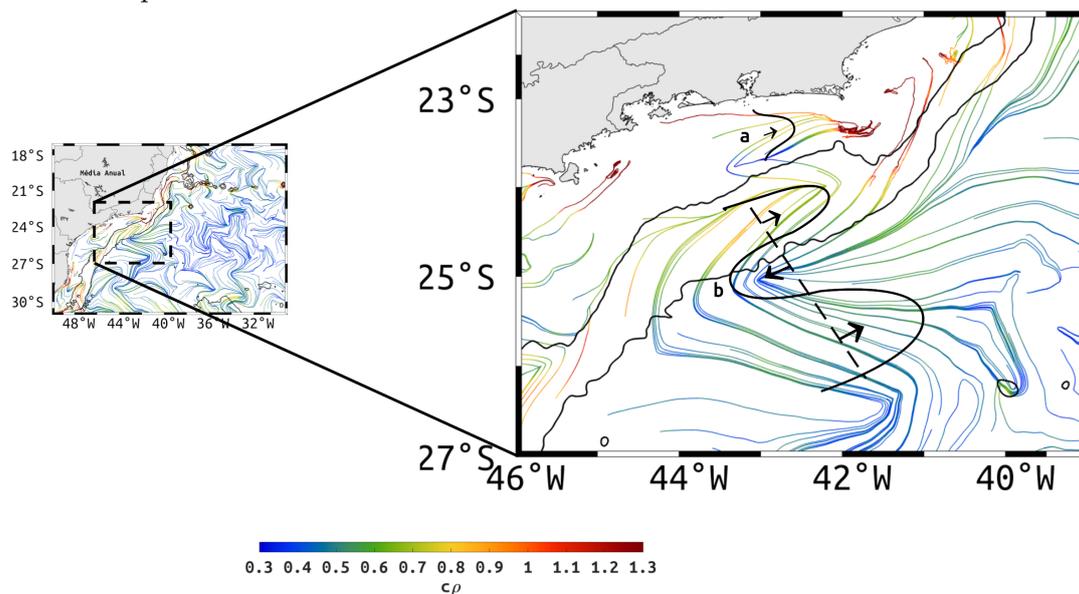
Uma terceira região (Figura 3.5e) está localizada na defronte o litoral do Rio de Janeiro, orientada de leste para oeste (localização 7 na Figura 3.3a), com a presença de uma ressurgência costeira próxima a Cabo Frio que deforma as ECLc em *chevrons*. Um par de características ciclônicas e anticiclônicas, entre  $23$  a  $25^{\circ}\text{S}$ , e nas isóbatas de  $200$  e  $2000\text{ m}$  causam uma sequência de transporte *onshore-offshore-onshore-offshore*, embora o transporte transversal à plataforma continental pareça limitado, não ultrapassando a isóbata de  $2000\text{ m}$ , onde o núcleo da CB pode ser vista. Mais a *offshore*, perto de  $41^{\circ}\text{W}$  e  $25^{\circ}\text{S}$ , há um valor máximo de ASM associado ao fluxo Lagrangiano anticiclônico recorrente, representado pelos alongamentos das ECLc (Figura 3.5e, veja também a Figura A.10).

Perto do Cabo de Santa Marta (localização 9 na Figura 3.3a) encontramos a quarta região, mais ao sul do domínio (Figura 3.5f), onde o fluxo da superfície é influenciado por uma região de ressurgência costeira distinta, em  $29^{\circ}\text{S}$ , e a presença de duas estruturas semelhantes a dipolos, sugerindo variações de transporte transversal à

plataforma, sobre a isóbata de 200 *m*, restrito à *onshore* da isóbata de 2000 *m*.

O eixo da CB (consulte a ECM na Figuras 3.2c e 3.2d, e a posição dos gradientes termiais coincidindo com as ECLc em forma de chevrons na Figura 3.1) está posicionado entre estruturas anticiclônicas e ciclônicas (Figura 3.5e). À medida que a CB flui de nordeste para o sudoeste, a parte externa da CB ganha rotação no sentido anti-horário, *offshore* à isóbata de 2000 *m*. O fluxo ao longo da costa, na plataforma, orientado de leste para o oeste, próximo à região 7 (Figura 3.3a), torna-se um fluxo *offshore* a partir de Cabo Frio. À medida em que ele se aproxima da isóbata de 200 *m* e é alimentado por uma circulação no sentido horário, sobre a isóbata de 200 *m*, conecta-se com a circulação *offshore* no sentido anti-horário. Assim, a média mensal da velocidade Euleriana sugere um transporte limitado transversal à plataforma, entre as isóbatas de 200 e 2000 *m* (Figura 3.5e), que coincide com as regiões de fraca atração (Figuras 3.3b e 3.5). É compatível também com as estruturas principais Eulerianas, anticiclônicas e ciclônicas, encontradas em ambos os lados do eixo da CB (b e c identificados na Figura 3.6).

Figura 3.6 - Representação esquemática do transporte Lagrangiano persistente baseado nas médias anuais das ECLc, coloridas de acordo com as médias anuais de  $c_p$ . O mapa à esquerda mostra o domínio completo da região de estudo. O mapa à direita refere-se a um detalhamento (*zoom*) do retângulo tracejado. Os contornos de 200 e 2000 *m* de profundidade são representados por linhas pretas.



FONTE: Produção da autora.

Com base nisso, propomos uma representação esquemática do meandramento persistente entre 23 a 27°S (Figura 3.6). A força da atração ao longo das ECLc deformadas em *chevrons* pela CB é um indicativo da cinemática da região. Ao longo do eixo principal da CB, entre 25 a 26°S, as ECLc são fracas ( $c\rho \approx 0,3$  em escala logarítmica), indicando o núcleo da CB. No entanto, entre 24 a 25°S, o núcleo da CB apresenta valores maiores de  $c\rho$  ( $\approx 0,6$  na escala logarítmica) refletindo um aumento na força de atração que está associada à circulação transversal à plataforma, conforme descrito anteriormente. Entre 23 a 24°S, as ECLc atingem valores altos de  $c\rho$  ( $> 0,8$  em escala logarítmica) refletindo o afluyente costeiro ao fluxo ao longo do talude, isto é relacionado ao jato de ressurgência costeira de Cabo Frio, no sentido nordeste (veja a Figura 3.6). Existem dipolos similares, adjacentes à CB, em diferentes latitudes (Figuras 3.5d, 3.5e e 3.5f). Os cálculos das ECLc e de  $c\rho$  apontam uma resposta semelhante a presença desses dipolos (Figura A.9).

### 3.2.2 Variabilidade do fluxo de superfície por meio de derivadores

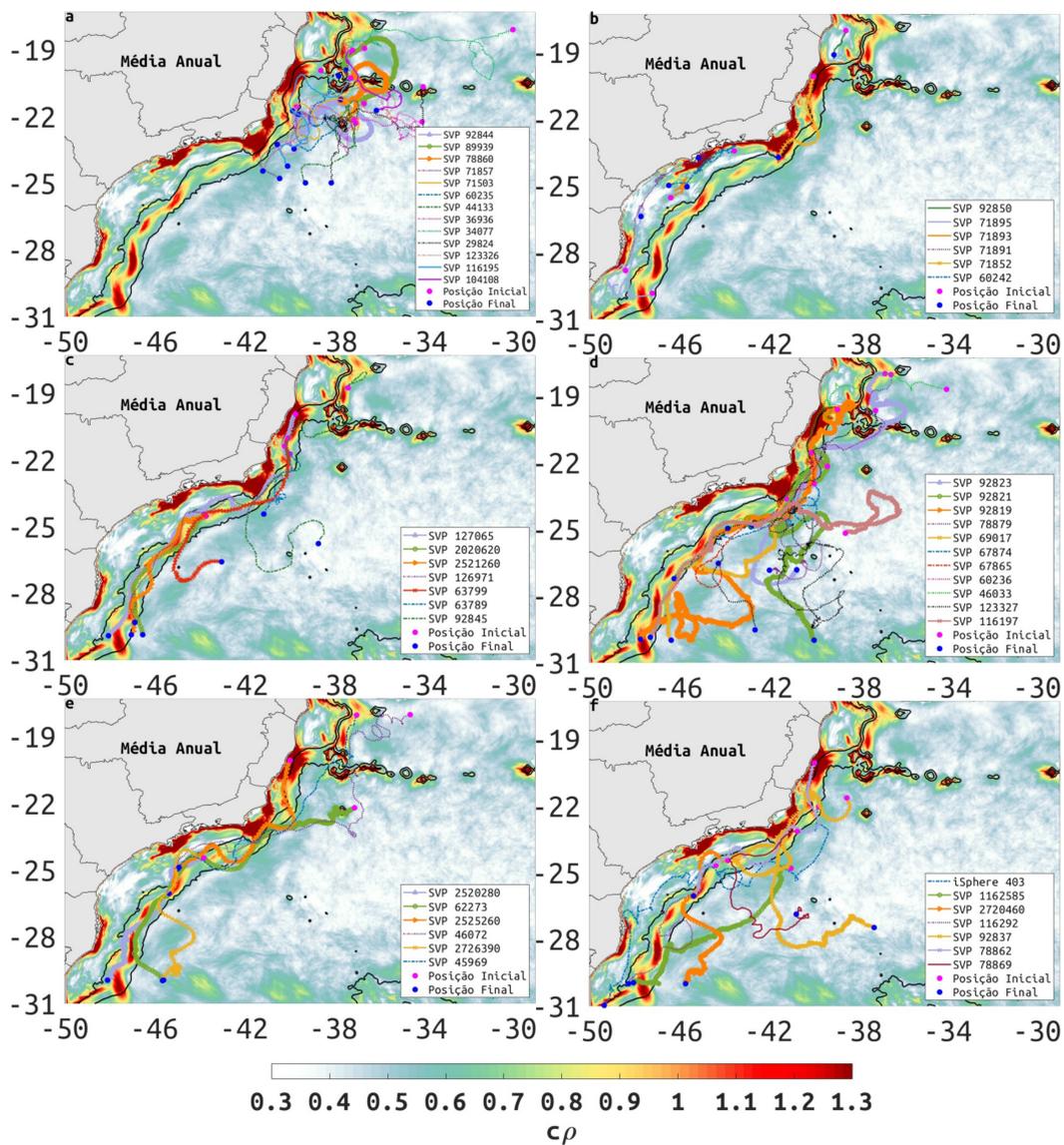
Um total de 352 trajetórias são utilizadas neste estudo. Essas trajetórias contemplam: i) dados de derivadores SVP, com velas de 15 *m*, rastreados por satélites, interpolados a cada 6 horas, distribuídos pelo *Global Drifter Program*, GDP, da NOAA (Figura A.5b); e ii) os dados de *iSpheres* (Figura A.5a), ofertados pela Pro-oceano, com o consentimento da empresa PetroRio. Uma minoria, referente às 352 trajetórias, cruzou em algum momento a isóbata de 2000 *m*. Menos de 30%, desses derivadores, cruzaram a isóbata de 200 *m* (Tabela 3.1). Algumas dessas trajetórias estão representadas nos mapas de média anual de  $c\rho$  (Figura 3.7). Essas trajetórias, plotadas sobre  $c\rho$ , destacam os padrões de transporte Lagrangianos quase-estáveis que estão associados à CB em torno da isóbata de 2000 *m*. Os padrões de transporte observados mostram uma região de fluxo com um significativo número de derivadores que passam por vários dias confinados em vórtices e meandros. Essas atividades de mesoescala estão localizadas próximo das cadeias montanhosas submarinas de Vitória-Trindade (Figura 3.7a, veja também a região 2 na Figura 3.3a) e do monte submarino de Almirante Saldanha (região 5 da Figura 3.3a). Os derivadores também podem passar algum tempo confinados em regiões atratoras fracas, representadas por valores baixos de  $c\rho$ , ou confinadas *inshore* à isóbata de 200 *m*, a qual também apresenta valores de  $c\rho$  baixos, exceto em alguns locais próximos à linha de costa (Figura 3.7b).

Tabela 3.1 - Porcentagem de derivadores, com velas de 15 *m*, rastreados por satélites, distribuídos pelo GDP da NOAA, e de *iSpheres* que cruzaram a isóbata de 2000 *m* ao longo de uma região de fraca atração, como indicado na Figura 3.3b. O mesmo derivador pode ser contado mais de uma vez caso ele cruze mais de uma região de fraca atração. \*A porcentagem está relacionada ao total dos 352 derivadores.

<b>Regiões</b>	<b>derivadores(%)*</b>
Região de atração fraca 01	10,51
Região de atração fraca 02	29,54
Região de atração fraca 03	16,47
Região de atração fraca 04	10,51
Região de atração fraca 05	17,04

FONTE: Produção da autora.

Figura 3.7 - Trajetórias selecionadas de derivadores SVP, rastreados por satélites, interpolados a cada 6 horas, distribuídos pelo GDP da NOAA; e trajetórias das *iSpheres*, distribuída pela Prooceano, com o consentimento da PetroRio. Todas as trajetórias estão sobrepostas à média anual de  $c\rho$ . a) Derivadores aprisionados em vórtices e meandros próximos à cadeia submarina de Vitória-Trindade e ao monte submarino Almirante Saldanha; b) Derivadores aprisionados em regiões de fraca atração ou *inshore* à isóbata de 200 m; c) derivadores que se deslocam *inshore* à CB, entre as isóbatas de 200 e 2000 m; d) Derivadores que se deslocam *offshore* à isóbata de 2000 m; e) Derivadores que se deslocam *onshore-offshore-onshore*; f) Derivadores que se deslocam *onshore-offshore-onshore*. Os contornos de profundidade de 200 e 2000 m são representados pelas linhas pretas. O SVP de cada derivador está identificado na legenda, à direita inferior, de cada mapa.

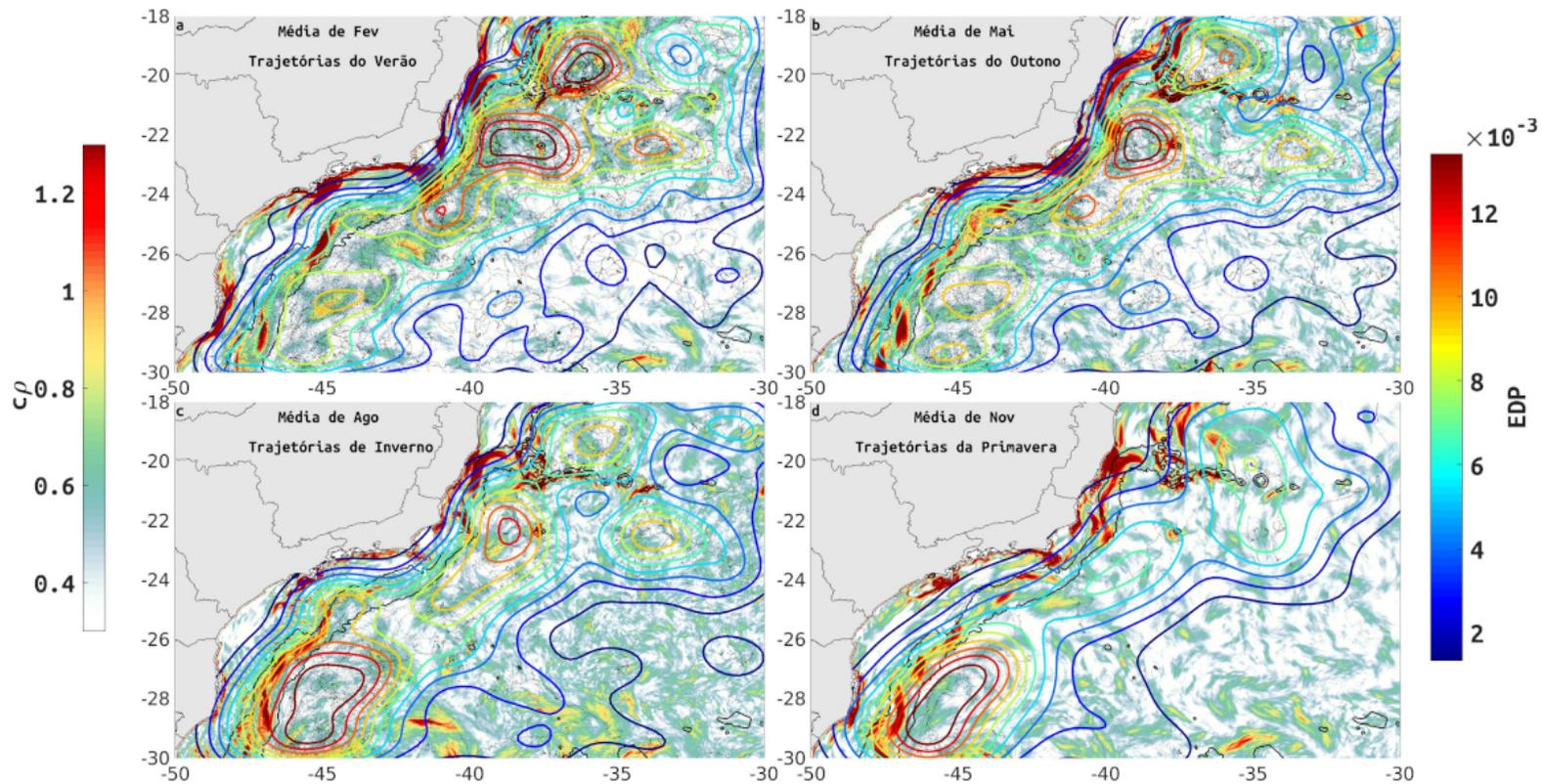


FONTE: Produção da autora.

Quando os derivadores viajam apenas *inshore* do núcleo da CB, entre as isóbatas de 200 e 2000 *m*, há algum meandramento (Figura 3.7c). Os derivadores que se deslocam à *offshore* da isóbata de 2000 *m* encontram uma estrutura ciclônica permanente (Figuras 3.5e e 3.5f). Outros exemplos de transporte transversal à plataforma identificam as estruturas ciclônicas persistentes entre: 23 a 25°S, 26,5°S e 29°S (Figuras 3.5e e 3.5f). Essas estruturas ciclônicas persistentes tendem a influenciar onde os derivadores se moverão *onshore* ou *offshore* (Figuras 3.7c a 3.7f). É menos provável que o transporte transversal à plataforma atravesse a isóbata de 200 *m*. O fluxo dos derivadores transversal à plataforma, entre 24°S a 27°S (Figuras 3.7c a 3.7e) é mais provável em regiões de baixo  $c\rho$  do que em regiões de alto  $c\rho$ .

Os efeitos dos meandros e de estruturas vorticiais, ambos persistentes (Figuras 3.5a e 3.5b), nos derivadores SVP, podem claramente ser vistos como altos valores de Estimção de Densidade de Probabilidade (EDP, consulte a seção 3.5) que medem a possibilidade de os derivadores visitarem uma região (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Os valores de PDE (contornos coloridos) em (a) para todas as trajetórias encontradas durante o verão austral (de Janeiro a Março) plotado sobre a média do mês de Fevereiro de  $c\rho$  (mapa em cores); (b) para todas as trajetórias encontradas durante outono austral (de Abril a Junho) plotado sobre a média do mês de Maio de  $c\rho$  (mapas em cores); (c) para todas as trajetórias encontradas durante inverno austral (de Julho a Setembro) plotado sobre a média do mês de Agosto de  $c\rho$  (mapas em cores); e (d) para todas as trajetórias encontradas durante primavera austral (de Outubro a Dezembro) plotado sobre a média do mês de Novembro de  $c\rho$  (mapas em cores). Os contornos de 200 e 2000 m de profundidades estão representados por linhas pretas.



FONTE: Produção da autora.

Nos meses de Fevereiro a Maio, as regiões de alta EDP tendem a serem confinadas dentro de regiões de máximo  $c\rho$ , que ocorrem próximo à regiões de ressurgências costeiras e ao longo de características batimétricas acentuadas (regiões 2 e 5 da Figura 3.3).

Entre 24 a 30°S, os valores de EDP tendem a estar bem alinhados com a região do talude. Nesta, os valores de EDP diminuem consideravelmente em direção à costa, em qualquer latitude. As exceções são localizadas próximas de 25°S em: Fevereiro, Maio e Agosto. Nessa latitude e meses os valores de EDP médios ( $\approx 6 \times 10^{-3}$ ) podem ser vistos *inshore* à isóbata de 200 m. EDP máximo ( $> 11 \times 10^{-3}$ ) estão confinados à *offshore* e adjacente à isóbata de 2000 m. Todas as trajetórias, dos 352 derivadores, podem ser visualizadas na Figura A.11. As EDP dos derivadores sugerem uma variabilidade sazonal com valores de máximo EDP ( $> 11 \times 10^{-3}$ ), localizados ao norte de 24S, somente durante o verão e o outono (Figuras 3.8a e 3.8b). O inverno se apresenta como uma estação de transição, uma vez que os valores de EDP máximos diminuem ao norte de 24°S e aumentam ao sul de 26°S (Figura 3.8c). Já na primavera, os valores máximos de EDP estão limitados ao sul de 26°S.

Em todos os casos, os valores máximos de EDP tendem a se situar à *offshore* da isóbata de 2000 m. Uma única exceção, a máxima de EDP está centrada próximo a 22°S e 34°W, encontrada, principalmente, no verão, outono e inverno.

A região isolada próxima à linha de costa, entre 24 e 27°S, possui uma região maior de EDP com valor zero no outono e no inverno (Figuras 3.8b e 3.8c). Nessa região, os valores de  $c\rho$ , para as mesmas estações, são insignificantes em relação aos valores de  $c\rho$  no verão e na primavera (Figuras 3.8a e 3.8d). Em todas as estações, essa região costeira está bem isolada. Outra região que tende a estar isolada é a linha de costa, ao norte de 20S, principalmente, fora do verão (Figuras 3.8b até 3.8d).

### 3.2.3 O derramamento de óleo no campo de Frade

Os cálculos das ECLc e de  $c\rho$  têm sido usados com sucesso para estimar as prováveis trajetórias de derramamentos de óleo, como nos acidentes no Golfo do México, ocorridos em 1979 e 2010 (DURAN et al., 2018).

Nós mostramos que ao realizar os mesmos cálculos de (DURAN et al., 2018), mas utilizando um modelo oceânico de superfície livre e de *eddy-resolving*, é possível obter um bom nível de concordância entre as ECLc e o comportamento do derramamento

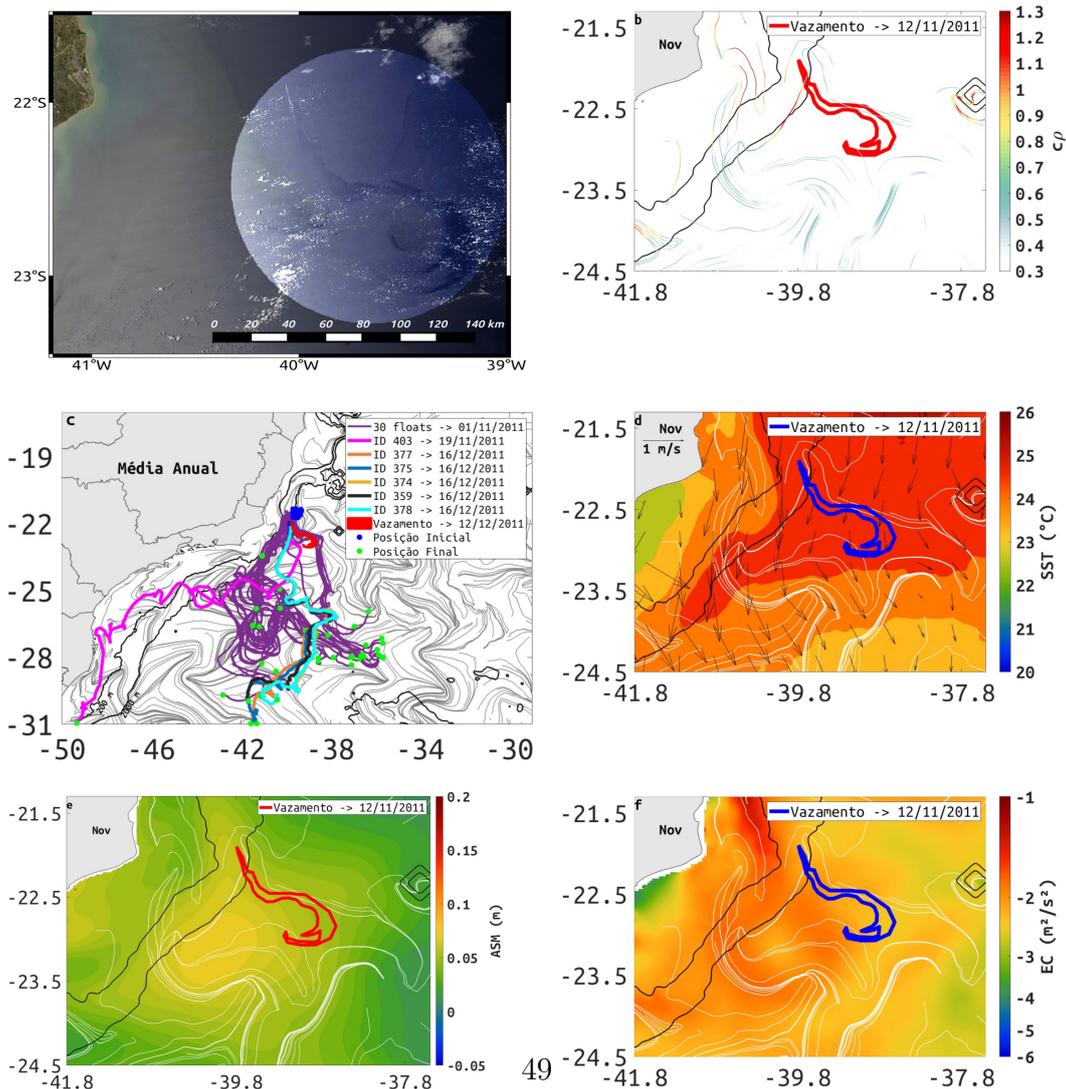
de óleo *offshore* ocorrido no Campo de Frade (Figura 3.9a). O vazamento ocorreu a 120 km da costa do estado do Rio de Janeiro (Brasil) no dia 7 de Novembro de 2011. O derramamento atingiu uma área de 1998 km<sup>2</sup> e um comprimento de 234 km, em menos de 15 dias, sendo contido apenas em 30 de dezembro do mesmo ano (Figura 3.9b).

A concordância das ECLc pode ser qualitativamente avaliada com a comparação entre: a trajetória do derramamento de óleo, os 30 flutuadores sintéticos (*floats*), simulados, durante o mesmo mês do acidente, e seis derivadores *iSpheres*, rastreados por satélites, lançados entre Novembro e Dezembro de 2011 (Figura 3.9c). No dia 19 de Novembro foi lançado um *iSphere* de forma imediata para acompanhar o vazamento (linha magenta). Quase um mês depois, as outras 5 *iSpheres* (linhas nas cores laranja, azul, amarelo, cinza e ciano) foram lançados simultaneamente *cluster*, com o objetivo de gerar informações da difusão turbulenta e manter equipamentos e compreender a dinâmica da região caso uma nova mancha fosse detectada (SANTOS, 2020). Os *floats* foram simulados para se moverem livremente durante 60 dias, que é o mesmo período em que o derramamento real progrediu antes de sua contenção final. Veja, também, um melhor detalhamento da concordância visual em Figura A.4.

Uma parte dos *floats* (trajetórias de cor roxa, localizadas à noroeste na Figura 3.9c), concordam com a trajetória do derramamento observado (em vermelho) e com um dos *iSpheres*, lançado em Novembro (trajetória de cor magenta, com ID de 403, Figura 3.9c). A maioria dos *floats* se move ao longo das ECLc. A outra parte dos *floats* (trajetórias de cor roxa, localizadas à sudoeste na Figura 3.9c) corresponde com as trajetórias das *iSpheres* (trajetórias na cor laranja, azul, amarelo, cinza e ciano na Figura 3.9c) lançadas em Dezembro. Portanto, tanto as ECLc como as trajetórias dos *floats* e das *iSpheres* estão em acordo. As informações apontam que existem dois padrões de transportes principais originados no local do derramamento. Enquanto a mancha de óleo flui em concordância com uma das ECLc (Figura 3.9b), a mesma não se comporta de acordo com a média mensal de Novembro das correntes superficiais (Figura 3.9d). Naturalmente, a média da velocidade Euleriana é frequentemente perpendicular às ECLc encontradas no local do derramamento.

Observe que as ECLc, calculadas para extrair padrões de transportes prováveis dentro do período de uma semana, são indicadoras precisas das trajetórias de alguns dos derivadores. O vazamento, ocorrido em Novembro, teve sua origem  $\approx 370$  km de uma região de ressurgência costeira (região 6 na Figura 3.3b, veja também a Figura 3.9d), e permeou à sudeste, perto da posição média de uma feição ciclônica (Figuras 3.9e

Figura 3.9 - a) Vazamento de óleo da operadora Chevron, conforme observado, em cores naturais, pelo sensor MODIS em 12 de Novembro de 2011 às 10:30 (UTC -3) no campo de Frade (cortesia da Petrobras). b) A extensão do derramamento de óleo (polígono preenchido na cor vermelha) plotado sobre as ECLc mensais de Novembro coloridas de acordo com  $cp$ . c) O derramamento de óleo (polígono preenchido de cor vermelha), as 30 trajetórias simuladas durante 60 dias, entre em 1 de Novembro a 31 de Dezembro de 2011, pelo modelo ROMS (linhas roxas) e as trajetórias dos 06 *iSpheres* (cortesia de Prooceano e PetroRio SA), lançados entre Novembro e Dezembro de 2011 (linhas nas cores magenta, laranja, azul, amarelo, cinza e ciano), plotados ao longo das *squeezelines* climatológicas anuais (linhas na cor cinza). As datas dos lançamentos e os IDs de cada *iSpheres* estão identificadas no canto superior à direita. d) Derramamento de óleo (polígono de cor azul) plotado sobre a média mensal de Novembro das: velocidades de superfície oceânicas do ROMS (setas pretas), dos dados de TSM do MUR (mapa em cores) e das ECLc (linhas brancas). e) Derramamento de óleo (polígono vermelho), plotado sobre a média mensal de Novembro de ASM do ROMS (mapa em cores) e das ECLc (linhas brancas). f) Derramamento de óleo (polígono azul), plotado sobre a média mensal de Novembro da ECT do ROMS (mapa em cores, em escala de log) e das ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 m de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.



49 FONTE: Produção da autora.

e 3.9f, veja também a Figura 3.5d). As posições finais do derramamento de óleo coincidem com as *squeezelines* persistentes, que se deformam em *chevrons*, em Novembro (23°S e 39°W), e advectam o derramamento de óleo para a isóbata de 2000 m. É importante observar também como as ECLc visualmente concordam com as frentes térmicas (Figura 3.9d), com a ASM (Figura 3.9e) e com a distribuição de ECT (Figura 3.9f).

### 3.2.4 A contaminação de petróleo em larga escala no nordeste do Brasil de origem desconhecida

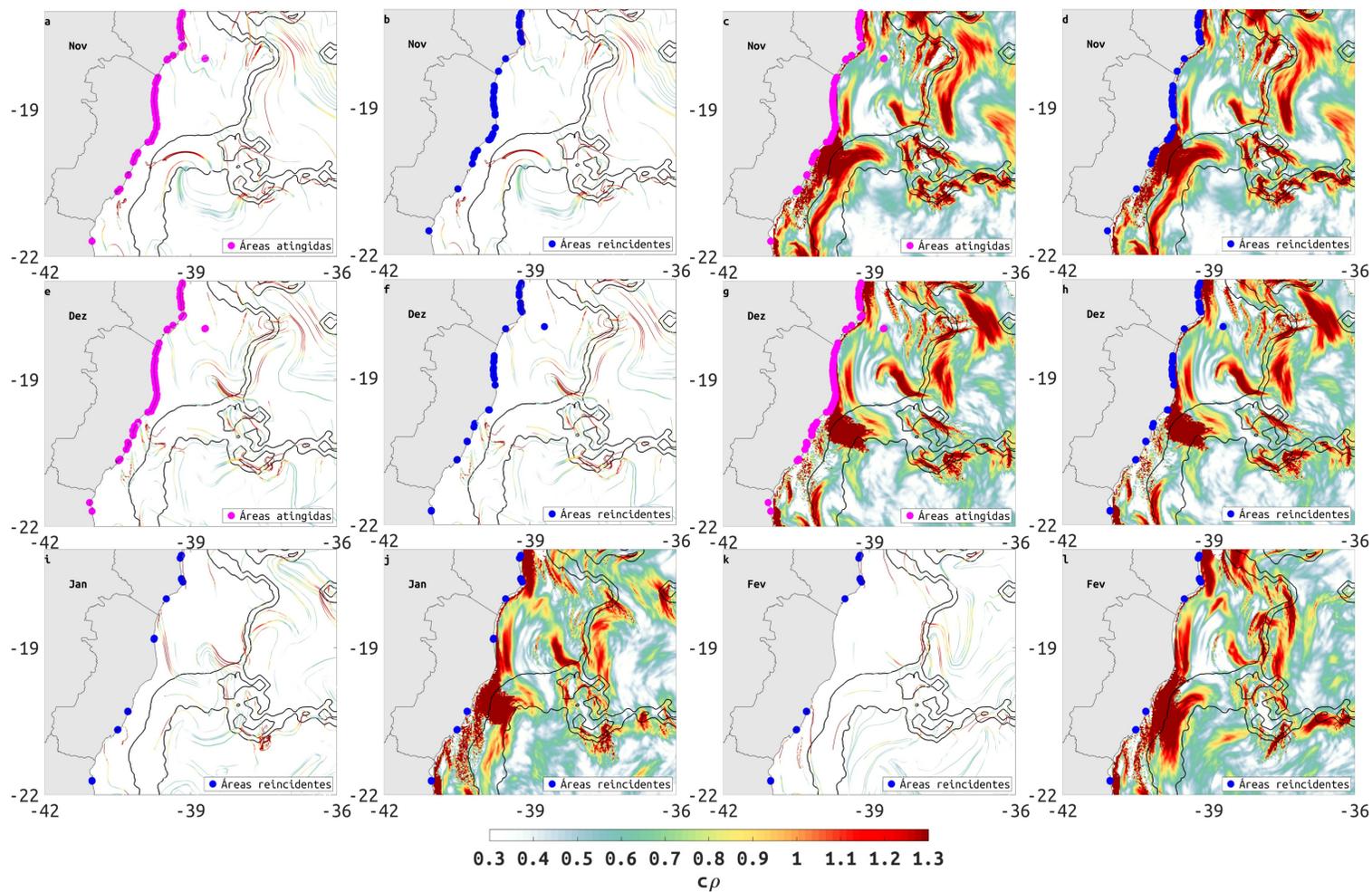
Em 2019, o Brasil sofreu uma emergência ambiental relacionada ao vazamento de petróleo que impactou um significativo número de praias do estado do Maranhão até o norte do estado do Rio de Janeiro (veja as Figuras 1.4 e 1.3). O vazamento atingiu uma extensão de quase 4000 km (IBAMA, 2019a; BRASIL. MARINHA, 2019).

Desde o fim de agosto, quando foi detectada pela primeira vez o vazamento de óleo, relataram-se ocorrências de manchas de óleo em mais de mil praias, incluindo as 12 áreas de proteção marinha (IBAMA, 2019a). Até o mês de Novembro, mais de 2000 toneladas de óleo tinham sido removidas dessas praias (THE GUARDIAN, 2019) e, até o momento dessa elaboração deste documento, ainda não há indicação ou evidência de sua origem (IBAMA, 2019a). As manchas de petróleo bruto se moviam em subsuperfície, o que dificultou o seu monitoramento utilizando sensores de satélite orbitais.

Uma das áreas marinhas protegidas mais importantes, o Banco Abrolhos, foi oleada no início de Novembro de 2019. Esta área é reconhecida internacionalmente como patrimônio da biodiversidade marinha (GREENPEACE, 2019; WWF, 2019; CI, 2019; SAFETY4SEA, 2019) e foi incluída na 16<sup>a</sup> rodada de licitações para exploração e produção de petróleo e gás natural, sob o regime de concessão, aberta em Dezembro de 2018 (resoluções, CNPE n°17/2018 and CNPE n°03/2019; (ANP, 2019)).

Nós mostramos a localização das praias oleadas conhecidas, situadas dentro da área de estudo, em: Novembro de 2019 (Figura 3.10a até a Figura 3.10d), Dezembro de 2019 (Figura 3.10e até a Figura 3.10h), Janeiro de 2020 (Figura 3.10i e 3.10j) e Fevereiro de 2020 (Figura 3.10k e 3.10l). Nestas regiões, o petróleo encalhou pela primeira vez durante os meses de Novembro (Figura 3.10a até a Figura 3.10d) e Dezembro (Figura 3.10e até a Figura 3.10h).

Figura 3.10 - Localização das praias, ao longo da costa brasileira, referente à nossa área de estudo, que foram oleadas pela primeira vez (pontos cor de rosa), e em que ocorreram as reincidências (pontos azuis) em: Novembro (mapas de a até d) e Dezembro (mapas de e até h) de 2019 e Janeiro (mapas de i até j) e Fevereiro (mapas de k até l) de 2020. Os contornos de 200 e 2000 m de profundidade estão representados por linhas pretas. Os locais oleados e re-oleados são sobrepostos às médias mensais de ECLc (linhas coloridas) e de  $c\rho$  (mapa em cores) para indicarem os padrões de transporte e os locais de máxima atração de partículas.



As manchas de óleo se moveram de norte para o sul seguindo a CB. Embora a maior parte da costa contaminada esteja fora do domínio do nossa simulação, é possível observar que as regiões com valores máximos de  $c\rho$  ( $> 1,3, 3,7$  em unidade linear) são indicadores fortes de encalhamento de petróleo no litoral, pelo menos por uma única vez (Figuras 3.10a, 3.10c, 3.10e e 3.10g). Os valores máximos de  $c\rho$  também indicam onde houve e poderão ocorrer novas reincidências (Figuras 3.10b, 3.10d, 3.10f, 3.10h até a Figura 3.10l).

### 3.3 Discussões

Oferecemos, pela primeira vez, uma representação integrada do papel dos vórtices e meandros na formação do fluxo principal da CB com base nos cálculos das ECLc. A natureza quase-estável dessas estruturas Lagrangianas permitem a identificação da influência difusa e consistente das características de mesoescala desta CCO. As *squeezelines* climatológicas, deformadas em formas de *chevrons*, podem ser vistas ao longo do eixo principal da CB. Essas deformações coincidem com as deformações em *chevrons* obtidas a partir de dados orbital de TSM, como é sugerido pelo fluxo principal. Tais estruturas caracterizam o núcleo superficial da CB, posicionado ao longo da isóbata de 2000 m. Essa caracterização coincide sazonalmente com a simulação e os dados de satélite de alta resolução (Figura 3.1). As saídas da simulação de alta resolução ( $\approx 3$  km) indicam que os *chevrons* também respondem ao transporte transversal persistente à plataforma com a transição dos valores de ASM: valores positivos, altos, perto do litoral, para valores negativos, baixos, entre as isóbatas de 200 a 2000 m, para valores positivos, altos, à *offshore* da isóbata de 2000 m (Figuras 3.5a e 3.5b). As estruturas ciclônicas e anticiclônicas, zonalmente emparelhadas, são as responsáveis por deformarem as ECLc em forma de *chevrons*. Em um trabalho recente (BERON-VERA et al., 2020) encontraram *chevrons* semelhantes abrangendo o eixo Lagrangiano das Correntes das Malvinas. Eles mostraram que essas estruturas persistentes, sobrepondo às ECLs parabólicas sem cisalhamento, comportam-se como uma barreira de transporte transversal à plataforma. Mostramos que as ECLc hiperbólicas podem também identificar a deformação de fluidos como *chevrons* ao longo do núcleo da CB. Essa afirmação está em concordância com as médias mensais de TSM que determinaram os padrões de advecção em forma de *chevrons* (Figuras 3.1a e 3.1b).

Vários estudos independentes têm discutido a presença de características de mesoescala ao longo do CB (SCHMID et al., 1995; CAMPOS et al., 1995; SILVEIRA et al., 2004; SILVEIRA et al., 2008; CALADO et al., 2006; CHEN et al., 2019) e a sua intera-

ção com gradientes topográficos acentuados e com o cisalhamento de superfície e subsuperfície como indutores da formação de meandros ciclônicos e anticiclônicos e, conseqüentemente, em vórtices (ARRUDA et al., 2013; SOUTELINO et al., 2013). Em relação às características dinâmicas de tal variabilidade de mesoescala no AS, acredita-se que a maioria das anomalias de SSH observadas nos dados do altímetro sejam causadas por uma combinação de ondas de Rossby, que se propagam para oeste, e redemoinhos não lineares, que se propagam geralmente para oeste com um pequeno componente voltado para o norte (CHELTON et al., 2011; POLITO; SATO, 2015). Estudo de Rocha et al. (2014) apontou que as instabilidades baroclínicas da CB estão associadas à geração de meandros e redemoinhos.

Durante o verão, as deformações das ECLc, representadas pelos *chevrons*, cobrem uma extensa área com montes submarinos e a mudança acentuada na orientação da costa, coincidente com a ECT máxima ( $-2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , em escala logarítmica,  $0,13 \text{ m}^2/\text{s}^2$  em unidade linear) estendendo-se à *offshore* do Banco de Abrolhos e entre 21 a 26°S (Figura 3.2a). Durante o inverno, a ECT máxima é menos organizada (Figura 3.2b), possivelmente, como resultado do aumento do número de frentes frias atmosféricas que se deslocam para o norte. A presença de meandros e vórtices persistentes ao longo do eixo da CB é, também, evidente sazonalmente (médias mensais de Março e Agosto) nos: mapas de ECT e ECM (Figura 3.2a até 3.2d), mapas de ASM (Figura 3.5), das EDP (Figura 3.8) para as trajetórias dos derivadores, e mapas de velocidade superficial (Figura A.10). A orientação e localização das ECLc tendem a seguir esses recursos conhecidos. A ASM simulada indica a presença dos vórtices ciclônico de Vitória (Figura 3.5c) e anticiclônico de Abrolhos (Figura 3.5c), próximos à região da cadeia Vitória-Trindade e de Abrolhos, respectivamente (localizações 1, 4 e 2 da Figura 3.3a). O intenso fluxo de cisalhamento, causado pela projeção do Banco Abrolhos, à leste da plataforma, e pela cadeia submarina de Vitória-Trindade são evidentes com valores altos de  $c\rho$  ( $> 1, 2,7$  em unidade linear, veja Figura 3.4) e trajetórias caóticas de derivadores SVP (Figura 3.7a). À medida que a CB move em direção ao sul, ela atravessa uma região de ressurgência costeira, induzida pelo vento (CASTELAO; BARTH, 2006; RODRIGUES; LORENZZETTI, 2001), por volta de 21S, na região do Cabo de São Tomé (localização 6 da Figura 3.3a, veja também a Figura 3.5d e a Figura A.13a), caracterizada pela persistência de valores altos de  $c\rho$ , durante todo o ano (Figura 3.4). As ECLc, deformadas em *chevrons*, no vórtice de São Tomé, retratadas na Figura 3.5d, têm formas semelhantes às encontradas mais ao sul do eixo da CB, mas com o vórtice *offshore* exibindo uma extremidade dobrada na direção da rotação anticiclônica. Como esses *chevrons* são formados distantes do eixo da CB, suas formas tendem a estar em conformidade com a rotação

do vórtice. O vórtice à *onshore* possui uma feição ciclônica semi-permanente (veja as Figura A.13a até A.13c). Esse vórtice se origina do descolamento de um meandro instável da CB, provavelmente induzido por instabilidade baroclínica (CALADO et al., 2008; CAMPOS, 2006; LIMA et al., 2016). Os vórtices ciclônicos e meandros persistentes, que eles geram, são conhecidos por induzir ou realçar a ressurgência costeira (CALADO et al., 2010). Neste trabalho, associamos essas ressurgências aos valores altos de atração ( $> 1, 2,7$  em unidade linear, Figura 3.4). Existe uma região de confluência Lagrangiana ao sul da ressurgência costeira de Cabo Frio (localização 7 da Figura 3.3a), associada à presença de feições ciclônica-anticiclônicas, em ambos os lados da isóbata de  $2000\text{ m}$ , próximo a  $25^\circ\text{S}$  (Figura 3.5e, Figura A.13a até a Figura A.13c). Aqui os nossos cálculos de  $c\rho$  e das ECLc capturaram com precisão os principais elementos da circulação superficial conhecidos como uma região de corrente-vórtices-ressurgência (CALADO et al., 2010), oferecendo uma visão Lagrangiana integrada espaço-temporalmente de um sistema dinamicamente complexo. Mais ao sul, o Cabo de Santa Marta (localização 9 da Figura 3.3a) é dinamicamente similar a Cabo Frio com fluxos alternados entre anticiclônico (*offshore*) e ciclônico (*inshore*) (Figura 3.5f), que coincidem com a advecção oriunda de TSM (veja a Figura A.13) realçado pela instabilidade baroclínica (SILVEIRA et al., 2008). A ressurgência costeira persistente na quebra da plataforma é resultante da interação da CB com a orientação da costa e a topografia da plataforma (PALMA; MATANO, 2009). Durante o verão, a força do vento fortalece à ressurgência costeira. No inverno, um fluxo para norte advecta a água fria e pouco salina proveniente do rio Prata (CAMPOS et al., 2013) (Figura 3.1a). As ECLc, organizadas zonalmente, em torno do Cabo de Santa Marta, apresentam estruturas em formas de *chevrons* sobre os valores máximos de ECM ao longo do eixo do fluxo principal da CB (Figura 3.2c e 3.2d).

As ECLc extraíram padrões de transporte Lagrangiano quase-estáveis associados a meandros persistentes e estruturas rotacionais, conforme indicado em diferentes regiões na Figuras 3.5c até 3.5f. Quando o eixo da CB está sobre a isóbata de  $2000\text{ m}$ , ao sul de  $22^\circ\text{S}$ , os meandros frontais se desenvolvem como uma resposta à instabilidade baroclínica devido ao cisalhamento vertical, associado este à CB e à corrente de contorno oeste intermediária, que flui abaixo de  $500\text{ m}$  de profundidade (SILVEIRA et al., 2008). À medida que esses meandros crescem, eles podem causar uma reversão no fluxo de superfície, na frente *inshore* da CB. Usamos a média anual das ECLc para propor uma representação esquemática, apresentada na Figura 3.6, do fluxo meandrante quase-estável e persistente, encontrado entre  $22$  a  $31^\circ\text{S}$ . Um fluxo baroclínico, similar, foi obtido por (CALADO et al., 2010), com um experimento de modelo oceânico, com uma resolução horizontal de  $13\text{ km}$  e  $20$  níveis  $\sigma$ . Em

seu estudo, Calado et al. (2010) mostrou a existência de um padrão de onda de vorticidade quase permanente na região. O típico meandramento ciclônico, entre 200 e 2000 *m*, também, é conhecido por induzir ressurgência costeira na quebra da plataforma durante o verão austral (CAMPOS et al., 2000). (CAMPOS et al., 1996) descreveram a existência de um par de vórtices com rotações opostas, ao sul de Cabo Frio, similar à nossa representação esquemática. Porém, o estudo não foi capaz de oferecer uma explicação para a existência do par de vórtices. As características persistentes associadas com os valores altos de  $c\rho$  ( $> 1$ , 2.7 em unidade linear) contribuem com a revisita frequente dos derivadores durante o verão e o inverno (Figuras 3.8a e 3.8b).

A interpretação das ECL nem sempre é uma tarefa simples, pois demanda a integração de dados diferentes e independentes (DURAN et al., 2018; GOUGH et al., 2019). Para esse fim, utilizamos dados de derivadores e de *floats*, liberados em locais específicos para avaliar, com sucesso, a significância das ECLc calculadas. Apesar da forte variabilidade sazonal observada na TSM de satélite, ECT e nas ECLc derivados de simulação, o fluxo da CB tende a atuar como uma barreira de transporte para partículas. O cálculo da EDP referente aos 352 derivadores rastreados por satélites mostra que, majoritariamente, as partículas se concentram em trechos extensos ao longo da isóbata de 2000 *m* (Figura 3.8). Veja também a Figura A.11 para visualizar um gráfico contendo todas as trajetórias ao longo dos 13 anos simulados. Existe um padrão espaço-temporal claro na distribuição das trajetórias. De Fevereiro a Maio elas se concentram ao norte de 24°S, e ao sul do mesmo ponto entre Agosto até Novembro. A prevalência de valores altos de  $c\rho$  ( $> 1$ , 2,7 em unidade linear) também segue uma tendência semelhante, como demonstrado nos mapas mensais de força de atração climatológica (Figura 3.4).

A forte variabilidade nessa corrente, ao longo da plataforma, é sugerida pela presença de uma intensa atividade vorticial (Figura 3.2a, Figura 3.2b e Figura 3.5d até a Figura 3.5f), com a magnitude da máxima ECT sendo comparável à máxima ECM (Figura 3.2c e Figura 3.2d). Enquanto a ECM está centrada ao longo da isóbata de 2000 *m*, a ECT máxima está centralizada mais à *inshore*, entre as isóbatas de 200 e 2000 *m*. A localização da máxima EC é similar à localização da máxima ECT, com contribuições da máxima ECM, sugerindo, novamente, a persistência da atividade vorticial (Figura 3.2e e Figura 3.2f). A deformação das *squeezelines* climatológicas, em *chevrons*, delinea uma assinatura consistente, entre as regiões altas e baixas de ASM médias simuladas alinhadas às médias das velocidades Eulerianas de superfície (Figura A.10). Isso é mais evidente em torno de 23°S, onde o gradiente (variação)

de ASM é baixo, entre as isóbatas de 200 a 2000  $m$ , e o gradiente alto de ASM, à *offshore* da isóbata de 2000  $m$  (Figuras 3.5a e 3.5b), que parecem concentrar a maior parte do cisalhamento horizontal do fluxo. Quase 30% dos 352 derivadores utilizados neste estudo (Tabela 3.1) conseguiram atravessar regiões de fraca atração (Figura 3.3b). A terceira região fraca coincide com o trabalho realizado por Santos et al. (2010). Santos et al. (2010) realizaram um projeto de monitoramento em 2009, próximo as reservas de óleo na Bacia de Santos, com o lançamento de 40 iSpheres e 12 derivadores SVP, onde identificaram uma região preferencial de "entrada" dos iSpheres, na latitude da ilha do Cardoso ( $\approx 25^\circ\text{S}$ ). Essa região pode estar relacionada com ondas de Rossby e a conservação de vorticidade relativa da CB, como pode ser observado na Figura 6 do trabalho de Assireu et al. (2017). Veja também os dados do derivador de SVP 127065, na Figura 3.7c; os derivadores de IDs 403, 78862, 2720460 na 3.7e; os derivadores de IDs 62273, 2525260 na 3.7f. De fato, as EDP das posições dos derivadores SVP (Figura 3.8) sugerem que os valores altos de  $c\rho$ , sobre o talude, comportam-se como uma barreira de transporte ao redor da isóbata de 200  $m$ . A probabilidade de um flutuador atravessar esta barreira é de aproximadamente uma ordem de magnitude menor do que a probabilidade de ele não atravessar. Quando os derivadores atravessam a isóbata de 2000  $m$ , em direção à isóbata de 200  $m$ , eles tendem a fazê-lo ao longo de uma seção com valores baixos de  $c\rho$ . Da mesma forma, os derivadores liberados *inshore* à isóbata de 200  $m$  tendem a ser confinados na plataforma (Figura 3.7b).

Nosso domínio de estudo, abrange duas das mais importantes áreas produtoras de petróleo do AS: as bacias de Santos e Campos. Juntas elas são responsáveis por 87% da produção total de petróleo no Brasil. Nossos resultados destacam a natureza complexa do transporte superficial ao longo da CB e os desafios que ela representa àqueles envolvidos em modelar a trajetória de derramamentos de óleo como parte de planos de contingência e respostas emergenciais. Usando exemplos de dois eventos diversos de derramamento de óleo, mostramos que dos cálculos das ECLc e de  $c\rho$  provém novas informações relevantes para uma avaliação detalhada da organização do transporte de superfície. Nossos resultados, para o vazamento do Campo de Frade, concordam com o transporte *offshore* que também pode ser visto com os derivadores (Figura 3.9c), média mensal de TSM (Figura 3.9d), e a máxima ECT, *offshore* à isóbata de 2000  $m$  (Figura 3.9f), todos à *offshore* da isóbata de 2000  $m$ . Podemos ver na Figura 3.9c que apenas um *iSpheres*, iSphere 403 (lançado no mesmo dia da aquisição do sensor Modis) e alguns *floats* foram capazes de reproduzir o movimento da mancha de óleo com mesma acurácia do padrão de transporte determinado pelas ECLc (Figura 3.9b). As demais iSpheres (lançadas em Dezem-

bro) e a outra parte dos floats seguem a dinâmica referente ao mês de Dezembro. A utilidade das ECLc para o planejamento e resposta à derramamentos de óleo é novamente demonstrada aqui. Na localidade do derramamento de óleo no Campo de Frade, os *floats* e as trajetórias dos *iSpheres* mostram dois padrões de transporte diferentes, com o óleo seguindo um deles. Ambos os padrões de transporte são representados claramente pelas ECLc geradas na origem do derramamento. Essa observação suporta o potencial uso dessas estruturas a fim de restringir as mais prováveis trajetórias da mancha de óleo durante uma resposta de emergência. A partir das comparações dos padrões de transporte demonstra-se mais uma vez que a média da velocidade Euleriana pode ser duvidosa. A velocidade Euleriana tende a ser perpendicular aos padrões de transporte Lagrangiano simulados e observados. Por sua vez, as ECLc, utilizadas e calculadas neste trabalho mostram com precisão os padrões de transporte (Figura 3.9d). Veja-se um exemplo adicional no estudo de (DURAN et al., 2018). Nesta pesquisa, mostramos que a interpretação de ECLc nem sempre é direta. A interpretação e, conseqüentemente, a identificação dos padrões de transporte persistentes devem ser apoiados pelas comparações entre as ECLc e os campos médios Eulerianos, como por exemplo, TSM (Figura 3.1), ASM (Figura 3.5), EC (Figura 3.2), e de derivadores SVP (Figura 3.8 e 3.9).

Recentemente, um acidente em grande escala oleou quase 4000 *km* de extensão de praias no Brasil, entre Novembro de 2019 a Fevereiro de 2020, cuja origem ainda não foi determinada. Isso nos deu uma oportunidade única de avaliar como os cálculos das ECLc e  $c\rho$  poderiam contribuir com os padrões de encalhamento de petróleo nas praias, sem a necessidade de se considerar a fonte de contaminação. Por definição, as ECLc foram projetadas para trabalhar com derramamentos de óleo genéricos. A sequência dos locais oleados relatados pelos moradores locais e pelo governo brasileiro, sugere que o derramamento de óleo deve ter se originado próximo à bifurcação da CSE, centrada em torno de 10 a 14°S (RODRIGUES et al., 2007). Apesar dessa hipótese, da origem do vazamento, não ser um consenso entre a comunidade científica. A maior parte do petróleo dispersou-se como manchas de subsuperfície. Porém, encontramos uma boa concordância entre as regiões de valores máximos de  $c\rho$  e das ECLc persistentes com as primeiras praias oleadas e reincidentes (Figura 3.10). Tal concordância sugere quais regiões são mais vulneráveis ao acidente. Comparando os locais impactados apenas uma vez àqueles na qual houve reincidência (Figura 3.10, pontos rosa e azul, respectivamente) nota-se claramente que a próxima mancha acontecerá mais próximo de valores máximos de  $c\rho$  ( $> 1,3, 3,6$  em unidade linear).

O uso combinado de  $c\rho$  e das ECLc persistentes com dados simulados e obser-

vacionais (imagens de satélite e boias flutuantes) mostraram ser uma ferramenta promissora para indicar o comportamento de trajetórias de derramamento de óleo e locais de encalhamento.

Apesar das correntes oceânicas próximas à superfície, dominadas pela força da ação de cisalhamento do vento e das ondas, influenciarem no transporte de materiais flutuantes no oceano, o estudo de [Lodise et al. \(2019\)](#) fornece uma nova visão sobre o cisalhamento vertical presente em correntes superficiais impulsionadas pelo vento sob ventos fortes. [Lodise et al. \(2019\)](#) mostra que a componente, impulsionada pelo vento, das velocidades dos derivadores (com e sem velas) diminuem em magnitude e giram à direita da direção do vento de acordo com a profundidade (SSH). Para derivadores SVP, amostrados nos primeiros 60 *cm* da superfície oceânica, o ângulo de deflexão, à direita da direção do vento, aumentando de 30 para 85°, e a velocidade em 2,341% da velocidade do vento na faixa de 12 a 20 *m/s*. Os derivadores sem vela, amostrados acima dos primeiros 6 *cm* da superfície do mar, possuem o ângulo de deflexão variando de 5 para 55°, e a velocidade em 3,4%. Em ambos os derivadores, as velocidades, impulsionadas pela ação dos ventos, exibem um aumento no ângulo de deflexão com o aumento da velocidade do vento, sustentando uma diferença média de 8 a 30° entre as camadas amostradas com o aumento do vento (12–20 *m/s*). No geral, a velocidade do vento e deriva de Stokes representaram cerca de 70% da velocidade total de derivadores SVP e cerca de 80% da velocidade de derivadores sem vela.

### 3.4 Sumário e conclusões

Mostramos que, com o uso combinando das ECLc e de  $c\rho$  com dados de TSM de satélite (Figuras 3.1, A.1 e A.2), simulação de velocidades Eulerianas de superfície, ASM (Figuras 3.5 e A.9), ECT, ECM e EC (Figuras 3.2 e A.3) derivadores Lagrangianos e flutuadores sintéticos (Figuras 3.7, 3.8, 3.6, A.6, A.7 e A.8), é possível obter novas ideias sobre como o transporte oceânico superficial é organizado numa configuração complexa de CCO fraca. Os padrões de transporte Lagrangianos quase-estáveis (Figuras 3.4 e A.12) nesta CCO elegantemente capturam o papel dos vórtices e dos meandros persistentes e recorrentes no transporte de superfície. Esta nova abordagem produziu resultados consistentes, tornando possível a criação de uma representação integrada para o papel da atividade de mesoescala na formação e caracterização do fluxo da CB (Figura 3.6). Uma representação precisa dos fluxos de superfície, em sistemas de correntes, dominados por instabilidades e intensa atividade de mesoescala, é, particularmente, desafiadora ao tentar conciliar as

visões Eulerianas e Lagrangianas. Até agora, os resultados publicados na CB têm provido evidências de que a interação da superfície e dos fluxos em nível da piconclina, juntamente com a topografia complexa do fundo, e as mudanças abruptas na orientação da costa, produzem uma série de características persistentes de mesoescala (CAMPOS et al., 1995; CAMPOS et al., 1996; SILVEIRA et al., 2008). A média do fluxo Euleriano pode não ser representativa ao transporte material, dificultando a descrição precisa do transporte de material na superfície do oceano. Superamos essa limitação descrevendo o fluxo da superfície da CB, a partir do ponto de vista Lagrangiano, e, então, conectando-o a campos Eulerianos, tais como: TSM, ASM, ECM e ECT.

A significância do esquema proposto foi avaliada usando três eventos diferentes de derramamento de óleo (Figuras 3.9, A.4, A.14 e 3.10). A avaliação provou que as ECLc geram resultados consistentes quando comparadas com a trajetória de derramamento e encalhamento de óleo observado.

### 3.5 Métodos

Nosso domínio, entre 17 a 31°S e 29 a 50°W, é delimitado ao norte pelo Banco Nacional de Abrolhos e pela cadeia montanhosa de Vitória-Trindade, e ao sul pelo limite sul do Cabo de Santa Marta (Figura 3.3a).

#### 3.5.1 Dados de velocidade do ROMS

Foram utilizadas as saídas de médias diárias de uma simulação do ROMS (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2009), com resolução horizontal de  $1/36^\circ$ ,  $\approx 3$  km, e 40 níveis verticais, seguidores de terreno. A simulação do modelo foi forçada, a cada 6 h, pelos campos atmosféricos obtidos do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) e do *Climate Forecast System* (CFSv2), com  $\approx 38$  km de resolução horizontal (SAHA et al., 2010; SAHA et al., 2012; SAHA et al., 2014). A cada 5 dias, a simulação é forçada pelas condições de contorno lateral do *Simple Ocean Data Assimilation* (SODA, versão 3.3.1), com  $0.25^\circ$  e 50 níveis verticais (CARTON et al., 2018). A simulação incluiu as entradas de dois rios, Doce e Paraíba do Sul, utilizando a climatologia mensal de escoamento estimado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2018) e as temperaturas superficiais dos rios, obtidas pelo *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA), com uma resolução espacial de  $1/20^\circ$  (DONLON et al., 2012). A forçante de maré (resumidas na Tabela 3.2) incluiu os 08 constituintes principais, 02 constituintes de períodos longos e 03 constituintes harmônicos não lineares, extraídos do *TOPEX/Poseidon Global*

*Inverse Solution* (TPXO, versão 8) da Universidade do estado de Oregon (EGBERT; EROFEEVA, 2002). Nossa simulação de execução livre foi integrada de 3 de Janeiro de 2000 a 31 de Dezembro de 2015, totalizando 15 anos de experimento. Os primeiros 3 anos foram descartados como *spin-up*. Esse é o período de integração do modelo no qual a energia da superfície oscila quase periodicamente em torno de um estado estacionário (MARCHESIELLO et al., 2003).

Tabela 3.2 - Constituintes de maré inseridas ao arquivo de forçante

Constituinte	Nome
M2	Principal lunar semi diurna
S2	Principal solar semi diurna
N2	Lunar elíptica maior
K2	Lunar solar semi diurna
K1	Lunar solar diurna
O1	Principal solar diurna
P1	Principal solar diurna
Q1	Lunar elíptica maior
Mf	Lunar quinzenal
Mn	Lunar mensal
M4	Principal lunar quarto diurna
MS4	Quarto diurna de águas rasas
MN4	Quarto diurna

FONTE: A própria autora.

Um mapa conceitual da obtenção dos dados de velocidades superficiais do modelo ROMS pode ser encontrado na Figura A.16, no apêndice.

### 3.5.2 Simulações Lagrangianas

As simulações do ROMS contêm um algoritmo embutido de *float* que permite o rastreamento *on-line* de derivadores passivos no domínio do modelo. As trajetórias das partículas são calculadas a partir dos campos de velocidade Euleriana em cada etapa do tempo baroclínico usando o preditor Milne e o corretor de Hamming, ambos de quarta ordem (NARVÁEZ et al., 2012; SEBILLE et al., 2018). As simulações das partículas foram realizadas para cobrir três objetivos: i) analisar a variabilidade por trás dos padrões de transporte Lagrangiano de frequência baixa extraídos pelas ECLc; ii) testar as informações extraídas pelas ECLc, como locais com aumento de transporte cruzando à plataforma ou em regiões isoladas; e iii) reproduzir o padrão de transporte Lagrangiano que ocorreu durante o derramamento de óleo no Campo

de Frade.

Para os dois primeiros objetivos, 30 *floats* foram lançados em cada um dos 28 pontos estabelecidos no domínio de estudo. Todos os lançamentos, com 30 *floats* cada, foram realizados durante o verão e o inverno austral na superfície e incluem um componente de caminhada livre (*random walk*).

No verão austral, os *floats* foram lançados no dia 1 de Dezembro de 2013, e fluíram livremente na direção horizontal, até 28 de Fevereiro de 2014. Já no inverno austral, os *floats* foram lançados no dia 1 de Junho de 2006 e fluíram livremente, na direção horizontal, até 30 de Setembro de 2006.

Para o terceiro objetivo, lançamos, em um único ponto e em um único evento, 30 *floats* na superfície do mar. Para esse experimento também incluímos um componente de caminhada aleatória de 1 de Novembro a 31 de Dezembro de 2011. Essa simulação coincidiu com os meses e a localização do derramamento de óleo da operadora Chevron no Campo de Frade (ANP, 2011). Os dados do derramamento de óleo foram fornecidos, como cortesia, pela Petrobras. Durante o derramamento de óleo, 6 derivadores de superfície, *iSpheres*, foram lançados pela Prooceano. Os lançamentos dos *iSpheres* foram planejados para rastrear e monitorar o derramamento de óleo da Chevron. Os dados dessas trajetórias das *iSpheres* foram cortesia da PetroRio S.A. As *iSpheres*, (RÖHRS et al., 2012; RÖHRS; CHRISTENSEN, 2015), são boias de rastreamento da deriva do derramamento, de custo baixo, desenvolvida pela *Metocean Data Systems*.

Um mapa conceitual sobre a metodologia adotada para a simulação dos flutuadores sintéticos pode ser encontrada na Figura A.17, no apêndice.

### 3.5.3 As ECL climatológicas e $c\rho$

O cálculo das ECLc, estruturas que organizam o transporte Lagrangiano, usado aqui, foi desenvolvido por (DURAN et al., 2019). As ECLc são calculadas usando o código encontrado em Duran et al. (2019). Os dados de velocidades da superfície do mar são obtidos a partir de saídas diárias, de 13 anos, da simulação do ROMS. A climatologia da velocidade superficial foi obtida pelas médias diárias, da série temporal, definindo uma climatologia de 365 dias, desconsiderando, portanto, os dias bissextos. Uma descrição mais detalhada do método pode ser encontrada no estudo de Duran et al. (2018). As trajetórias foram integradas usando o método Runge-Kutta de 4<sup>a</sup>/5<sup>a</sup> ordem, com adaptação de etapas e interpolações cúbicas.

A integração da trajetória durou um período de 7 dias ( $T = -7$  dias), para cada condição inicial no espaço ( $x_0$ ) e no tempo ( $t_0$ ). Essa escala de tempo é adequada para extrair transporte recorrente ou persistente relacionados as estruturas de mesoescala (DURAN et al., 2018). Os cálculos usam uma grade numérica de  $1024 \times 878$ , com uma grade computacional auxiliar de  $2,03 \text{ km}$  ao norte, sul, leste e oeste de cada ponto da grade.

Um detalhamento das fórmulas físicas e matemática pode ser encontrado no capítulo 2, e os respectivos mapas conceituais da quantificação e identificação das ECLs e ECLc podem ser encontrados na Figura A.18, no apêndice.

### 3.5.4 Trajetórias de superfície observadas e suas Estimativas de Densidade de Probabilidade (EDP)

Utilizamos dados de 352 derivadores SVP, rastreados por satélite, distribuídos pelo *Global Drifter Program* (GDP), da NOAA (ELIPOT et al., 2016). Os dados provenientes de derivadores são interpolados a cada  $6 \text{ h}$ , abrangendo uma série temporal de 13 anos a fim de calcular a EDP, do inglês *Probability Density Estimate* (PDE), das trajetórias desses derivadores. A EDP é calculada usando uma função de densidade de probabilidade, do inglês *Probability Density Function* (PDF), ( $PDF(\rho, t | \rho_0, t_0)$ ) (DAVIS et al., 2011; SILVERMAN, 1986). As regiões com altas incidências de trajetórias foram obtidas usando a estimativa da densidade *kernel*, do inglês *Kernel Density Estimation* (KDE) (EPANECHNIKOV, 1969) suavizado, aproximadamente, com caixas de  $3^\circ \times 3^\circ$  em 900 pontos, igualmente espaçados, calculados de acordo com Epanechnikov (1969), Silverman (1986). Adotamos uma Escala de Tempo Lagrangiana (ETL) de 03 dias (ASSIREU et al., 2003) para cada trajetória. No estudo de Assireu et al. (2003) foi determinado o coeficiente de difusão estimado entre  $6 \times 10^6$  e  $9,1 \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  e uma ETL de 1 a 5 dias para o AS. A ETL representa o tempo em que a velocidade de dois pontos diferentes permanecem auto correlacionada. Ou seja, é o intervalo de tempo máximo em que o efeito da memória no deslocamento das partículas é verificado em um fluido. Para essas trajetórias, adotamos uma abordagem probabilística, usando a EDP dos movimentos das trajetórias dos derivadores. Para a análise estatística, os dados dos derivadores, foram separados em trajetórias de 3 dias baseados na ETL típica para essa região (SCHMID et al., 1995; ASSIREU et al., 2003). A análise considera, para cada trajetória, sua posição inicial ( $\rho_0 = (x_0, y_0)$ ) no tempo ( $t_0$ ) e o destino final de cada trajetória ( $\rho = (x, y)$ ) no tempo ( $t$ ). Veja, também, o mapa conceitual em Figura A.19.

### 3.5.5 Dados auxiliares

A temperatura da superfície do mar foi obtida a partir de dados globais diários de TSM, do sensor *Multi-scale Ultra-high Resolution* (MUR) (CHIN et al., 2017). O MUR fornece dados com resolução espacial de  $0.01^\circ$ , em intervalos de, aproximadamente,  $1 \text{ km}$ .

A distribuição da energia cinética foi estimada, por unidade de massa, para os campos médios e turbulentos. A EC representa o somatório da ECM, a energia da circulação média, e da ECT, a parte flutuante da velocidade absoluta (SCHMID et al., 1995; ASSIREU et al., 2003). A ECM, ECT e EC foram calculados a partir das Equações 3.1, 3.2 e 3.3:

$$ECM = \frac{1}{2} (\bar{\mathbf{u}}^2 + \bar{\mathbf{v}}^2) \quad (3.1)$$

$$ECT = \frac{1}{2} (\overline{\mathbf{u}'^2} + \overline{\mathbf{v}'^2}) \quad (3.2)$$

$$EC = ECM + ECT \quad (3.3)$$

Onde  $\bar{\mathbf{u}}$  e  $\bar{\mathbf{v}}$  são as médias mensais das componentes da velocidade das correntes de superfície calculadas das médias diárias.  $\mathbf{u}'$  e  $\mathbf{v}'$  são os desvios da média. Todos os valores de ECM, ECT e de EC estão em  $m^2 s^{-2}$ . Um mapa conceitual pode ser visualizado em Figura A.20.



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta tese é apresentado o uso das Estruturas Coerentes Lagrangianas climatológicas, ECLc, a fim de identificar os padrões recorrentes e persistentes quase-estáveis do transporte Lagrangiano, independentes do observador, no oceano Atlântico Sudoeste. A síntese dessas informações é oriunda da quantificação precisa das ECLc e de sua força de atração climatológica ( $c\rho$ ) combinada com dados Eulerianos e Lagrangianos, simulados (ROMS e algoritmo de flutuadores do ROMS), e observados (dados de sensores orbitais e de derivadores), respectivamente. Os resultados oferecem, pela primeira vez, uma representação integrada sobre o papel dos vórtices e meandros persistentes na formação do fluxo principal da CB. Além de corroborar com o conhecimento no padrão de transporte de: partículas, traçadores passivos e poluentes, bem como na circulação oceânica do Atlântico Sudoeste. Essa nova abordagem traz resultados consistentes entre os padrões de transporte Lagrangianos quase-estáveis e as suas implicações no comportamento de manchas de óleo. O que melhora a eficácia da resposta de emergência futura a derramamentos de óleo, planejamento de contingência, operação de resgate, avaliação de conectividade de larvas e peixes, estratégias de lançamento de derivadores, dispersão e destino de poluentes e de lixo marinhos. O resultado também pode vir a contribuir para avaliação de resultados oriundos de simulações hidrodinâmicas.

Em síntese, esse estudo chegou às seguintes considerações finais:

- O fluxo principal da CB está localizado próximo à isóbata de 2000  $m$  (Figuras 3.1, 3.2). Uma avaliação pode ser visualizada (Figura A.2) ao verificar a acurácia encontrada pelas *chevrons* no gradiente do TSM, obtidas pelo sensor MUR, e pelo cálculo as ECLc. Também podemos averiguar a quantificação e identificação, precisa, das ECLc nas aplicações dos três vazamentos distintos (Figuras 3.9, A.4, A.14 e 3.10).
- Há uma advecção *offshore* persistente durante o verão e inverno austral (Figuras 3.1 e A.1).
- Há uma variabilidade sazonal na CB, entre as isóbatas de 200 e 2000  $m$ , ao sul de 23°S (Figura 3.4), bem destacada, durante o verão e no inverno austral (Figuras 3.2, A.3, 3.3 e 3.8).
- Valores máximos de  $c\rho$  são encontrados perto de áreas de batimetria íngreme e regiões de ressurgências costeiras (Figura 3.3a).

- Valores de baixo  $c\rho$  são considerados como regiões estagnadas (Figura 3.4), o que indica ser uma região segura contra os derramamentos originados fora dessas regiões (Figura A.8, painel do meio). Do mesmo modo, é improvável que qualquer poluição originada nesta região, incluindo a linha de costa, disperse-se durante um acidente, causando possivelmente um impacto maior devido a uma concentração maior de contaminantes (Figura A.8, painel direito). Uma aplicação dessa informação pode ser observado no descarte do do Rebocador Costeiro, ocorrido em 2006 (Figura A.14).
- As linhas material atratoras climatológicas persistentes, *squeezelines*, deformadas em forma de *chevrons*, semelhantes às deformações encontradas nos gradientes termais e ao pico da velocidade média Euleriana, correspondem ao transporte transversal, persistente, à plataforma com a transição de valores positivos (altos), próximo à linha de costa, para valores negativos (baixos), entre as isóbatas de 200 a 2000 *m*, e positivos (altos), à *offshore* da isóbata de 2000 *m* (Figuras 3.1, 3.2, 3.5 e 3.6).
- Pares zonais de estruturas ciclônicas e anticiclônicas são incorporadas nessa transição, fazendo com que as ECLc se deformem em *chevrons*.
- Em 23°S, o fluxo da CB passa a ser *offshore* à medida em que ele se aproxima da isóbata de 200 *m* e é alimentado por uma circulação no sentido horário, sobre a isóbata de 200 *m*, conectando-se com a circulação *offshore* no sentido anti-horário (Figura 3.6).
- Há uma barreira de transporte, perto da isóbata de 200 *m*, confirmada pelo movimento limitado, à *inshore*, de derivadores SVP, e indicada, com precisão, por máxima força de atração climatológica ao longo do talude (Figuras 3.4, 3.8 e Tabela 3.1).
- A identificação e a descrição quantitativa das ECLc pode melhorar a eficácia de respostas de emergência à derramamentos de óleo, dispersão e destino de poluentes (Figuras 3.9, 3.10, A.14).

Dada a importância e a contribuição desses resultados, pretende-se como atividade futura:

- Estender esse estudo para outras regiões.

- Verificar se as ECLc e  $c\rho$  também auxiliam no processo inverso de um vazamento, para que assim possa-se auxiliar na identificação da origem do vazamento.
- Definir um conjunto de procedimentos voltados ao prognóstico das mudanças iminentes de uma mancha de óleo, que integre mapas de ECLs e ECLc e modelos de dispersão de óleo.
- Definir regiões de apoio para respostas de emergência e contingenciamento a um vazamento.
- Verificar as vantagens de se utilizar as ECLc *versus* o produto *Finite-Size Lyapunov Exponents* (FSLE) da AVISO.
- Adaptar as saídas da simulação do ROMS para o *OceanParcels*.
- Verificar se as ECLc podem avaliar o potencial uso de energia renovável para a região.
- Sobrepor mapas de ecossistemas marinhos da região e estudo com os blocos de exploração de óleo e gás.
- Quantificar a Cadeia de Markov para toda a região entre 16°N a 36°S e de 59 a 29°W.
- Verificar se uma região estagnada consegue restringir o movimento das partículas mesmo na presença de uma atividade atmosférica transiente.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). **Relatório anual de segurança operacional das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural**: circulação externa. 2011. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/images/Relatorios\\_SSM/Relatorio\\_anual\\_2011.pdf](http://www.anp.gov.br/images/Relatorios_SSM/Relatorio_anual_2011.pdf)>. Acesso em: 03 Jul 2020. 61
- \_\_\_\_\_. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**: circulação externa. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/producao/2019-05-boletim.pdf>>. Acesso em: 03 Jul 2020. 50
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). **Folheto institucional**: folheto e folder - português. 2018. Disponível em: <[http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo\\_sophia=76975](http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo_sophia=76975)>. Acesso em: 28 Aug. 2019. 59
- AHARON, R.; ROM-KEDAR, V.; GILDOR, H. When complexity leads to simplicity: ocean surface mixing simplified by vertical convection. **Physics of Fluids**, v. 24, n. 5, p. 056603, 2012. 15, 16
- ARRUDA, W. Z.; CAMPOS, E. J.; ZHARKOV, V.; SOUTELINO, R. G.; SILVEIRA, I. C. da. Events of equatorward translation of the vitoria eddy. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 61–73, 2013. 53
- ASSAD, L. P. d. F.; TORRES-JUNIOR, A. R.; ARRUDA, W. Z.; MASCARENHAS-JUNIOR, A. d. S.; LANDAU, L. Volume and heat transports in the world oceans from an ocean general circulation model. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 2, p. 181–194, 2009. 27
- ASSIREU, A. T.; DAUHUT, T.; SANTOS, F. A. dos; LORENZZETTI, J. A. Near-inertial motions in the Brazil current at 24°s–36°s: Observations by satellite tracked drifters. **Continental Shelf Research**, v. 145, p. 1–12, 2017. 56
- ASSIREU, A. T.; STEVENSON, M. R.; STECH, J. L. Surface circulation and kinetic energy in the sw atlantic obtained by drifters. **Continental Shelf Research**, v. 23, n. 2, p. 145–157, 2003. 62, 63
- BAUER, P.; THORPE, A.; BRUNET, G. The quiet revolution of numerical weather prediction. **Nature**, v. 525, n. 7567, p. 47–55, 2015. 13

BERON-VERA, F. J.; BODNARIUK, N.; SARACENO, M.; OLASCOAGA, M.; SIMIONATO, C. Stability of the Malvinas current. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 30, n. 1, p. 013152, 2020. 16, 18, 52

BERON-VERA, F. J.; HADJIGHASEM, A.; XIA, Q.; OLASCOAGA, M. J.; HALLER, G. Coherent lagrangian swirls among submesoscale motions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 37, p. 18251–18256, 2019. 5, 16

BERON-VERA, F. J.; OLASCOAGA, M. J.; BROWN, M. G.; KOÇAK, H. Zonal jets as meridional transport barriers in the subtropical and polar lower stratosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 2, p. 753–767, 2012. 16

BERON-VERA, F. J.; OLASCOAGA, M. J.; GONI, G. Oceanic mesoscale eddies as revealed by lagrangian coherent structures. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 12, 2008. 15, 16

BERON-VERA, F. J.; OLASCOAGA, M. J.; HALLER, G.; FARAZMAND, M.; TRIÑANES, J.; WANG, Y. Dissipative inertial transport patterns near coherent lagrangian eddies in the ocean. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 25, n. 8, p. 087412, 2015. 15, 16

BERON-VERA, F. J.; WANG, Y.; OLASCOAGA, M. J.; GONI, G. J.; HALLER, G. Objective detection of oceanic eddies and the agulhas leakage. **Journal of Physical Oceanography**, v. 43, n. 7, p. 1426–1438, 2013. 15, 16

BOEBEL, O.; DAVIS, R.; OLLITRAULT, M.; PETERSON, R.; RICHARDSON, P.; SCHMID, C.; ZENK, W. The intermediate depth circulation of the western south atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 21, p. 3329–3332, 1999. 3, 4

BORGOGNO, D.; GRASSO, D.; PEGORARO, F.; SCHEP, T. Barriers in the transition to global chaos in collisionless magnetic reconnection. i. ridges of the finite time lyapunov exponent field. **Physics of Plasmas**, v. 18, n. 10, p. 102307, 2011. 16

BOZORGMAGHAM, A. E.; ROSS, S. D. Atmospheric lagrangian coherent structures considering unresolved turbulence and forecast uncertainty. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 22, n. 1-3, p. 964–979, 2015. 16

BRANICKI, M.; MANCHO, A. M.; WIGGINS, S. A lagrangian description of transport associated with a front–eddy interaction: application to data from the north-western mediterranean sea. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 240, n. 3, p. 282–304, 2011. 16

BRASIL. MARINHA. **Manchas de óleo no litoral do nordeste**. 2019. Disponível em : <https://www.marinha.mil.br/manchasdeoleo> Acesso em: 20 Nov 2019. 50

CALADO, L.; GANGOPADHYAY, A.; SILVEIRA, I. D. A parametric model for the Brazil current meanders and eddies off southeastern Brazil. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 12, 2006. 4, 52

\_\_\_\_\_. Feature-oriented regional modeling and simulations (forms) for the western south atlantic: Southeastern Brazil region. **Ocean Modelling**, v. 25, n. 1-2, p. 48–64, 2008. 54

CALADO, L.; SILVEIRA, I. D.; GANGOPADHYAY, A.; CASTRO, B. D. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22 s, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 10-11, p. 1181–1188, 2010. 54, 55

CAMPOS, E.; IKEDA, Y.; CASTRO, B.; GAETA, S.; LORENZZETTI, J.; STEVENSON, M. Experiment studies circulation in the western south atlantic. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 77, n. 27, p. 253–259, 1996. 27, 55, 59

CAMPOS, E. J. Equatorward translation of the vitoria eddy in a numerical simulation. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 22, 2006. 54

CAMPOS, E. J.; GONÇALVES, J.; IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the south Brazil bight: summer of 1991. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 100, n. C9, p. 18537–18550, 1995. 3, 4, 27, 52, 59

CAMPOS, E. J.; VELHOTE, D.; SILVEIRA, I. C. da. Shelf break upwelling driven by Brazil current cyclonic meanders. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 6, p. 751–754, 2000. 55

CAMPOS, E. J. D.; IKEDA, Y.; CASTRO, B.; GAETA, S. A.; LORENZZETTI, J. A.; STEVENSON, M. Experiment studies circulation in the western south atlantic. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 77, n. 27, p. 253–259, 1996. 4

- CAMPOS, P. C.; MÖLLER-JUNIOR, O. O.; PIOLA, A. R.; PALMA, E. D. Seasonal variability and coastal upwelling near Cape Santa Marta (Brazil). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 3, p. 1420–1433, 2013. 54
- CARTON, J. A.; CHEPURIN, G. A.; CHEN, L. SODA3: A new ocean climate reanalysis. **Journal of Climate**, v. 31, n. 17, p. 6967–6983, 2018. 59
- CASTELAO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around cabo frio, Brazil: the importance of wind stress curl. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 3, 2006. 53
- CASTRO, B. d.; LORENZZETTI, J.; SILVEIRA, I. d.; MIRANDA, L. d. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil**, v. 1, p. 11–120, 2006. 3, 27
- CERRONE, B. N. **Estatísticas da Circulação do Oceano Atlântico Sudoeste a partir de dados Lagrangeanos**. 61 p. Dissertação em Eng. Civil — (UFRJ/ COPPE/) Programa de Engenharia Civil), Rio de Janeiro, 2010. 90
- CHELTON, D. B.; GAUBE, P.; SCHLAX, M. G.; EARLY, J. J.; SAMELSON, R. M. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. **Science**, v. 334, n. 6054, p. 328–332, 2011. 53
- CHEN, H.-H.; QI, Y.; WANG, Y.; CHAI, F. Seasonal variability of sst fronts and winds on the southeastern continental shelf of brazil. **Ocean Dynamics**, v. 69, n. 11-12, p. 1387–1399, 2019. 52
- CHIN, T. M.; VAZQUEZ-CUERVO, J.; ARMSTRONG, E. M. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 200, p. 154–169, 2017. 63
- CONSERVATION INTERNATIONAL. **Abrolhos Seascape**: Places. 2019. Disponível em: <<https://www.conservation.org/places/abrolhos-seascape>>. Acesso em: 15 Nov 2019. 50
- CONSERVAÇÃO DAS AVES DO BRASIL (SAVE BRASIL). **O derrame de óleo nas praias do nordeste brasileiro e as aves limícolas migratórias**. 2020. Disponível em: <[encurtador.com.br/g1FMT](http://encurtador.com.br/g1FMT)>. Acesso em: 24 Jun 2020. 7

- DAVIS, R. A.; LII, K.-S.; POLITIS, D. N. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. In: **POLITIS, D. N.; DAVIS, R. A.; LII, K. S. (Ed.) Selected works of Murray Rosenblatt**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 95–100. [62](#)
- DEESE, H. E.; PRATT, L. J.; HELFRICH, K. R. A laboratory model of exchange and mixing between western boundary layers and subbasin recirculation gyres. **Journal of Physical Oceanography**, v. 32, n. 6, p. 1870–1889, 2002. [6](#)
- DICKEY, T. D. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems. **Journal of Marine Systems**, v. 40, p. 5–48, 2003. [1](#), [15](#)
- DONAHUE III, M. J. An introduction to mathematical chaos theory and fractal geometry. **Retrieved September**, v. 20, p. 2001, 1997. [14](#)
- DONLON, C. J.; MARTIN, M.; STARK, J.; ROBERTS-JONES, J.; FIEDLER, E.; WIMMER, W. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (ostia) system. **Remote Sensing of Environment**, v. 116, p. 140–158, 2012. [59](#)
- D'OVIDIO, F.; FERNÁNDEZ, V.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, E.; LÓPEZ, C. Mixing structures in the mediterranean sea from finite-size lyapunov exponents. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 17, 2004. [5](#)
- DURAN, R.; BERON-VERA, F. J.; OLASCOAGA, M. J. Extracting quasi-steady lagrangian transport patterns from the ocean circulation: an application to the Gulf of Mexico. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–10, 2018. [5](#), [6](#), [9](#), [14](#), [16](#), [26](#), [28](#), [29](#), [47](#), [55](#), [57](#), [61](#), [62](#)
- \_\_\_\_\_. **CIAM Climatological Isolation and Attraction Model–Climatological Lagrangian Coherent Structures**. 2019. National Energy Technology Laboratory-Energy Data eXchange; NETL. Disponível em: <https://bitbucket.org/rodu/clcss/src/master/>. [61](#)
- D'AGOSTINI, A.; GHERARDI, D. F. M.; PEZZI, L. P. Connectivity of marine protected areas and its relation with total kinetic energy. **PloS One**, v. 10, n. 10, p. e0139601, 2015. [27](#)
- EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic technology**, v. 19, n. 2, p. 183–204, 2002. [60](#)
- ELIPOT, S.; LUMPKIN, R.; PEREZ, R. C.; LILLY, J. M.; EARLY, J. J.; SYKULSKI, A. M. A global surface drifter data set at hourly resolution. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 5, p. 2937–2966, 2016. [62](#)

- EMÍLSSON, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, p. 101–112, 1961. 3
- EPANECHNIKOV, V. A. Non-parametric estimation of a multivariate probability density. **Theory of Probability & Its Applications**, v. 14, n. 1, p. 153–158, 1969. 62
- FARAZMAND, M.; BLAZEVSKI, D.; HALLER, G. Shearless transport barriers in unsteady two-dimensional flows and maps. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 278, p. 44–57, 2014. 26
- FARAZMAND, M.; HALLER, G. Computing lagrangian coherent structures from their variational theory. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 22, n. 1, p. 013128, 2012. 6
- FRAGOSO, M. da R. et al. A 4d-variational ocean data assimilation application for Santos Basin, Brazil. **Ocean Dynamics**, v. 66, n. 3, p. 419–434, 2016. 27
- FU, L.-L.; CAZENAVE, A. **Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications**. [S.l.: s.n.], 2000. 1, 2
- GARFIELD, N. I. **The Brazil Current at subtropical latitudes**. Tese (Doutorado) — University of Rhode Island, Kingston, 1994. 3
- GARRISON, T. **Fundamentos de oceanografia**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2016. 1, 2
- GLOBAL DRIFTER DESIGN CENTER AND DATA BUOY CO-OPERATION PANEL. **Global drifter programme barometer drifter design reference: Dbcp report no. 4, revision 2**. USA and Switzerland, Mai 2005. 44 p. 10
- GORDON, A. L.; GREENGROVE, C. L. Geostrophic circulation of the brazil-falkland confluence. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 33, n. 5, p. 573–585, 1986. 3
- GOUGH, M. K.; BERON-VERA, F. J.; OLASCOAGA, M. J.; SHEINBAUM, J.; JOUANNO, J.; DURAN, R. Persistent lagrangian transport patterns in the northwestern Gulf of Mexico. **Journal of Physical Oceanography**, v. 49, n. 2, p. 353–367, 2019. 6, 28, 55
- GOUGH, M. K.; RENIERS, A.; OLASCOAGA, M. J.; HAUS, B. K.; MACMAHAN, J.; PADUAN, J.; HALLE, C. Lagrangian coherent structures in a coastal upwelling environment. **Continental Shelf Research**, v. 128, p. 36–50, 2016. 16

GOUVEIA, M. B.; GHERARDI, D. F.; LENTINI, C. A.; DIAS, D. F.; CAMPOS, P. C. Do the brazilian sardine commercial landings respond to local ocean circulation? **PloS One**, v. 12, n. 5, p. 1–19, 2017. 27

GREENPEACE. **O petróleo ronda Abrolhos**. 2019. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/brasil/blog/o-petroleo-ronda-abrolhos/>>. Acesso em: 22 Nov 2019. 50

GRIGORIEV, R. **Transport and mixing in laminar flows: from microfluidics to oceanic currents**. 5. ed. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 978-3-527-41011-8. 21

HADJIGHASEM, A.; FARAZMAND, M.; BLAZEVSKI, D.; FROYLAND, G.; HALLER, G. A critical comparison of lagrangian methods for coherent structure detection. **Chaos**, v. 27, n. 5, p. 053104, 2017. 25

HALLER, G. Distinguished material surfaces and coherent structures in three-dimensional fluid flows. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 149, n. 4, p. 248–277, 2001. 14, 20, 23, 24

\_\_\_\_\_. A variational theory of hyperbolic lagrangian coherent structures. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 240, n. 7, p. 574–598, 2011. 22, 23, 24, 25

\_\_\_\_\_. Lagrangian coherent structures. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 47, p. 137–162, 2015. 5, 14, 20

HALLER, G.; BERON-VERA, F. J. Geodesic theory of transport barriers in two-dimensional flows. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 241, n. 20, p. 1680–1702, 2012. 26

HALLER, G.; HADJIGHASEM, A.; FARAZMAND, M.; HUHN, F. Defining coherent vortices objectively from the vorticity. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 795, p. 136–173, 2016. 14

HALLER, G.; SAPSIS, T. Where do inertial particles go in fluid flows? **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 237, n. 5, p. 573–583, 2008. 21

HALLER, G.; YUAN, G. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 147, n. 3-4, p. 352–370, 2000. 14, 20, 21, 22, 24, 25

HUHN, F.; KAMEKE, A. V.; PÉREZ-MUÑUZURI, V.; OLASCOAGA, M. J.; BERON-VERA, F. J. The impact of advective transport by the south Indian

Ocean countercurrent on the Madagascar plankton bloom. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 6, 2012. 16

IMAWAKI, S.; BOWER, A. S.; BEAL, L.; QIU, B. Western boundary currents. In: SIEDLER, G.; GRIFFIES, S. M.; GOULD, J.; CHURCH, J. A. (Ed.). **International Geophysics**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 103, p. 305–338. 2, 27

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Informação técnica no 7/2019-COPROD/CGMAC/DILIC**: Processo no. 02001.005656/2019-52. 2019. Disponível em: <[https://www.ibama.gov.br/phocadownload/notas/2019/informacao\\_tecnica\\_n\\_7\\_2019.pdf](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/notas/2019/informacao_tecnica_n_7_2019.pdf)>. Acesso em: 15 Nov 2019. 50

\_\_\_\_\_. **Manchas de Óleo**: Desmobilização. 2019. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo-desmobilizacao>>. Acesso em: 24 Jun 2019. 7

\_\_\_\_\_. **Manchas de Óleo**: Galeria. 2019. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo-galeria>>. Acesso em: 04 Jul 2019. 8

IPRC, I. **IPRC Climate Newsletter, Vol.8, no.2**. 2008. Online. [http://iprc.soest.hawaii.edu/newsletters/iprc\\_climate\\_vol8\\_no2.pdf](http://iprc.soest.hawaii.edu/newsletters/iprc_climate_vol8_no2.pdf) Accessed: 20 Nov 2019. 7

JOHNS, W. E. One-dimensional baroclinically unstable waves on the gulf stream potential vorticity gradient near cape hatteras. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 11, n. 3-4, p. 323–350, 1988. 3

KATSANOULIS, S.; FARAZMAND, M.; SERRA, M.; HALLER, G. Vortex boundaries as barriers to diffusive vorticity transport in two-dimensional flows. **Physical Review Fluids**, v. 5, n. 2, p. 024701, 2020. 15, 16

LIMA, M. O.; CIRANO, M.; MATA, M. M.; GOES, M.; GONI, G.; BARINGER, M. An assessment of the Brazil current baroclinic structure and variability near 22 s in distinct ocean forecasting and analysis systems. **Ocean Dynamics**, v. 66, n. 6-7, p. 893–916, 2016. 4, 27, 54

LODISE, J.; ÖZGÖKMEN, T.; GRIFFA, A.; BERTA, M. Vertical structure of ocean surface currents under high winds from massive arrays of drifters. **Ocean Science**, v. 15, n. 6, p. 1627–1651, 2019. 58

LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; FILHO, W. L. M.; ASSIREU, A. T. Satellite observation of Brazil current inshore thermal front in the sw south atlantic: space/time variability and sea surface temperatures. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 17, p. 2061–2068, 2009. 3

MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J. C.; SHCHEPETKIN, A. Equilibrium structure and dynamics of the california current system. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, n. 4, p. 753–783, 2003. 60

MARTA-ALMEIDA, M.; RUIZ-VILLARREAL, M.; PEREIRA, J.; OTERO, P.; CIRANO, M.; ZHANG, X.; HETLAND, R. D. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine Pollution Bulletin**, v. 71, n. 1-2, p. 139–151, 2013. 27

MASLO, A.; SOUZA, J. M. A. C. de; ANDRADE-CANTO, F.; OUTERELO, J. R. Connectivity of deep waters in the Gulf of Mexico. **Journal of Marine Systems**, v. 203, p. 103267, 2020. 6, 16, 28

METOCEAN SYSTEMS. **ISPHERE**: Specifications. 2020. Disponível em: <<https://www.metocean.com/wp-content/uploads/2017/09/iSPHERE-1.pdf?x31811>>. Acesso em: 15 Nov 2019. 90

NARVÁEZ, D. A.; KLINCK, J. M.; POWELL, E. N.; HOFMANN, E. E.; WILKIN, J.; HAIDVOGEL, D. B. Modeling the dispersal of eastern oyster (*crassostrea virginica*) larvae in delaware bay. **Journal of Marine Research**, v. 70, n. 2-3, p. 381–409, 2012. 60

NASA EARTH OBSERVATORY (NASA EO). **The Terra satellite captured a rainbow-like optical phenomenon called a glory over the Pacific Ocean**: Water droplets within clouds scatter light to produce the effect. 1995. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/78380/a-glorious-view>>. Acesso em: 29 Jul 2020. 18

\_\_\_\_\_. **The eddy and the plankton**. 2011. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/77120/the-eddy-and-the-plankton>>. Acesso em: 01 Jul 2020. 17

\_\_\_\_\_. **Spring color in the North Sea**. 2018. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/92113/spring-color-in-the-north-sea>>. Acesso em: 01 Jul 2020. 17

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Heights of the Eyjafjallajökull Eruption Plume**. 2010. Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA13052>>. Acesso em: 11 Jul 2020. 19
- \_\_\_\_\_. **Jovian vortex view**. 2019. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/image-feature/jpl/jovian-vortex-view>>. Acesso em: 29 Jul 2020. 18
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **This Day in History: Deepwater horizon oil spill occurred**. 2020. Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/content/day-history-deepwater-horizon-oil-spill-occurred>>. Acesso em: 11 Jul 2020. 19
- OLASCOAGA, M. J.; HALLER, G. Forecasting sudden changes in environmental pollution patterns. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 13, p. 4738–4743, 2012. 7, 16
- OLASCOAGA, M. J. et al. Drifter motion in the gulf of mexico constrained by altimetric lagrangian coherent structures. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 23, p. 6171–6175, 2013. 26
- OLIVEIRA, B. L. A. de; NETTO, T. A.; ASSAD, L. P. de F. Three-dimensional oil dispersion model in the Campos Basin, Brazil. **Environmental Technology**, v. 39, n. 3, p. 277–287, 2018. 27
- ONU, K.; HUH, F.; HALLER, G. Lcs tool: a computational platform for lagrangian coherent structures. **Journal of Computational Science**, v. 7, p. 26–36, 2015. 26
- PALMA, E. D.; MATANO, R. P. Disentangling the upwelling mechanisms of the south Brazil bight. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 11-12, p. 1525–1534, 2009. 54
- PEACOCK, T.; HALLER, G. Lagrangian coherent structures: the hidden skeleton of fluid flows. **Physics Today**, v. 66, n. 2, p. 41–47, 2013. 6, 21
- PENG, J.; PETERSON, R. Attracting structures in volcanic ash transport. **Atmospheric Environment**, v. 48, p. 230–239, 2012. 16
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991. 2, 3, 27

PICKARD, G. L.; EMERY, W. J. **Descriptive physical oceanography: an introduction**. [S.l.: s.n.], 2016. 1

POLITO, P. S.; SATO, O. T. Do eddies ride on rossby waves? **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 120, n. 8, p. 5417–5435, 2015. 53

REID, J. L. On the total geostrophic circulation of the south atlantic ocean: flow patterns, tracers, and transports. **Progress in Oceanography**, v. 23, n. 3, p. 149–244, 1989. 3

REMPEL, E. L.; CHIAN, A.-L.; BRANDENBURG, A. Lagrangian coherent structures in nonlinear dynamos. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 735, n. 1, p. L9, 2011. 16

ROCHA, C. B.; SILVEIRA, I. C. da; CASTRO, B. M.; LIMA, J. A. M. Vertical structure, energetics, and dynamics of the Brazil current system at 22 s–28 s. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 1, p. 52–69, 2014. 53

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the southeast brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, n. 4, p. 371–394, 2001. 53

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal variability of the south equatorial current bifurcation in the atlantic ocean: a numerical study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, n. 1, p. 16–30, 2007. 57

RÖHRS, J.; CHRISTENSEN, K. H. Drift in the uppermost part of the ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 23, p. 10–349, 2015. 61

RÖHRS, J.; CHRISTENSEN, K. H.; HOLE, L. R.; BROSTRÖM, G.; DRIVDAL, M.; SUNDBY, S. Observation-based evaluation of surface wave effects on currents and trajectory forecasts. **Ocean Dynamics**, v. 62, n. 10-12, p. 1519–1533, 2012. 61

ROMERO, A.; ABESSA, D.; FONTES, R.; SILVA, G. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: case study for the santos basin region, brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 74, n. 1, p. 156–164, 2013. 27

SAFETY4SEA. **Brazil's Abrolhos park in danger due to possible oil explorations**. 2019. Disponível em: <https://safety4sea.com/brazils-abrolhos-park-in-danger-due-to-possible-oil-explorations/>  
Acesso em: 25 Nov 2019. 50

SAHA, S. et al. The ncep climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015–1058, 2010. 59

\_\_\_\_\_. **NCEP climate forecast system version 2 (cfsv2) monthly products**. [S.l.]: National Center for Atmospheric Research, 2012. 59

\_\_\_\_\_. The ncep climate forecast system version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014. 59

SAMELSON, R.; VALLIS, G. K. Large-scale circulation with small diapycnal diffusion: the two-thermocline limit. **Journal of Marine Research**, v. 55, n. 2, p. 223–275, 1997. 13

SAMELSON, R. M. Lagrangian motion, coherent structures, and lines of persistent material strain. 2013. 6, 13, 14

SANTOS, F. A. dos. **Comentários da banca**. 2020. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por [francisco@proceano.com.br](mailto:francisco@proceano.com.br) em 30 abr. 2020. 48

SANTOS, F. A. dos; FRAGOSO, M. R.; CRUS, L. M. Marques da; PELLEGRINI, J. A. C. Mondocorcovado project: A 10-month currents and surface drift monitoring in santos basin. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2010., 2010, Rio de Janeiro. **Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes, 2010. p. 1–8. 56

SATELLITE IMAGING CORPORATION. **WorldView-2 satellite image of Fukushima Dai-ichi**. 2011. Disponível em: <<https://www.satimagingcorp.com/gallery/worldview-2/worldview-2-fukushima-daiichi/>>. Acesso em: 11 Jul 2020. 19

SCHMID, C.; SCHÄFER, H.; ZENK, W.; PODESTÁ, G. The Vitória eddy and its relation to the Brazil current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 25, n. 11, p. 2532–2546, 1995. 52, 62, 63

SCHMID, C.; SIEDLER, G.; ZENK, W. Dynamics of intermediate water circulation in the subtropical south atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 30, n. 12, p. 3191–3211, 2000. 3

SCULLY-POWER, P. D. **35 years ago: STS-41G – a flight of many firsts**. 2019. Disponível em: <https://>

[//www.nasa.gov/feature/35-years-ago-sts-41g-a-flight-of-many-firsts](http://www.nasa.gov/feature/35-years-ago-sts-41g-a-flight-of-many-firsts)

Acesso em: 29 Jul 2020. 18

SEBILLE, E. V. et al. Lagrangian ocean analysis: fundamentals and practices.

**Ocean Modelling**, v. 121, p. 49–75, 2018. 60

SERRA, M.; HALLER, G. Efficient computation of null geodesics with applications to coherent vortex detection. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 473, n. 2199, p. 20160807, 2017. 15, 16

SERRA, M.; SATHE, P.; RYPINA, I.; KIRINCICH, A.; ROSS, S. D.; LERMUSIAUX, P.; ALLEN, A.; PEACOCK, T.; HALLER, G. Search and rescue at sea aided by hidden flow structures. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 1–7, 2020. 16, 19

SHADDEN, S. C.; LEKIEN, F.; PADUAN, J. D.; CHAVEZ, F. P.; MARSDEN, J. E. The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in monterey bay. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 56, n. 3-5, p. 161–172, 2009. 21

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005. 9, 29, 59

\_\_\_\_\_. Correction and commentary for “ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system” by haidvogel et al., *j. comp. phys.* 227, pp. 3595–3624. **Journal of Computational Physics**, v. 228, n. 24, p. 8985–9000, 2009. 9, 29, 59

SILVEIRA, I. C. A. da; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S. de; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000. 2

SILVEIRA, I. D.; CALADO, L.; CASTRO, B.; CIRANO, M.; LIMA, J.; MASCARENHAS, A. d. S. On the baroclinic structure of the Brazil current–intermediate western boundary current system at 22–23 s. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 14, 2004. 3, 4, 52

SILVEIRA, I. d.; LIMA, J.; SCHMIDT, A.; CECCOPIERI, W.; SARTORI, A.; FRANSCISCO, C.; FONTES, R. Is the meander growth in the Brazil current

- system off southeast Brazil due to baroclinic instability? **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, n. 3-4, p. 187–207, 2008. 3, 4, 27, 52, 54, 59
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. [S.l.: s.n.], 1986. 62
- SOUTELINO, R.; GANGOPADHYAY, A.; SILVEIRA, I. D. The roles of vertical shear and topography on the eddy formation near the site of origin of the Brazil current. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 46–60, 2013. 53
- SOUTELINO, R. G.; SILVEIRA, I. C. A. d. **A origem da Corrente do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 3
- STOMMEL, H. The westward intensification of wind-driven ocean currents. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 29, n. 2, p. 202–206, 1948. 1, 2
- \_\_\_\_\_. A survey of ocean current theory. **Deep Sea Research (1953)**, v. 4, p. 149–184, 1957. 27
- STRAMMA, L. The Brazil current transport south of 23 s. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 36, n. 4, p. 639–646, 1989. 3, 4
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the south Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999. 4, 27
- TALLAPRAGADA, P.; ROSS, S. D.; III, D. G. S. Lagrangian coherent structures are associated with fluctuations in airborne microbial populations. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 21, n. 3, p. 033122, 2011. 16
- TALLEY, L. D.; PICKARD, G.; J, W.; SWIFT, J. H. **Descriptive physical oceanography: an introduction**. [S.l.: s.n.], 2011. 1, 2
- TANG, W.; CHAN, P. W.; HALLER, G. Lagrangian coherent structure analysis of terminal winds detected by lidar. part i: turbulence structures. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 2, p. 325–338, 2011. 16
- \_\_\_\_\_. Lagrangian coherent structure analysis of terminal winds detected by lidar. part ii: structure evolution and comparison with flight data. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 10, p. 2167–2183, 2011. 16

THE GUARDIAN. **Brazil blames devastating oil spill on Greek-flagged tanker**. 2019. Disponível em:

<<https://www.theguardian.com/world/2019/nov/01/>

[brazil-blames-oil-spill-greek-flagged-tanker-venezuelan-crude](https://www.theguardian.com/world/2019/nov/01/brazil-blames-oil-spill-greek-flagged-tanker-venezuelan-crude)>.

Acesso em: 01 Jan 2020. 50

TRUESDELL, C.; NOLL, W. **The non-linear field theories of mechanics**.

[S.l.]: Springer, 2004. 579 p. 25

WIGGINS, S. The dynamical systems approach to lagrangian transport in oceanic flows. **Annual Revision on Fluid Mechanics**, v. 37, p. 295–328, 2005. 13, 27

WORLD WILDLIFE FUND FOR NATURE (WWF). **Patrimônio da**

**biodiversidade, Abrolhos precisa ser protegido**. 2019. Disponível em:

<<https://www.wwf.org.br/?70622/>

[Patrimonio-da-biodiversidade-brasileira-Abrolhos-precisa-ser-protetido](https://www.wwf.org.br/?70622/Patrimonio-da-biodiversidade-brasileira-Abrolhos-precisa-ser-protetido)>.

Acesso em: 20 Nov 2019. 50

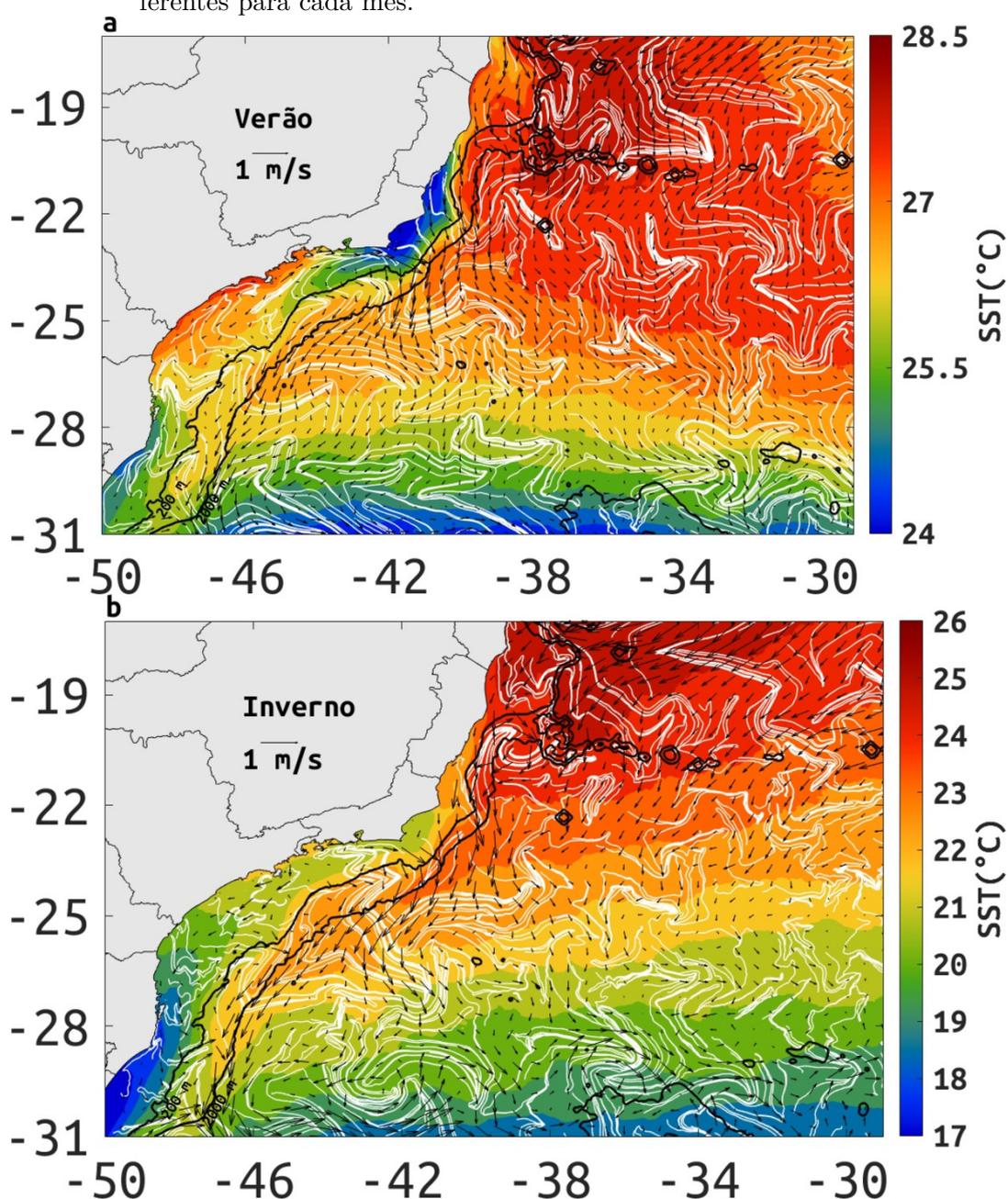




## APÊNDICE A

### A.1 Médias sazonais de Verão e Inverno de TSM.

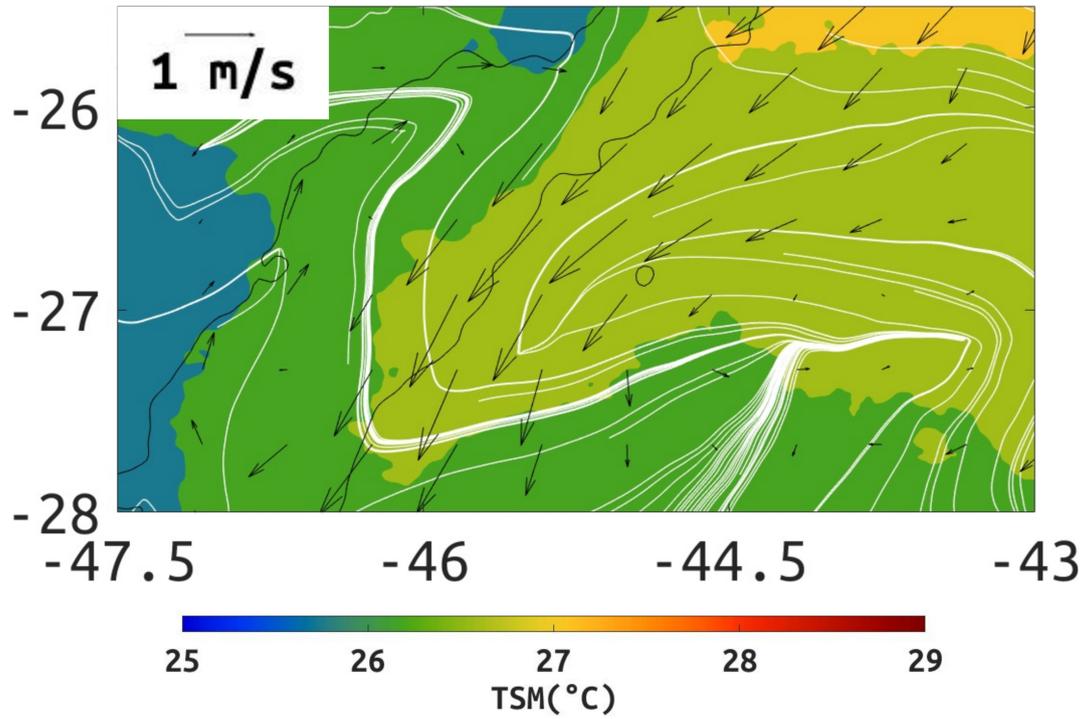
Figura A.1 - Médias sazonais de Verão (a) e inverno (b) de TSM a partir do conjunto de dados do MUR (mapa de cores), com resolução espacial de  $0.01^\circ$  distribuídos pela PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), sobrepostas pelas médias mensais das velocidades de superfície do oceano correspondente do ROMS (vetores pretos), e sobrepostas sobre as ECLc (linhas brancas). Os contornos de 200 e 2000 m de profundidades estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as barras coloridas são diferentes para cada mês.



FONTE: Produção da autora.

## A.2 Chevron

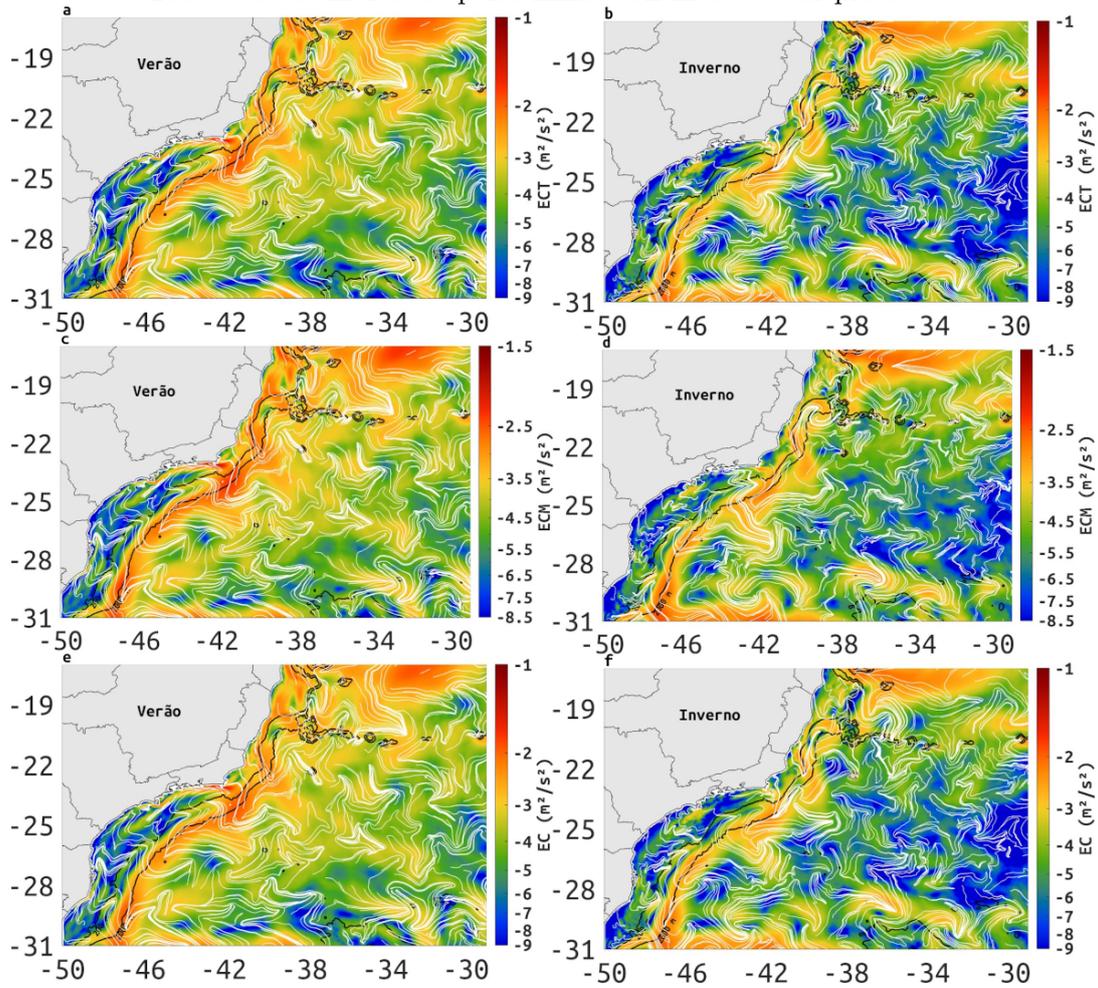
Figura A.2 - Detalhamento das linhas de material atratoras (*squeezelines*, linhas brancas) deformadas em chevrons (forma de v). Esse padrão de deformação são visualmente semelhantes às deformações encontradas nos gradientes de TSM obtidas dos dados do satélite MUR.



FONTE: Produção da autora.

### A.3 Médias sazonais de Verão e Inverno de Energia Cinética

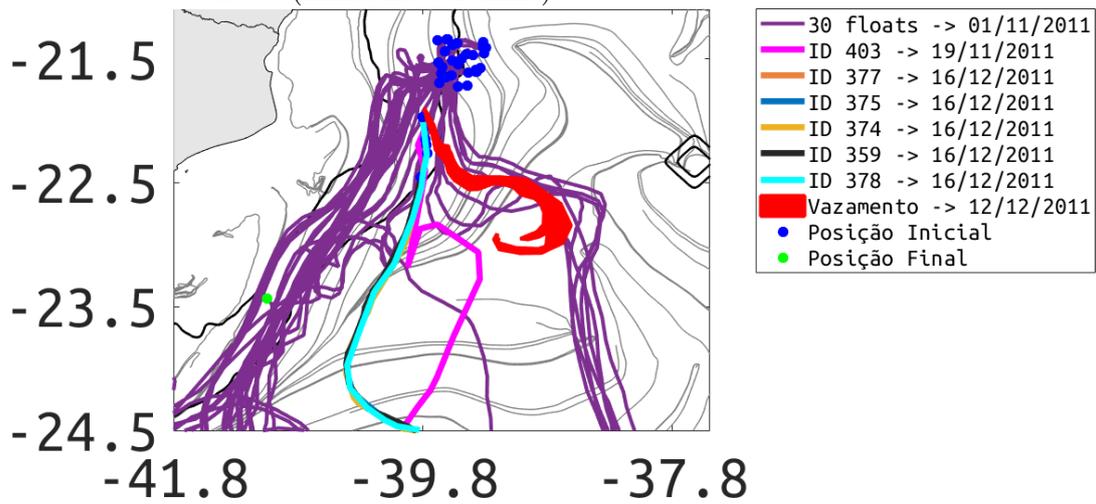
Figura A.3 - Médias sazonais de ECT (a e b), ECM (c e d) e EC (e e f) (mapas em cores) para o Verão (quadros à esquerda) e Inverno (quadros à direita), entre 2003 a 2015. Unidade de  $m^2/s^2$  em escala logarítmica. ECLc sazonais são representados por linhas brancas. Os contornos de profundidades de 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.



FONTE: Produção da autora.

#### A.4 Campo de Frade

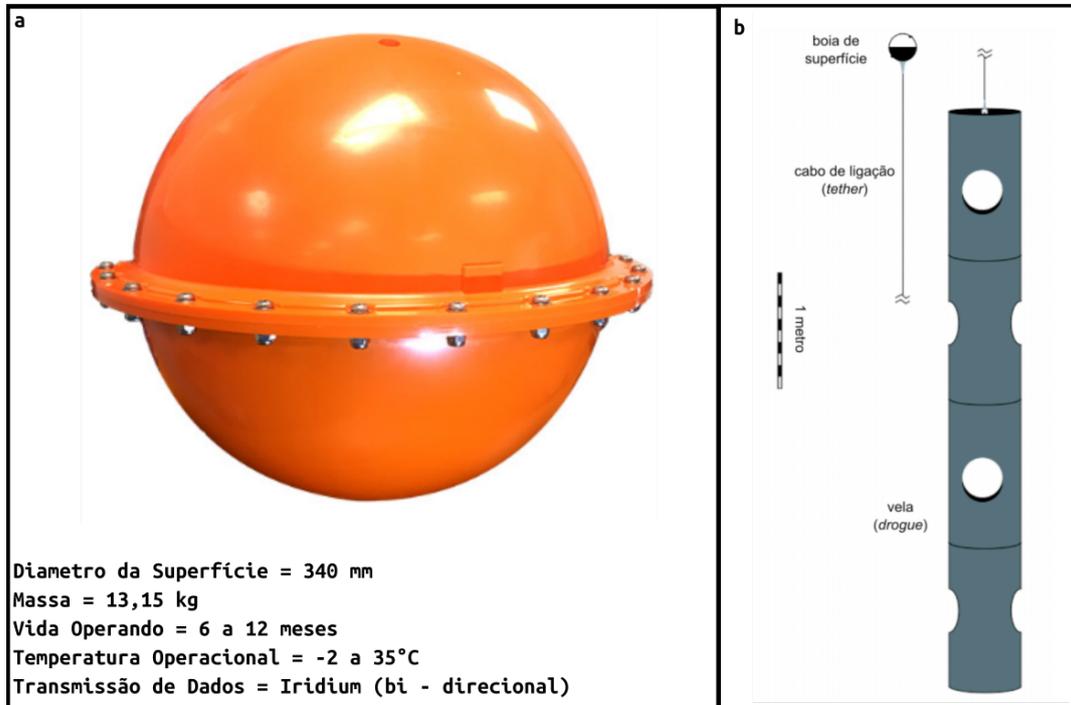
Figura A.4 - Detalhamento do vazamento de óleo da operadora Chevron (polígono preenchido na cor vermelha) as 30 trajetórias simuladas durante 60 dias, entre em 1 de Novembro a 31 de Dezembro de 2011, pelo modelo ROMS (linhas roxas) e as trajetórias dos 06 iSpheres (cortesia de Prooceano e PetroRio SA), lançados entre Novembro e Dezembro de 2011 (linhas nas cores magenta, laranja, azul, amarelo, cinza e ciano), plotados ao longo das *squeezelines* climatológicos anuais (linhas na cor cinza).



FONTE: Produção da autora.

## A.5 Derivadores

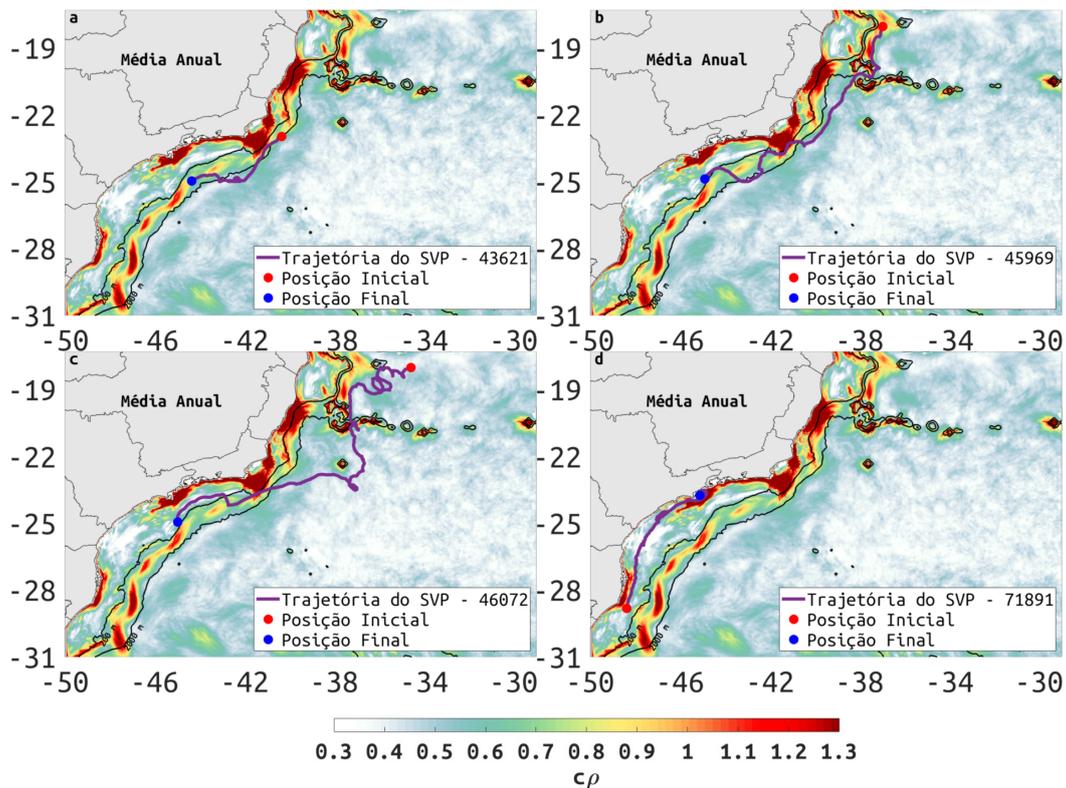
Figura A.5 - Representações esquemáticas da (a) iSphere e do (b) derivador SVP.



FONTE: Adaptado de Cerrone (2010) e Metocean Systems (2020).

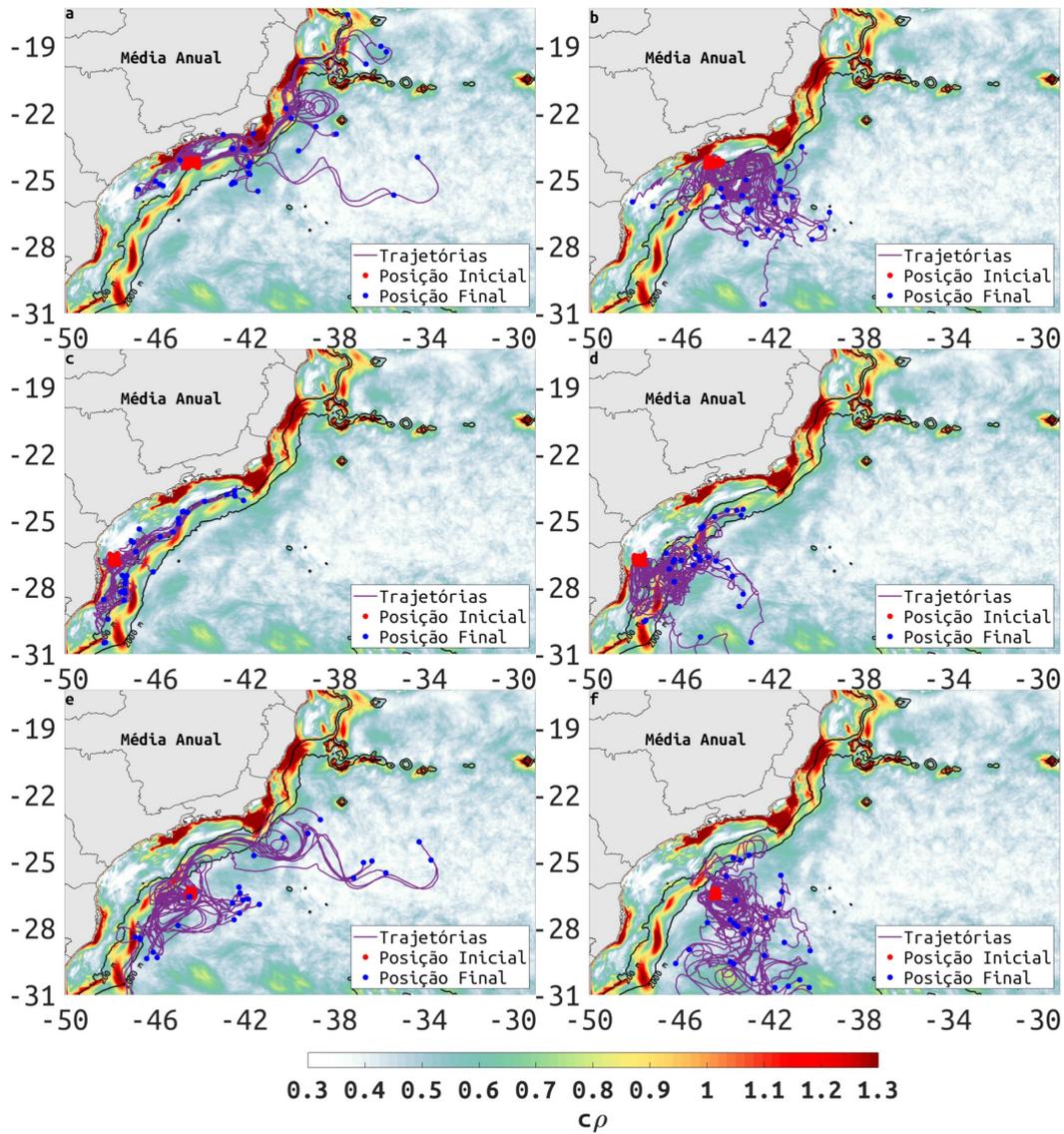
## A.6 Trajetórias dos derivadores SVP e sintéticos

Figura A.6 - Trajetórias dos derivadores SVP plotados sobre a média anual de  $c\rho$  (em escala logarítmica). a) Derivadores sob os números de SVP 43621, b) 45969, c) 46072 e d) 71895. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Os IDs dos derivadores estão localizados no canto inferior direito de cada quadro da imagem. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e pontos em azuis as suas posições finais.



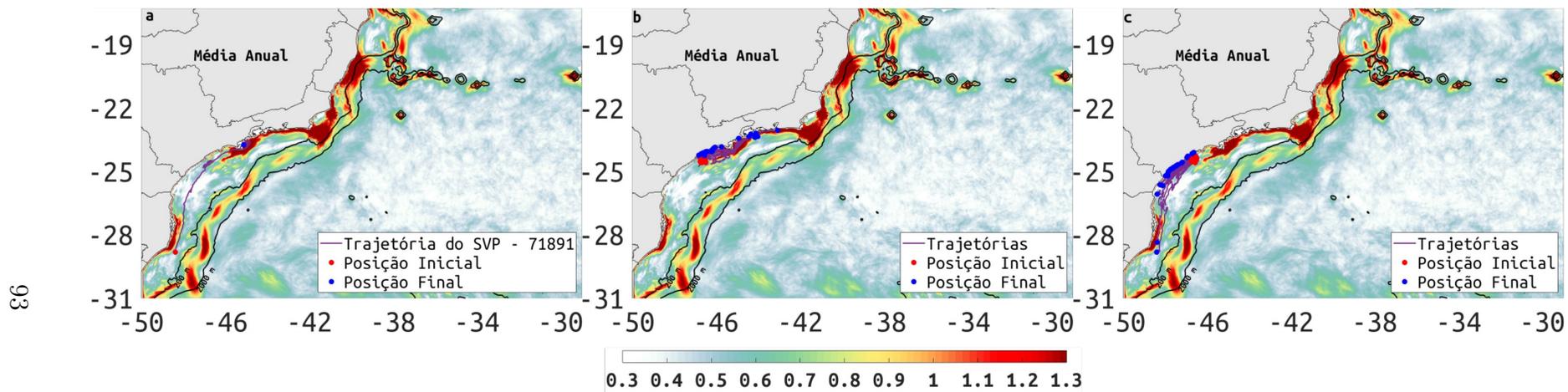
FONTE: Produção da autora.

Figura A.7 - Trajetórias dos flutuadores sintéticos (*floats*) sobre a média anual de  $c\rho$  (em escala logarítmica). No lado esquerdo, encontram-se as trajetórias dos 30 *floats* lançados em 1 de Dezembro de 2013, com os destinos até 28 de Fevereiro de 2014. No lado direito, estão as trajetórias dos 30 *floats* lançados em 1 de Junho de 2006, com os destinos até 30 de Setembro de 2006. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 *m* estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e os pontos em azuis suas posições finais.



FONTE: Produção da autora.

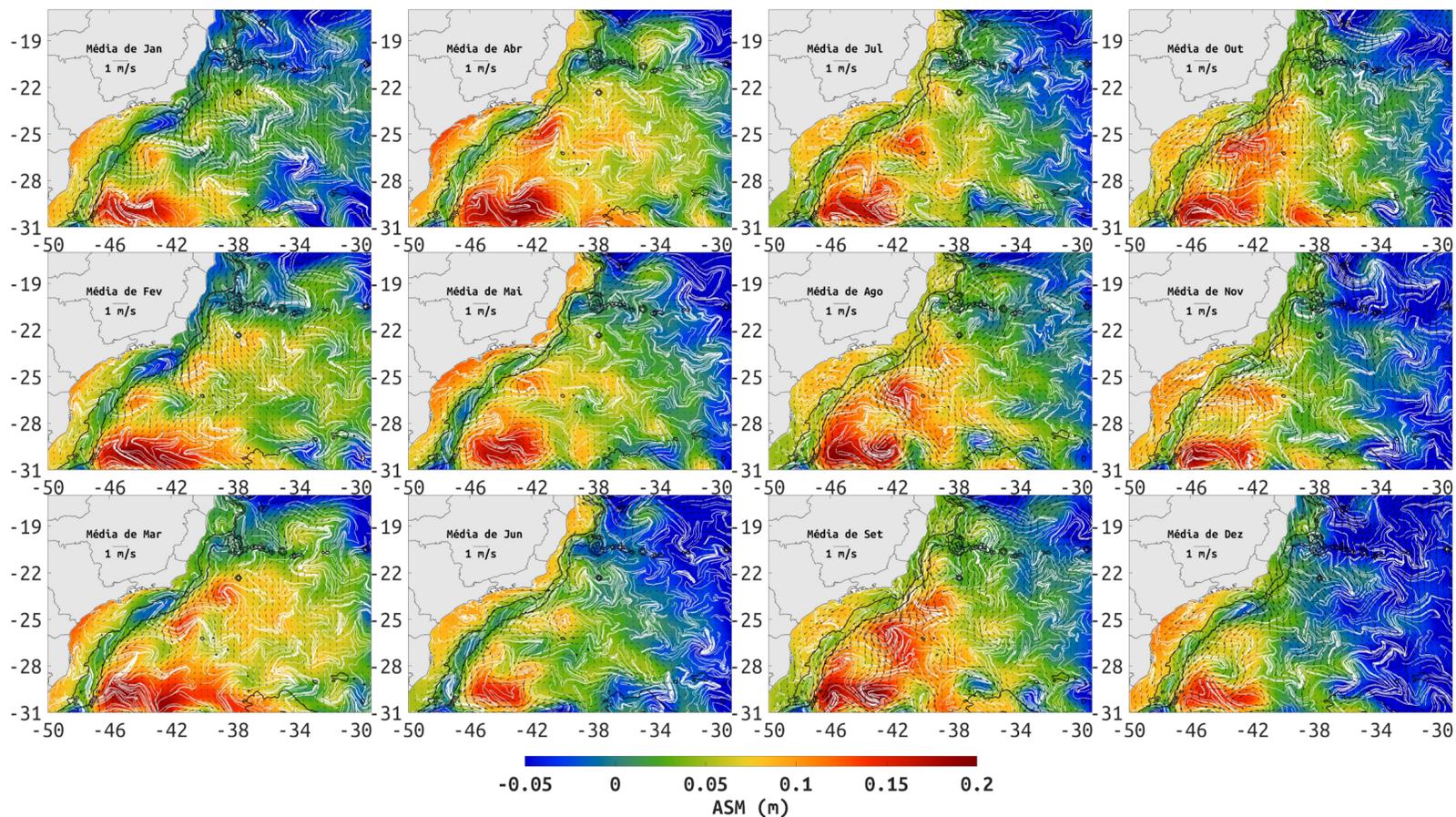
Figura A.8 - a) Derivador SVP 71891 plotado sobre  $cp$  anual (em escala logarítmica). b) As trajetórias dos 30 *floats* lançados em 1 de Dezembro de 2013 com destino até 28 de Fevereiro de 2014. c) As trajetórias dos 30 *floats* lançados em 1 de Junho de 2006 com destino até 30 de Setembro de 2006. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os pontos em vermelhos indicam as posições iniciais de cada trajetórias (linhas roxas) e os pontos em azuis suas posições finais.



FONTE: Produção da autora.

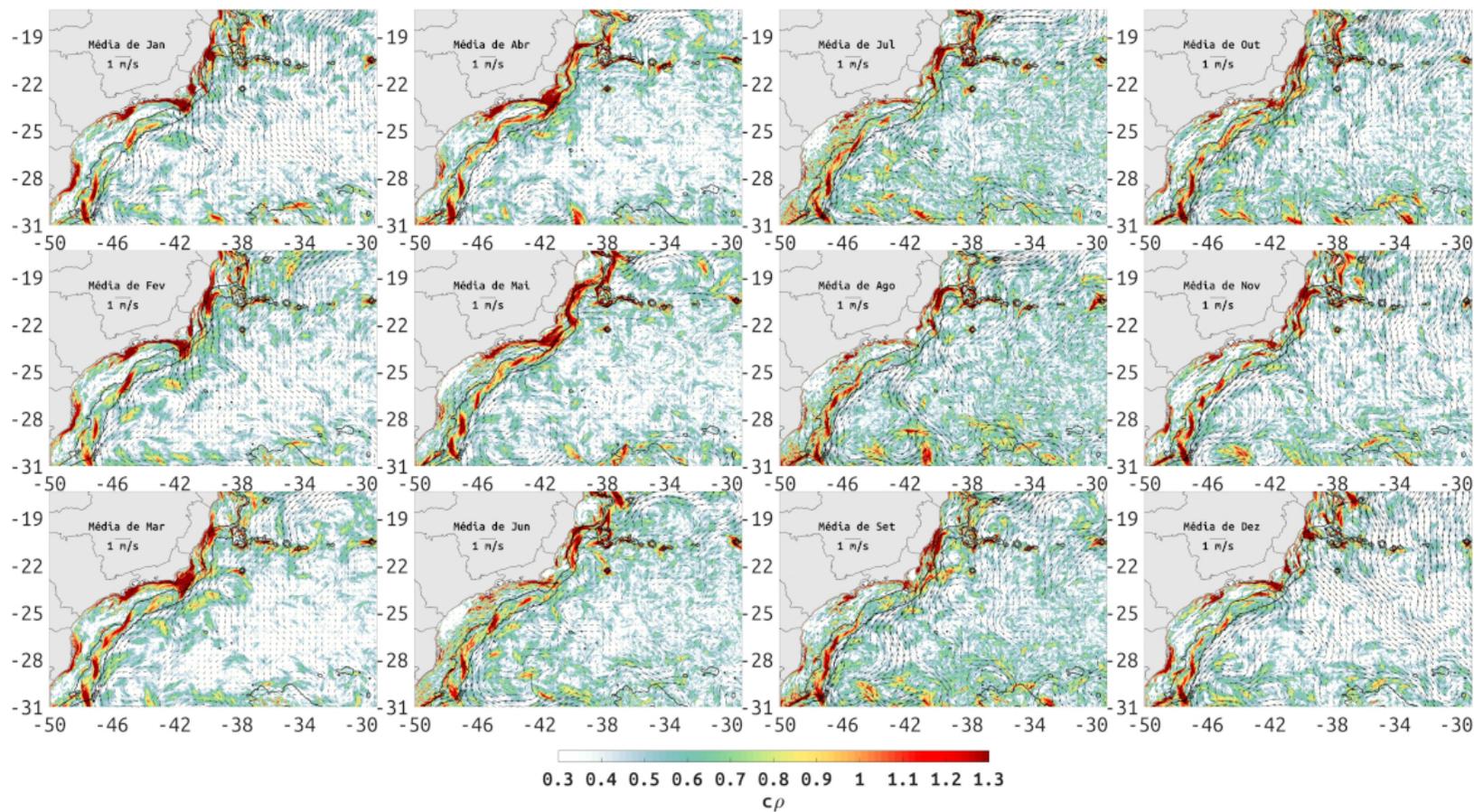
## A.7 Médias mensais das velocidades superficiais da simulação

Figura A.9 - Médias mensais de ASM plotados (mapas em cores) sobre as médias mensais de velocidade de superfície simuladas (vetores pretos), e sobre as médias mensais de ECLc (linhas brancas). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta.



FONTE: Produção da autora.

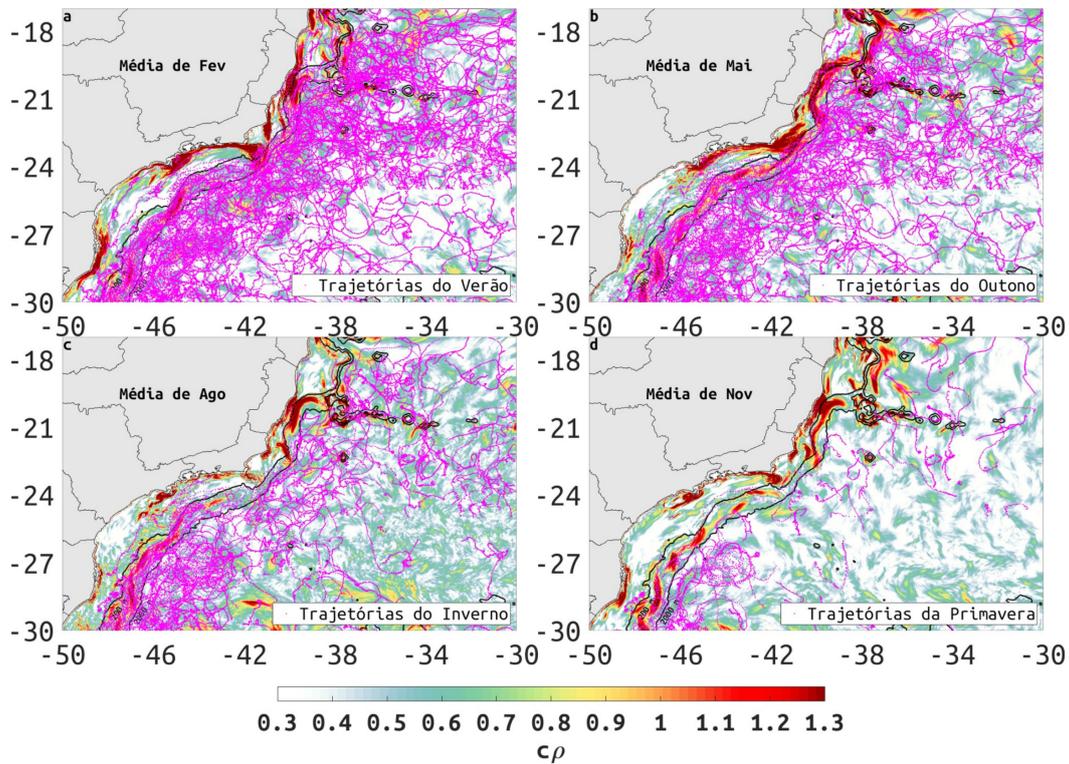
Figura A.10 - Médias mensais de  $c\rho$  (em escala logarítmica) plotado sobre as médias mensais de velocidades de superfície simuladas (vetores pretos). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente.



FONTE: Produção da autora.

## A.8 Trajetórias por estações do ano

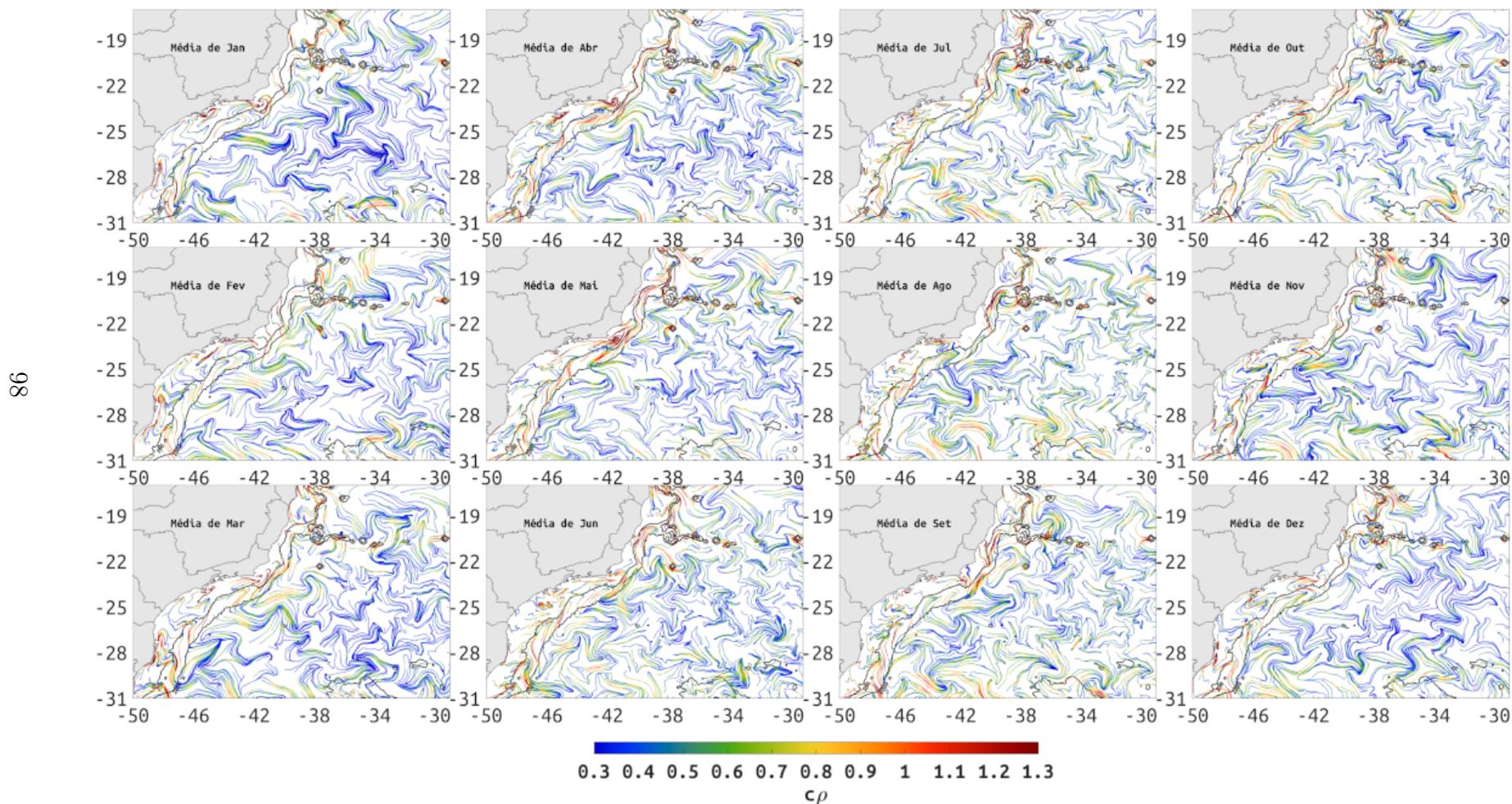
Figura A.11 - Todas as trajetórias referentes ao verão (de Janeiro a Março) plotadas sobre  $c\rho$  de Fevereiro (a). Todas as trajetórias referentes ao outono (de Abril a Junho) plotadas sobre  $c\rho$  de maio (b). Todas as trajetórias referentes ao inverno (de Julho a Setembro) plotadas sobre  $c\rho$  de Agosto (c). Todas as trajetórias referentes à primavera (de Outubro a Dezembro) plotadas sobre  $c\rho$  de Novembro (d). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente. Os valores de  $c\rho$  estão em escala logarítmica.



FONTE: Produção da autora.

## A.9 Padrões de transporte Lagrangiano persistentes

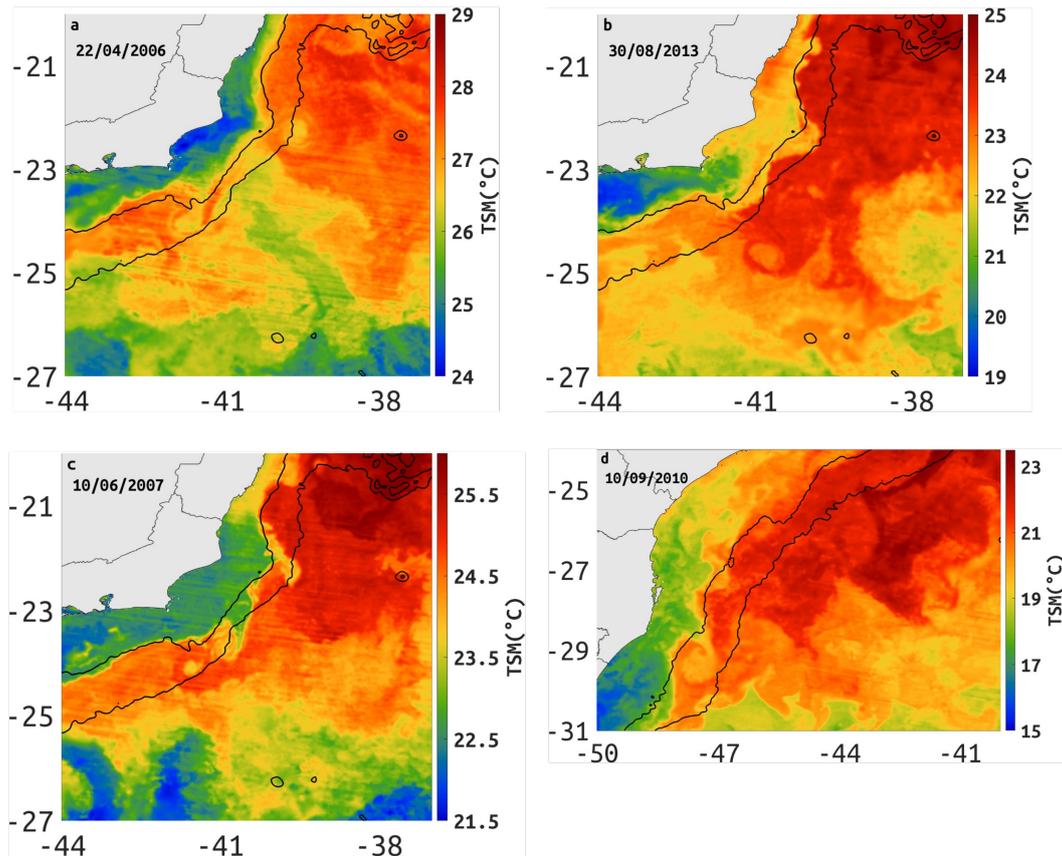
Figura A.12 - Médias mensais de ECLc (*squeezelines*) da área de estudo coloridas de acordo com as médias mensais de  $c\rho$  (em escala logarítmica). Os contornos de profundidades, 200 e 2000 m estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta, respectivamente.



FONTE: Produção da autora.

## A.10 Temperatura da superfície do mar derivada do MUR

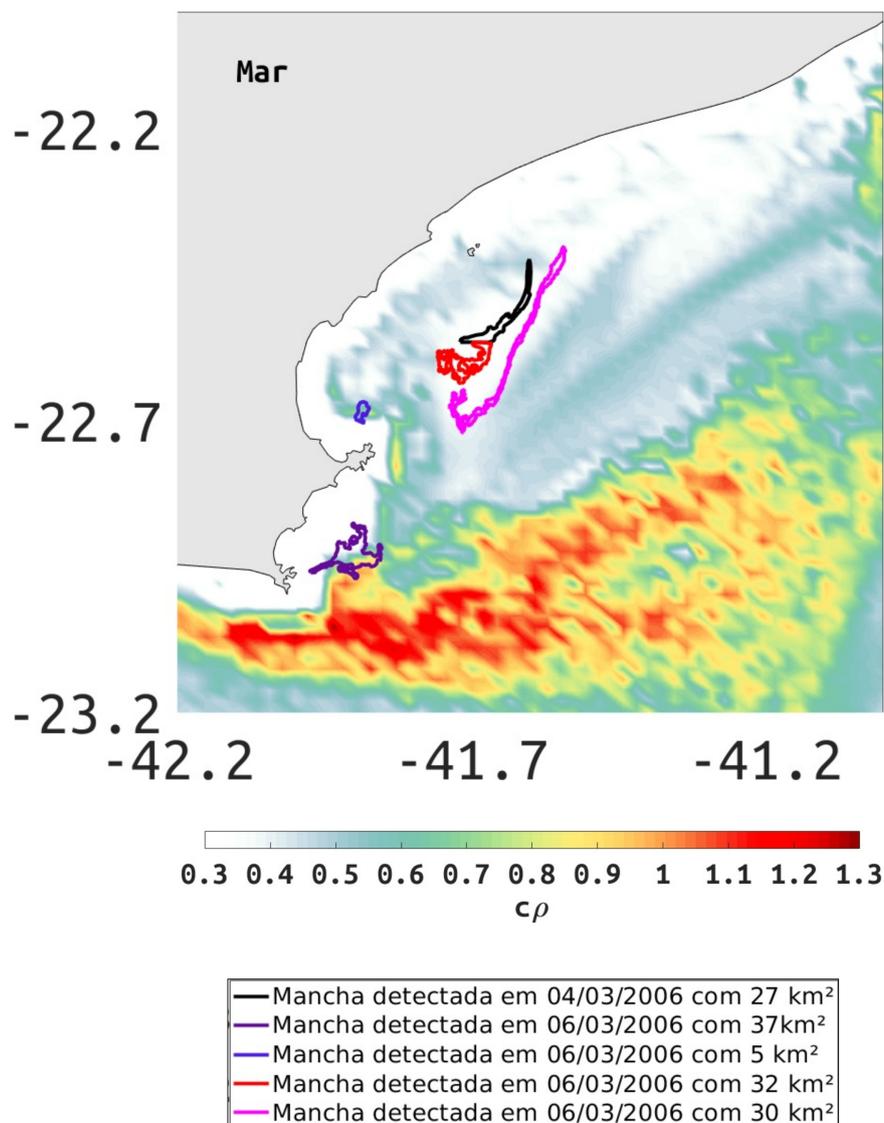
Figura A.13 - Médias mensais de TSM com presença dos vórtices de Vitória, São Tomé, Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. Imagem referente a a) 22 de Abril de 2006; b) 08 de Agosto de 2013; c) 10 de Junho de 2007; d) 10 de Setembro de 2010. Os contornos de profundidades, 200 e 2000 *m* estão indicados pelas linhas contínuas de cor preta. Observe que as escalas de cores são diferentes para cada imagem.



FONTE: Produção da autora.

## A.11 Rebocador costeiro

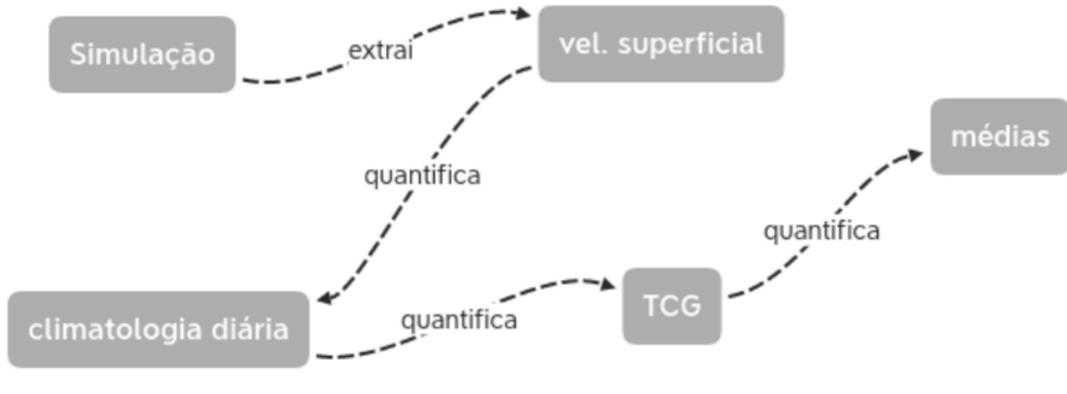
Figura A.14 - Rastro de um derramamento de óleo de um rebocador costeiro, ocorrido em março de 2006, próximo a região costeira de Cabo Frio, plotado sobre a média mensal de  $c\rho$  para o mês de Março. A mancha detectada com  $27\text{ km}^2$  estava a  $16\text{ MN}$  (milhas náuticas) da costa, a de  $32\text{ km}^2$  estava a  $13\text{ MN}$ , a de  $5\text{ km}^2$  estava a  $5\text{ MN}$ , a de  $30\text{ km}^2$  estava a  $8\text{ MN}$ , e por fim, a de  $37\text{ km}^2$  estava a  $1,5\text{ MN}$ . Observe que as manchas de  $27\text{ km}^2$  (cor preta),  $32\text{ km}^2$  (cor vermelha) e  $30\text{ km}^2$  (cor magenta) estão contidas dentro de uma região estagnada ( $c\rho < 0,3$ ), mantendo o rastro do reboque contido nessa região. Enquanto a mancha de  $37\text{ km}^2$  (cor roxa) tende a ir para a região de alto valores de  $c\rho$  ( $> 1$ ).



FONTE: Produção da autora.

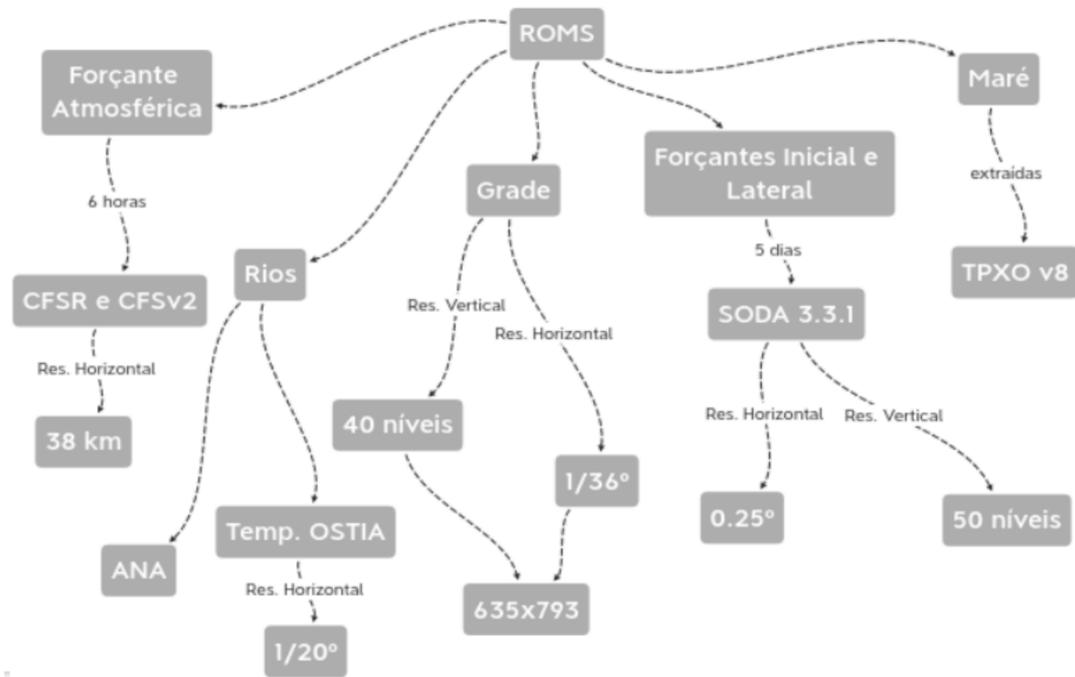
## A.12 Mapas Conceituais

Figura A.15 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia das ECLc.



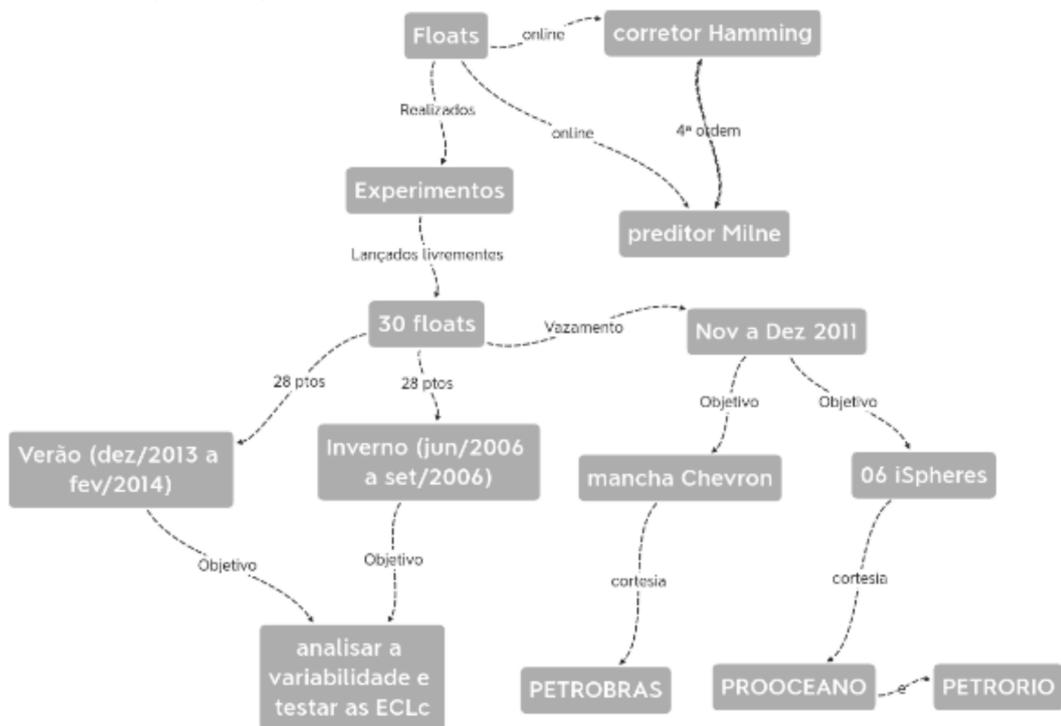
FONTE: Produção da autora.

Figura A.16 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia das velocidades superficiais obtidas pela simulação.



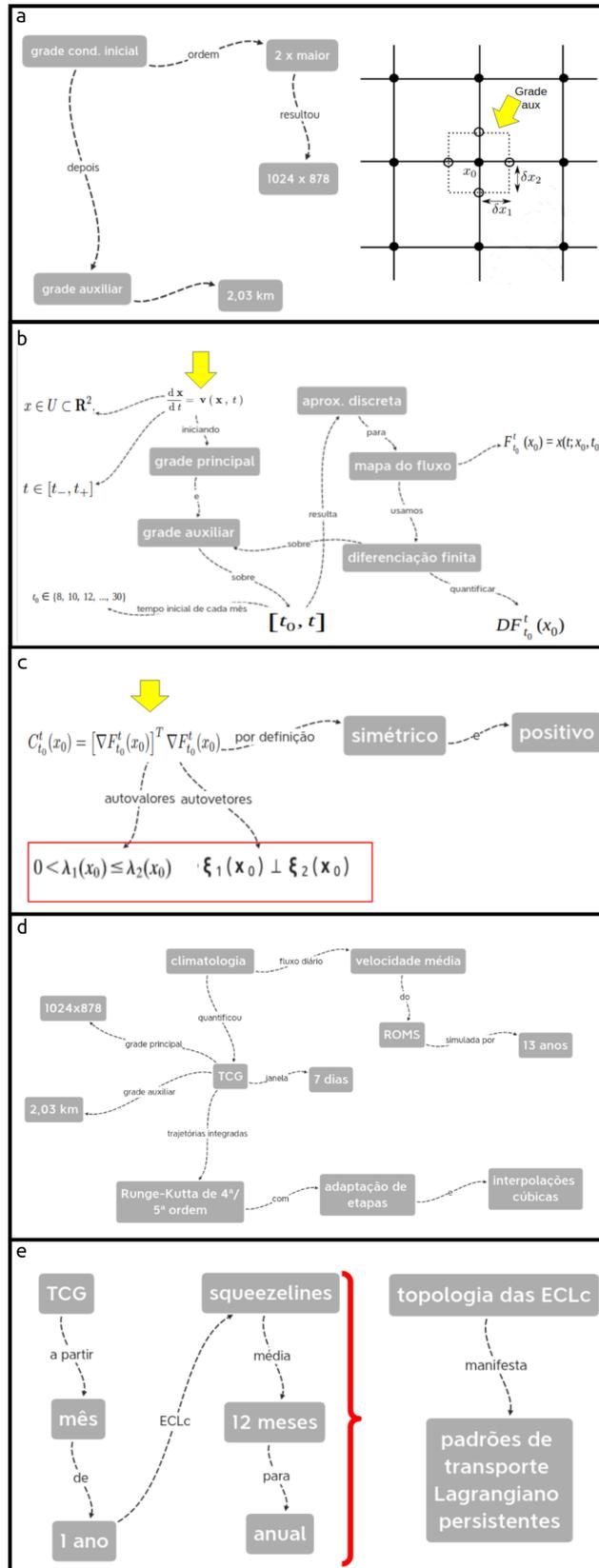
FONTE: Produção da autora.

Figura A.17 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia das simulações dos flutuadores sintéticos.



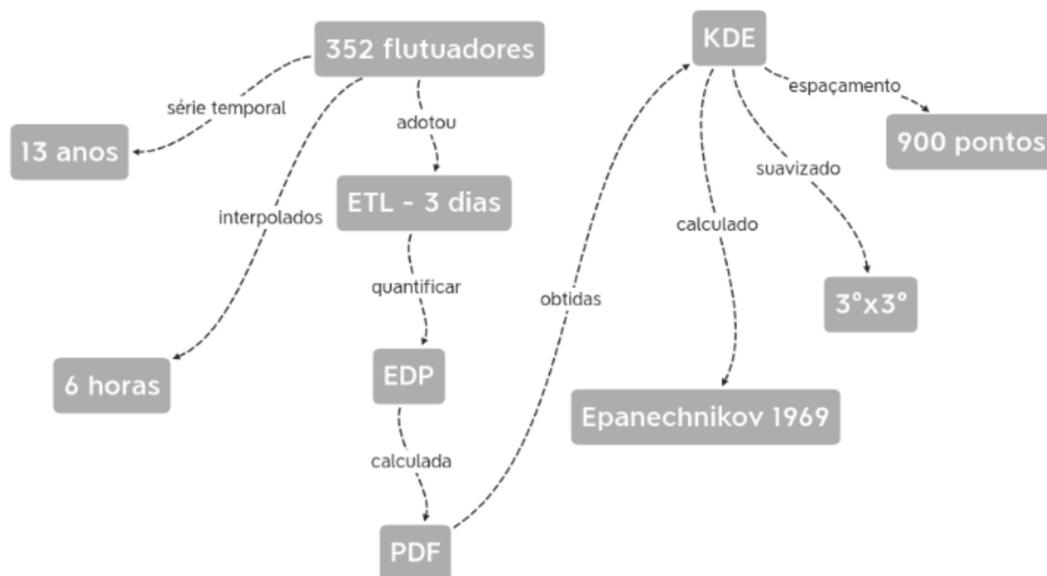
FONTE: Produção da autora.

Figura A.18 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia das ECLs e ECLc.



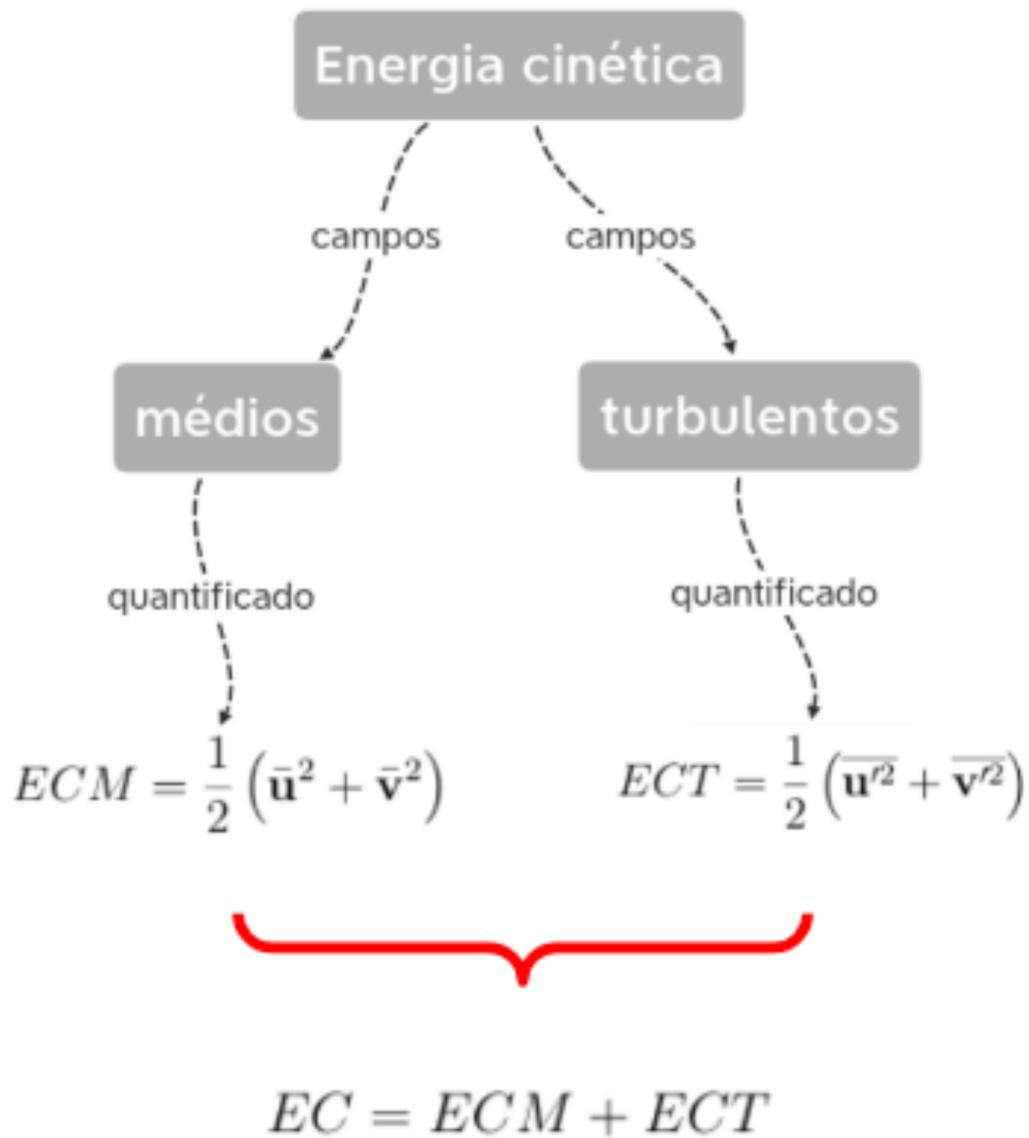
FONTE: Produção da autora.

Figura A.19 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia da quantificação da EDP.



FONTE: Produção da autora.

Figura A.20 - Mapa conceitual, resumido, da metodologia da quantificação da ECT, ECM e EC.



FONTE: Produção da autora.

