Thiago Podadera Costa

Modelo Paramétrico Regional da Corrente do Brasil na Bacia de Campos

Versão Corrigida da dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador:

Prof. Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Modelo Paramétrico Regional da Corrente do Brasil na
Bacia de Campos**

Thiago Podadera Costa

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de
Oceanografia Física.

Versão Corrigida

Julgada em ____ / ____ / ____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Deixo aqui minha dedicatória a duas pessoas fundamentais à minha existência: à minha mãe Solange (*in memoriam*) e ao meu pai, Francisco, guerreiro nesta batalha que é a VIDA. Obrigado.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	vi
Abstract	vii
1 Introdução	1
1.1 Preâmbulo	1
1.2 A Área de Estudo	2
1.2.1 A Bacia de Campos	2
1.3 O Oceano Atlântico Sul	3
1.3.1 Velocidades e Transporte de Volume na Bacia de Campos	7
1.4 A Atividade de Mesoescala - Os Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil	9
1.5 A Frente Termal de Superfície na Bacia de Campos	12
1.6 Hipótese Científica	16
1.7 Objetivos	16
2 Conjunto de Dados Correntográficos	18
2.1 Preâmbulo	18
2.2 O Fundeio Marlim	18
2.2.1 Descrição dos Dados	18
2.2.2 Processamento dos Dados do Fundeio	19
2.3 O Sistema OCEANOP - Oceanografia Operacional	26
2.3.1 Descrição dos Dados	26

2.3.2	Processamento dos Dados de Corrente Medidos Através de ADCP	28
3	Comissão Oceano SE II e o Conjunto de dados de TSM	34
3.1	Preâmbulo	34
3.2	A Comissão Oceano Sudeste II	35
3.2.1	Descrição dos Dados	35
3.2.2	Processamento dos dados de ADCP	37
3.2.3	Resultados e Discussão	40
3.3	Dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM)	45
3.3.1	Processamento dos dados de TSM na Bacia de Campos	47
3.3.2	Apresentação da Frente Térmica da Corrente do Brasil	48
4	O Modelo Paramétrico Regional da Corrente do Brasil	52
4.1	Preâmbulo	52
4.2	Formulação Teórica	53
4.3	Estimativa dos Parâmetros do Modelo	55
4.4	A Aplicação do Modelo Paramétrico	59
4.4.1	O Uso das Imagens de TSM no Modelo	59
4.4.2	Construção da Abrangência Regional do Modelo	63
5	Estudo de Caso para o Modelo Paramétrico - Eventos de Julho e Agosto	75
5.1	Preâmbulo	75
5.2	A Grade Regional da Bacia de Campos	75
5.3	A Aplicação do Modelo Paramétrico	77
5.3.1	Evento de Julho de 2007	77
5.3.2	Evento de Agosto de 2007	85
6	Considerações Finais	98
6.1	Sumário e Conclusões	98
6.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	104
	Referências Bibliográficas	105

Agradecimentos

Realmente, não foi fácil começar a escrever, mas não pelo fato do que ou de quem iria esquecer. Isso é o de menos. Realmente, quem é amigo de verdade, uma página não resume todo o sentimento que se nutre por alguém. Claro, é muito bom ser lembrado e guardado, mas acho que, na minha opinião o que vale é realmente o que passamos juntos com todas essas pessoas. Mas também já adianto que se esqueci de algum nome, desculpe-me e considere-se lembrado. Novamente, foi difícil escrever, pois toda a lembrança desses dois anos (mais até, né) de trabalho vieram à tona. Uma mescla de momentos engraçados, sérios, alegres, tensos e ao mesmo tempo angustiante e triste. E, nessas horas que as amizades são criadas e amizades antigas são ainda mais fortalecidas.

Uma delas, é claro, é a amizade e o carinho que tenho ao meu querido e estimado orientador *Prof. Dr. Ilson*. Nesta altura do campeonato, tratá-lo com pompas seria o mesmo que negar uma amizade construída desde 2003, quando entrei no laboratório me oferecendo pra qualquer trabalho (trabalhos acadêmicos, hein). Aliás, usei as palavras erradas. Não é mais amizade. Esse careca aí é parte da família que eu tenho. Obrigado pelas brigas, pelas broncas, mas também pela ajuda e pelos momentos de alegria. Obrigado Ilson.

Aos meus grandes amigos de laboratório: ao longo destes 8 anos tive o prazer de conviver com pessoas maravilhosas, seja conversando a respeito de assuntos acadêmicos, seja curtindo boas risadas. Obrigado aos meus amigos César, Leandros (Brócolis e Calado), Ronaldo (cascão), Rafael Soutelino, Juliana, Leilane, Ana Paula, Tainá, Felipe Sarguis, Filipe Areinha, HJ, André Catarina e aos novos alunos do LaDO Tiago, André, Thales.

Tem uma pessoa que também gostaria de agradecer imensamente pelo carinho,

pela atenção, pelo ouvido nos momentos tristes: professora Sueli. Obrigado, professora, pelas inúmeras conversas, pela ajuda e pelo carinho. Foram dois anos difíceis que, com absoluta certeza, foram esquecidos em parte quando conversávamos.

Agradeço também aos meus professores Belmiro, Marcelo Dottori, professor Paulo Polito e professora Olga. Obrigado por me socorrerem em momentos bastante angustiantes, onde eu não conseguia chegar a nenhum lugar com resultados malucos. Quero agradecer também à uma pessoa bastante querida. Adriene. Muito obrigado.

Quero agradecer aos grandes camaradas que conheci ao longo desses anos no IO e pude compartilhar boas risadas com essa turma. Obrigado aos amigos Dani, Tom, Alê(xana), Thiago Coelho, Fabrício (Bombadão fedorento), Franzoca (o garoto de Quixeramobim), Gonça, Augusto, Hermínio. Passamos por boas, hein? Quero estender meus agradecimentos a outros amigos do DOB - professor Paulo Sumida e Maysa. Tomar café da manhã em companhia de duas pessoas maravilhosas como vocês não tem preço. Obrigado.

Aos meus amigos de FUNDESPA, Bauer, Elcio, Wagnão, Giuliana, Paulinha, Rafa (pintinho - BOA GAROTO - PETROBRAS !!!), Ana Lúcia pela paciência neste momento da minha vida. Obrigado a todos vocês.

Duas pessoas são fundamentais pra que este trabalho esteja finalizado. Meu pai Francisco e meu irmão Gustavo. A base de uma família sólida, concreta e principalmente onde todos os participantes desse "clã" se amam de verdade. Vocês sabem que eu os amo demais e tenho vocês em todos os lugares que eu vou e em tudo que eu faço. Feliz sou eu que tenho vocês ao meu lado.

Quero deixar meu carinho e minha saudade a uma pessoa muito especial. Minha mãe Solange. Infelizmente sua presença física não está mais entre nós. Mas não tem um dia que eu não me levanto e penso em você. Não tem um dia que eu não sinta saudade. Por isso, a todos que lêem esta parte do trabalho, por isso foi tão difícil continuar. Pensei em desistir, em largar tudo, mas nada disso iria adiantar. Então dedico aos meus pais este trabalho e principalmente à minha mãe que, mesmo de longe, me deu forças pra continuar. Fique em paz.

Não posso deixar de agradecer à minha vó, aos meus tios Mauro e Sérgio *in memoriam* à minha Tia Rosângela e aos meus primos Erika e Ivan. Essa família que eu tenho

é demais de porreta e muito harmoniosa.

E, recentemente, mais ou menos há uns dois anos atrás eu ganhei novas pessoas que fazem parte da minha história. Muito obrigado aos mais novos membros da minha família Paulinha, Rodrigo ("Bora toáá uááá?") e à minha querida Fátima. Realmente, sou muito feliz por ter pessoas tão especiais ao meu lado.

Por fim e para deixar de ser tão prolixo, gostaria de agradecer à minha esposa Barbara Villela. Tenho a certeza de que sem ela, muito deste trabalho não teria sido executado. Com seu carinho, sua atenção, com seu respeito e sua força diante de momentos tão difíceis eu só tenho a agradecer e dizer que estarei sempre ao teu lado. Muito obrigado. Eu te amo.

Esta dissertação é parte integrante do Projeto do Subprojeto de Oceanografia Física do Projeto "Avaliação da Heterogeneidade Ambiental da Bacia de Campo - HABITATS", em co-coordenação do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da PETROBRAS e o Departamento de Biologia Marinha da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Dedico este trabalho à minha mãe, meu pai, meu irmão e à minha mulher. Sem vocês...a vida só seria três pontinhos. Obrigado.

Resumo

Um modelo paramétrico regional tridimensional da Corrente do Brasil (CB) foi construído com o objetivo de investigar se o meandramento frontal da CB domina a variabilidade subinercial na Bacia de Campos. A parametrização da CB normal à costa seguiu a formulação proposta por *Schmidt et al.* [2007]. Os parâmetros da CB foram estimados a partir dos perfis de velocidade quase-sinóticos durante a amostragem do cruzeiro OCEANO SUDESTE II (OCSEII) da Marinha do Brasil. A frente térmica costeira (FTC), facilmente detectado na superfície do mar por imagens de satélite, é tida como a fronteira costeira do CB com velocidades desprezíveis. A FTC padrão é, então, inferida pelo método do gradiente máximo em uma data escolhida. Com a localização da FTC, várias radiais são projetadas normalmente à frente e os perfis de velocidades da CB são ajustados a estas radiais. O próximo passo é interpolar objetivamente o campo de velocidade para obter uma CB tridimensional. A variabilidade espacial da CB neste mapa é, portanto, unicamente devido à arqueamento da velocidade/FTC, e os padrões de velocidade são devidos apenas ao meandramento frontal. Estes foram identificados nas séries temporais das FTC e o modelo foi computado para dois eventos separados no inverno de 2007 e comparados com os dados de ADCPs da PETROBRAS montados em quatro plataformas de petróleo. A comparação foi feita usando compósitos semanais e médias para isolar movimentos de mesoescala. Isso mostra que há um acordo muito favorável entre o modelo e as medições de velocidade de mar aberto em ambas as magnitudes e direções. Este assegura que os meandros frontais, ou mais especificamente, o meandro de São Tomé domina a variabilidade subinercial ao longo do talude continental e do platô de São Paulo. A única exceção é para o ADCP montado sobre uma plataforma de petróleo em plataforma continental. O modelado e as observações *in situ* discordam e indicam que outros fenômenos, tais como ondas de plataforma, devem ser contabilizados na parte costeira.

Abstract

A regional three-dimensional parametric model of the Brazil Current (BC) was built with the goal of investigating whether or not the BC frontal meandering dominates the subinertial current variability in the Campos Basin. The BC cross-stream parametrization followed the formulation proposed by *Schmidt et al.* [2007]. The BC parameters were estimated from quasi-synoptic velocity profiling sampled during the Brazilian Navy cruise OCEANO SUDESTE II (OCSEII). The surface inshore thermal front (ITF), easily detected in sea surface temperature satellite images, is taken as the inshore border of the BC jet with negligible velocities. The ITF spatial pattern is then inferred by the maximum gradient method on a chosen date or period. With the ITF location, several BC cross-stream profiles are projected normally to it. The next step is to objectively interpolate the velocity field to obtain a three-dimensional BC. The spatial variability of the BC in this map is therefore solely due to the arching of the velocity/ITF front, and therefore, the velocity patterns are due to frontal meandering only. Meandering events were identified in the ITF time series, the model computed the BC frontal patterns for two separate events in the winter of 2007 and compared with PETROBRAS' ADCP records mounted on four oil rigs. The comparison was done using weekly composites and averages to isolate mesoscale motions. It shows that there is a very favorable agreement between between the model and the open sea velocity measurements in both magnitude and direction. This reassures that the frontal meandering, or more specifically, the São Tomé Meander formation dominates the subinertial variability over the continental slope and the São Paulo Plateau. The only exception is for the ADCP mounted on an oil rig on the continental shelf. The modeled and *in situ* observations disagree and indicate that other phenomena, such as shelf waves, should be accounted in the coastal ocean in addition to the BC meandering.

Lista de Figuras

- 1.1 Representação bidimensional do *Setor Cabo de São Tome - Cabo Frio*, que se estende do Alto de Vitória (20,5°S) ao Alto de Cabo Frio (24°S). Em outras palavras, a Bacia de Campos. As linhas pontilhadas em amarelo representam os limites tanto norte como sul da bacia. 3
- 1.2 Representação tridimensional batimétrica da Bacia de Campos através do conjunto de dados ETOPO-2. 4
- 1.3 Sistema de correntes ao largo da margem continental brasileira, de acordo com os padrões esquemáticos de grande escala de *Stramma & England* [1999]. Adaptado por *Soutelino* [2008]. 5
- 1.4 Hipótese de *Campos et al.* [1995] através de interpretação gráfica de *Mattos* [2006]. A figura da esquerda representa a orientação meridional da costa em relação ao fluxo médio da corrente. O painel da direita indica o comportamento da corrente quando há mudança na inclinação da costa. Extraído de *Silveira* [2006] 10
- 1.5 Imagem de temperatura da superfície do mar em janeiro de 1998, extraído de *Mahiques et al.* [2005]. Refere-se à região da Bacia de Campos, num padrão espacialmente oscilatório que corrobora *Silveira et al.* [2008], ou seja, destaca os meandros ciclônicos junto aos Cabos São Tomé e Frio. 11
- 1.6 Distribuição de temperatura da água do mar em superfície resultante das observações realizadas no período de abril de 1970, de acordo com *Miranda* [1982]. 14
- 1.7 Comparação da posição das frentes médias da CB por *Garfield* [1990] (losangos negros) e por *Silveira et al.* [2008] (pontilhado vermelho) com a posição da isóbata de 200 m. Adaptado de *Silveira et al.* [2008]. 15

2.1	Localização geográfica do Fundeio correntográfico gentilmente fornecido pela PETROBRAS.	19
2.2	Série temporal de velocidade dos correntógrafos após filtragem tipo <i>Lanczos</i> . Nesta representação estão plotados a corrente em 5 níveis de amostragens - 50, 150, 350, 750 e 900 m de profundidade. Os três primeiros níveis representando o escoamento da CB e os dois últimos níveis representados correspondentes à Corrente do Contorno Intermédiária (CCI).	20
2.3	Vetores de velocidade média para os 11 correntômetros do Fundeio Marlim. Em tons de vermelho estão representadas as velocidades médias temporais da Corrente do Brasil em sua extensão vertical. As cores azuis denotam os valores médios associados à CCI. O eixo cartesiano no canto inferior direito da figura mostra o novo sistema de coordenadas rotacionados longitudinal e normal às isóbatas.	21
2.4	Modos dinâmicos da estrutura vertical da Corrente do Brasil e da CCI na região da Baía de Campos. Os modos plotados são: o modo barotrópico e os três primeiros modos baroclínicos.	24
2.5	Perfil vertical de $\bar{v}$ do Fundeio Marlim. Os pontos em vermelho representam a média dos registros pontuais dos correntômetros do fundeio nas determinadas profundidades. A linha em azul exibe o resultado do processo de interpolação dinâmica considerando o uso dos dois primeiros modos dinâmicos da corrente.	26
2.6	Localização dos pontos amostrais das plataformas de petróleo inseridas no sistema OCEANOP.	27
2.7	Figura tipo <i>stick-plot</i> representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do segundo semestre de 2007 das plataformas P48, FPSOBR, P40 e PPG1, enumeradas de 1 a 4 respectivamente.	32
2.8	Distribuição dos vetores médios de velocidade de corrente do sistema OCEANOP medidos em 50 m para o período de primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano, correspondente à média das séries exibidas na Figura 2.7.	33
3.1	Trajetória amostrada do ADCP de casco (VM-ADCP) pela Comissão Oceano Sudeste II da Marinha do Brasil.	36

3.2	Distribuição espacial dos vetores de velocidade amostrados por <i>ADCP</i> de casco durante a OCSE-II. Em sentido horário os níveis representados são: 0 m, 48 m, 80 m e 150 m.	42
3.3	Distribuição espacial dos vetores de velocidade amostrados por <i>ADCP</i> de casco durante a OCSE-II. Em sentido horário os níveis representados são: 200 m, 250 m, 300 m e 350 m.	43
3.4	Seção vertical de Velocidade Meridional mais ao norte do conjunto de radiais da Bacia de Campos.	44
3.5	Seção vertical de Vorticidade Relativa mais ao norte do conjunto de radiais da Bacia de Campos.	45
3.6	Seção vertical do Número de Rossby transversal para a radial mais ao norte da Bacia de Campos.	46
3.7	Imagem de TSM média do período de primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano para a região da Bacia de Campos com resolução de 4 km do projeto <i>Pathfinder</i> . As linhas em preto representam essas isóbatas de 200 e 2000 m. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.	49
3.8	Imagem do gradiente de TSM correspondente ao segundo semestre de 2007, do dia primeiro de julho ao dia 31 de dezembro. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.	50
3.9	Frente térmica média correspondente aos valores de máximo gradiente da Figura 3.8. Essa frente à media do segundo semestre de 2007, do dia primeiro de julho ao dia 31 de dezembro. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.	51
4.1	Seções de velocidade básica da Corrente do Brasil. Simetria (painel superior ($\beta = 1$)), inclinação voltada para a região oceânica (painel central ($\beta > 1$)) e inclinação voltada para a região costeira (painel inferior ($\beta < 1$)). De acordo com <i>Schmidt et al.</i> [2007]	55

4.2	Ajuste por mínimos quadrados não-linear para a estimativa da escala de decaimento da profundidade z_s de acordo com a fórmula 4.1 . Os pontos em vermelho representam os dados sinóticos do perfil vertical de velocidade meridional da CB, para a OCSEII. A linha em verde representa o perfil de velocidade ajustado.	56
4.3	Ajuste por mínimos quadrados não-linear para a estimativa das escalas de decaimento horizontal do lado costeiro l_c e do lado oceânico l_o de acordo com a fórmula 4.1 . A curva em vermelho representam os dados sinóticos do perfil zonal de velocidade meridional da CB da Comissão Oceano Sudeste II. A linha em azul representa o perfil de velocidade ajustado.	58
4.4	Comparação entre as observações de velocidade da radial mais ao norte da OCSEII e a correspondente aplicação da fórmula 4.1 da CB parametrizada.	58
4.5	Aplicação da fórmula 4.1 para o perfil zonal da CB parametrizada entre a posição da frente interna ($V = 0$ em $x = 0$).	59
4.6	Temperatura da Superfície do Mar para as semanas de mapeamento da OCSEII (painéis esquerdos). A direita tem-se a intensificação do gradiente que permite a minimização do erro ao traçar no traçado da frente. Os painéis superiores representam a semana compreendida entre os dias 20 a 26 de outubro de 2002; os painéis centrais representam a semana de coleta entre os dias 27 de outubro a 02 de novembro de 2002 e os painéis inferiores a semana entre os dias 03 e 09 de novembro de 2002.	61
4.7	Frente térmica média amostrada através de imagens de satélite para os meses em que se realizou o cruzeiro oceanográfico da Marinha do Brasil na região da BC.	62
4.8	Representação da frente térmica média da Corrente do Brasil (tracejado vermelho) e a posição normal das radiais criadas para o acoplamento do modelo paramétrico da corrente.	64
4.9	Representação esquemática da grade para interpolação dos campos de velocidade.	65

4.10	Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 0 m.	69
4.11	Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 50 m.	70
4.12	Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 100 m.	71
4.13	Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 150 m.	72
4.14	Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 200 m.	73
5.1	Grade completa utilizada para a interpolação das propriedades físicas. Esta grade estende-se desde a porção sul da Cadeia Vitória-Trindade até o sul da Bacia de Campos, na Região de Cabo Frio, em 23°S.	76
5.2	Figura tipo <i>stick-plot</i> representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do a segundo semestre de 2007 das plataformas P48, FPSOBR, P40 e PPG1, enumeradas de 1 a 4 respectivamente. A barra demarcada em cinza marca o período de interesse ao evento.	78
5.3	Vetores médios da Corrente do Brasil para a primeira semana de julho de 2007 do conjunto de dados do sistema OCEANOP. Em azul, a localização das plataformas e as setas vermelhas representam o escoamento médio.	79
5.4	Imagem de TSM do projeto <i>Pathfinder</i> para a primeira semana de julho de 2007.	80

5.5	Frente média da Corrente do Brasil para o período da primeira semana de julho (1-7/07/2007).	81
5.6	Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho).	81
5.7	Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP.	83
5.8	Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Em azul estão plotados o posicionamento das Plataformas associada aos vetores médios de corrente observadas (vetores vermelhos). A linha tracejada corresponde a frente média para a semana de 1 a 7 de julho de 2007.	84
5.9	Figura tipo <i>stick-plot</i> representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do a segundo semestre de 2007 das plataformas 1, 2, 3 e 4. A barra demarcada em cinza marca o período de interesse ao evento.	85
5.10	Imagem da Temperatura da Superfície do Mar correspondente às semanas de 12-18/08/2007 (painel superior), 19-25/08/2007 (painel central) e 26-31/08/2007 (painel inferior). Os painéis, de cima para baixo representam a evolução da Corrente do Brasil e o crescimento do meandro ao largo do Cabo de São Tomé.	88
5.11	Frentes média da Corrente do Brasil para o período de 12 a 31 de agosto de 2007. Painel superior: frente média da CB entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel central: segunda semana de agosto; de 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: de 26 a 31 de agosto de 2007.	89
5.12	Evolução dos vetores médios da corrente para o período de 12 a 31 de agosto de 2007. Painel superior: vetores médios da CB entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel central: vetores médios da segunda semana de agosto; de 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: vetores médios da CB de 26 a 31 de agosto de 2007.	91

5.13	Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho). Painel superior esquerdo: posicionamento das radiais entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel superior direito: posicionamento das radiais entre os dias 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: posicionamento das radiais entre os dias 26 e 31 de agosto de 2007.	93
5.14	Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB ao longo de 12 ao dia 18 de agosto de 2007.	94
5.15	Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB ao longo de 19 ao dia 25 de agosto de 2007.	95
5.16	Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB ao longo de 26 ao dia 31 de agosto de 2007.	96
5.17	Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho) para a primeira semana de amostragem dos dados de Plataforma (12-18 de agosto de 2007).	96
5.18	Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho) para a segunda semana de amostragem dos dados de Plataforma (19 a 25 de agosto de 2007).	97
5.19	Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho) para a terceira semana de amostragem dos dados de Plataforma (26 a 31 de agosto de 2007).	97

6.1	Perfil vertical da autofunção empírica adimensional $F_1(z)$ ao qual se refere às anomalias de velocidade do Fundeio Marlim. Os pontos em vermelho denotam os valores médios da série para os níveis correntométricos. A linha em azul contínua exibe o resultado da interpolação ao uso dos 4 primeiros modos dinâmico.	100
6.2	Comparativo entre as anomalias de velocidade de u e v para a determinação das características meandantes da CB na região da Bacia de Campos.	101

Lista de Tabelas

1.1	Estimativas de transporte de volume e da velocidade máxima da Corrente do Brasil. Atualizada relativamente à de <i>Silveira</i> [2006] até a latitude de 23°S . . .	8
2.1	Valores médios encontrados para as componentes normal ($\bar{u}$) e paralela ($\bar{v}$) às isóbatas para o Fundeio Marlim da Bacia de Campos.	22
2.2	Raios de deformação para o Sistema CB na Bacia de Campos.	24
2.3	Velocidade média de corrente para o período que compreende o segundo semestre de 2007 (do dia primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano) das componentes u e v do sistema OCEANOP.	31
4.1	Parâmetros utilizados no modelo.	57

Capítulo 1

Introdução

1.1 Preâmbulo

A Bacia de Campos responde atualmente com aproximadamente 84% da produção nacional de petróleo. A maior parte do óleo extraído é sobre o talude continental sob forte influência do regime de circulação dita oceânica. Entretanto, apesar dos esforços de pesquisadores brasileiros e da Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), o conhecimento da variabilidade das correntes oceânicas é insipiente e limitado a séries de tempo curtas e recentes. Neste trabalho pretendemos sintetizar as informações acerca das correntes advindas de literatura, re-trabalho e análise de dados observacionais pretéritos e informações oriundas de sensores orbitais para produzir um modelo parametrizado de circulação. Este modelo pretenderá reproduzir as feições oceanográficas mais conspícuas observadas nesta bacia sedimentar: os meandros e vórtices da Corrente do Brasil.

Esta dissertação é parte integrante do Subprojeto Oceanografia Física do Projeto "Avaliação da Heterogeneidade Ambiental da Bacia de Campos - HABITATS", em coordenação do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da PETROBRAS e o Departamento de Biologia Marinha da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo introdutório é descrita a área de estudo, uma síntese da literatura sobre a oceanografia da Bacia de Campos, a hipótese científica que norteia esta dissertação bem como seus objetivos. No Capítulo 2, são apresentados os conjuntos de dados correntográficos e

a respectiva análise das séries de tempo. O Capítulo 3 descreve o conjunto de dados quase-sinóticos (oriundos de comissões hidroceanográficas) e sinóticos (oriundos de imagens termais de satélites orbitais). Formula-se e calibra-se o modelo paramétrico da Corrente do Brasil no Capítulo 4. No Capítulo 5 aplica-se e avalia-se o modelo paramétrico na reprodução da variabilidade temporal do sistema de correntes. No Capítulo 6, tecem-se as considerações finais a partir da apresentação de uma síntese dos resultados e sugestão para trabalhos futuros.

1.2 A Área de Estudo

1.2.1 A Bacia de Campos

A margem continental sudeste brasileira pode ser dividida em duas porções: Bacia de Campos (BC) e Bacia de Santos (BS). Entretanto, o foco deste trabalho se restringe apenas à porção norte desta região. Definida estruturalmente como a região entre o Alto de Vitória (20,5°S) e o Alto de Cabo Frio (24°S), a Bacia de Campos possui área superior a 100.000 km² [Viana *et al.*, 1998]. A determinação dos limites da BC corresponde à fisiografia relacionada à área; o limite sul é caracterizado especificamente pela mudança de orientação da linha de costa e consequentemente das isóbatas próximo à região de Cabo Frio. Ao norte, o lineamento de Vitória, e consequentemente a Cadeia Vitória-Trindade, restringe a parte norte da bacia, como mostra a Figura 1.1.

Vale destacar ainda, seguindo Viana *et al.* [1998], as características que marcam a fisiografia da BC. Em média, a largura da plataforma continental da bacia é de aproximadamente 100 km. A região norte é a parte mais estreita quando comparada ao sul desta e, por isso, a quebra da plataforma (região que compreende a transição entre os ambientes geomorfológicos) concentra-se próximo à isóbata de 80 m, fato este que ocorre em 130 m na porção sul da BC.

O talude continental, região de maior inclinação e posterior à plataforma continental, possui declividade média em torno de 2,5°. Ainda é importante frisar ao leitor que a base do talude possui inclinação e que esta se apresenta mais rasa na parte ao norte da bacia e se aprofundando ao nos dirigirmos ao sul (Figura 1.2).

A Figura 1.2 acima mostra detalhadamente uma composição tridimensional da Ba-

Figura 1.1: Representação bidimensional do Setor Cabo de São Tomé - Cabo Frio, que se estende do Alto de Vitória (20,5°S) ao Alto de Cabo Frio (24°S). Em outras palavras, a Bacia de Campos. As linhas pontilhadas em amarelo representam os limites tanto norte como sul da bacia.

cia de Campos. Ao que tange à descrição da área de estudo, geomorfologicamente, esta parte do litoral sudeste brasileiro é definido por Zembruscki [1979] como o Setor Cabo de São Tomé - Cabo Frio. Na parte norte do sistema, podemos encontrar cânions formado em épocas de retração marinha, o que muito provavelmente eram níveis de base de drenagem do rio Paraíba do Sul. Na parte sul, o platô de São Paulo interrompe o talude continental e introduz certa suavidade ao declive do mesmo.

1.3 O Oceano Atlântico Sul

A costa brasileira está inserida praticamente em toda a porção do oceano Atlântico Sul. Em termos latitudinais, isso equivale dizer que o litoral do Brasil se estende do equador até aproximadamente 35°S, o que contabiliza mais de oito mil quilômetros

Figura 1.2: Representação tridimensional batimétrica da Bacia de Campos através do conjunto de dados ETOPO-2.

de fronteira entre o continente e o mar. Esta porção do oceano Atlântico encerra um grande giro anticiclônico limitado, segundo *Stramma & England* [1999], em sua porção sul pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), pela Corrente Sul Equatorial (CSE) ao norte do giro. Juntamente à porção leste encontra-se a Corrente de Benguela (CBe) e completando o giro na parte oeste delimita-se a Corrente do Brasil (CB).

Apesar de simplista a breve descrição que segue acima, existem certas características que são importantes relatar. A corrente que compõe a parte setentrional do giro (ramo sul da Corrente Sul Equatorial, de acordo com *Stramma* [1991]), chega à costa brasileira e deparando-se com a margem continental é forçada a se bifurcar. Seguindo os padrões de *Stramma & England* [1999], o oceano sobre a margem continental brasileira pode ser dividido em três camadas principais a saber: os primeiros 150 m de coluna de água é

denominado de camada superficial; o segundo terço compreendendo de 150 aos 500 m de profundidade é denominado de piconclina; e para a camada intermediária tem-se a faixa de profundidade compreendida entre os 500 e 1000 m. Para tais subdivisões adotadas encontram-se diferentes massas de águas, onde tem-se a Água Tropical (AT), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Intermediária Antártica (AIA) respectivamente.

O ramo sul da CSE (CSEs) dirige-se para a margem continental brasileira. Entretanto, os diferentes níveis de profundidade, ainda segundo *Stramma & England* [1999] atingem a costa em latitudes distintas. A camada superficial se depara com a costa em aproximadamente 15°S. Aos níveis piconclínicos e intermediários, o encontro daquela com a margem ocorrem em aproximadamente 20°S e 25°S respectivamente como observado na Figura 1.3.

Figura 1.3: Sistema de correntes ao largo da margem continental brasileira, de acordo com os padrões esquemáticos de grande escala de *Stramma & England* [1999]. Adaptado por *Soutelino* [2008].

O sistema de escoamento na margem continental brasileira se mostra extremamente

complexo e estratificado como é exemplificado na figura. Isso porque em todas as camadas, subdivididas e referenciadas nos parágrafos acima, a CSEs se bifurca, em faixas latitudinais distintas que se estendem de 15° a 25°S, dando origem às Correntes de Contorno Oeste (CCO). Assim, ao se bifurcar, a CSEs origina duas CCOs, uma orientada para sul e a outra direcionada ao equador. Ainda, soma-se o fato de que o ramo sul da bifurcação é composto basicamente por três correntes oceânicas verticalmente localizadas.

O ramo superficial sul da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial (BiCSE) recebe o nome de CB e se origina aproximadamente em 15°S fluindo em direção ao sul. Em aproximadamente 20°S, a CB recebe mais aporte da BiCSE, porém em nível picnoclínico e, dessa maneira tem seu volume aumentado. A Corrente do Brasil continua fluindo até aproximadamente 25°S onde mais uma vez tem seu espessamento aumentado devido a novo aporte de água da BiCSE que ocorre em nível intermediário. A partir desta latitude, a CB passa a fluir por toda a coluna de água do oceano superior.

A Corrente de Contorno Intermediária, é originada através da BiCSE, porém em nível intermediário. O ramo norte desta bifurcação tem por característica dirigir-se para o norte ao longo do contorno oeste onde em 20°S recebe novo aporte do ramo norte da BiCSE em nível picnoclínico. Assim, ao se somar com este novo escoamento, recebe o nome de Subcorrente Norte do Brasil (SNB). Mais adiante, o outro ramo (norte e superficial) da BiCSE junta-se à SNB dando origem à Corrente Norte do Brasil. A este sistema de correntes em que se encontra a Corrente do Brasil (CB) e Corrente de Contorno Intermediária (CCI) dá-se o nome de sistema CB-CCI [Godoi, 2005].

É importante destacar a quarta camada, que ocupa as porções do sopé continental e parte da planície abissal. Nesta camada é possível reconhecer três diferentes massas de água na qual a primeira delas, a Água Circumpolar Superior (ACS) flui na mesma direção que a massa de água acima dela, a AIA. Assim, de acordo com *Stramma & England* [1999]; *Mémery et al.* [2000] a ACS pode ser considerada o limite inferior do Giro Subtropical.

A segunda massa de água que é encontrada nesta camada oceânica é a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Entre a profundidade de 1500 a 3000 m o escoamento se dá de forma bem organizada em direção ao sul e esta corrente recebe o nome

de Corrente de Contorno Profunda (CCP) ao largo de todo o contorno oeste e abaixo do sistema previamente descrito. Por fim, a terceira massa de água e correspondente à circulação de fundo está representada pela Água Circumpolar Inferior (ACI). Essas duas massas de água juntas são transportadas pela CCP.

Este é o padrão típico encontrado na porção sul do Atlântico Sul. Para revisão desta primeira parte, foram apresentadas as diferentes correntes que encerram o Giro Subtropical, mais destacadamente, o sistema CB-CCI. Porém, vale destacar que este sistema é o que se pode observar em termos de grande escala. Para que se entenda a complexidade do sistema de correntes que banham a margem continental brasileira é necessário que se desvencilhe da grande escala para que se possa observar os movimentos em uma escala menor. Assim, é de fundamental importância que se analise os padrões de mesoescala do sistema CB-CCI, que serão descritos na seção 1.4.

1.3.1 Velocidades e Transporte de Volume na Bacia de Campos

A revisão feita por *Silveira et al.* [2000b] mostra que existem poucas estimativas sobre o transporte de volume calculado para a Corrente do Brasil na Bacia de Campos. Os autores concentram-se em duas regiões especificamente: aos entornos de Cabo Frio e mais ao sul, na confluência Brasil-Malvinas. As estimativas encontradas são derivadas de cálculos geostróficos. Certamente que instrumentos como o *PEGASUS* foram utilizados primariamente por *Evans & Signorini* [1985], além de medições através de correntômetros por *Müller et al.* [1998] e *Lima* [1997] através dos projetos *WOCE* e *PROCAP-1000* e representaram o pioneirismo na estimativa do transporte da CB na região da bacia. A Tabela 1.1 apresenta uma adaptação de *Silveira* [2006] para o cálculo do transporte de volume em Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) da CB entre a faixa latitudinal que compreende grande parte da Bacia de Campos.

A tabela mostra que entre as latitudes de 21°S e 23°S ocorrem cálculos geostróficos em que se utilizam profundidades de referência que oscilam entre 500 e 600 m. Isso se deve ao fato de que esta é a interface entre duas massas de água: a ACAS e AIA. Isso, apesar de ser implícito em todos os trabalhos citados, aparece unânime que a Corrente do Brasil transporta em seu fluxo, primordialmente AT e ACAS nos entornos da Bacia de Campos.

Os valores de transporte diferem em relação aos métodos listados, sejam eles feito através de cálculos dinâmicos, por modelos numéricos ou até mesmo através da inferência de equipamentos utilizados para a perfilagem de corrente. Assim, observa-se valores que variam de -2 Sv a cerca de -11 Sv. De acordo com *Silveira* [2006] vale destacar os trabalhos realizados por *Signorini* [1978] que através de dados hidrográficos e consequentemente pelos cálculos dinâmicos ter utilizado valores de referência em 600 m obteve o fluxo da CB, aos entornos da BC, nos primeiros 200 m de coluna de água onde as velocidades superficiais atingem cerca de $0,55 \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 1.1: Estimativas de transporte de volume e da velocidade máxima da Corrente do Brasil. Atualizada relativamente à de *Silveira* [2006] até a latitude de 23°S

Latitude	Prof. Referência	Transporte (Sv)	Velocidade m s^{-1}	Referência
21°S	600	-9,4	-	<i>Schmid et al.</i> [1995]
21°S	numérico	-6,7	-0,83	<i>Silveira et al.</i> [2005]
21°S	numérico	-7,9	-0,60	<i>Silveira et al.</i> [2005]
$21^\circ40'\text{S}$	500	-4,4	-0,61	<i>Evans et al.</i> [1983]
22°S	600	-5,2	-0,55	<i>Signorini</i> [1978]
22°S	por fundeio	$-5,5 \pm 2,6$	-	<i>Lima</i> [1997]
22°S	numérico	-7,1	$< -0,55$	<i>Lima</i> [1997]
$22^\circ30'\text{S}$	numérico	-5,2	-0,90	<i>Silveira et al.</i> [2004]
23°S	600	-6,0	-0,70	<i>Signorini</i> [1978]
23°S	500	-2,2/-2,7	-0,49	<i>Miranda & Castro Filho</i> [1979]
23°S	Pegasus	-11	-0,50	<i>Evans & Signorini</i> [1985]
23°S	Pegasus	-5,6	-0,52	<i>Silveira et al.</i> [2004]
23°S	Pegasus	-6,0	-0,70	<i>Garfield</i> [1990]
23°S	600/1300	-10,1/-10,9	-	<i>Stramma</i> [1989]
23°S	por fundeio	-1,3	-0,28	<i>Müller et al.</i> [1998]

Além de *Signorini* [1978] citado no parágrafo anterior, outro que merece destaque é *Lima* [1997]. Este calculou o transporte da CB através de dois métodos distintos. No primeiro caso, *Lima* [1997] utilizou três fundeios correntográficos alinhados zonalmente em 22°S permitindo que se calculasse o transporte da CB por uma série temporal anual. Assim, utilizando os métodos aplicados por *Tomczak et al.* [1996], foi estimado o transporte da Corrente do Brasil em $-5,5 \pm 2,6$ Sv. Adicionalmente, foi realizado uma radial hidrográfica desta linha de fundeios e utilizando o modelo computacional da

Universidade de Princeton (*Princeton Ocean Model (POMsec)*) o referido autor obtém velocidades baroclínicas absolutas a partir do campo de massa observado.

Em termos de perfilagem sinótica, *Evans & Signorini* [1985] através de perfiladores acústicos *Pegasus* revelaram valores de cerca de -6 Sv e velocidades que atingem -0,5 m s⁻¹ em superfície, concordando com as velocidades geostróficas e numéricas, mostrando uma CB rasa. *Müller et al.* [1998] fundeou três estruturas sobre as isóbatas de 200, 950 e 2200 m. Os resultados mostram que a magnitude média da corrente é cerca de 0,15 m s⁻¹ com o transporte associado em cerca de -1,5 Sv. Esses valores podem ser atribuídos aos diferentes níveis escolhidos uma vez que é mencionado que um dos fundeios estava posicionado a 170 m abaixo da linha da superfície do mar e como foi discutido anteriormente, a CB está praticamente confinada em 200 m de coluna.

Silveira et al. [2004] reanalisa os dados de *Evans & Signorini* [1985] e mapeia a distribuição seccional da CB e CCI encontrando valores de -5,6 e 3,6 Sv, respectivamente. Em adição, atualiza a utilização do *POMsec* de *Lima* [1997] e encontra valores de -6/-7 Sv para o transporte baroclínico em 22,5°S. *Silveira et al.* [2008] utilizaram um conjunto de dados adicionais e simulações com *POMsec* para confirmar valores de transporte baroclínico em torno de -5/-6 Sv para a Corrente do Brasil. Particularmente, uma das distribuições seccionais apresentadas por estes autores inclui um grande meandro ciclônico que recircula cerca de 5,4 Sv em sua estrutura. A atividade de mesoescala é descrita na próxima seção.

1.4 A Atividade de Mesoescala - Os Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil

A CB apresenta grande dinâmica de mesoescala, dominada basicamente por meandros e vórtices, observados na costa sudeste brasileira. *Mascarenhas et al.* [1971] foram os primeiros autores a descreverem os padrões meandantes e a atividade vortical da CB ao largo de Cabo Frio, a partir de mapas de topografia dinâmica. Nas análises dinâmicas de dados hidrográficos *Signorini* [1978] retoma o tema do meandramento da CB, discutindo a circulação entre o Cabo de São Tomé e a Baía de Guanabara, uma vez que este autor capturou um vórtice anticiclônico ao norte de Cabo Frio.

Ao entendimento de *Campos et al.* [1995], o meandramento da CB ao largo da Bacia de Campos é devido à mudança de orientação da costa e do gradiente de topografia de fundo (Figura 1.4). Por inércia, é de se esperar que a Corrente do Brasil atinja locais de maior profundidade. Como consequência ao estiramento da coluna de água, a CB adquire vorticidade ciclônica. Dessa forma a CB tenta voltar à profundidade de escoamento associada a sua profundidade. Novamente, por inércia, atinge valores topográficos que permitam o achatamento da coluna de água e consequentemente vorticidade anticiclônica.

Figura 1.4: Hipótese de *Campos et al.* [1995] através de interpretação gráfica de *Mattos* [2006]. A figura da esquerda representa a orientação meridional da costa em relação ao fluxo médio da corrente. O painel da direita indica o comportamento da corrente quando há mudança na inclinação da costa. Extraído de *Silveira* [2006]

Os padrões meandramentos da CB são presentes nas imagens AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). A primeira referência de inspeção regular das séries de imagens em AVHRR pode ser encontrada em *Garfield* [1990]. Para este autor, que analisou cerca de cinco anos de conjunto de imagens, a frente térmica da CB, a qual demarca a borda continental desta, localiza-se próximo à isóbata de 200 m e apresenta dois máximos, (projeções da frente em direção ao oceano aberto) ao largo dos Cabos São Tomé e Frio.

Esta observação feita pelo autor levou-o a considerar que estes máximos referen-

ciados acima seriam estruturas bimodais. Em outras palavras, isso representaria um sistema de dois cavados não-propagantes de uma onda de Rossby e aparentemente instáveis (Figura 1.5). As imagens de 1982 a 1987 permitiram a *Garfield* [1990] identificar dois vórtices de, aparentemente, núcleos frios emitidos pelo eixo da CB. No entanto, o rastreamento destes anéis vorticais é de difícil mapeamento uma vez que seus núcleos são de águas costeiras mais frias e, devido ao isolamento vortical, essas águas seriam rapidamente aquecidas.

Figura 1.5: Imagem de temperatura da superfície do mar em janeiro de 1998, extraído de *Mahiques et al.* [2005]. Refere-se à região da Bacia de Campos, num padrão espacialmente oscilatório que corrobora *Silveira et al.* [2008], ou seja, destaca os meandros ciclônicos junto aos Cabos São Tomé e Frio.

Os dados analisados por *Garfield* [1990] mostram ainda os aspectos qualitativos a respeito da Corrente do Brasil. Apenas as ondas de grande amplitude são observadas nas imagens de satélite, com velocidades de fase bastante baixas com propagação dos

meandros parecendo ser ocasional e precedidas de processos de instabilidade. Apesar de todos os esforços para o entendimento da formação de meandros e vórtices da região da Bacia de Campos, o conjunto de informações ainda é muito escasso e esparsa. Baseado nesta limitação, *Silveira et al.* [2008] utiliza um conjunto de 113 imagens AVHRR de 1993 a 2001 para análise de Funções Ortogonais Empíricas (FOE). através destas encontram padrões meandantes oscilatórios correspondendo a ondas de vorticidade de 520 km, 338 km e 266 km. Dentre essas ondas, as mais curtas explicam apenas 19% da variância total da série, mas tratam-se de ondas baroclinicamente instáveis e com amplo potencial de crescimento.

Foi somente com o auxílio de estudos numéricos e analíticos que foram possíveis os avanços na dinâmica de mesoescala da BC. Um dos primeiros estudos conduzidos nessa linha de pesquisa foi apresentado por *Fernandes et al.* [2009]. O autor considerou que o sistema CB-CCI seria dominado pelo primeiro modo baroclínico e utilizou um modelo de duas camadas de densidade homogênea para as simulações numéricas através do Modelo Isopical da Universidade de Miami (MICOM). Assim, seu experimento produziu ondas onde o início do meandramento da CB se iniciava em aproximadamente 16°S com frequência de 25 dias e comprimento de onda de 430 km. Entretanto, o trabalho de *Fernandes et al.* [2009] mostrou que a propagação dos meandros para SO era superior (da ordem de $0,20 \text{ m s}^{-1}$) àquela reportada preteritamente, com velocidades de fase muito baixas.

Os experimentos realizados por *Calado et al.* [2008] consistiram em simulações com implementação da versão do modelo da Universidade de Princeton, o *Princeton Ocean Modelling* (POM). Nos seus experimentos, foi considerada a utilização pioneira de modelagem orientada por feições oceanográficas parametrizadas matematicamente. Dentre essas feições a frente da Corrente do Brasil, com intensidade sinótica, foi utilizada nos experimentos. Como principal resultado os autores confirmam *Silveira et al.* [2008], tendo a instabilidade baroclínica como mecanismo primário de crescimento dos meandros ciclônicos de Cabo de São Tomé e Cabo Frio.

1.5 A Frente Termal de Superfície na Bacia de Campos

Na seção anterior, citamos os estudos de *Garfield* [1990] e *Silveira et al.* [2008] como dois dos trabalhos a utilizar informações de frentes termais na investigação dos fenômenos de mesoescala na Bacia de Campos. Nesta, dedicamo-nos à descrição física das frentes termais a partir não somente de imagens de satélite, mas também de dados *in-situ* para a região.

As propriedades físicas mais referenciadas da água do mar são os dados de temperatura (medidos em °C pelo sistema internacional de unidades) e salinidade (número adimensional que representa a quantidade de sal dissolvido na água do mar). Esses parâmetros caracterizam, por exemplo, as massas de água, uma vez que a tendência dessas propriedades é se manter razoavelmente constante desde o sítio de formação. A interação entre os diferentes volumes de água gera gradientes bastante significativos e que determinam as chamadas frentes. Em outras palavras, frentes significam regiões onde há intensificação do gradiente *quase-horizontal* dessas propriedades em questão [*Castro et al.*, 2006]. Apesar destas proporcionarem gradientes significativos nas propriedades, as frentes não representam barreiras físicas naturais aos processos associados ao encontro das massas de água.

Em primeira análise, estabelecer um conceito a respeito de frentes ou zonas frontais não é uma tarefa fácil devido à diversidade da natureza física, manifestações externas e escalas tanto temporal como espacial como concordam os especialistas da área. Assim, por definição, *Castro et al.* [2006] abordam as zonas frontais (que podem ser consideradas tanto oceânicas e/ou costeiras) como sendo regiões em cujos gradientes espaciais das principais características termodinâmicas são muito grandes ao compará-los com as condições climatológicas médias. Por esta razão, as frentes (ou interface da frente como se refere os autores citados) é uma região (superfície) inserida dentro da zona frontal coincidente à região de máximo gradiente das propriedades.

Em seus estudos, *Miranda* [1982] utilizou-se de 430 estações oceanográficas distribuídas ao longo da região entre Cabo de São Tomé (RJ) e Ilha de São Sebastião (SP) para os períodos de janeiro, abril, julho e novembro de 1970 e para o mês de fevereiro de 1971. Os dados coletados são mostrados em distribuições espaciais de temperatura (Figura 1.6) e salinidade ao longo de toda a região.

Figura 1.6: Distribuição de temperatura da água do mar em superfície resultante das observações realizadas no período de abril de 1970, de acordo com *Miranda* [1982].

É possível notar que os gradientes horizontais de temperatura são encontrados nas regiões adjacentes ao Cabo de São Tomé e Cabo Frio denotando a posição da frente junto à isobata de 100 m como mostra a figura acima. *Miranda* [1982] ainda reforça a variabilidade da posição da frente, a partir de dados coletados, aos meses em que se segue. O autor mostra que esta (ou, no caso o que é chamado de frente, ou seja, o gradiente horizontal de temperatura) se localiza entre as isóbatas de 100 m e 200 m à medida em que os dados são coletados. Em outras palavras, o ano de 1970 se segue e a posição do gradiente se afasta da costa até atingir a isóbata de 200 m em fevereiro de 1971.

Os dados amostrados por *Miranda* [1982] em seu trabalho, mostram de maneira bastante significativa a posição da frente na região oceânica da Bacia de Campos. Novas técnicas na tomada de dados foram importantes para se mapear as frentes, mesmo antes da apresentação deste referido autor, como por exemplo a introdução de imagens de temperatura da superfície do mar aos estudos oceanográficos. O primeiro registro de que se tem ideia no estudo das frentes é de *Halliwel & Mooers* [1983] para obter a posição estatística da frente da corrente análoga à CB no hemisfério norte, a Corrente do Golfo.

Figura 1.7: Comparação da posição das frentes médias da CB por *Garfield* [1990] (losangos negros) e por *Silveira et al.* [2008] (pontilhado vermelho) com a posição da isóbata de 200 m. Adaptado de *Silveira et al.* [2008].

Como citado anteriormente, o mapeamento das frentes para a porção SE do oceano Atlântico através de sensoriamento remoto foi amplamente utilizado por *Garfield* [1990], que se utilizou de cinco anos de imagens e definiu a frente térmica da CB localizando-a junto a isóbata de 200 m. *Silveira et al.* [2008] obtiveram resultado semelhante na definição da frente média da CB. Recentemente, *Lorenzetti et al.* [2009] buscaram auxílio nas imagens termais do sensor de *AVHRR/NOAA* para mapear a frente da CB através de metodologia objetiva e original ao largo do Sudeste brasileiro. Com isso os autores mostraram que devido à intensa atividade de mesoescala da CB nos intermédios do Cabo de São Tomé e Cabo Frio, a frente da corrente se apresenta bem espalhada em relação ao posicionamento médio da frente. Ainda, as conclusões de *Lorenzetti et al.* [2009] mostram que acima de 22°S ocorre a intensificação da feição em cerca de 20

km adentro da isobatimétrica de 200 m. Assim como é mostrado em *Miranda* [1982] e *Garfield* [1990], o referido autor mostra que a frente térmica da CB apresenta grande variabilidade sazonal. Nos períodos de verão e outono, a feição está deslocada a oeste da isóbata de 200 m; nos períodos de inverno e primavera, a frente encontra-se mais espalhada, porém a média para estes períodos indica que a feição em questão localiza-se entre as isóbatas de 200 e 1000 m.

Os estudos acima demonstram as características da frente termal de superfície sobre a margem continental sudeste brasileira, resultado do contato entre duas massas de água: a AC e a AT. Conforme descrito em *Lorenzetti et al.* [2009], esta frente delimita o contato entre águas oceânicas e sobre a plataforma. Seria assim, representativa da borda costeira (ou borda continental) da CB segundo esses autores. Esta frente, de acordo tanto com *Garfield* [1990] como *Silveira et al.* [2008], serve de excelente traçador para os movimentos meandranes da CB. Entretanto, existem ainda questões em aberto sobre a relação entre a frente termal de superfície, a frente termal em nível picnoclínico e a frente de velocidade da Corrente do Brasil.

1.6 Hipótese Científica

Apresentou-se até aqui uma síntese acerca dos principais pontos que remetem aos padrões de circulação do Atlântico Sul, em especial a Corrente do Brasil que bordeja a margem continental brasileira. Foram expostas também as principais características a respeito da atividade de mesoescala na região da Bacia de Campos e também uma breve descrição em termos de frentes termais oceânicas para a costa sudeste. Face às limitações de conjuntos de observações e ausência, até a presente data, de simulações numéricas regionais de caráter preditivo, uma maior investigação sobre o fenômeno do meandramento e sua evolução temporal deve resultar na concatenação entre o posicionamento termal da frente da CB e a estrutura tridimensional da corrente. Para que tal seja possível, parte majoritária da energia associada à variabilidade do sistema hidrodinâmico precisa estar confinada a fenômenos de baixa frequência-ditos subinerciais. E este fato parece ser confirmado pelos estudos de *Lima* [1997] e *Silveira et al.* [2008]. Assim, levantamos as seguintes questões:

- Como é a estrutura tridimensional da Corrente do Brasil na Bacia de Campos?
- Existe alguma relação entre a frente termal costeira e a frente de velocidades da CB?
- São as velocidade de corrente, em escala subinercial dominadas pelos meandros e vórtices resultantes do arqueamento ciclônico ou anticiclônico da CB?

Com o intento de responder a estas perguntas, a **Hipótese Científica** que norteia este trabalho é:

A variabilidade subinercial das velocidades no talude da Bacia de Campos é governada pelo meandramento frontal da CB, que tem os deslocamentos da frente térmica de superfície como seu traçador.

1.7 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é a avaliação das velocidades associadas ao meandramento frontal da CB como características do sinal de velocidade observado em escala subinercial na Bacia de Campos. Almeja-se, portanto, acrescentar novas informações acerca da variabilidade de mesoescala da CB, calcando-se no mapeamento da frente termal oceânica através de imagens de satélites. Para alcançar o objetivo central, elaboramos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o perfil vetical médio de velocidades típico da CB;
- Identificar o padrão médio horizontal de velocidades em quase-superfície da CB;
- Mapear a frente da CB utilizando imagens de satélite da temperatura da superfície do mar;
- Reproduzir o modelo paramétrico da CB proposto por *Schmidt et al.* [2007] e calibrando-o com dados *in-situ*; e
- Aplicar o modelo reproduzido acima para o conjunto de dados sinóticos da Bacia de Campos que serão apresentados nesta dissertação.

Os dados do fundeio Marlim, gentilmente fornecidos pela PETROBRAS, servirão de base para a caracterização do perfil vertical de velocidade da Corrente do Brasil. Para a identificação dos padrões médios horizontais de velocidade em quase-superfície da CB serão utilizados os dados também gentilmente servidos pela PETROBRAS e que fazem parte da primeira rede de Oceanografia Operacional do país (denominada de projeto OCEANOP). Tratam-se de estações oceanográficas instaladas em plataformas de exploração que realizam medições do local com perfiladores de velocidade. Adicionalmente, colaboram para o entendimento da estrutura seccional de velocidade na Bacia de Campos, os dados quase-sinóticos das comissões hidrooceanográficas da Marinha do Brasil. Neste caso, e em particular nesta dissertação, serão utilizados os dados da Comissão Oceano Sudeste II realizada pela Marinha do Brasil. Para mapear a frente da CB, utilizaremos imagens termais de satélites orbitais. Por fim, para construirmos o modelo paramétrico proposto em três dimensões, utilizaremos aquele que foi proposto por *Schmidt et al.* [2007] para a estrutura seccional da corrente, interpolação objetiva para a construção dos campos em toda a extensão da Bacia de Campos, juntamente com os dados *in situ* supracitados.

Capítulo 2

Conjunto de Dados Correntográficos

2.1 Preâmbulo

A finalidade deste Capítulo 2 é apresentar os principais dados correntográficos que permitirão o desenvolvimento do modelo paramétrico em escala regional. Os dados oriundos de uma linha de fundeio, o Fundeio Marlim da PETROBRAS, servirão de base para a descrição do perfil médio vertical da Corrente do Brasil. Já, os dados que seguem ao projeto denominado OCEANOP da PETROBRAS servirão para o mapeamento regional do modelo, proposto no penúltimo capítulo deste trabalho.

2.2 O Fundeio Marlim

2.2.1 Descrição dos Dados

O conjunto de dados contidos nesta seção corresponde ao Fundeio Marlim (Figura 2.1), nome dado a este ponto por fazer parte da região de exploração da PETROBRAS na Bacia de Campos, o *campo MARLIM*. Os dados foram coletados durante o projeto "PROCAP-1000 - Programa de Capacitação Tecnológica em Águas Profundas. O fundeio está localizado nas coordenadas 22°42'S e 40°12'W na isóbata de 1250 m onde onze (11) correntômetros foram dispostos para que fossem realizadas as medições ao longo de todo o perfil. As profundidades para estas medições iniciam-se aos 50 m e perfilando através dos 100 m, 250 m, 350 m, 450 m, 550 m, 650 m, 750 m, 950 m, 1050 m,

1200 m. Ainda, o conjunto de medidas contempla uma série ao longo do ano de 1992 aos meses de fevereiro até fim de dezembro com medições de 1 em 1 hora. Os dados referentes aos 5 primeiros meses desta série foram previamente investigados por *Silveira et al.* [2008], o qual estendemos a aplicação da metodologia utilizada pelos autores na presente análise.

Figura 2.1: Localização geográfica do Fundeio correntográfico gentilmente fornecido pela PETROBRAS.

2.2.2 Processamento dos Dados do Fundeio

Os dados do correntômetro analisados foram previamente analisados pela fornecedora desta série correntográfica. Ao que foi passado, os dados sofreram rigorosos testes de consistência, garantindo assim a confiabilidade dos dados; vale destacar ainda que a série correntográfica já sofreu correção em sua declinação magnética para o Norte Verdadeiro. Vale ainda destacar que os dados, como mostra a Figura 2.2 sofreram uma interpolação do tipo *linear* em alguns períodos faltantes da série, como é caso para os períodos dos meses entre maio e junho a todas as profundidades. Essa informação somente foi possível identificar ao momento de plotagem dos *stick-plots*, uma vez que esta informação não nos constava no momento de aquisição dos dados.

O conjunto de informações recebidos em laboratório passou pelo segundo teste: o

controle na remoção de *spikes* para em seguida ser utilizado um filtro passa-baixa tipo *Lanczos* de 40 horas. É possível observar na Figura 2.2 a série correntográfica ao longo de todo o ano para as profundidades de 50 m, 150 m, 350 m, 750 m e 900 m após a filtragem.

Figura 2.2: Série temporal de velocidade dos correntógrafos após filtragem tipo *Lanczos*. Nesta representação estão plotados a corrente em 5 níveis de amostragens - 50, 150, 350, 750 e 900 m de profundidade. Os três primeiros níveis representando o escoamento da CB e os dois últimos níveis representados correspondentes à Corrente do Contorno Intermédiária (CCI).

A importância do uso destes dados está diretamente relacionada à excelente resolução vertical deste fundeio. Lembre-se que são 11 correntômetros dispostos verticalmente em profundidades que se limitam de 50 m até cerca de 1200 m de profundidade.

De maneira geral, os vetores resultantes da média temporal das séries são apresentadas na Figura 2.3

Figura 2.3: Vetores de velocidade média para os 11 correntômetros do Fundeio Marlim. Em tons de vermelho estão representadas as velocidades médias temporais da Corrente do Brasil em sua extensão vertical. As cores azuis denotam os valores médios associados à CCI. O eixo cartesiano no canto inferior direito da figura mostra o novo sistema de coordenadas rotacionados longitudinal e normal às isóbatas.

A figura mostra que o escoamento médio tanto ao domínio da Corrente do Brasil (vetores representados em vermelho) quanto à CCI (vetores representados em azul) segue aproximadamente o padrão das isóbatas locais. À medida que se atinge maiores profundidades, a CB diminui sua magnitude e em aproximadamente 350 m apresenta inversão de sentido. A partir desta já é possível constatar o domínio da Corrente de Contorno Intermidiária com escoamentos médios ao longo da profundidade em direção ao N-NE (o que ocorre opostamente à Corrente do Brasil). A Tabela 2.1 faz menção aos valores médios encontrados para a CB e CCI.

Desta maneira, observa-se que o escoamento dominante é caracterizado principalmente ao longo das isóbatas. A Tabela 2.1 mostra que os dados originalmente fornecidos pela PETROBRAS em termos das componentes zonal e meridionais, neste momento v e u foram redenominados para ao longo das isóbatas e a componente perpendicular (normal) às isóbatas do talude continental.

Tabela 2.1: Valores médios encontrados para as componentes normal ($\bar{u}$) e paralela ($\bar{v}$) às isóbatas para o Fundeio Marlim da Bacia de Campos.

Nível	$\bar{u}$ (m s ⁻¹)	$\bar{v}$ (m s ⁻¹)
50	-0,03	-0,31
100	-0,03	-0,26
250	-0,06	-0,08
350	-0,05	0,01
450	-0,06	0,08
550	-0,05	0,11
650	-0,01	0,18
750	-0,04	0,19
950	-0,05	0,22
1050	-0,03	0,22
1200	-0,01	0,09

Como foi visto na tabela acima, os dados estão discretizados para determinadas profundidades. Assim, dispondo destes dados, é possível obter um perfil contínuo de velocidade ao longo da coluna de água? Claramente a resposta é sim utilizando simples interpoladores que os programas computacionais reservam para este tipo de cálculo. Porém, neste trabalho, seguindo *Silveira et al.* [2008], será aplicado um método simples de interpolação vertical dos perfis que se baseia nos *modos dinâmicos* normais. Além de propiciar o processo de interpolação, este método permite avaliar o conteúdo modal do perfil em questão. Este método referenciado em questão foi denominado por *Silveira et al.* [2008] de "interpolação dinâmica" e é descrito a seguir.

Para a realização dos cálculos da interpolação dinâmica, dois procedimentos devem ser adotados. Em primeiro é necessário o cálculo e alisamento da frequência de Brunt Väisällä ($N(z)$) a partir dos dados hidrográficos disponíveis à região de estudo. Posteriormente faz-se a resolução do problema de autovalor numericamente para encontrar os modos dinâmicos. Os modos são partes funcionais de $N(z)$.

Deste modo, a relação dos modos dinâmicos com o perfil vertical de velocidade pode ser escrita em forma de uma expansão

$$\bar{v}(x_m, y_m, z) = \sum_{i=0}^N \bar{V}_i(x_m, y_m) F_i(z), \quad (2.1)$$

onde $\bar{v}(x_m, y_m, z)$ representa a velocidade média na posição do Fundeio Marlim (x_m, y_m) , $F_i(z)$ é o i -ésimo modo normal de estrutura vertical, $\bar{V}_i(x_m, y_m)$ é a amplitude associada ao i -ésimo modo.

$$N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial z}, \quad (2.2)$$

em que o termo ρ_0 representa o valor médio da densidade da coluna de água.

A frequência de $N(z)$ utilizada neste trabalho é aquela calculada e alisada por *Silveira et al.* [2008]. O perfil foi cedido pelo orientador desta dissertação e foi obtido a partir dos dados hidrográficos das estações oceanográficas dispostas na região da Baía de Campos durante os cruzeiros de manutenção do Fundeio Marlim.

A solução do problema para os autovalores, é obtido através da separação de variáveis da equação da conservação de vorticidade potencial quase-geostrófica [*Flierl*, 1978; *Pedlosky*, 1987]. Os autovetores são os modos dinâmicos enquanto os autovalores associados são definidos representam o inverso do quadrado dos raios de deformação baroclínicos [*Flierl*, 1978; *Houry et al.*, 1987; *Silveira et al.*, 2000a]. Este problema de autovalor, também conhecido como problema de autovalor de Sturm-Liouville é a resolução do sistema abaixo para encontrar $F_i(z)$.

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2(z)} \frac{\partial F_i(z)}{\partial z} + \frac{1}{Rd_i^2} F_i(z) = 0; \quad \frac{\partial F_i(z)}{\partial z} = 0 \text{ em } z = 0, -H, \quad (2.3)$$

onde Rd_i representa o i -ésimo raio de deformação.

Uma vez equacionado o perfil de $N^2(z)$, o sistema de Equações 2.3 resolve numericamente os valores para os raios de deformação, como mostra a Tabela 2.2 e os correspondentes modos dinâmicos (Figura 2.4) de estrutura vertical. Para isso, considerou-se nos cálculos que o parâmetro de Coriolis f fosse equivalente a $f = 5,6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e a profundidade considerada foi aproximada ao nível correntográfico de 900 m ($H_0 = 900$ m).

Tabela 2.2: Raios de deformação para o Sistema CB na Bacia de Campos.

Raio	Valor (km)
Rd_0	1810
Rd_1	25
Rd_2	13
Rd_3	09

Figura 2.4: Modos dinâmicos da estrutura vertical da Corrente do Brasil e da CCI na região da Bacia de Campos. Os modos plotados são: o modo barotrópico e os três primeiros modos baroclínicos.

Ao ser feita a aproximação de tampas rígidas, o primeiro autovetor é sempre zero e portanto o valor de Rd_0 é inf. Para tanto, o valor calculado analiticamente para o primeiro raio de deformação é:

$$Rd_0 = \frac{\sqrt{gH_0}}{|f|} \quad (2.4)$$

Exemplos de aplicações como esta assim como a avaliação da composição modal foram realizadas por *Silveira et al.* [2000a], como citado anteriormente, para a Corrente Norte do Brasil; e mais recentemente por *Urbano & Silveira* [2003] para os domínios do Atlântico Tropical.

Para a estimativa das amplitudes, a idéia básica consiste em usar a expressão convencional para a projeção modal dada por

$$\bar{V}_i(x_m, y_m) = \frac{\int_{z_d}^{z_s} F_i(z) \bar{v}(x_m, y_m, z) dz}{\int_{z_f}^{z_s} F_i^2(z) dz} \quad (2.5)$$

sob a aproximação da regra de integração numérica do ponto médio. Na Equação 2.5, os limites de integração z_f e z_s correspondem às profundidades do nível correntográfico mais profundo utilizado (900 m) e do nível mais raso medido (50 m).

Assim, a Figura 2.5 representa o resultado da interpolação dinâmica para todo o nível amostrado do Fundeio Marlim excetuando-se as profundidades de 1050 e 1200 m. Percebam que toda a coluna de água foi amostrada para determinado tipo de interpolação em cujo dados foram submetidos. Entretanto, desta figura o mais importante de se presenciar a região em que há o domínio da Corrente do Brasil, ou seja, os 350 primeiros metros de coluna de água. A Figura 2.5 vem corroborar os dados apresentados na Figura 2.1 em que o domínio da CB ocorre nesta camada fato este também citado na literatura para a região da Bacia de Campos. Claramente, é possível notar que as velocidades negativas indicam o escoamento orientado para S-SO com dominância do primeiro modo baroclínico (note, a inversão a partir da profundidade de 350 m). Com isso, o modelo paramétrico da corrente deve ser representativo até aproximadamente este nível, onde já é possível encontrar, a partir de tal profundidade o domínio da Corrente de Contorno Intermediária.

Figura 2.5: Perfil vertical de $\bar{v}$ do Fundeio Marlim. Os pontos em vermelho representam a média dos registros pontuais dos correntômetros do fundeio nas determinadas profundidades. A linha em azul exibe o resultado do processo de interpolação dinâmica considerando o uso dos dois primeiros modos dinâmicos da corrente.

2.3 O Sistema OCEANOP - Oceanografia Operacional

2.3.1 Descrição dos Dados

A região da Bacia de Campos também é conhecida por sua grande importância econômica no cenário petrolífero. A maior parte da produção de petróleo é oriunda desta região com inúmeras plataformas, e algumas representadas na Figura 2.6. A importância na região de exploração deste recurso fez com que a PETROBRAS iniciasse um projeto de monitoramento contínuo das condições meteo-oceanográficas da bacia e portanto, em cada plataforma são instalados equipamentos que medem as principais características do meio. Estas informações são armazenadas e enviadas para um banco de dados central da companhia para que neste local sejam tratados e qualificados todos os dados. A este projeto a PETROBRAS denominou de *OCEANOP - Oceanografia*

Operacional.

Figura 2.6: Localização dos pontos amostrais das plataformas de petróleo inseridas no sistema OCEANOP.

Os dados fornecidos e analisados neste documento referem-se também a medições feitas por ADCP. Entretanto, os registros feitos por estes equipamentos estão presos às plataformas de exploração da empresa e a tomada das medições é feita pontualmente de acordo com a localidade das plataformas de operação. Deste modo é possível que as variações em escala temporal e o comportamento da corrente ao longo dos pontos sejam registrados para que sejam feitas as análises acerca do comportamento da corrente do mesmo modo que o fundeio descrito acima. A diferença entre os equipamentos em questão, apesar de se referirem à mesma propriedade física (ou seja, velocidade) é que a linha de fundeios necessita de vários equipamentos que permitam a perfilagem da velocidade ao longo da coluna de água, enquanto um único ADCP (sejam eles fixos nas plataformas ou móveis - objeto de estudo do Capítulo 3) trabalham na diferença da frequência do tempo que o som emitido retorna aos transdutores - este denominado

de efeito *Doppler* - em diferentes níveis de amostragem

Os dados que foram gentilmente cedidos pela PETROBRAS estão dispostos em longas séries de tempo que variam desde 2005 até meados e por vezes fim do ano de 2009. Portanto são séries correntométricas longas e que atingem profundidades de cerca de 800 m e a metodologia aplicada aos dados de ADCP, como será relatado mais adiante, consistirá na análise das componentes subinerciais posto que os registros fornecidos pela PETROBRAS já sofreram pré-tratamento para a remoção de dados que não representem a realidade ou que sofreram algum tipo de adulteração. Ainda, os dados, ao que consta pela fornecedora, sofreram correção junto a declinação magnética, orientando-os em conformidade ao Norte verdadeiro, tal e qual os dados de fundeio.

2.3.2 Processamento dos Dados de Corrente Medidos Através de ADCP

Tratamento dos Dados - OCEANOP

Como citado no Subitem 2.3 os dados de ADCP das plataformas instaladas na Baía de Campos e monitoradas continuamente pelo projeto intitulado OCEANOP já sofreram o pré-processamento e foram cedidos pela PETROBRAS. Portanto, a principal análise acerca dos dados é a remoção das principais componentes atribuídas às medições de corrente das plataformas.

Em outras palavras o grupo de oceanografia operacional da PETROBRAS tem por objetivo verificar a qualidade dos dados através de testes de domínio, de repetição sucessiva e de valores espúrios além de serem feitas as correções da declinação magnética afim de se obter a verdadeira orientação dos dados quanto ao norte verdadeiro.

A metodologia aplicada aos dados refere-se ao que foi exposto por *Miranda et al.* [2002] aos dados medidos pelo equipamento. A decomposição de um vetor $\vec{v}$ qualquer nas componentes u e v em relação aos eixos Ox e Oy é dado por:

$$u = V \cos(\theta) \quad e \quad v = V \sin(\theta) \quad (2.6)$$

Na equação representada acima V é o módulo do vetor e θ é o ângulo trigonométrico formado entre os eixos das abscissas (Ox). Supondo que $\vec{v}$ represente o vetor veloci-

dade em um ponto qualquer. Assim, utilizando a variável dd como sendo a medida no sentido horário com origem no norte magnético deve-se resolver a seguinte proposição: como decompor o vetor velocidade com as Equações 2.6? Assim, a providência que deve ser tomada é fazer com que a origem do ângulo dd seja coincidente com a de θ pois somente para ângulos com essa origem são válidas as igualdades trigonométricas das Equações em 2.6. Portanto o ângulo θ passa a ser calculado por:

$$\theta = 90^\circ - dd \quad (2.7)$$

Para a redução de uma direção magnética dd ao Norte Verdadeiro, é necessário aplicar na Equação 2.8 a direção pelo ângulo de declinação magnética referido à carta. Portanto tem-se que

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D), \quad (2.8)$$

onde D representa o ângulo de declinação magnética associado às cartas nauticas para cada ano até o presente.

A partir deste conjunto de dados, a velocidade foi decomposta nas componentes u e v a partir da Equação 2.6, porém levemente modificada transformando os ângulos de graus para radianos, como mostra a equação a seguir.

$$u = V \cos\left(\theta \frac{\pi}{180}\right) \quad e \quad v = V \sin\left(\theta \frac{\pi}{180}\right) \quad (2.9)$$

Após a decomposição da intensidade ao longo das plataformas associadas ao estudo da região, os dados foram filtrados de forma a selecionar as frequências de interesse à proposta do trabalho. Em outras palavras, a energia associada aos períodos supra-inerciais foram removidos por um filtro do tipo "Lanczos" (o mesmo utilizado para o caso do fundeio correntográfico) com frequência de corte de 40 horas.

Apesar da representatividade temporal dos dados, apenas o segundo semestre de 2007 pôde ser aproveitado para o determinado estudo. Primeiramente porque nem todos os conjuntos de dados contemplam a variabilidade temporal do sistema Corrente do Brasil com registros que variam desde 2005 até 2009. Em segundo, entre os períodos apresentados, as séries possuem grandes espaçamentos de dados que, uma simples interpolação linear resolveria o problema. Portanto, as quatro plataformas, representadas na Figura 2.6, possuem dados sem a necessidade de interpolar longos períodos de dados, é que utilizaram-se os dados referentes ao segundo semestre de 2007.

Outro detalhe importante acerca dos dados é o que mostra a Figura 2.7. O eixo de máxima velocidade da Corrente do Brasil está centrado em aproximadamente 50 m de profundidade. Dessa maneira, os dados das plataformas foram separados para esta profundidade e plotados conforme Figura 2.7. Estão representadas as três plataformas que se encontram em águas mais profundas (P48, FPSOBR e P40) designadas no gráfico de 1, 2 e 3 respectivamente e a quarta próximo à região de quebra da plataforma continental na Bacia de Campos, a PPG1 e designada como plataforma 4.

A Figura 2.7 mostra que em 50 m para as plataformas *off-shore* a Corrente do Brasil flui para S-SO com maiores intensidades nos pontos 1 e 3 (P48 e P40). Para a plataforma 2 (FPSOBR) o escoamento se apresenta bem menos intenso que suas análogas, orientado em direção à SO. Em todos os conjuntos de *stick-plots* é possível notar inversões no padrão médio de escoamento da CB, já citado acima, indiciando possivelmente a presença das feições de mesoescala descritas no Capítulo 1, seção 1.4 - Os Meandros e Vórtices da CB.

A Figura 2.8 e a Tabela 2.3 exibe os vetores médios de corrente do sistema OCEANOP para a profundidade de 50 m do segundo semestre de 2007, compreendido dos dias primeiro de julho ao dia 31 de dezembro. Percebe-se que nas plataformas mais oceânicas, a direção das velocidades médias segue os contornos batimétricos, indicando que apesar do período relativamente curto esse estado médio é provavelmente representativo de um estado básico de escoamento. Adicionalmente, observamos que a velocidade média sobre a plataforma mais costeira (PPG1), é praticamente nula, atestando que a estrutura da Corrente do Brasil está confinada a leste de sua localização.

Este conjunto de dados servirá para entrada do modelo ao que tange a variabilidade temporal deste no estudo de alguns casos específicos como será mostrado no Capítulo 5. Em outras palavras, para os dados em 50 m serão separadas as séries de tempo respectivas e avaliado o comportamento destas juntamente com imagens termais de satélite para a construção da estrutura temporal para este caso. Para tal experimento, serão separados ao longo de todo o registro eventos onde ocorrem possíveis inversões na corrente, fato este que corrobora ao estudo de caso do meandramento da CB ao largo da Bacia de Campos. Mais adiante, serão apresentados os estudos de caso acerca dessas feições

Tabela 2.3: Velocidade média de corrente para o período que compreende o segundo semestre de 2007 (do dia primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano) das componentes u e v do sistema OCEANOP.

Plataforma	u ($m s^{-1}$)	v ($m s^{-1}$)
FPSOBR	-0.06	-0.35
P40	-0.33	-0.24
P48	-0.42	-0.40
PPG1	0.01	0.03

Figura 2.7: Figura tipo *stick-plot* representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do segundo semestre de 2007 das plataformas P48, FPSOBR, P40 e PPG1, enumeradas de 1 a 4 respectivamente.

Figura 2.8: Distribuição dos vetores médios de velocidade de corrente do sistema OCEANOP medidos em 50 m para o período de primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano, correspondente à média das séries exibidas na Figura 2.7.

Capítulo 3

Comissão Oceano SE II e o Conjunto de dados de TSM

3.1 Preâmbulo

Este terceiro capítulo da dissertação trata sobre os conjuntos de dados coletados a bordo do N. Oc. Antares (de outubro a dezembro de 2002) e também da aquisição, tratamento e processamento das imagens de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) adquiridas através da sonda *Pathfinder* para todos os conjuntos de dados analisados em questão. Os dados *in situ* cedidos pela Marinha do Brasil fornecerão as principais características a respeito da estrutura seccional da CB na região da Bacia de Campos, ou seja, como é, até que profundidade e onde se localiza o escoamento da CB, bem como os valores de velocidade e transporte da corrente. O segundo conjunto de dados tratados nesta seção são de imagens termais obtidas na Bacia de Campos. Através do uso de imagens de satélite, é possível determinar a posição da frente térmica entre as latitudes de 20,5° e 24°S. A estimativa da posição das frentes termais da região servirão como ponto chave para a estruturação espacial do Modelo Paramétrico da CB, idealizado por *Schmidt et al.* [2007], aplicado para os entornos da porção norte da costa sudeste brasileira e apresentado a partir do Capítulo 4.

3.2 A Comissão Oceano Sudeste II

3.2.1 Descrição dos Dados

A Marinha do Brasil tem por iniciativa a coleta de dados oceanográficos para obtenção de amostragens ambientais em toda a região dos limites territoriais do litoral brasileiro. Denominadas de **Comissões** as campanhas oceanográficas da marinha subdividem-se de acordo com a região de estudo em que são coletados para análise dos mesmos.

A bordo do N/Oc. Antares a *Comissão Oceano Sudeste II*, ou *OCSE-II*, realizou medições ao longo da margem continental sudeste brasileira no período de 22 de outubro de 2002 a 03 de dezembro do mesmo ano. As presentes coletas na área de Oceanografia Física foram feitas através de perfilagens de temperatura e salinidade utilizando-se um equipamento denominado de CTD da marca *Seabird*, modelo *SBE 9Plus*.

Os dados de CTD para esta presente dissertação não serão analisados. Outra aquisição, porém, é de fundamental importância à condução deste trabalho que são os dados medidos através de um correntógrafo acústico de casco (*VM-ADCP*). O equipamento que recebe as iniciais descritas há pouco é uma junção das primeiras letras de cada palavra com o seguinte significado: **Vessel Mounted Acoustic Doppler Current Profiler** - *Perfilador de Corrente por Efeito Doppler Montado no Casco*. Basicamente, o ADCP é um equipamento projetado para medir a velocidade e direção do escoamento de água através do efeito Doppler. É um instrumento que transmite ondas sonoras através da água. As partículas transportadas pela corrente de água refletem o som de volta para o instrumento que percebe o eco através de sensores, fazendo com que ele reconheça as diferentes profundidades e as velocidades.

O efeito Doppler refere-se à mudança de frequência do sinal transmitido pelo sonar, causada pelo movimento relativo entre o aparelho e o material em suspensão da água sob a ação do feixe das ondas sonoras. Um feixe sonoro, que é emitido com uma frequência F_1 , ao ser refletido por uma partícula em movimento, retorna com uma frequência F_2 . Deste modo, o equipamento é capaz de quantificar essa alteração na frequência e associá-la à velocidade e direção de deslocamento das partículas e, por consequência, do fluido em que elas estão imersas passivamente. Desta forma, a suposição básica desse método é que as partículas dissolvidas na água se deslocam

com a mesma velocidade do escoamento.

Os dados de *VM-ADCP* foram coletados em toda a campanha da OCSE-II. Para tal, a Marinha do Brasil utilizou em sua amostragem de coleta o ADCP da marca *RD Instruments* com frequência de 75 KHz. O total da campanha perfaz aproximadamente 4500 milhas náuticas, composta de sete radiais hidrográficas as quais abrangeram grande parte de Baía de Campos e a porção norte da Baía de Santos, como é observado na Figura 3.1. A perfilagem de corrente foi realizada em aproximadamente 100 camadas equipaçadas verticalmente de 8 m cada uma totalizando o alcance máximo de 800 m. Vale ainda lembrar que à medida que aumenta-se a profundidade na amostragem geral de correntes utilizando-se este tipo de equipamento, mais passível de interferências, dados espúrios e aquisições inexistentes serão computadas. A metodologia e o emprego do tratamento dos dados brutos de *VM-ADCP* serão relatados mais adiante, quando será discutida a metodologia empregada aos dados.

Figura 3.1: Trajetória amostrada do ADCP de casco (VM-ADCP) pela Comissão Oceano Sudeste II da Marinha do Brasil.

3.2.2 Processamento dos dados de ADCP

Diferentemente do que foi descrito para os dados de ADCP fundeados em plataforma do sistema OCEANOP, os dados da comissão da Marinha do Brasil não sofreram nenhum tipo de pré-processamento. Dessa maneira existem duas possibilidades que podem ser utilizadas para o processamento dos mesmos: a primeira técnica refere-se basicamente ao uso dos *softwares* desenvolvidos pelo próprio fabricante do instrumento em cuja dissertação não será abordado tendo-se em vista a aplicação de outro método para o tratamento dos registros de VM-ADCP.

A segunda técnica baseia-se no protocolo da *Common Ocean Data Access System* (CODAS), um pacote de programas desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Universidade do Havaí.

Promediação Temporal

O método de obtenção dos dados de ADCP, como discutido anteriormente, depende das diferentes frequências recebidas pelo sinal através do efeito Doppler. Com isso a aquisição dos dados é bastante ruidosa, ou seja, existem muitos sinais de velocidade da corrente que o equipamento capta e o armazena na forma de dados. Desta maneira é necessário que uma das primeiras etapas do processo de processamento dos dados seja a remoção dos ruídos.

Os feixes sonoros emitidos pelo equipamento são denominados de *ping*, resultando em um perfil de velocidade que atinge valores superficiais até a profundidade em que o feixe acústico penetra na coluna de água. O intervalo amostral dos *pings* para a expedição II da Marinha do Brasil foi de 3 segundos. A aquisição dos dados, feito através do *software VMDAS 1.2.0.8*, que recebe os sinais diretamente do VM-ADCP, dispõe de promediações temporais. Esta configuração permite que sejam criados basicamente três tipos de arquivos de saída: os brutos, que contém os *pings* inalterados, os arquivos de médias curtas (*Short Time Average - STA*) e os de médias longas (*Long Time Average - LTA*). Este trabalho optou por realizar o processamento dos dados com as médias longas, estas compostas de arquivos em intervalos de 10 minutos, uma vez que as técnicas apresentadas pela Universidade do Havaí são significativas ao objetivo proposto.

Cálculo da Velocidade Absoluta

As velocidades medidas pelo VM-ADCP, por se tratarem de grandezas vetoriais, necessitam de um referencial para que a tomadas dos dados possam medir com exatidão os valores da corrente. A amostragem desses dados torna-se particularmente mais complexa pois o referencial que é adotado para determinadas práticas não é fixo. Para solucionar este tipo de problema e seja possível obter as velocidade absolutas, é necessário o acoplamento do sistema de posicionamento por satélite (GPS) e uma agulha giroscópica (GIRO), pois o sistema de GPS fornece ao instrumento as coordenadas geográficas do navio e a GIRO indica a direção em que a proa está voltada em relação ao norte verdadeiro.

Aparentemente o método citado acima parece simples. As respostas de dois dos três sistemas interligados ADCP-GPS-GIRO são praticamente simultâneas a qualquer mudança, seja ela de intensidade ou mudança de orientação. Entretanto, a GIRO apresenta uma resposta mais lenta do que a necessária à aquisição dos dados principalmente em trechos onde o navio executa manobras em que há mudanças em sua aceleração. Nessas porções que existe a diferença nas acelerações, a GIRO não se comporta de forma adequada podendo acarretar erros na medição da magnitude e direção da corrente.

Para suprir esta deficiência associada à GIRO, adotou-se o procedimento de calibração proposto em Joyce [1989] e Pollard & Read [1989]. Essa calibração é feita apenas nos trechos onde seja suspeito o mal funcionamento da GIRO. Pollard & Read [1989] consideram o fato de que no caso de mal funcionamento da GIRO fica possível diagnosticar os desvios resultantes e que os mesmos possuem a tendência de serem constantes para cada sistema ADCP-GPS-GIRO. Este método recebe o nome de *Watertracking* pois se utiliza de uma camada de referência para o cálculo da velocidade absoluta do navio em analogia ao *Bottomtracking*, comumente utilizado em águas rasas utilizando como referencial fixo o fundo oceânico.

O presente estudo foca principalmente na CB fluindo ao largo do talude continental, ou seja, em grandes profundidades, onde não há trechos rasos em que o ADCP consiga trabalhar em *Bottomtracking*. Para tanto, escolheu-se a décima oitava camada, que corresponde a profundidade de 150 m aproximadamente. Essa escolha se deve a

dois fatores: em primeiro, evitar regiões muito profundas em que o sinal de ADCP tem menor capacidade de penetração e em segundo, evitar maior variabilidade espacial da corrente em níveis mais rasos.

Remoção de Perfis Espúrios

Existem formas de diagnosticar a qualidade dos dados provocados por diferentes fatores: falhas mecânicas, presença de organismos na coluna de água, incrustações e até mesmo bolhas nos transdutores. A terceira etapa consiste na eliminação dos perfis considerados inadequados por terem sofrido danos no momento de sua aquisição. Com isso, o parâmetro mais utilizado para este propósito é a velocidade vertical, pois comparativamente as velocidades verticais são uma ordem de grandeza inferiores às velocidades horizontais no oceano.

Outro método de diagnosticar problemas no conjunto dos dados são as velocidades horizontais. É bastante prudente notar que as velocidades máximas horizontais dos oceanos, para a Corrente do Brasil, não possuam magnitude superior a 2 m s^{-1} e portanto velocidades superiores a essa intensidade e possam ser descartadas.

Por fim, dados que não atingiram os 50% do chamado *Percent Good* foram removidos. Ainda assim, caso algum dado não significativo tenha permanecido, ou seja, tenha passado através da análise do conjunto geral dos dados com qualidade superior ao *Percent Good*, o *software* gera seções de velocidade para que seja removido manualmente utilizando-se de inspeção visual. O mais importante neste caso foi buscar dados onde houvessem mudanças muito bruscas e isoladas na intensidade ou direção do vetor velocidade.

3.2.3 Resultados e Discussão

Assim, após a descrição da metodologia aplicada aos dados de VM-ADCP, esta sessão do trabalho prosseguirá apresentando os resultados referentes à campanha da Marinha do Brasil. As Figura 3.2 e 3.3 representam o resultado do processamento através do *software* CODAS a seguir.

Apesar da Figura 3.1 representar a trajetória percorrida pela Marinha nessa operação, apenas as três radiais apresentadas abaixo são representativas à Bacia de Campos. Dois

são os motivos escolhidos para que fossem determinadas essas radiais. Em primeira análise, esta campanha, como relatada acima, possui uma extensão temporal muito grande e logo a sinopcidade da coleta dos dados não é respeitada em toda a área percorrida. Portanto, apenas as três trajetórias apresentadas nesta figura possuem intervalo inferior a duas semanas de navegação e coleta dos dados. Em segunda análise, a OCSE-II abrange uma faixa territorial bastante ampla (que engloba amostragem fora da área de estudo em questão).

Assim, é importante destacar os aspectos fundamentais acerca das Figuras 3.2 e 3.3. São mostradas duas figuras que representam o escoamento da CB junto à Bacia de Campos em diferentes profundidades. A localização e configuração da corrente corresponde ao que é citado na literatura. A CB apresenta o formato de cúspide e está confinada entre as isóbatas de 200 m e 1000 m. O que se observa nos mapas próximos à superfície é um escoamento intenso, com o núcleo de velocidade próximo de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ e junto à quebra de plataforma nesta região. Os máximos de velocidade encontrados são relativamente altos, porém situam-se dentro dos limites apresentados na Tabela 1.1 e que revisa os valores historicamente encontrados na Bacia de Campos na literatura. A configuração espacial da corrente concorda com o descrito por *Silveira et al.* [2004] entre as latitude da Bacia de Campos, ou seja, a Corrente do Brasil permanece como uma corrente estreita, de aproximadamente 100 km de largura.

Há limitações em determinar a CB em toda sua extensão vertical a partir das medições do VM-ADCP. Este equipamento, por trabalhar em uma frequência de aproximadamente 75 KHz possui certa resolução vertical que possibilita a amostragem em aproximadamente 300 m de coluna de água. Para esta região de estudo *Silveira et al.* [2004] mostra que a região de domínio da Corrente do Brasil ultrapassa a profundidade de 400 m.

Próximo à região do Cabo de São Tomé, em 22°S , a Comissão da Marinha brasileira capturou em suas medições de corrente uma estrutura meandrante. Nesta radial, é possível notar a formação de uma estrutura ciclônica aos entornos desta indicando a formação do Vórtice de São Tomé.

Ao sul desta latitude, o escoamento da CB retoma a sua estrutura padrão, ou seja, na sua forma *gaussiana* convencional fluindo com o núcleo de velocidade máxima, da

Figura 3.2: Distribuição espacial dos vetores de velocidade amostrados por ADCP de casco durante a OCSE-II. Em sentido horário os níveis representados são: 0 m, 48 m, 80 m e 150 m.

ordem de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ ao longo da isóbata de 500 m. Ainda, o escoamento da CB apresenta também maior extensão horizontal à medida em que flui em direção ao sul.

A Figura 3.4 representa a seção de Velocidade Meridional mais ao norte do conjunto de dados da Bacia de Campos. Esta seção foi gerada a partir do mapeamento objetivo utilizando todos os níveis disponíveis com os dados que satisfizeram os critérios de qualidade do CODAS. Foi necessário, porém, limitar verticalmente (em cerca de 300 m) e espacialmente (aproximadamente 150 km) a seção vertical uma vez que a região de máximo interesse se encontra na região da quebra de plataforma da bacia.

Assim, é possível notar que a Corrente do Brasil possui seu escoamento orientado em direção ao sul (fato este corroborado à Figura 3.2) com valores que atingem cerca de $0,73 \text{ m s}^{-1}$. Ainda é importante notar que as velocidades medidas estão acima daque-

Figura 3.3: Distribuição espacial dos vetores de velocidade amostrados por ADCP de casco durante a OCSE-II. Em sentido horário os níveis representados são: 200 m, 250 m, 300 m e 350 m.

las descritas na literatura. A largura da Corrente do Brasil é da ordem de 100 km e juntamente com a espessura da CB, o transporte calculado é de cerca de 9,2 Sv - valor que se situa no limite superior da faixa apresentada na literatura (Tabela 1.1).

A Figura 3.5 representa a seção de vorticidade relativa gerada a partir da seção de velocidade meridional descrita acima.

Através da seção apresentada na Figura 3.4 e a Figura 3.5, pode-se identificar de forma inédita, a partir dos dados de velocidade, a frente de vorticidade da CB, demarcada por um lobo ciclônico na porção mais próxima da quebra de plataforma e o lobo anticiclônico na porção oceânica da Corrente do Brasil. Esta seção de vorticidade relativa indica que o cisalhamento horizontal da corrente é mais vigoroso aos primeiros 150 m de coluna de água além de apontar a região oceânica em que este cisalhamento

Figura 3.4: Seção vertical de Velocidade Meridional mais ao norte do conjunto de radiais da Bacia de Campos.

ocorre. Em outras palavras, o cisalhamento ocorre próximo à região da borda costeira da Corrente do Brasil, região em que se encontra a frente térmica.

A Figura 3.6 exibe o cálculo do Número de Rossby transversal à corrente, dado por

$$Ro = \frac{|\zeta|}{|f_0|},$$

onde ζ representa a vorticidade relativa e f_0 , o parâmetro de Coriolis médio da região em questão. O resultado mostra que para a Corrente do Brasil descrita a partir das velocidades instantâneas, Ro atinge $O(1)$ no centro da corrente, exibindo um comportamento muito similar a outras correntes de contorno oeste do oceano mundial, tais quais Corrente do Golfo, Kuroshio e Corrente das Agulhas. Ao contrário do que era in-

Figura 3.6: Seção vertical do Número de Rossby transversal para a radial mais ao norte da Bacia de Campos.

uma área pequena comparada à varredura espacial dos sensores de satélite. Claro que as medidas feitas pelos sensores à distância refletem os fenômenos que ocorrem em superfície, porém os registros feitos através das imagens auxiliam na compreensão de fenômenos sejam eles regionais ou mesmo em escalas globais.

Os dados de temperatura da superfície do mar podem ser obtidos por sensores que possuem sua operação em bandas de infra-vermelho ou até mesmo em bandas de microondas. Para este estudo, foram utilizados dados de infra-vermelho do satélite operado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA através dos sensores de AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). A data de seu lançamento é do ano de 1981 com cobertura espacial abrangendo todo o globo. As resoluções espaciais superam os sensores de microondas; neste caso os dados utilizados possuem resolução espacial máxima da ordem de 4 km e resolução temporal de 7 dias. A grande

vantagem de utilizar esse tipo de sensor é a representatividade espacial e com isso as feições de meso-escala são preservadas. Entretanto, esses sensores que se utilizam da banda de infra-vermelho possui um inconveniente pois as nuvens não são transparentes ao sensor e com isso a amostragem fica bem prejudicadas.

3.3.1 Processamento dos dados de TSM na Bacia de Campos

Na sessão anterior, foi dito que a resolução espacial aplicada a este estudo refere-se à de 4 km. Entretanto, o início do programa *Pathfinder* teve início na década de 90 com mapas de resolução da ordem de 9 km. Apesar de todo o sucesso do programa, alguns problemas surgiram em decorrência desta versão (versão 4 - resolução de 9 km, aproximadamente) e limitaram o uso. Como é possível destacar, existe forte influência de áreas que são atingidas por aerossóis atmosféricos causando grande ruído à captação dos dados. Há fatores como a máscara de terra, altamente grosseira, as quais impediam aplicações para as regiões litorâneas.

Em parceria com a *University of Miami's Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science* (RSMAS), o *National Oceanographic Data Center*, pertencente à NOAA, reanalisou o banco de imagens dos dados de AVHRR através do aperfeiçoamento do algoritmo *Pathfinder* nas etapas de seu processamento. Como resultado desta reanálise, os mapas de TSM globais possuem resolução espacial da ordem de 4 km, a maior possível. Esta versão recebeu o nome de versão 5 do programa *Pathfinder* gerando mapas desde 2001 com este tipo de resolução.

A aquisição dos dados de TSM foi obtida diretamente através do acesso à página referente aos dados do projeto *Pathfinder* com arquivos de extensão *.hdf*. Os dados selecionados para este determinado trabalho referem-se às médias temporais de 7 dias de aquisição em diferentes épocas do ano (diferentes épocas dos dados *in-situ*).

Dessa maneira, com os valores de TSM corretos e georeferenciados para a Bacia de Campos o passo seguinte para a utilização dos dados é o mapeamento da frente térmica. Como explicitada na seção 1.5 o conceito de frente não é estruturalmente bem definido pois varia de acordo com a propriedade física em questão e com diferentes escalas de movimento. Neste caso é assumido que a temperatura superficial do oceano é o parâmetro utilizado para que sejam mapeadas as frentes e que os máximos gradi-

entes ocorrem horizontalmente.

Seguindo os métodos utilizados por *Valerio et al.* [2008] a identificação da frente térmica está frequentemente situada entre as isóbatas de 200 m e 2000 m. Perceba que a palavra frequentemente foi utilizada uma vez que essa não é uma condição necessária para não seja encontrada uma frente que não esteja situada entre as isobatimétricas citadas. Como segunda característica, a frente não interage com as águas costeiras e não forma gradiente com águas de ressurgência costeira. Também, por ser um sensor de infra-vermelho e não ser "invisível" às nuvens, a região da Bacia de Campos deve estar livre da cobertura para que seja mapeada de maneira correta a frente. Por fim, o gradiente térmico deve ser bem pronunciado para o realce da frente.

Os dados de TSM podem, por vezes, subjugar a visão de quem está digitalizando as frentes. Para que isso não ocorra, ou seja, para que os erros sejam minimizados, constroi-se os mapas em tons acinzentados. Porém os tons de cinza não representam os valores do gradiente e sim são os valores construídos a partir do cálculo do módulo quadrático do gradiente térmico. Este cálculo, leva em consideração a derivada da matriz aos dados de TSM em relação às coordenadas geográficas e elevadas a segunda potência para que os gradientes não assumam valores negativos.

3.3.2 Apresentação da Frente Térmica da Corrente do Brasil

Os resultados aos conjuntos de dados serão apresentados a partir do capítulo 4. Por hora, a Figura 3.7 mostra os dados de TSM para a região da Bacia de Campos.

Vale notar que os principais pontos posicionados por *Valerio et al.* [2008] estão em conformidade nesta figura. Ela mostra que está em proximidade com as isóbatas de 200 e 2000 m. As linhas em preto representam essas isóbatas. Outro ponto colocado pelo referido autor é a consistência em relação ao conjunto de dados apresentados e quanto a presença de nuvens. É possível notar que a falta de dados somente se faz presente nas regiões muito próximas à costa justamente por estar limitada na escala de cores. Ainda é importante ressaltar que a análise da frente não interage com águas costeiras e nem com águas da ressurgência costeira.

A Figura 3.8, ressalta o valor do máximo gradiente associada a frente térmica. O ressalte do gradiente se faz em uma linha muito tênue próximo à única isóbata de-

Figura 3.7: Imagem de TSM média do período de primeiro de julho de 2007 ao dia 31 de dezembro do mesmo ano para a região da Bacia de Campos com resolução de 4 km do projeto *Pathfinder*. As linhas em preto representam essas isóbatas de 200 e 2000 m. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.

marcada (a de 100 m) em tons de cinza. Esse gradiente apresenta maior robustez em seu sinal na região ao largo do Cabo de São Tomé, onde a frente se desloca para além da isobatimétrica de 100 m. Entretanto, a análise das frentes neste documento não é feita apenas na visualização dos gradientes; apesar de se tornarem as referências no momento do traçado, a frente em si é diretamente demarcada ao longo da imagem de TSM no padrão *RGB* de escalas de cores.

Para o entendimento deste estudo, a relação entre a Corrente do Brasil e a frente térmica média tem um único propósito, como será descrita nos capítulos seguintes a este. A finalidade do levantamento serve de parâmetro para que seja inferido a borda da Corrente do Brasil. Esta borda, representa a porção mais costeira da corrente onde as velocidades geostróficas que serão inferidas pelo modelo apresentam velocidades praticamente nulos. Em outras palavras, a localização da frente reflete simplesmente a localização da borda costeira da CB.

A Figura 3.9 exibe a frente média para o período correspondente ao segundo semestre

Figura 3.8: Imagem do gradiente de TSM correspondente ao segundo semestre de 2007, do dia primeiro de julho ao dia 31 de dezembro. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.

de 2007. Essa frente foi digitalizada a partir da Figura 3.8 em que se ressalta a região que corresponde ao gradiente térmico da frente. A digitalização foi feita manualmente e, embora reconheça-se alguma subjetividade do método empregado, ou seja, da digitalização dos pontos frente a linha de máximo gradiente térmico, acredita-se que seja aqui mais objetivo do que a digitalização da suposta frente a partir dos mapas de falsa cor de TSM, tal qual realizado por *Silveira et al.* [2008].

Figura 3.9: Frente térmica média correspondente aos valores de máximo gradiente da Figura 3.8. Essa frente à media do segundo semestre de 2007, do dia primeiro de julho ao dia 31 de dezembro. Esse período corresponde àquele da série de dados de correntografia contínuas do sistema OCEANOP.

Capítulo 4

O Modelo Paramétrico Regional da Corrente do Brasil

4.1 Preâmbulo

Nos capítulos anteriores foram apresentados os conjuntos de dados para o estudo da circulação na região da Bacia de Campos. Nesta parte do trabalho, será introduzida a descrição, metodologia e os resultados do emprego do modelo para a estrutura espacial da CB. A idéia principal é a aplicação deste para a estrutura de velocidade somente à Corrente do Brasil entre 21°S e 25°S com o auxílio dos conjuntos de dados de correntes observadas e a estimativa das posições das frentes térmicas a partir das imagens do projeto *Pathfinder*. As etapas de construção e aplicação do modelo paramétrico regional são as seguintes:

1. Parametriza-se a estrutura seccional da CB, usando a formulação teórica proposta por *Schmidt et al.* [2007]. Esta consiste num formato gaussiano típico de um jato geofísico com núcleo em superfície. Pode haver deformação desta através da interação com a topografia. Os parâmetros da gaussiana são escolhidos com base nas análises de observações pretéritas. Estes parâmetros consistem na velocidade máxima no centro do jato, a largura da corrente, a profundidade da corrente, por exemplo
2. Uma vez estabelecida a largura da CB parametrizada, a localização da frente in-

terna da CB é assumida como a de velocidade praticamente zero da corrente, ou seja, seu limite costeiro. Escolhe-se, então, uma data ou período na qual se deseja caracterizar a CB, estima-se frente térmica e projeta-se regionalmente quantas seções de correntes parametrizadas quando desejado ao longo da extensão da Bacia de Campos.

3. A próxima fase é a interpolação objetiva para obtenção de velocidades em grade curvilinear. Mapas tanto de função de corrente quanto de velocidade horizontalmente não-divergente podem ser construídos.

Nas subseções a seguir, detalharemos as etapas supracitadas e apresentaremos exemplos de sua aplicação.

4.2 Formulação Teórica

Os modelos paramétricos de velocidade de corrente são utilizados para estudos teóricos a fim de se comprovar a estrutura dinâmica ou na determinação de escoamentos básicos para a utilização em modelos de instabilidade geofísica, bem como na determinação de condições iniciais de modelos numéricos. Todavia, a grande maioria dos modelos paramétricos foi desenvolvido para a Corrente do Golfo.

A proposta de *Schmidt et al.* [2007] é desenvolver e aplicar uma formulação analítica baseada nas poucas observações existentes do Sistema CB.

Os autores propõem o emprego de fórmula analítica que permita e/ou possibilite preservar as propriedades básicas da corrente afim de se definir um estado básico de representação adequada à distribuição seccional da CB. Consideraram para tanto uma forma de um jato geofísico intensificado em superfície que apresente um perfil horizontal gaussiano e uma estrutura vertical de decaimento exponencial. Desse modo podemos escrever a estrutura seccional da CB pela seguinte equação:

$$V(x, z) = V_{BT} + V_s \exp \left\{ \frac{z}{z_s} \right\} \begin{cases} \exp \left\{ - \left[\frac{(x - x_f \beta_c)}{l_c} \right]^2 \right\} & \text{se } x \leq x_f \\ \exp \left\{ - \left[\frac{(x - x_f \beta_o)}{l_o} \right]^2 \right\} & \text{se } x > x_f, \end{cases} \quad (4.1)$$

assim V_s representa a máxima velocidade baroclínica do núcleo da corrente em superfície centrada em x_f , z_s representa a taxa de decaimento da velocidade com a profundidade, V_{BT} representa a velocidade barotrópica da CB ao largo da Baía de Campos, l_c e l_o são as larguras da corrente na parte interna (costa) e na parte externa (oceano) respectivamente. Complementando

$$\beta_c = 1 - \frac{z}{z_s A_c} \quad e \quad \beta_o = 1 - \frac{z}{z_s A_o}, \quad (4.2)$$

representam respectivamente, a inclinação da corrente nas partes costeira ($x \leq x_f$) e oceânica ($x > x_f$) em relação ao eixo vertical (z). (A_c) é o parâmetro do grau de inclinação da corrente de superfície na parte costeira. (A_o) é o parâmetro de inclinação de corrente de superfície na parte oceânica e pode ser calculada da seguinte maneira

$$A_o = A_c \frac{l_c}{l_o}. \quad (4.3)$$

Dessa maneira podemos notar que caso $l_c = l_o$ a corrente é simétrica em relação ao eixo z e $\beta_c = \beta_o = \beta$. Caso $\beta > 1$ ou $\beta < 1$ a corrente pode inclinar no sentido do oceano aberto ou para a região costeira respectivamente, como mostra a Figura 4.1 extraída de *Schmidt et al.* [2007].

Figura 4.1: Seções de velocidade básica da Corrente do Brasil. Simetria (painel superior ($\beta = 1$)), inclinação voltada para a região oceânica (painel central ($\beta > 1$)) e inclinação voltada para a região costeira (painel inferior ($\beta < 1$)). De acordo com Schmidt *et al.* [2007]

4.3 Estimativa dos Parâmetros do Modelo

A aplicação de modelos paramétricos a regiões com pouca disponibilidade de observações é conveniente para a investigação de fenômenos oceanográficos. No entanto, há óbvia dificuldade na estimativa e correta escolha dos parâmetros para caracterizar a corrente. Ou seja, desejamos que o modelo apresente características de um

jato médio, mas intensidades de velocidade que reproduzam um escoamento em escala sinótica. No caso da aplicação à CB, usaremos as informações das radiais sinóticas, em particular da radial mais ao norte, do conjunto OCSEII (Figuras 3.2 e 3.4) para estimativa da estrutura vertical e estrutura horizontal na direção normal à corrente. Utilizaremos a análise dos dados do fundeio Marlim para auxiliar na estimativa da velocidade que independe da estratificação e da profundidade: a velocidade barotrópica.

Iniciemos a estimativa dos parâmetros pelo cálculo de z_s e V_s a partir da seção sinótica de velocidades da radial mais ao norte exibida na Figura 3.4. A escolha desta se deve ao núcleo da corrente estar centrado aproximadamente na isóbata 500 m e, portanto, próximo à profundidade apontada por Garfield [1990] como provável localização média do eixo da CB ao norte de Cabo Frio. Precedemos assim à realização de um ajuste por mínimos quadrados não-linear para a estimativa de z_s e linear para uma estimativa de V_s . Os resultados encontrados foram de uma escala vertical de decaimento de 250 m e uma velocidade baroclinica em superfície de $-0,64 \text{ m s}^{-1}$. A Figura 4.2 ilustra o ajuste feito na localidade do máximo de velocidade encontrado na seção exibida na Figura 3.4. Os resultados das estimativas dos parâmetros estão sumarizados na Tabela 4.1.

Figura 4.2: Ajuste por mínimos quadrados não-linear para a estimativa da escala de decaimento da profundidade z_s de acordo com a fórmula 4.1. Os pontos em vermelho representam os dados sinóticos do perfil vertical de velocidade meridional da CB, para a OCSEII. A linha em verde representa o perfil de velocidade ajustado.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados no modelo.

Parâmetro	Valor
z_s	250 m
V_s	-0,64 m s ⁻¹
V_{BT}	0,04 m s ⁻¹
x_f	22 km
l_c	19 km
l_o	27 km
A_o	10

A estimativa da velocidade barotrópica V_{BT} não pode ser obviamente realizada pela seção de velocidades da Figura 3.4, pois esta não atinge o fundo na região do máximo da corrente. Recorremos, então, à análise modal realizada no fundeio Marlim. Nesta, a amplitude da componente barotrópica de velocidade é 0,04 m s⁻¹ e será aqui o valor adotado. Reconhecemos duas limitações nesta escolha. A primeira é que se trata de um valor médio e não sinótico; e a segunda pelo fundeio Marlim estar localizado a leste da isóbata do eixo da CB. *Silveira et al.* [2004] estimaram uma velocidade barotrópica característica de 0,05 m s⁻¹ a partir de uma radial sinótica de velocidades perfiladas em 22°S e *Silveira et al.* [2008] encontraram 0,02 m s⁻¹ pela análise dos primeiros seis meses de dados do fundeio Marlim. O valor escolhido, portanto, se encontra na faixa dos poucos valores disponíveis na literatura. Utilizaremos também um valor constante da V_{BT} assumindo que esta representa um valor médio para a Corrente do Brasil.

Os parâmetros de estrutura frontal x_f , l_c e l_o foram determinados através da distribuição meridional de velocidades em quase-superfície da seção de velocidades da Figura 3.4. Como no caso da estimativa de z_s , realizamos ajustes não-lineares por mínimos quadrados nas metades ciclônica e anticiclônica da CB por meio de duas meias curvas gaussianas. A distância x_f foi considerada como a distância característica que separa a borda continental e o núcleo de velocidade da corrente. A escala de decaimento do lado costeiro foi de 19 km ao passo que a escala de decaimento do lado oceânico foi de 27 km. Os resultados do ajuste estão apresentados na Figura 4.3 em termos de perfil meridional e na Figura 4.4 em termos de distribuição seccional da corrente. A largura aproximada da corrente medida através dos dados de ADCP de casco

da Comissão da Marinha infere valores da ordem de 80 a 100 km. Tais valores estão entre aqueles encontrados por *Signorini [1978]*, *Lima [1997]*, *Silveira et al. [2004]* e *Silveira et al. [2008]*. Afim de avaliar a total estrutura do jato da CB, apresentamos a Figura 4.5

Figura 4.3: Ajuste por mínimos quadrados não-linear para a estimativa das escalas de decaimento horizontal do lado costeiro l_c e do lado oceânico l_o de acordo com a fórmula 4.1 . A curva em vermelho representam os dados sinóticos do perfil zonal de velocidade meridional da CB da Comissão Oceano Sudeste II. A linha em azul representa o perfil de velocidade ajustado.

Figura 4.4: Comparação entre as observações de velocidade da radial mais ao norte da OCSEII e a correspondente aplicação da fórmula 4.1 da CB parametrizada.

Figura 4.5: Aplicação da fórmula 4.1 para o perfil zonal da CB parametrizada entre a posição da frente interna ($V = 0$ em $x = 0$).

4.4 A Aplicação do Modelo Paramétrico

4.4.1 O Uso das Imagens de TSM no Modelo

Como já dito anteriormente, na seção 3.2.1, a OCSEII foi realizada entre os meses de outubro a dezembro de 2002. Os dados referentes a esta campanha possuem uma duração e grande abrangência espacial. No entanto, apenas três radiais contém amostragens significativas à Bacia de Campos, pois compreendem 16 (dezesesseis) dias de amostragem e abrangem de maneira quase-sinótica a BC. Em outras palavras, o período amostrado se estende de 25 de outubro a 09 de novembro de 2002.

Assim, em busca da melhor qualidade de dados para que se pudesse representar de maneira satisfatória as condições descritas por *Valerio et al.* [2008] ao que tange o mapeamento da frentes, inúmeras imagens de satélite do programa *Pathfinder* foram testadas. Os dados referentes à OCSEII representam três semanas de coleta ao longo da Bacia de Campos. Consequentemente, optou-se por utilizar a composição de imagens semanais descartando-se as diárias, pois há muita interferência de nuvens e os compósitos de 8 dias que, apesar de uma média maior, não representariam as três semanas, ou seja, haveria um *delay* entre os dados quase-sinóticos e as imagens de satélite.

Apesar de todos os testes realizados com diferentes compósitos de TSM, foi neces-

sário uma pequena adaptação aos dados. As imagens termais utilizadas são preferencialmente as que correspondem ao período noturno, uma vez que ao longo do dia, há a interferência do brilho na camada superficial medida pelo sensor. Porém, mesmo a média semanal noturna continha grandes espaços vazios pois o sensor utilizado é incapaz de desconsiderar os padrões atmosféricos da região, ou seja, as nuvens e realizar o registro da temperatura de pele. Optou-se, deste modo, em preencher parte dos dados de TSM noturno com os dados diurnos para que os campos de temperatura da superfície do mar sejam satisfatoriamente validados. Assim, como mostra a Figura 4.6, os painéis dispostos à esquerda representam a temperatura da superfície do mar de acordo com o período de amostragem do cruzeiro na BC complementado com os dados de TSM diurnos aos dados noturnos e os painéis em tons de cinza representam as regiões do oceano onde há as maiores intensificações de gradiente. Dois pontos acerca da superposição dos dados vale ressaltar. Primeiramente, os gradientes são preservados pois os dados de TSM diurnos **complementam** e não **substituem** valores já existentes da amostragem noturna. Esse mecanismo é somente para obter imagens superficiais mais completas. E segundo, tanto algumas imagens diurnas como noturnas que não possuem dados preservam locais com manchas em tons muito azulados e locais da imagem em branco, como é possível ver na figura.

As figuras mostram que os gradientes térmicos da frente (Figura 4.6) representados à direita não estão bem pronunciados. Ao se comparar com as imagens de TSM, apresentadas no canto esquerdo da figura, nota-se a presença da frente. Em primeira análise, as figuras que estão na parte superior representam a semana de 27 de outubro a 2 de novembro de 2002 e caracterizam parte da frente localizada entre as latitudes de $20,5^{\circ}$ a $21,5^{\circ}$ S, região em que a OCSEII realizou as medições de corrente. Deste modo, como mostra a Figura 4.6 a frente da CB localiza-se bem próximo à quebra de plataforma (primeira linha em preto representa a isóbata de 100 m), com a estrutura da frente pouco meandante, nada pronunciadamente forte, apenas uma estrutura bastante bem comportada.

Entretanto, as figuras centrais estão associada à segunda semana de aquisição referente à campanha da OCSEII () dos dados geograficamente ao sul do Cabo de São Tomé (é necessário salientar que esta posição faz menção às coletas da OCSEII). É importante

Figura 4.6: Temperatura da Superfície do Mar para as semanas de mapeamento da OC-SEII (painéis esquerdos). A direita tem-se a intensificação do gradiente que permite a minimização do erro ao traçar no traçado da frente. Os painéis superiores representam a semana compreendida entre os dias 20 a 26 de outubro de 2002; os painéis centrais representam a semana de coleta entre os dias 27 de outubro a 02 de novembro de 2002 e os painéis inferiores a semana entre os dias 03 e 09 de novembro de 2002.

notar que nestas duas figuras é nítida a estrutura da frente meandrando e ultrapassando a isóbata de 2000 m (segunda linha em preto). Estes dados, conforme visto no capítulo 3, na Figura 3.2 evidenciam a estrutura do Vórtice de São Tomé mostradas nas

imagens de TSM capturadas.

Por fim, os dados da parte inferior da figura apenas registram o final da estrutura espacial da frente térmica na BC, onde ainda foram realizados as últimas medições para **esta região**. O acompanhamento da frente junto com os gradientes não permite a identificação de nenhuma feição com gradiente pronunciado, porém, nesta parte final é possível notar apenas pelas imagens de TSM que a frente retoma sua posição entre as isóbatas demarcadas de 100 e 2000 m, completando assim o mapeamento nesta região. Assim, com a posição das três frentes demarcadas, pode-se mapear a frente média, a junção destas localizadas nas diferentes coordenadas da BC, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4.7: Frente térmica média amostrada através de imagens de satélite para os meses em que se realizou o cruzeiro oceanográfico da Marinha do Brasil na região da BC.

É importante notar que as imagens semanais de TSM permitiram que se mapeasse a frente térmica média, como mostra a Figura 4.7, para cada uma das porções da bacia de acordo com o cruzeiro expedicionário da Marinha do Brasil. Infelizmente, as frentes sofreram esta setorização pois o conjunto referente a esta porção nesta data não permitiu mais tomadas de frente em toda a BC. Com isto, os eixos setorizados das frentes

para cada semana servirão de base para a construção da frente média (Figura 4.7) e consequentemente do modelo paramétrico da CB para a região. Em outras palavras, o mapeamento da frente térmica média representa a borda interna da CB onde as velocidades *geostróficas* representadas do modelo são iguais ou tendem a zero.

4.4.2 Construção da Abrangência Regional do Modelo

A seção anterior forneceu os primeiros passos em busca da aplicação do modelo paramétrico regionalmente para toda a Bacia de Campos. Esta segunda parte trata mais especificamente da montagem e utilização do modelo para a construção das seções de velocidade ao longo da região de interesse. Com isso, a Figura 4.8 faz referência às radiais normais criadas ao longo da frente média de TSM em questão. Estas radiais, seguindo as idéias de *Gangopadhyay & Robinson* [2002], serão tratadas como radiais de dados sintéticos de ADCP e usadas para interpolação e obtenção do campo de velocidade não-divergente na Bacia de Campos.

Para que o modelo represente de maneira satisfatória a CB na Bacia de Campos, os dados que sugerem a estrutura espacial são os coletados pelo *VM-ADCP* da OCSEIL. Com isso a velocidade da CB na direção normal à radial não varia ao longo da bacia em respeito à continuidade do próprio jato geofísico. Em outras palavras, isso significa que os valores não sofrem correções entre os intervalos das radiais. Em **média**, o valor da CB adotado para o modelo é da ordem de $0,65 \text{ m s}^{-1}$.

Qualitativamente, os valores sofrem variação devido ao posicionamento central do eixo de máxima velocidade da corrente ao atravessar a BC, porém em média, a Corrente do Brasil apresenta distâncias horizontais correspondentes a aproximadamente 85 km e não mudam o formato gaussiano ao longo do escoamento. Para este modelo, não foram considerados variações ao longo do tamanho da estrutura horizontal da CB, permanecendo uniforme e com aproximadamente 80 km de espaçamento horizontal.

Para obter um mapa de velocidades em qualquer nível de profundidade abrangendo toda a Bacia de Campos, é necessário fazer uma breve explanação a respeito do gradeamento horizontal utilizado para o mapeamento dos campos de velocidade geostrófico. A Figura 4.9 representa uma grade curvilinear a ser utilizada no processo de interpolação dos campos de velocidade. A técnica de interpolação é referida na literatura

Figura 4.8: Representação da frente térmica média da Corrente do Brasil (tracejado vermelho) e a posição normal das radiais criadas para o acoplamento do modelo paramétrico da corrente.

como *Análise Objetiva* (AO). Esta técnica tem por princípio o *Teorema de Gauss-Markov* cuja teoria fornece uma expressão para as estimativas de erros mínimos quadráticos de propriedades físicas e a estatística do campo calculada na forma de espectro espaço-temporal [Bretherton et al., 1976].

A AO aplicada a dados de oceano podem ser equacionadas por um ajuste de mínimos quadrados em que as funções-peso dependem da correlação entre os dados, seguindo Carter & Robinson [1987]. Dessa maneira, a implementação da técnica aos dados oceânicos necessita de conhecimento prévio da função de correlação das variáveis C , e da variância do erro amostral aleatório ϵ^2 . Seguindo ainda Emery & Thomson [1998], embora a especificação da matriz de correlação deva ser determinada na estrutura observada das variáveis do oceano, existe a opção de se utilizar uma forma matemática teórica ajustada e baseada nesta estrutura.

Para o mapeamento horizontal dos fluxos geofísicos, buscamos utilizar uma função de correlação dada por:

Figura 4.9: Representação esquemática da grade para interpolação dos campos de velocidade.

$$C(\Delta x, \Delta y) = (1 - \epsilon^2) e^{-[(\Delta x^2)/l_x^2 + (\Delta y^2)/l_y^2]}, \quad (4.4)$$

onde Δx e Δy representam os incrementos espaciais horizontais nas direções x e y , respectivamente; l_x e l_y são os chamados comprimentos de correlação e ϵ^2 é a variância do erro amostral aleatório. Devido a forte isotropia horizontal, as diferenças entre os comprimentos de correlação l_x e l_y costumam ser pequenas, principalmente em regiões de muita atividade vortical.

Em muitos casos é bastante usual utilizar a forma isotrópica gaussiana (de acordo com *Silveira et al.* [2000a]) da Equação 4.4, principalmente naqueles envolvendo mapeamento de quantidade com estruturas de caráter radial, tal como:

$$C(r) = (1 - \epsilon^2) e^{-r^2/l_c^2}, \quad (4.5)$$

onde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ e l_c representa o comprimento de correlação horizontal na direção radial.

Dessa maneira, é possível determinar o comprimento de correlação do erro amostral através de duas maneiras: (I) é possível determinar a partir dos ajustes não-lineares da

função de correlação amostral dos dados às formas teóricas, como visto na Equação 4.6 ou pelo conhecimento prévio da estrutura do campo investigado e das principais feições que se quer mapear. Para este presente trabalho, adotou-se a segunda medida e com isso para l_c foi adotado o valor de **160** km o que é cerca de **1,2°** com erro amostral aleatório ϵ de **0,09**.

Resumidamente, o emprego da AO como técnica de interpolação na construção dos campos horizontais estima o valor desta quantidade para cada ponto pertencente à grade de interpolação de escolha. Como subproduto, a Análise Objetiva nos fornece o campo de erros estimado a partir da raiz do erro médio quadrático associado ao método de interpolação.

Maapeamento da Função de Corrente

O campo horizontal de velocidades, aqui representados tanto pelas medidas oriundas do ADCP de casco da OCSEII como também da velocidade parametrizada do modelo podem ser decompostas em duas partes: uma delas não-divergente e rotacional e outra divergente e irrotacional. Assim:

$$\vec{v}_{obs} = (u_{obs}, v_{obs}) = \vec{k} \times \nabla \psi_{obs} - \nabla \chi_{obs}, \quad (4.6)$$

onde ψ_{obs} é a função de corrente e χ_{obs} é o potencial de velocidade. É importante ressaltar que foi utilizado para esta equação um *subescrito* "obs" (de observado). Entretanto, esta equação também se aplica ao modelo uma vez que os dados advindos da formulação analítica referem-se somente a u e v porém reconstruídos.

Todavia, ao considerar os esforços promediados por *Silveira et al.* [2000a], a parte divergente pode ser negligenciada, pois os erros de interpolação do campo não-divergentes são maiores do que os campos de velocidade divergente, nas Correntes de Contoro Oeste. Assim, é possível escrever a Equação 4.6 como sendo:

$$\vec{v}_{obs} \approx \vec{k} \times \nabla \psi_{obs} \quad (4.7)$$

Dessa maneira é possível obter o campo de função de corrente observada e modelada (ψ_{obs} e ψ_{mod}) de um campo não-divergente através da interpolação ótima. A diferença de interpolação realizada nesta parte do trabalho está no conjunto de dados que compõem a entrada da análise. Neste caso, os dados iniciais aos campos da AO são os de u e v e nesse caso a análise objetiva passa a se chamar *Análise Objetiva Vetorial*, o mesmo adotado por *Silveira et al.* [2000a].

Além disso, o campo gradeado e interpolado necessita respeitar as condições de escoamento nulo normal ao longo do contorno fechado. Assim foi escolhida a condição de *Dirichlet* onde é assumido um valor constante ao longo do contorno. Portanto, como o vetor velocidade é sempre paralelo à linha de corrente, será respeitada a continuidade.

Este método é diretamente aplicável para as profundidades que se seguem além da quebra de plataforma, onde pode-se admitir por aproximação que o sistema de correntes se encontra em balanço geostrófico. Em mapeamentos inferiores a 100 m, região escolhida para a condição, existe o contorno sólido da isóbata de 100 m, enquanto às profundidades superiores, utilizou-se a isóbata equivalente ao nível selecionado.

As Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 a seguir mostram o resultado dos campos de velocidade de corrente observada (painéis superiores) comparativamente aos campos de velocidade utilizando-se o modelo proposto por *Schmidt et al.* [2007] (painéis inferiores) agora transformados em campos horizontais. O cenário restrito da Bacia de Campos limita-se pouco abaixo de 21°S e encerrando-se relativamente em diferentes faixas latitudinais (em 23°S na região mais próxima à costa e em 24°S na porção mais oceânica da grade). Em relação aos campos horizontais observados de corrente a 0 m, 50 m, 100 m, 150 m e 200 m é possível notar que o fluxo da Corrente do Brasil localiza-se entre a quebra de plataforma (isóbata de 100 m) e a isobatimétrica de 2000 m nas latitudes entre 21° e 22°S e o eixo de máxima velocidade coincidindo com o intervalo destas. A partir da latitude do Cabo de São Tomé, o eixo de velocidade da corrente ultrapassa a linha de 2000 m e nitidamente é possível notar a estrutura meandrante da corrente ao longo deste eixo latitudinal. Nas porções mais inferiores, ou seja, nas regiões abaixo do Cabo de São Tomé, o eixo de velocidade ainda permanece às regiões mais profundas da bacia, porém já começa a retornar ao seu estado básico de escoamento, ou seja, em

regiões mais rasas.

O posicionamento da corrente em relação às isóbatas se reflete em todas os campos amostrados, entretanto é mais plausível de se observar esta feição em até 150 m de profundidade, visto que a maior dificuldade está na representatividade e confiabilidade dos dados à medida que se afunda na coluna de água. Vale ressaltar também o padrão gaussiano da corrente apresentando uma distância horizontal da ordem de 80 km. Apesar de se afastar da costa, a Corrente do Brasil mantém o formato ao percorrer a Bacia de Campos. Entretanto, o que chama mais atenção são os motivos pelos quais a corrente avança às regiões mais profundas. Este meandramento reflete a presença de uma estrutura ciclônica em frente a 22°S e muito se assemelha ao vórtice de São Tomé. É um vórtice frontal, ou seja, pertencente ao eixo principal da corrente.

A análise do modelo proposto reflete condições semelhantes a cerca do padrão de circulação na região da Bacia de Campos. Em primeira análise, o leitor perceberá que os padrões de circulação em 21°S não estão condizentes aos padrões de circulação apresentados aos dados de ADCP da OCSE-II. Obviamente, ao checar as Figuras 3.2 e 3.3 nota-se que os dados registrados estão praticamente em 21,5°S e a grade amostral ultrapassa essa latitude. Portanto, quando comparam-se os dados apresentados pelo modelo à posição referenciada pelo observado nota-se grande semelhança acerca do dinamismo da corrente na região. Em outras palavras, a corrente modelada já começa a deslocar o eixo de velocidade para as regiões mais profundas do oceano.

A largura da corrente, ao longo da Bacia de Campos, se mantém sem grandes variações. Isso significa que em todos os ponto da região, ela possui cerca de 80 km de largura e espessura de 400 m. Diferentemente do que ocorre nos dados amostrados, o vórtice frontal de São Tomé aparece mais próximo à região da quebra e do talude, fato este que ocorre no modelo espacial, porém dada as características de uniformidade da corrente ao longo da bacia, o vórtice aparece mais espalhadamente e ocupando a região do talude.

A comparação entre os painéis superiores e inferiores das Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram padrões qualitativamente semelhantes com a presença do meadro frontal de São Tomé. Este é um forte indicativo que a hipótese que norteia este trabalho foi satisfeita, visto que a composição dos mapas do modelo paramétrico foi gerada

Figura 4.10: Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 0 m.

Figura 4.11: Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 50 m.

Figura 4.12: Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 100 m.

Figura 4.13: Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 150 m.

Figura 4.14: Campos horizontais de Função de Corrente Observada sobrepostos por vetores de velocidade (figura superior) e campos horizontais de Função de Corrente Modelada sobrepostos por vetores de velocidade (figura inferior). mapeado é de 200 m.

sempre com o mesmo perfil de corrente na direção normal à frente térmica interna. Entretanto, os padrões observados e modelados diferem nos detalhes. Atribuímos as diferenças principalmente à natureza quase-sinótica dos dados da OCSEII. Como já foi dito, as radiais foram executadas ao longo de três semanas. Já a configuração da frente térmica é média compreendendo exatamente as mesmas três semanas de amostragem da OCSEII. Logo, a distribuição de função de corrente mapeada objetivamente devido ao modelo é como se tivesse um caráter mais sinótico que a distribuição associada às observações. Para verificar esta questão de sinopcidade bem como acompanhar a evolução temporal de um evento de meandramento, aplicaremos o modelo a datas consecutivas e compararemos com as distribuições sinóticas de velocidade dos dados do sistema OCEANOP no próximo capítulo.

Capítulo 5

Estudo de Caso para o Modelo

Paramétrico - Eventos de Julho e Agosto

5.1 Preâmbulo

O estudo da Corrente do Brasil ao largo da Bacia de Campos aplicando-se um método desenvolvido por *Schmidt et al.* [2007] chega em sua etapa onde a variabilidade temporal da corrente assume seu papel. Os capítulos anteriores, serviram de subsídio para o entendimento dos processos que ocorrem junto à Bacia de Campos; abordaram o conjunto de dados que possibilitaram a validação do modelo em escala espacial (horizontal e vertical) e este, que por fim, encerra a estrutura temporal da corrente. Neste capítulo, portanto, serão apresentados alguns cenários em que as imagens de satélite captam o meandramento da CB e o desenvolvimento dos vórtices frontais. Em alguns casos, há apenas o meandramento da corrente, uma vez que as imagens termais foram prejudicadas pela cobertura de nuvens ou pela falta de dados.

5.2 A Grade Regional da Bacia de Campos

Na seção 4.2 foi desenvolvido todo o aparato teórico necessário ao desenvolvimento do modelo paramétrico da Corrente do Brasil. Torna-se, portanto, redundante apresentar a formulação analítica para a segunda parte do modelo em questão. Isso porque, a última metade do trabalho se processa de maneira mais ou menos semel-

hante ao capítulo anterior à exceção de que a estrutura do modelo se baseia na variabilidade temporal da corrente ao longo das plataformas do sistema OCEANOP, descritas no Capítulo 2.

Entretanto, cabe reforçar aqui parte do trabalho que foi deixado justamente para este capítulo. Ao ser formulado o arcabouço teórico em que o modelo se baseia, foi dimensionalizada uma grade em que adaptou-se as condições necessárias às comparações aos dados da Marinha do Brasil. Com isso, foi escolhido apenas o tamanho da grade apropriada em que contivesse os dados da OCSE-II. Nesta parte do trabalho, porém, como mostra a Figura 5.1, está representada a grade completa para a região de estudo da Bacia de Campos.

Figura 5.1: Grade completa utilizada para a interpolação das propriedades físicas. Esta grade estende-se desde a porção sul da Cadeia Vitória-Trindade até o sul da Bacia de Campos, na Região de Cabo Frio, em 23°S.

A grade confeccionada para a interpolação dos campos é curvilínea e se caracteriza

por uma resolução espacial de 60x70 pontos, que em outras palavras significa que a distância entre os pontos normais à costa é de cerca de 3,5 km aproximadamente e de 7 km na direção paralela a esta. A partir destes parâmetros os maiores erros associados ao processo de interpolação ficam em torno de 10%, nos extremos dela. Através da definição da grade, que possibilita maior abrangência à região da Bacia de Campos, serão prosseguidas as análises dos dados.

5.3 A Aplicação do Modelo Paramétrico

Nesta parte do trabalho, vamos apresentar dois casos específicos. O primeiro deles refere-se à primeira semana do mês de julho de 2007 onde há a formação do meandro junto à Corrente do Brasil. E um segundo caso retrata desde a gênese até o desenvolvimento do meandro de São Tomé, que foi observado em agosto de 2007.

5.3.1 Evento de Julho de 2007

Os dados que servem de parâmetro ao evento de meandramento da CB são datados do dia 01/07/2007 ao dia 30/12/2007 do sistema OCEANOP. Assim, como mostra a Figura 5.2 sobre retângulo destacado em cinza ao canto esquerdo, este primeiro estudo de caso compreende a primeira semana de julho, dos dias 1 ao 7 deste mesmo mês.

Cada linha de *stick-plot* representa o nível de 50 m para cada ponto de Plataforma de exploração da PETROBRAS. O motivo pelo qual foi escolhida esta profundidade se deve ao fato de que a corrente modelada em questão possui núcleo de velocidade em superfície e os primeiros registros do equipamento datam desta profundidade em questão. Desta maneira, optou-se por utilizar esse nível de referência sobre os dados observados. A Figura 5.3 mostra o padrão médio das correntes para o determinado período de julho. Esta figura mostra que nas diferentes plataformas onde foram realizadas as medições, o escoamento médio da CB no período se apresenta orientado para sul na porção norte da Bacia de Campos e à medida que este se dirige para o sul da bacia, a corrente média parece estar ajustada à topografia. Em outras palavras, isso quer dizer que nas plataformas abaixo da região do Cabo de São Tomé o escoamento se orienta em sentido SO. Neste período a exceção é feita aos registros captados pelo

Figura 5.2: Figura tipo *stick-plot* representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do a segundo semestre de 2007 das plataformas P48, FPSOBR, P40 e PPG1, enumeradas de 1 a 4 respectivamente. A barra demarcada em cinza marca o período de interesse ao evento.

ADCP fundeado aquém da quebra da plataforma continental. A velocidade é para o norte e com magnitude muito baixa.

Ou seja, isso implica que as correntes aferidas pela plataforma 4 se orientam em direção ao norte e em escala cerca de dez vezes inferior ao medido na porção *offshore* do oceano. Em termos de magnitude média, A CB atinge valores de cerca de 0,5 m s⁻¹ nas primeiras tomadas de dados na plataforma 3 mais ao norte. Os pontos de amostragem mais ao sul, apresentam magnitudes de corrente da ordem 0,6 m s⁻¹.

Figura 5.3: Vetores médios da Corrente do Brasil para a primeira semana de julho de 2007 do conjunto de dados do sistema OCEANOP. Em azul, a localização das plataformas e as setas vermelhas representam o escoamento médio.

A partir da Figura 5.4 é possível descrever mais algumas características apresentadas para a porção da margem sudeste brasileira. Esta imagem é um compósito semanal da primeira semana de dados (01 a 07 de julho de 2007), representa a TSM na região da Bacia de Campos. Em primeira análise, percebe-se que a temperatura das águas costeiras se diferenciam das águas oceânicas com temperaturas mais frias. Isso delimita um gradiente térmico em relação a estas duas porções do oceano refletindo na frente térmica, como observado na figura. Nesta configuração é possível notar que frente adquire comportamento bastante meandrante. Ao percorrer a região, em sua porção norte a frente térmica da CB localiza-se próximo à isobatimétrica de 100 m (primeira linha destacada em preto) e à medida desloca-se ao sul a frente desloca-se mais para a região *offshore* do oceano.

Entre as latitudes de 22°S e 23°S a frente térmica atinge seu ponto máximo de incursão oceânica, próximo à segunda linha que representa a isobatimétrica de 2000 m para logo em seguida e esta latitude, em direção ao sul, retornar próximo à isóbata de

100 m. A partir do posicionamento da frente, através do cálculo da intensificação do gradiente, delimita-se a localização da frente média para este período em questão.

Figura 5.4: Imagem de TSM do projeto *Pathfinder* para a primeira semana de julho de 2007.

A Figura 5.5 apresenta a frente térmica média da Corrente do Brasil delimitada para primeira semana de julho de 2007. Mais ainda, esta figura que ressalta o gradiente térmico entre as duas regiões oceânicas evidencia a presença de estrutura ciclônica presente na região da Bacia de Campos: em primeira análise ao norte da bacia a estrutura que avança em direção ao oceano aberto ressalta a presença do Vórtice de São Tomé.

A partir da frente média mapeada, como é mostrado na Figura 5.5, foram "alocadas" radiais perpendiculares à frente e que permitissem a inserção do modelo em questão (Figura 5.6). A ideia de construir radiais perpendiculares utilizando como parâmetro a frente média encontra-se na descrição do modelo no capítulo anterior.

Figura 5.5: Frente média da Corrente do Brasil para o período da primeira semana de julho (1-7/07/2007).

Figura 5.6: Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho).

A Figura 5.7 expressa o campo de função de corrente calculado a partir de seções do modelo paramétrico desenvolvido para a Corrente do Brasil. Como se observa, o escoamento da CB ao longo da Bacia de Campos se mostra bastante bem comportado entre aproximadamente as latitudes de 20,5°S e 21,5°S, onde este já atravessou a região dos entornos da Cadeia Vitória-Trindade. Ao atingir as porções mais ao sul da bacia, nos entornos do Cabo de São Tomé, os campos modelados evidenciam a estrutura ciclônica do Vórtice de São Tomé. Os campos de ψ puderam mapear o meandramento a partir da frente média e dessa maneira pode-se definir a estrutura ciclônica associada a este meandro frontal da corrente.

A correta reprodução do meandro a partir de construção dos campos de ψ evidencia o fato corroborado na literatura: os meandros e vórtices ao longo da Bacia de Campos são estruturas frontais da Corrente do Brasil [Garfield, 1990; Silveira et al., 2004, 2008]. Fato este que a estrutura criada para este estudo evidencia e corrobora com o aparecimento e desenvolvimento de tais estruturas nos entornos do Cabo de São Tomé como mostra a Figura 5.7.

Em seguida, mais ao sul desta região, a estrutura da Corrente do Brasil retoma seu padrão de escoamento médio em direção ao sul, após seu escoamento ter sido deslocado para *offshore*. O resultado satisfatório obtido através do mapeamento dos campos se faz presente ao se sobrepor a estrutura média da frente térmica, juntamente com os valores médios das correntes observadas ao longo da primeira semana de julho, como mostrado na Figura 5.8.

Nela é importante notar algumas singularidades a respeito do escoamento médio. A primeira análise feita refere-se ao posicionamento da frente térmica e como esta serve de borda costeira para o escoamento da Corrente do Brasil. Ao longo de toda a frente, os valores de máxima velocidade se encontram à direita do posicionamento da frente. Com isso, a CB tem o seu escoamento próximo à região do talude superior, localizado entre as isóbatas de 1000 e 2000 m e a frente claramente fazendo o papel onde as velocidades geostróficas são praticamente nulas.

O segundo ponto a ser levantado faz menção aos vetores obtidos através das médias medidas pelas Plataformas. Quando se compara o resultado do modelo juntamente com os resultados observados, claramente é observado que os valores obtidos através

da formulação analítica se aproximam tanto em intensidade como em direção e sentido dos valores reais de observação. Com isso, é claro de se notar que o padrão médio dos campos de ψ respondem fielmente àqueles aferidos em campo.

Figura 5.7: Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP.

Portanto, vale ressaltar nesta figura que os padrões médios da corrente observada são respeitados no campo vetorial modelado da corrente. Para as plataformas 1, 2 e 3 a direção preferencial dos campos vetoriais reproduzidos se assemelham bem ao escoamento médio para a semana. Para a plataforma na porção mais rasa, a velocidade modelada responde bem àquela aferida pelos equipamentos, orientada preferencialmente para o norte.

Em síntese, a promediação temporal em 1 semana dos vetores de corrente do sistema OCEANOP manteve o sinal das velocidades tipicamente de mesoescala. Estas, na Bacia de Campos, parecem ser dominadas pelo meandro frontal de São Tomé.

Apesar da simplicidade do modelo aqui empregada, a concordância entre a direção das correntes modeladas (e não-divergentes horizontalmente) e as correntes do sistema OCEANOP é alta. A exceção é a estação 4 sobre a plataforma, que registra velocidades de mesma intensidade, mas direção diferente. Acredita-se que seja evidência de outros movimentos característicos daquela província fisiográfica marinha.

Figura 5.8: Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Em azul estão plotados o posicionamento das Plataformas associada aos vetores médios de corrente observadas (vetores vermelhos). A linha tracejada corresponde a frente média para a semana de 1 a 7 de julho de 2007.

5.3.2 Evento de Agosto de 2007

Na seção anterior foi descrito o estudo da variação da corrente ao longo da primeira semana de julho. Nesta, o foco principal é a detecção da estrutura e seu desenvolvimento ao longo de outro período que possibilite a visualização do escoamento da corrente em diferentes épocas. Para isso, os dados utilizados para determinado experimento referem-se praticamente ao período do dia 12 até o dia 31 de agosto de 2007. Assim como mostra a Figura 5.9, sobre retângulo destacado em cinza, está destacada a época do ano de 2007 que possibilita tal direcionamento nos estudos.

Figura 5.9: Figura tipo *stick-plot* representando as correntes em 50 m. De cima para baixo, as séries de correntes representam os dados do a segundo semestre de 2007 das plataformas 1, 2, 3 e 4. A barra demarcada em cinza marca o período de interesse ao evento.

O destaque mostrado na Figura 5.9 relata o comportamento da CB ao longo dos registros feitos pelos ADCPs fundeados nas plataformas do sistema OCEANOP. Neles, salienta-se na primeira semana que as correntes estão bem definidas e orientadas de acordo com o norte geográfico. Ou seja, o escoamento da corrente se orienta em direção ao sul e à medida que se observa mais ao sul da Bacia de Campos, nota-se que as correntes se orientam de acordo com a topografia local, passando de um escoamento para o sul para o sentido S-SO.

Para a segunda semana deste conjunto de dados, as correntes já noticiam uma mudança em relação à sua orientação preferencial. Isso significa que o padrão apresentado anteriormente, ou seja, com as correntes fluindo ao largo da bacia, nesta semana já evidenciam a mudança de orientação nos padrões médios analisados. A CB, nas porções mais ao sul mudam o sentido de S-SO para praticamente a oeste evidenciando a presença de feições de mesoescala associadas à região. Para a terceira semana escolhida, que de acordo as datas referem-se a última semana do mês de agosto os padrões de corrente ainda permanecem diferentes daqueles vistos para a primeira data estipulada ao estudo (12 a 18 de agosto de 2007). As correntes ao sul do Cabo de São Tomé apresentam seu *stick-plots* ainda orientados em direção à costa, ou seja, para Oeste, contrapondo os valores obtidos para o escoamento normal da região.

Com isso, pode-se demonstrar, a partir das imagens de TSM das semanas escolhidas, os registros que foram obtidos através dos equipamentos presenciando a evolução da frente. Dessa maneira o que foi relatado para a primeira semana se confirma através da Figura 5.10 onde a frente da CB se apresenta como uma estrutura bastante bem comportada fluindo ao largo da BC. Isso equivale dizer que o painel superior da figura mostra uma frente localizada entre a primeira isobatimétrica representativa do 100 m e a segunda isobatimétrica, mais afastada da costa e que lhe confere a profundidade de 2000 m. Ao longo de toda a imagem de TSM, avista-se a posição da frente e nenhum registro anômalo, como por exemplo ultrapassar a linha dos 2000 m é observado.

Entretanto, para a mesma Figura 5.10, porém no painel central, nota-se um padrão diferente daquele observado no painel acima. Próximo à região de Cabo de São Tomé, a frente que antes se localizava restrita apenas entre as isóbatas de 100 e 2000 m, ultrapassa o limite externo da isóbata. Este fato também é reportado ao longo do painel

inferior da mesma figura.

O fato da frente estar se dirigindo para as porções mais oceânicas não possui nenhuma relação com os eixos de máxima velocidade da corrente. A região de máximo gradiente, ou seja, região delimitada entre a água superficial que se localiza em cima da plataforma e da água superficial que banha a porção mais afastada da costa, apresenta variação na sua composição média, possivelmente relacionada à atividade de mesoescala da região. A frente possui uma única relação em todo este levantamento: o de fazer parte apenas da borda costeira da Corrente do Brasil.

Assim, delimitada a posição do sistema de frente deste estudo de caso, o próximo passo é a caracterização da frente média ao longo da Bacia de Campos. Paralelamente à observação dos valores obtidos para a determinação do máximo gradiente, a Figura 5.11 representa as linhas das frentes médias para os determinados períodos. Novamente, iniciando pelo painel superior da figura, nota-se que a frente média está de acordo com os registros anteriores citados. A linha de máxima variação na TSM localiza-se entre as isóbatas de 100 e 1000 m de profundidade ao longo de toda a bacia e ao fim de 23°S, por se tratar de uma região onde as isóbatas aparecem bem próximas umas das outras, a posição de referência da frente é entre as isobatimétricas de 1000 e 2000 m.

Entretanto, quando se depara com os registros da frente média do painel central da Figura 5.11 observa-se o padrão descrito anteriormente de que a CB avança, entre as latitudes de 21,5° e 22,5°S, para a região mais afastada da costa. Isso pode ser observado ao longo do painel inferior da mesma figura. Os registros apontam para o aparecimento de uma estrutura de mesoescala associada aos fenômenos de meandramento da CB, pois ao longo dessas três semanas de registro, o comportamento que antes se mostrava de uma frente bem comportada em toda a estrutura da Bacia de Campos, nas duas semanas finais ao registro, a frente se mostra deslocada bem ao largo do Cabo de São Tomé.

Figura 5.10: Imagem da Temperatura da Superfície do Mar correspondente às semanas de 12-18/08/2007 (painel superior), 19-25/08/2007 (painel central) e 26-31/08/2007 (painel inferior). Os painéis, de cima para baixo representam a evolução da Corrente do Brasil e o crescimento do meandro ao largo do Cabo de São Tomé.

Figura 5.11: Frentes média da Corrente do Brasil para o período de 12 a 31 de agosto de 2007. Painel superior: frente média da CB entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel central: segunda semana de agosto; de 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: de 26 a 31 de agosto de 2007.

Os valores médios dos campos vetoriais de corrente para cada uma das três sem-

anas em análise são apresentados na Figura 5.12 a seguir. Dessa forma, como registram os painéis, nota-se claramente a evolução temporal da CB ao longo da Bacia de Campos. No painel que representa a corrente na primeira semana de registro, ou seja de 12 a 18 de agosto, o escoamento da corrente apresenta-se bem comportado nos pontos de amostragem. O escoamento médio apresentado pelo painel superior da figura atesta que as corrente ao norte da BC registram escoamento orientado para S e em média com velocidades que atingem cerca de $0,5 \text{ m s}^{-1}$.

No painel central da Figura 5.12 o valor da corrente média também não ultrapassa $0,6 \text{ m s}^{-1}$. A diferença se faz presente principalmente quando se é confrontada a direção média desta com a semana anterior. Com isso, claramente se nota que a direção média da corrente mudou de sentido, pois o que antes se mostrava orientada para S-SO, nesta semana de dados, entre 19 e 25 de agosto, a corrente se direciona para praticamente o sentido Oeste, comprovando a feição de mesoescala presente nesta região.

O painel inferior apenas atesta a robustez do sinal da corrente, pois os vetores médios da corrente ainda se orientam para oeste. Esta última etapa do registro, mostra que ao longo de todo o período, a CB passa de um regime de escoamento aparentemente bem comportado, para a interação deste com uma feição de mesoescala.

Portanto, a inspeção da Figura 5.12 apenas vem a corroborar com o que se vem observando ao longo das frentes agora com os vetores médios da corrente. Compilando as informações obtidas dos dois resultados é possível observar que o escoamento médio da Corrente do Brasil ao atravessar a Bacia de Campos apresenta um comportamento bastante comum ao norte do Cabo de São Tomé, ou seja, um escoamento bem comportado e bem definido. A partir do deslocamento desta em direção ao sul, para estas semanas ocorre o crescimento e desenvolvimento de um vigoroso meandro ao largo da bacia associada ao escoamento da corrente. Posterior a este acontecimento, a CB tende a registrar seu escoamento básico em direção ao Cabo Frio.

Assim é de se esperar que o cenário para os campos de corrente apresentem esta configuração. Para isto, novamente o que foi aplicado para o primeiro caso, repetem-se os mesmos procedimentos para este estudo de caso, o de formação e o desenvolvimento de meandramento da CB ao largo da Bacia de Campos.

Figura 5.12: Evolução dos vetores médios da corrente para o período de 12 a 31 de agosto de 2007. Painel superior: vetores médios da CB entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel central: vetores médios da segunda semana de agosto; de 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: vetores médios da CB de 26 a 31 de agosto de 2007.

A partir da frente média mapeada, como é mostrado na Figura 5.13, foram "alocadas" radiais perpendiculares à frente e que permitissem a inserção do modelo em questão. A ideia de construir radiais perpendiculares utilizando como parâmetro a frente média encontra-se na descrição do modelo no capítulo anterior.

Coadunando as informações adquiridas entre as frentes médias e os vetores médios de corrente, é possível montar os campos de função de corrente modeladas para os determinados períodos amostrados. Com isso, apresentam-se os cenários de corrente para a região entre as semanas que se seguem e como ela evolui ao longo das semanas com a formação e desenvolvimento desta estrutura meandrante que foi citada neste texto.

Para este caso especificamente, três padrões serão apresentados. O primeiro cenário representa o campo de função de corrente modelado para a primeira semana de agosto dos registros (que equivale aos 7 dias descontando a partir do dia 12 de agosto). O segundo campo representa a semana subsequente ao primeiro registro onde, já observado pelos dados, a corrente muda sua orientação muito provavelmente atestando a formação dos meandros frontais da CB. E para o terceiro caso, os campos de ψ modelado referem-se ao relato do que ocorre posterior às duas semanas de dados anteriores.

Após a compilação de todas as informações necessárias, tem-se a construção, a partir da Figura 5.14, do campo de função de corrente modelado para o nível de 50 m da primeira semana do conjunto de dados de agosto (dia 12 ao dia 18). É possível notar que, ao longo de todo o escoamento, a CB concentra-se entre as isóbatas de 1000 e 2000 m, ou seja, na região do talude intermediário. O escoamento é orientado para sul com velocidade média de cerca de $0,55 - 0,60 \text{ m s}^{-1}$. A largura aproximada da corrente é de aproximadamente 80 km ao longo de todo o trecho percorrido da Bacia de Campos.

Os núcleos de máxima velocidade se localizam em cima da isóbata de 2000 m. Ao norte de Cabo de São Tomé a CB apresenta escoamento orientado em direção ao sul e a partir desta região topográfica, a corrente passa a se orientar para o sentido SO. Ainda nesta figura é possível notar a presença de três estruturas distribuídas ao longo de toda a grade, entretanto essas velocidades que se dirigem para o norte não possuem influência no campo de ψ e não são feições de mesoescala associada à CB e sim reflexos da continuidade imposta pela análise objetiva realizada. O comportamento

meandrante desta é repetido em aproximadamente 22°S decorrente do ajuste da corrente frente à topografia local. Portanto, na semana em questão a CB flui bastante bem comportada sobre a Bacia de Campos.

Figura 5.13: Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho). Painel superior esquerdo: posicionamento das radiais entre os dias 12 a 18 de agosto de 2007. Painel superior direito: posicionamento das radiais entre os dias 19 a 25 deste mesmo ano. Painel inferior: posicionamento das radiais entre os dias 26 e 31 de agosto de 2007.

Para a semana compreendida entre os dias 19 a 25 de agosto de 2007, o padrão modelado apresenta-se diferente ao apresentado na semana anterior. A Figura 5.15, apresenta um escoamento médio orientado em direção ao sul de aproximadamente $0,5 \text{ m s}^{-1}$, bem definido e com largura aproximada de 80 km de estrutura horizontal. Entretanto, quando se observa ao longo de 22°S nota-se a presença de um ciclone nesta região, fato que corrobora a mudança de sentido nos campos médios dos vetores de velocidade medidas através de ADCP. Tem-se a formação e desenvolvimento do Vórtice

de São Tomé. A CB flui ao largo desta estrutura, evidenciando que a estrutura formada é parte do meandramento frontal da Corrente do Brasil.

Figura 5.14: Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB eo longo de 12 ao dia 18 de agosto de 2007.

Para o período que compreende entre os dias 26 a 31 de agosto, tem-se a representação dos campos de função de corrente da Figura 5.16. Novamente, é possível observar o escoamento da CB bem orientado e em direção ao sul acima do Cabo de São Tomé. Em termos de largura da corrente e velocidades médias, o padrão se mantém o mesmo, ou seja, de aproximadamente 80 km de estrutura horizontal e da ordem de $0,55 \text{ m s}^{-1}$ as velocidade imposta ao modelo. Porém, ao que tange a respeito da estrutura básica da CB, os padrões não se alteram. O que é observado, contudo é o desenvolvimento da estrutura frontal do Vórtice de São Tomé nesta região. Portanto, a análise dos campos juntamente com a feição mostram que este vórtice modelado/amostrado pertence à frente da Corrente do Brasil.

Quando comparado as velocidades obtidas do modelo com os dados observados junto às plataformas (Figuras 5.17, 5.18 e 5.19) é possível perceber que o modelo re-

sponde às características das velocidades amostradas ao longo da Bacia de Campos. Assim, a frente média da corrente para os três conjuntos amostrados representa a borda interna da Corrente do Brasil. As velocidades observadas pelas plataformas correspondem à estrutura do vórtice ao largo do Cabo de São Tomé e não como parte do escoamento médio da CB, aferindo e dando confiabilidade ao modelo, que isola o mecanismo de meandramento por arqueamento da frente de velocidades da CB. Este também reproduz essas mesmas velocidades no mesmo sentido que aquelas registradas pelos equipamentos, o que atesta que as escolhas da Tabela 4.1 são adequados para representar uma estrutura de jato da CB média com intensidade sinótica.

Figura 5.15: Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB eo longo de 19 ao dia 25 de agosto de 2007.

Figura 5.16: Campos Horizontais de Função de Corrente modelada para o nível de 50 m correspondente aos dados amostrados pelas Plataformas de Petróleo que compõem o quadro do projeto OCEANOP. Este campo representa a estrutura da CB eo longo de 26 ao dia 31 de agosto de 2007.

Figura 5.17: Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média termal da CB (tracejado vermelho) para a primeira semana de amostragem dos dados de Plataforma (12-18 de agosto de 2007).

Figura 5.18: Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média térmica da CB (tracejado vermelho) para a segunda semana de amostragem dos dados de Plataforma (19 a 25 de agosto de 2007).

Figura 5.19: Posicionamento das radiais (em amarelo) perpendicularmente à posição da frente média térmica da CB (tracejado vermelho) para a terceira semana de amostragem dos dados de Plataforma (26 a 31 de agosto de 2007).

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Sumário e Conclusões

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma síntese do o que foi apresentado ao longo deste trabalho de dissertação. Estes resultados são fruto da busca por respostas acerca das estruturas dinâmicas das feições de mesoescala que ocorrem ao longo da Bacia de Campos associadas somente à Corrente do Brasil.

Em seus trabalhos, *Godoi* [2005] apresenta uma nova denominação acerca da estrutura formada entre a Corrente do Brasil e a Corrente de Contorno Intermediária: o Sistema CB, constituído essencialmente pela CB, CCI, os meandros e vórtice associados às ondas de vorticidade. Fluindo em direção ao sul e ocupando os primeiros metros de coluna de água, a Corrente do Brasil transporta essencialmente AT e ACAS [*Evans & Signorini*, 1985; *Silveira et al.*, 2000b]. Resumidamente, a CCI ocupa os níveis intermediários da coluna de água e transporta majoritariamente AIA e ACS em direção ao norte-nordeste [*Stramma & England*, 1999; *Böebel et al.*, 1999; *Schmid et al.*, 2000]. Entretanto o escopo principal deste trabalho fundamenta-se na Corrente do Brasil fluindo ao largo da Bacia de Campos, mais especificamente.

O Setor Cabo de São Tomé - Cabo Frio apresenta elevada importância tanto no cenário comercial como em aspectos oceanográficos. Economicamente, a região norte do estado do Rio de Janeiro é a maior reserva petrolífera no cenário *offshore* brasileiro e que a Petrobras vem explorando esse recurso desde a década de 1970, respondendo em cerca de 80% de toda a produção nacional do petróleo. Paralelamente a esta iniciativa

comercial, pois o recurso captado encontra-se em solo oceânico, a região que se estende desde o Alto Estrutural de Vitória (em 20,5°S) até as proximidades de Cabo Frio (23°S) representa grande relevância no cenário oceanográfico.

É nesta pequena porção do oceano que reside a recorrência de formação de meandros ciclônicos que crescem em amplitude temporalmente. Podem, por vezes se destacam da corrente e rumam para os interiores da porção do Giro Subtropical do Atlântico Sul; por vezes, os meandros também podem ser reabsorvidos pela própria CB, como descrito por *Garfield* [1990]. A importância se deve ao fato destas estruturas vorticais serem minimamente tão energéticas e vigorosas que as observadas em outros sistemas de corrente de contorno oeste fluindo ao largo de margens continentais. Interessante afirmar que, contrasensualmente, a CB é considerada a mais fraca CCO subtropical do oceano mundial. Com isso a hipótese científica ao qual se baseia este documento é o de testar se o arqueamento da frente térmica interna (ou costeira) da CB, e consequente formação de meandros frontais, é responsável pela variabilidade subinercial (ou de mesoescala, no presente caso) na Bacia de Campos.

O processo de investigação dinâmica da CB foi iniciado através do conjunto de dados do Fundeio Marlim. Esta amostragem corresponde a uma série temporal de um ano de registros datados de 1992 contendo em toda a coluna de água onze correntômetros instalados nas profundidades que estão descritas na Seção 2.2.2. A análise dos dados mostrou que ao longo dos primeiros 350 m de coluna há o domínio da CB com velocidade máxima localizada em subsuperfície (aproximadamente 50 m) de cerca de $0,40 \text{ m s}^{-1}$ orientada para sul. A partir da profundidade de 350 m já é possível caracterizar outro fluxo em direção oposta à CB e com velocidade média da ordem de $0,20 \text{ m s}^{-1}$. O fluxo médio da CB se mostrou orientado ao longo da isóbata local e partindo dessa informação foi construído o perfil médio desta componente de velocidade - $\bar{v}$ e alisado pelo uso dos modos normais dinâmicos (resultado da projeção gaussiana dos modos no perfil vertical de $\bar{v}$ através da regra numérica de integração). Assim, foi possível obter um perfil contínuo de velocidade a partir dos 11 pontos discretos. O primeiro modo baroclínico explica sozinho cerca de 80% da estrutura vertical do jato CB-CCI, o que atesta as suposições referenciadas por *Fernandes* [2001]; *Calado* [2001]; *Godoi* [2005] de que o Sistema CB-CCI consiste em um sistema basicamente

de primeiro modo. O resultado, no entanto, tão relevante quanto à descrição da estrutura vertical da CB, é a estimativa da componente barotrópica da CB. Esta tem sentido norte e é equivalente à amplitude do modo barotrópico de $0,04 \text{ m s}^{-1}$, o que corresponde a 10% da magnitude do valor da velocidade observada no nível correntográfico mais próximo da superfície. A estrutura do modo barotrópico responde por apenas 5% daquela Observada no sistema CB-CCI, segundo o cálculo de projeção modal.

Adicionamos aqui outro a ser levado em consideração acerca da estrutura vertical típica dos meandros. Realizamos também análise das Funções Ortogonais Empíricas (FOE) vetoriais para as anomalias de velocidade. A estrutura vertical, como mostra a Figura 6.1 não inverteu de sentido ao longo de toda a coluna de água exibindo um decaimento acentuado à medida que se aprofunda mais na coluna de água.

Figura 6.1: Perfil vertical da autofunção empírica adimensional $F_1(z)$ ao qual se refere às anomalias de velocidade do Fundeio Marlim. Os pontos em vermelho denotam os valores médios da série para os níveis correntométricos. A linha em azul contínua exibe o resultado da interpolação ao uso dos 4 primeiros modos dinâmico.

Isto indica que o meandramento é muito mais vigoroso no domínio da CB do que na CCI. Esta ausência de inversão ao longo do eixo vertical se reflete em uma composição dinâmica da estrutura do meandro mais rica e complexa do que o jato básico, corroborando *Silveira et al.* [2008]. A Figura 6.2 exibe a plotagem de u' e v' vinculados ao modo FOE dominante, ou seja, no presente caso é equivalente a plotar a parte real e

parte imaginária da amplitude modal. Notemos que o hodograma se apresenta espalhado, sem orientação preferencial. Ou seja, os meandros de mesoescala da CB podem tanto se propagar ao longo da batimetria como na direção normal à ela (i.e., em direção offshore). É evidente a persistência e recorrência dos meandros e vórtices na área de estudo. A análise espectral da série temporal de amplitude do modo FOE dominante, mostra que estes, de fato, dominam a variabilidade subinercial na BC.

Figura 6.2: Comparativo entre as anomalias de velocidade de u e v para a determinação das características meandantes da CB na região da Bacia de Campos.

A análise dos dados do Fundeio Marlim, entretanto, não respondem que tipo de fenômeno de meandramento em questão e a efetiva relação com a frente tanto interna quanto central de velocidades da CB.

O segundo conjunto de dados aplicados à região da Bacia de Campos refere-se ao programa financiado pela PETROBRAS de nome OCEANOP - Oceanografia Operacional. Neste programa, os diferentes pontos de exploração de petróleo possuem equipamentos que realizam a amostragem das condições meteo-oceanográficas pontuais entre as latitudes de 21° e $22,5^\circ\text{S}$. Com isso há o registro temporal da corrente ao longo dos anos. Para este trabalho foram utilizadas as medições coletada por quatro Plataformas distribuídas ao longo da região: a FPSOBR, a P48, P40 e por última a Plataforma localizada na região de quebra da plataforma continental, a PPG1. Como já foi determi-

nado, a partir dos dados do Fundeio Marlim, o núcleo de velocidade em aproximadamente 50 m de profundidade, para cada ponto de amostragem foi separada a série de tempo correspondente a este nível. Para isso separou-se o período que foi registrado em comum a todas as localidades. Trata-se do período de julho a dezembro de 2007. Os resultados proporcionados pelas medições mostram que a CB apresenta o escoamento médio em direção ao sul com velocidades médias em torno de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Os núcleos de velocidade se encontram em aproximadamente 50 m. Ainda em épocas determinadas do ano (mais especificamente na primeira semana de julho e nas três últimas semanas de agosto), houve a possibilidade de se obter os vetores médios dos eventos em que os dados noticiaram a presença da estrutura ciclônica na região. Os eventos de meandramento identificados pelo conjunto de dados do Sistema OCEANOP servem de base para confrontar a aplicação do modelo paramétrico da Corrente do Brasil, e sua relação com a variação temporal da frente térmica interna, com as velocidades observadas por ADCPs durante a ocorrência destes fenômenos.

A investigação para determinar se o meandramento frontal rege a variabilidade de mesoescala da CB é feita através da construção e aplicação de um modelo paramétrico da CB. A premissa básica para construção do modelo é que a frente térmica interior consiste na borda continental do jato, onde suas velocidades são essencialmente nulas. Ou seja, se inspecionarmos a distribuição espacial da frente, devemos interpretá-la como o extremo limite da CB em seu lado costeiro. Frente de velocidades, associada ao gradiente do vento térmico da CB, é portanto paralela à frente térmica interna em superfície. Embora seja premissa de construção do modelo, esta ideia será confirmada apenas se as distribuições modeladas e observadas (OCEANOP) forem semelhantes.

O primeiro passo então na construção do modelo paramétrico é a escolha da estrutura a ser parametrizada. Modificamos, assim, o modelo seccional teórico proposto por *Schmidt et al.* [2007] para inclusão da componente barotrópica estimada pelos dados do Fundeio Marlim. O modelo consiste no produto entre uma função de estrutura vertical (com apropriado cisalhamento de intensidade sinótica) e uma função de distribuição horizontal (que descreve a corrente em sua estrutura normal ao escoamento). Os parâmetros do modelo precisam ser então estimados a partir de dados sinóticos, em particular de distribuições seccionais.

Partimos, então, para utilização de novos conjuntos de dados que permitissem a avaliação de seções verticais da CB na BC através de perfilagens de velocidade. Os dados considerados são aqueles coletados pela Marinha do Brasil no ano de 2002. A esta campanha, realizada pelo N.Oc. Antares, foi designada o nome de Comissão Oceano Sudeste II (COSEII). Esta ocorreu na primavera (outubro-novembro) deste mesmo ano. Em posse destes, pôde-se construir os campos horizontais e verticais de velocidade horizontal. Para tal, notou-se que a CB apresenta largura da ordem de 100 km, com velocidades tipicamente de $0,65 \text{ m s}^{-1}$ para sul no centro jato e próximo da superfície. A identificação da frente de velocidade foi realizada pela estimativa da seção de vorticidade relativa da CB a partir de observações diretas e subsequente cálculo do número de Rossby. Este último revelou um comportamento semi-geostrófico, ainda não descrito na literatura, que permite dinamicamente a utilização da formulação de *Schmidt et al.* [2007] para a CB. De acordo com a análise das seções de ADCP de casco oriundos da OCSEII, a CB estende-se em aproximadamente 400 m de coluna de água, com extensão horizontal de 80-100 km.

O segundo passo consiste na construção de mapas horizontais de velocidade não-divergente e de função de corrente a partir da distribuição espacial da frente térmica interna. O campo de entrada no esquema de interpolação escolhido, o mapeamento objetivo, é obtido através da projeção normal das seções do modelo paramétrico à leste da posição da frente térmica numa determinada data. Obtém-se assim uma distribuição tridimensional da velocidade associada ao meandramento frontal da CB entre 0 m e 400 m. A posição da frente térmica é obtida através da utilização das imagens semanais de temperatura da superfície do mar do programa *Pathfinder*.

O modelo, então, foi validado com a utilização da frente média exatamente para o período de realização da Comissão OCSEII. O padrão horizontal foi corretamente reproduzido e pôde-se inclusive avaliar a distorção no mapeamento do campo observado pelo efeito da sinopticidade (a radial mais ao norte foi amostrada três semanas antes do que a mais ao sul).

Finalmente, os resultados da aplicação do modelo paramétrico foram confrontados com as médias dos vetores de velocidade em 50 m obtidos pelo Sistema OCEANOP. Escolheu-se esta profundidade pois ser àquela mais próxima da superfície coberta pela

perfilagem do ADCP e ser também à de máximo cisalhamento vertical. Os períodos escolhidos para a comparação foram associados a eventos de formação do Meandro de São Tomé entre julho e agosto de 2007. A comparação é muito favorável tanto em direção quanto sentido para as três plataformas oceânicas do Sistema OCEANOP. O mesmo não pode ser dito para o ADCP montado sobre a plataforma de exploração sobre a plataforma continental. As intensidade de velocidade entre modelo e observação são bastante semelhantes, mas a direção é distinta. A conclusão que chegamos é que, sobre o talude e oceano aberto, o meandramento frontal parece ser responsável por parte importante da variabilidade da velocidade em escala subinercial. No entanto, o mesmo não pode ser dito acerca das correntes sobre a plataforma continental. Estas podem estar associadas a outros fenômenos ligados à CB, tais quais vórtices de borda e não frontais. Contudo, o mais provável é que sejam devido a fenômenos típicos de plataforma tais quais as ondas de plataforma (*shelf waves*, já observadas na Bacia de Santos [Castro & Lee, 1995; Dottori & Castro, 2009]).

Com base nos resultados acima, aceitamos a hipótese formulada neste trabalho de que a variabilidade subinercial de correntes na Bacia de Campos é governada pelo fenômeno de meandramento da CB, que tem os deslocamentos da frente térmica interna de superfície como traçador.

6.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Diante ao exposto, a continuidade do trabalho deve ser feita afim de:

- Aprimorar o modelo paramétrico incluindo variação sazonal na velocidade de núcleo da corrente e definir protocolo para aplicação dos parâmetros de distorção da corrente devido à interação com a topografia através de relação entre profundidade do núcleo e isóbata correspondente;
- Utilizar novos parâmetros que possibilitem a delimitação da frente como por exemplo utilizar a frente halina ou de clorofila; e
- Aplicar o modelo para um conjunto de dados que possua variação tanto em escala espacial como em escala temporal.

Referências Bibliográficas

- Böebel, O., R. E. Davis, M. Ollitaut, R. G. Peterson, P. L. Richard, C. Schmid, & W. Zenk, 1999: The intermediate depth circulation of the Western South Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 26(21), 3329–3332.
- Bretherton, F. P., E. D. Russ, & C. B. A. Fandry, 1976: Technic for Objective Analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep-Sea Res.*, 23(7), 559–582.
- Calado, L., 2001: Dinâmica da formação dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil ao largo do sudeste brasileiro. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 95 pp.
- Calado, L., A. Gangopadhyay, & I. C. A. Silveira, 2008: Feature-oriented regional modeling and simulations (FORMS) for the western South Atlantic: Southeastern Brazil region. *Ocean Modelling*, 25, 48–64.
- Campos, E. J. D., J. E. Gonçalves, & Y. Ikeda, 1995: Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil Bight - summer of 1991. *J. Geophys. Res.*, 100(C9), 18.537–18.550.
- Carter, E. F. & A. R. Robinson, 1987: Analysis models for the estimation of oceanic fields. *J. Atmos. Oc. Tech.*, 4(1), 49–74.
- Castro, B. & T. Lee, 1995: Wind forced sea level variability on the Southeast Brazilian Shelf. *Journal of Geophysical Research*, 100(68), 16.045–16.056.
- Castro, B., J. A. Lorenzzetti, I. Silveira, & L. B. Miranda, 2006: *Estrutura Termohalina e Circulação na Região Entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS)*. In: Rossi-Wongtschowski,

- C. L. B., Madureira, L.S.-P. (Eds.), *O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil*. Edusp, São Paulo, 11-120 pp.
- Dottori, M. & B. M. Castro, 2009: The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, 59, 603–614.
- Emery, W. J. & R. E. Thomson, 1998: *Data analysis methods in physical oceanography*. Pergamon, Great Britain, 634 pp.
- Evans, D. & S. R. Signorini, 1985: Vertical structure of the Brazil Current. *Nature*, 315, 48–50.
- Evans, D., S. R. Signorini, & L. Miranda, 1983: A note on the transport of the Brazil Current. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1732–1738.
- Fernandes, A. M., 2001: Dinâmica baroclínica da Corrente do Brasil na região sudeste. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 pp.
- Fernandes, A. M., I. C. A. Silveira, L. Calado, E. J. D. Campos, & A. M. Paiva, 2009: A two-layer approximation to the Brazil Current–Intermediate Western Boundary Current System between 20°S and 28°S. *Ocean Modelling*, 29(2), 154–158.
- Flierl, G. R., 1978: Models of vertical structure and the calibration of two-layer models. *Dynam. Atmos. Oceans*, 2(4), 341–381.
- Gangopadhyay, A. & A. Robinson, 2002: Feature-oriented regional modeling of oceanic fronts. *DAO*, (36), 201–232.
- Garfield, N., 1990: The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de Doutorado, University of Rhode Island, Rhode Island, 121 pp.
- Godoi, S. S., 2005: Dinâmica quase-geostrófica do sistema Corrente do Brasil no embanhamento de São Paulo (23,5°–27°S). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 133 pp.
- Halliwell, G. R. & C. N. K. Mooers, 1983: Meanders of the Gulf Stream Downstream From Cape Hatteras 1975–1978. *J. Phys. Oceanogr.*, 13(7), 1275–1292.

- Houry, S., E. Dombrowsky, P. De Mey, & J.-F. Minster, 1987: Brunt-Väisälä frequency and rossby radii in the South Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 17(10), 1619–1626.
- Joyce, T., 1989: On In Situ "Calibration" of Shipboard ADCPs. *JAOT*, 6(6), 169–172.
- Lima, J. A. M., 1997: Oceanic circulation on the Brazil Current shelf break and slope at 22°S. Tese de Doutorado, University of New South Wales, New South Wales, 144 pp.
- Lorenzetti, J., J. Stech, W. L. Mello-Filho, & A. Assireu, 2009: Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. *C. Shelf Research*, 29(17), 2061–2068.
- Mahiques, M. M., M. C. Bicego, I. C. A. Silveira, S. H. M. Sousa, R. Lourenço, & M. M. Fukamoto, 2005: Modern sedimentation in the Cabo Frio upwelling system, Southeastern Brazilian shelf. *Anais Acad. Bras. de Ciências*, 73(3), 535–548.
- Mascarenhas, A. S., L. B. Miranda, & N. J. Rock, 1971: A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. *Costlow J. D.*, 1, 285:308.
- Mattos, R. A., 2006: Feições de meso e grande escalas da corrente do Brasil ao largo do sudeste brasileiro. Dissertação de Mestrado. *Universidade de São Paulo*, 126 pp.
- Miranda, L. & B. M. Castro Filho, 1979: Condições do movimento geostrófico das águas adjacentes a Cabo Frio (RJ). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 28(2), 79–83.
- Miranda, L. B., 1982: Análise de Massas de Água da Plataforma Continental e da Região Oceânica Adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) a Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 123pp..
- Miranda, L. B., B. M. Castro, & B. Kjerfve, 2002: *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editora da Universidade de São Paulo - Edusp, São Paulo, 414 pp.
- Müller, J. M., Y. Ikeda, N. Zangenberg, & L. V. Nonato, 1998: Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20° S and 28° S. *J. Geophys. Res.*, 103(C3), 5429–5437.

- Mémery, L., M. Arhan, X. A. Alvarez-Salgado, M.-J. Messia, H. Mercier, C. G. Castro, & A. F. Rios, 2000: The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic. *Prog. Oceanogr.*, 47, 69–98.
- Pedlosky, J., 1987: *Geophysical fluid dynamics*. Springer, New York, 728 pp.
- Pollard, R. & J. Read, 1989: A Method for Calibrating Shipmounted Acoustic Doppler Profilers and limitations of Gyro Compasses. *JAOT*, 6(6), 859–865.
- Schmid, C., G. Siedler, & W. Zenk, 2000: Dynamics of the Intermediate Water in the Subtropical South Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 3191–3211.
- Schmid, C. H., H. Schafer, G. Podesta, & W. Zenk, 1995: The Vitória Eddy and its relation to the Brazil Current. *J. Phys. Oceanogr.*, 25(11), 2532–2546.
- Schmidt, A. C. K., W. Ceccopieri, I. C. A. Silveira, & J. M. L. Lima, 2007: Modelo Paramétrico Analítico para a Estrutura de Velocidade do Sistema Corrente do Brasil. *Rev. Bras. Geofis.*, 25(1), 75–91.
- Signorini, S. R., 1978: On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep-Sea Res.*, 25(5), 481–490.
- Silveira, I., S. A. Lima, J.A.M, W. Ceccopieri, A. Sartori, C. Francisco, & R. Fontes, 2008: Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability? *Dynam. Atmos. Oceans*, 45(3-4), 187–207.
- Silveira, I. C. A., 2006: O Sistema de Correntes do Brasil na Bacia de Campos, RJ. Tese de Livre Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 160pp..
- Silveira, I. C. A., W. S. Brown, & G. R. Flierl, 2000a: Dynamics of the North Brazil Current retroflexion from the WESTRAX observations. *J. Geophys. Res.*, 105(C12), 28.559–28.583.
- Silveira, I. C. A., L. Calado, B. M. Castro, M. Cirano, J. A. M. Lima, & A. S. Mascarenhas, 2004: On the baroclinic structure of the Brazil Current-Intermediate Western Boundary Current System. *Geophys. Res. Lett.*, 31(14), L14.308.

- Silveira, I. C. A., E. O. Ribeiro, J. M. L. Lima, R. A. Mattos, R. G. Soutelino, & C. A. Leal, 2005: Caracterização oceanográfica da Bacia do Espírito Santo e da Região de Abrolhos. *Anais do II Congresso Brasileiro de Oceanografia*, Universidade Federal do Espírito Santos, Vitória, 1–3.
- Silveira, I. C. A., A. C. K. Schmidt, E. J. D. Campos, S. S. Godoi, & Y. Ikeda, 2000b: A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *R. bras. Oceanogr.*, 48(2), 171–183.
- Soutelino, R. G., 2008: A Origem da Corrente do Brasil. Dissertação de Mestrado *Universidade de São Paulo*, 101 pp.
- Stramma, L., 1989: The Brazil Current transport south of 23°S. *Deep-Sea Res.*, 36, 639–646.
- Stramma, L., 1991: Geostrophic Transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. *J. Mar. Res.*, 49(2), 281–294.
- Stramma, L. & M. England, 1999: On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104(C9), 20.863–20.883.
- Tomczak, M., P. Otto, J. Church, & F. Boland, 1996: Transport estimates for the East Australian Current from PCM3 mooring array. 23, 29–30.
- Urbano, D. F. & I. C. A. Silveira, 2003: Estrutura dinâmica das contra-correntes equatoriais do Oceano Atlântico ao longo de 44° W. *Rev. Bras. Geofis.*, 21(2), 145–162.
- Valerio, L. P., R. A. Mattos, L. Calado, & A. C. De Paula, 2008: Relação entre a Frente Térmica e de Velocidade da Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro. *III Simpósio Brasileiro de Oceanografia*, Universidade de São Paulo.
- Viana, A. R., J. C. Faugères, R. O. Kowsmann, J. A. M. Lima, L. F. G. Caddah, & J. G. Rizzo, 1998: Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. *Sement. Geol.*, 115, 133–157.
- Zembruski, S., 1979: Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In PROJETO REMAC. geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Série REMAC no. 7), Rio de Janeiro, 129–177.