Ácmon Francisco Pedrosa Bhering

**Correntes perpendiculares à costa ao Norte da
Plataforma Continental Sudeste Brasileira**

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

Orientador:

Professor Dr. Marcelo Dottori

São Paulo

2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Correntes perpendiculares à costa ao Norte da Plataforma
Continental Sudeste Brasileira**

Ácmon Francisco Pedrosa Bhering

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

Julgada em ____/____/____

Versão Corrigida

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Descrição da área de estudo	1
1.2	Circulação perpendicular em Plataformas Continentais	4
1.3	Ondas de plataforma	8
1.4	Intrusão de ACAS na Plataforma Continental Sudeste Brasileira	9
2	HIPOTESE E OBJETIVOS	12
3	METODOLOGIA	13
3.1	Dados de correntometria - Projeto DEPROAS	13
3.2	Dados de ventos	17
3.3	Estimativa do Número de Burger e do tempo de desligamento	18
3.4	Procedimentos estatísticos	19
3.5	Modelo Numérico	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	O número de Burger e o tempo de desligamento da camada de Ekman de fundo na PCSE	25
4.2	Ubatuba	27
4.2.1	Isóbata de 50 metros	27
4.2.2	Isóbata de 100 metros	38
4.2.3	Isóbata de 200 metros	48
4.3	Baia de Guanabara	63
4.3.1	Isóbata de 200 metros	63
4.4	Cabo Frio	74
4.4.1	Isóbata de 50 metros	74
4.4.2	Isóbata de 100 metros	83
4.4.3	Isóbata de 200 metros	88
4.5	Resultado do modelo numérico	96
5	CONCLUSÕES	101
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	103

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mapa indicando: (a) Plataforma Continental Sudeste Brasileira, (b) Norte da Plataforma Continental Sudeste Brasileira e (c) a região de estudo e as isóbatas de 50, 100 e 200 metros.	1
Figura 1.2: Velocidade perpendicular média (m/s) da componente perpendicular à costa em fundeios da plataforma média do Noroeste da África, Norte da Califórnia, Oregon e Peru, respectivamente. Correntes positivas direcionam-se ao largo. Os parâmetros de Burger para as figuras são 0.19, 0.43, 0.95 e 1.35, na ordem em que aparecem. Figura adaptada de Lentz e Chapman (2004).	6
Figura 3.1 Mapa das posições das três radiais e seus respectivos fundeios na região Norte da Plataforma de São Paulo e Sul da Plataforma do Rio de Janeiro. A Tabela 3.1 apresenta informações sobre cada um dos fundeios.....	14
Figura 3.2: Correntógrafo 2D-ACM da Falmouth Scientific.	16
Figura 3.3: Perfilador acústico de correntes da fabricante Sontec.	16
Figura 3.4: Componente zonal, não decomposta do vento para o primeiro trimestre do ano 2000. A série cinza é a interpolação de hora em hora enquanto a série preta é a série filtrada com filtro Lanzos de janela de 40 horas.	18
Figura 3.5: Componente meridional, não decomposta do vento para o primeiro trimestre do ano 2000. A série cinza é a interpolação de hora em hora enquanto a série preta é a série filtrada com filtro Lanzos de janela de 40 horas.	18
Figura 3.6: Histograma de distribuição de velocidade perpendicular à costa, em faixas de 2 cm/s, da profundidade de 75 metros de FUB2. A média é aproximadamente 8cm/s, enquanto os limites $\pm 3\sigma$ são aproximadamente -31cm/s e 48cm/s, respectivamente. Portanto todos os valores fora deste intervalo foram considerados outliers.	20
Figura 3.7 Grade e batimetria dos experimentos do modelo numérico.....	23
Figura 4.1 : Histogramas de distribuição de velocidade paralelas do Fundeio de 50 metros de Ubatuba, para as profundidades de 10, 30 e 44 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.	28
Figura 4.2: Histogramas de distribuição de velocidade perpendiculares do Fundeio de 50 metros de Ubatuba para as profundidades de 10, 30 e 44 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam para a costa.	29
Figura 4.3 Séries de dados do Fundeio 1 de Ubatuba: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente.....	30
Figura 4.4: Séries de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 1 de Ubatuba: em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente.....	31
Figura 4.5: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 10 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 4, 5 e 6, respectivamente.	32
Figura 4.6: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 30 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 3, respectivamente.	33

Figura 4.7: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 44 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 2 e 4, respectivamente.33

Figura 4.8: Ubatuba fundeio 1 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente. ..34

Figura 4.9: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 10 e 30m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 50 m (Ubatuba) entre dezembro de 2001 e fevereiro de 2002.....35

Figura 4.10: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 10 e 44m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 50 m (Ubatuba) entre abril e julho de 2003.....36

Figura 4.11: Ubatuba (50 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha.37

Figura 4.12: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 100 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 75 e 94 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.39

Figura 4.13: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 100 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 75 e 94 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam para a costa.39

Figura 4.14: série de dados do Fundeio 2 de Ubatuba (100m): em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades de 23, 75 e 94m, respectivamente.40

Figura 4.15: Série de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 2 de Ubatuba: em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades 23, 75 e 94m, respectivamente.....41

Figura 4.16: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 5 e 6, respectivamente.42

Figura 4.17: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 75 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2 e 6, respectivamente.43

Figura 4.18: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para a campanha 4. A primeira figura (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda (vermelha) apresenta dados para a componente paralela.43

Figura 4.19: Ubatuba fundeio 2 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades de 23, 75 e 94m, respectivamente44

Figura 4.20: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 75 e 94m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 100 m (Ubatuba) entre fevereiro e abril de 2004. O eixo das ordenadas representa a distância percorrida em km. Distâncias positivas representam fluxo para a costa.45

Figura 4.21: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23 e 75m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 100 m (Ubatuba) entre fevereiro e abril de 2004. O eixo das ordenadas representa a distância percorrida em km. Distâncias positivas representam fluxo para a costa.45

Figura 4.22: Ubatuba (100 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Planos sem gráfico significam que as campanhas possuem problemas amostrais.	47
Figura 4.23: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.....	49
Figura 4.24 Histogramas de distribuição de velocidade perpendiculares do Fundeio de 200 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.	49
Figura 4.25: Ubatuba fundeio 3 – em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares das velocidades, em cm/s. Profundidades de 23, 85, 155 e 94m, respectivamente.	50
Figura 4.26: série de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 3 de Ubatuba (200m): em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente.	51
Figura 4.27: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2 (parcialmente), 4 e 5, respectivamente.....	52
Figura 4.28: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 85 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4 e 6, respectivamente.	52
Figura 4.29: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.	53
Figura 4.30: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 194 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.	53
Figura 4.31: Ubatuba fundeio 3 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, respectivamente.....	54
Figura 4.32: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre novembro de 2001 e fevereiro de 2002.	56
Figura 4.33: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre junho e dezembro de 2002. A profundidade de 23 metros apresenta dados somente até agosto de 2002.	56
Figura 4.34: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre março e julho de 2003.	57
Figura 4.35 A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Ubatuba.....	58

Figura 4.36: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a primeira campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.	58
Figura 4.37: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 3 de Ubatuba.	59
Figura 4.38: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.	59
Figura 4.39: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a quarta campanha 4 do Fundeio 3 de Ubatuba.	60
Figura 4.40: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 4ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.	60
Figura 4.41: Ubatuba (200 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Planos sem gráfico significam que as campanhas possuem problemas amostrais.	62
Figura 4.42: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros da Baía de Guanabara, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.	64
Figura 4.43: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 200 metros da Baía de Guanabara, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.	64
Figura 4.44: série de dados do Fundeio 3 da Baía de Guanabara: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 23, 85, 155 e 194 metros, respectivamente.	65
Figura 4.45: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	66
Figura 4.46: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 85 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.	66
Figura 4.47: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.	67
Figura 4.48: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, para a campanha 1. A primeira figura (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda (vermelha) apresenta dados para a componente paralela.	67
Figura 4.49: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre dezembro de 2001 e março de 2002.	69

Figura 4.50: Pseudodeslocamento em km paras as profundidades de 23, 85 e 155 (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre junho e outubro de 2002.	69
Figura 4.51: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 1ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.	70
Figura 4.52: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Ubatuba.	70
Figura 4.53: Amplitudes do 1º, 2º e 3º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85 e 155 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa. Dados de velocidades para a profundidade de 194 metros foram desconsiderados.	71
Figura 4.54: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 3 de Ubatuba. Dados de velocidades para a profundidade de 194 metros foram desconsiderados.	71
Figura 4.55: Baía de Guanabara (200 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.	73
Figura 4.56: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 50 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 10, 30, e 44, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.	75
Figura 4.57: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 50 metros de Cabo Frio, para as profundidades de 10, 30 e 44, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.	75
Figura 4.58: série de dados do Fundeio 1 da radial de Cabo Frio: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 10, 30 e 44 metros, respectivamente.	76
Figura 4.59: Cabo Frio, fundeio 1 - profundidade de 10 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	77
Figura 4.60 Cabo Frio, fundeio 1 - profundidade de 30 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	77
Figura 4.61: Pseudodeslocamento em km paras as profundidades de 10 e 23 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 50m (Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002.	79
Figura 4.62: Pseudodeslocamento, em km, paras as profundidades de 10 e 23 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre julho e novembro de 2002.	79
Figura 4.63: Pseudodeslocamento, em km, paras as profundidades de 23 e 44 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre janeiro e abril de 2003.	80
Figura 4.64: Pseudodeslocamento em km paras as profundidades de 10, 23 e 44 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre fevereiro e março de 2004.	80
Figura 4.65: Amplitudes do 1º, 2º e 3º modos, respectivamente, para as profundidades de 10, 30 e 44 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa. 81	

Figura 4.66: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 1 de Cabo Frio.....	81
Figura 4.67: Cabo Frio (50 m) Índice de correlação por tempo (horas) entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.	82
Figura 4.68: Fundeio de 100 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 74 e 94 metros, respectivamente. Os dois histogramas superiores representam a distribuição da componente paralela enquanto os dois histogramas inferiores apresentam velocidades perpendicular. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda e se direcionam à costa, respectivamente.	84
Figura 4.69: série de dados do Fundeio 2 de Ubatuba: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades de 75 e 94m, respectivamente. Dados de velocidades para 23 metros foram desconsiderados.....	84
Figura 4.70: Cabo Frio, fundeio 2 – profundidade de 75 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.	86
Figura 4.71 Cabo Frio, fundeio 2 – profundidade de 94 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas.....	86
Figura 4.72: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 75 e 94m m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 100 m (radial de Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002. ...	87
Figura 4.73: Cabo Frio (100 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.	87
Figura 4.74: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 200 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.....	89
Figura 4.75: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa à sua esquerda.....	89
Figura 4.76: série de dados (cm/s) do Fundeio de 200 metros de Cabo Frio: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 23, 85, 155 e 194 metros, respectivamente.....	90
Figura 4.77: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 23 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.	91
Figura 4.78: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 85 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 3 e 4 respectivamente.	91
Figura 4.79: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a	

segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente. 92

Figura 4.80: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 194 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente. 92

Figura 4.81: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (radial de Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002. 93

Figura 4.82: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (radial de Cabo Frio) entre julho e novembro de 2002. 94

Figura 4.83: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85 e 155 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (radial de Cabo Frio) entre janeiro e abril de 2003. 94

Figura 4.84: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 1ª campanha de Cabo Frio. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa. 95

Figura 4.85: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Cabo Frio. 95

Figura 4.86: E1 - corrente perpendicular à costa (m/s) no transecto de Ubatuba em regime de vento, caracterizado por vento de sudoeste espacialmente constante. Campos iniciais de temperatura e salinidades constantes. Correntes negativas fluem ao largo. Eixo das abcissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m). 97

Figura 4.87: E2 - corrente perpendicular à costa (m/s) no transecto de Ubatuba em regime de vento de nordeste espacialmente constante. Campos iniciais de temperatura e salinidades constantes. Correntes negativas fluem para a costa. Eixo das abcissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m). 98

Figura 4.88: E3- corrente perpendicular à costa (m/s), através de modelo prognóstico, no transecto de Ubatuba com vento espacialmente constante e de verão e termoclina entre 90 e 120 metros. Correntes negativas fluem ao largo. Eixo das abcissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m). 100

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Dottori pelas orientações, ajudas, discussões e ensinamentos ao longo dessa caminhada. Também agradeço a todos os outros professores do IO USP pelo profissionalismo pedagógico e pela educação de ponta fornecida em suas aulas.

Agradeço ao pessoal do lab, principalmente pelo modelo numérico.

Também agradeço a minha família, que tanto amo, que sempre apoiou e incentivou todas as formas de educação, dentro e fora de casa.

Agradeço muito ao Mario por todo o apoio nessa estrada.

Agradeço a ajuda oceanográfica dos meus grandes amigos Afonso, Jonas e Bruna. Valeu leske!

Agradeço a todos os outros amigos de Floripa e BH que, seja no café ou na cerveja, formaram meu caráter, desenvolveram meu senso crítico e me deram muita alegria nessa vida.

E por fim e não menos importante, agradeço ao pessoal da secretaria de pós-graduação e da biblioteca, assim como todos os outros funcionários do IO, que me ajudaram diversas vezes. Muito obrigado!

Resumo

A componente perpendicular à costa das correntes nas plataformas continentais é comumente menos intensa e energética do que a componente paralela. Entretanto, elas são importantes no contexto da circulação normal à costa e da troca de água entre plataformas continentais e oceano aberto. Este trabalho teve por finalidade compreender o comportamento das correntes perpendiculares à costa na parte setentrional da Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE). Para tal, utilizou-se quatro anos de dados de correntometria do projeto DEPROAS em fundeios de 50, 100 e 200 metros de profundidades nas radiais de Cabo Frio, Ubatuba e Baía de Guanabara para diversas análises e procedimentos estatísticos, assim como experimentos numéricos utilizando-se o modelo computacional sECOM. Esses dados foram comparados com parâmetros adimensionais (número de Burger) afim de descrever os principais padrões de resposta dessas correntes às diversas condições nos espectros temporais e espaciais. O número de Burger (S) é um bom parâmetro para descrever a dinâmica perpendicular na PCSE. Regiões com S próximo ou maior do que um (principalmente próximas ao talude) transportam água, para a plataforma principalmente acima da camada de fundo, devido ao rápido desligamento da camada de Ekman (períodos menores do que os subinerciais). Consequentemente, nas regiões dos fundeios das isóbatas de 200 metros, registrou-se a exportação de água da plataforma para o oceano aberto próximo ao fundo associados à maré diurna.

Abstract

The cross-shore current on continental shelves are usually less intense and energetic than the alongshore current. However, they are important in characterizing the cross shelf circulation and the exchange of water between the continental shelf and the open ocean. This paper aims to understand the behavior of cross-shore currents on the northern part of the Southeast Brazilian Continental Shelf. It was used four years of current data from DEPROAS project's moorings (50, 100 and 200 meters depths) from cross-sections in Cabo Frio, Ubatuba and Guanabara Bay. Those data were statistically treated and analyzed. In addition, it was conducted numerical experiments with sECOM computational model. Those data were compared with dimensionless parameters (Burger number) in order to describe the main response patterns of them during different temporal and spatial conditions. The Burger number (S) is a good parameter to describe the cross-shelf dynamics in the studied area. When S is near or greater than one (especially near the slope) the water fluxes directed to the platform occurs mainly above the bottom layer due to the rapid shutdown of Ekman layer. Consequently, nearby the 200 meters isobaths, the water is exported to the open ocean near seabed associated with diurnal tide.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Descrição da área de estudo

A Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) se estende na direção sudoeste-nordeste, entre Cabo Frio ($23^{\circ}00'S$) e o Cabo de Santa Marta ($28^{\circ}36'S$), com comprimento ao longo da costa de aproximadamente 1100 km. A orientação da PCSE sofre uma abrupta mudança de orientação na latitude de Cabo Frio, onde se torna quase zonal. A declividade média da plataforma é suave (aproximadamente 1:1000) e sua quebra ocorre entre as isóbatas de 120 e 180 metros (Castro & Miranda, 1998). A área de estudo deste trabalho compreende a região norte da PCSE, mais especificamente às regiões compreendidas entre Ubatuba e Cabo Frio (Figura 1.1).

Figura 1.1: Mapa indicando a partir da figura superior esquerda em sentido horário: Plataforma Continental Sudeste Brasileira, Norte da Plataforma Continental Sudeste Brasileira e a região de estudo com as isóbatas de 50, 100 e 200 metros.

A região de estudo possui um padrão de distribuição de massas de água bem definido pela mistura de três massas: Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Costeira (AC). A AT é uma água oceânica que se localiza na parte superior e externa da Plataforma Continental. Possui temperatura e salinidade acima de 20°C e 36,4, respectivamente. A ACAS é também uma massa de água oceânica e encontra-se sobreposta à AT, com índices de temperatura e salinidade inferiores a 20°C e 36,4, respectivamente. Já a AC possui os menores índices de salinidade devido à descarga de águas estuarinas (AMOR, 2004) e apresenta as maiores temperaturas, registrando em média 22°C. Emilsson (1960) denominou a mistura destas três massas, que ocorre em grande parte da plataforma, principalmente em meias profundidades, como Água de Plataforma.

Castro (2014) quantificou a variabilidade da estratificação de massas, no sentido perpendicular à costa, entre verões e invernos ao largo de Ubatuba, utilizando alta resolução espacial (distância média entre pontos de coletas de aproximadamente 8 km). Este autor concluiu que a distância da estratificação máxima à costa é menor no verão (36,1 km da costa) do que no inverno (85,6 km). Ainda, mesmo considerando as trocas de calor entre o oceano e a atmosfera, Castro (2014) concluiu que essas regiões seriam verticalmente homogêneas, se não fosse pela advecção de massas d'água. Essa advecção ocorre na Plataforma Continental Interna, através do transporte paralelo à costa de Águas Continentais, e na Plataforma Continental Média, através da intrusão da ACAS.

Tratando-se dos aspectos hidrodinâmicos, segundo Castro (1996), as correntes observadas na Plataforma de São Paulo são originadas por forçantes de duas diferentes categorias: a primeira categoria é composta por forçantes que atuam diretamente sobre a plataforma, como a ação de ventos e variação espaço-temporal das propriedades hidrográficas; a segunda categoria é composta por forçantes comunicadas do talude através da quebra da plataforma, como as marés ou troca de massas d'água. Dados do Projeto Integrado de Oceanografia Física (PIOF) analisados por Castro (1996), e do PIOF e do projeto de Circulação Oceânica da Região Oeste do Atlântico Sul (COROAS), analisados por Dottori e Castro (2009), demonstram que as variabilidades média, máxima e mínima das correntes paralelas à costa são significativamente maiores do que as variabilidades das correntes normais às costas. Devido a esse fator, a maior parte dos estudos hidrodinâmicos conduzidos até então privilegiam a análise da variabilidade da componente paralela à costa das correntes.

As principais características atmosféricas ao longo da costa brasileira são definidos pelo giro anticiclônico do Atlântico Sul, determinado pela Alta Subtropical do

Atlântico Sul (ASAS), e pelos ventos alísios na zona equatorial (CASTRO & MIRANDA, 1998). Na região do estudo além da atuação da ASAS, há também a influência dos sistemas de frentes frias que acontecem, em média, entre três e seis dias, sendo intercalados por eventos de ventos do quadrante norte (CASTRO & MIRANDA, 1998).

Estudos conduzidos até o momento demonstram a importância da ação dos ventos na determinação das correntes observadas sob a Plataforma Continental Sudeste Brasileira, especialmente em sua parte mais central onde está inserida a plataforma do Estado de São Paulo. Kvinge (1967) analisou uma série de 17 dias de correntes para o canal de São Sebastião, e apesar de não concluir que as correntes ali observadas são primeiramente geradas devido ao regime de ventos, este autor correlaciona o sentido da corrente observada com a passagem de um sistema frontal, e que a oscilação deste sistema é similar à oscilação dos dados meteorológicos observados. Entretanto, Kvinge (1967) não analisou as componentes perpendiculares à costa.

Castro (1996), utilizando Funções Empíricas Ortogonais, determinou que a variância dos dados do campo de velocidade paralelo à costa é explicada em sua maior parte pelo modo barotrópico, sempre acima de 90% da variabilidade. Já para as correntes perpendiculares à costa, ora o segundo modo ora o terceiro modo explicam a maior parte da variância. Ainda, as correntes geradas pela maré foram responsáveis por até 43% da variabilidade da componente perpendicular à costa das correntes.

Dottori e Castro (2009) reanalisaram dados dos projetos PEOF e COROAS e determinaram que o modo barotrópico foi responsável pela maior parte da variabilidade dos dados da componente das correntes paralela à costa, e que existe uma alta correlação entre essa variabilidade e dados de vento. Entretanto, a importância do vento foi reduzida para as correntes próximas à quebra da plataforma, que sofre mais com a influência da Corrente do Brasil. No mesmo estudo, os autores supracitados realizaram experimentos numéricos, utilizando o modelo proposto por Clarke e Brink (1985) com ventos paralelos e perpendiculares à costa, com intensidade entre 8 e 11 m/s. Em todos os experimentos, as correntes geradas paralelas à costa são mais intensas do que as correntes normais, reforçando as observações.

Santos (2009) estudou dados de corrente do limite norte da Plataforma Continental Sudeste (região de Cabo Frio) e também concluiu que as correntes paralelas à costa foram mais intensas e com maior variabilidade temporal do que as correntes normais, corroborando com Castro (1996) e Dottori e Castro (2009). Ainda, as correntes de maré apresentavam uma influência aproximada em 45% da variabilidade das correntes perpendiculares, enquanto a variabilidade das correntes paralelas era representada majoritariamente pelas correntes subinerciais (entre 87% e 91%).

Entretanto, diferentemente das correntes paralelas, a variabilidade subinercial das correntes perpendiculares possui baixa correlação com regimes de vento, e o motivo provável que determina a variabilidade desses dados é a propagação de Ondas de Plataforma Continental, indicando a importância de forçantes remotas na área de estudo.

Nenhum dos trabalhos citados determina claramente os motivos da variabilidade ocorrida na componente perpendicular à costa das correntes, visto que essas são menos energéticas e possuem menor variabilidade do que as correntes paralelas. Sabe-se que as correntes de maré são responsáveis por grande parte da variabilidade nas correntes normais, mas que também existem outros fatores que determinam tal variabilidade.

Embora, em termos de variabilidade, a componente paralela à costa tenha um maior protagonismo, determinar a variabilidade da componente normal das correntes também é importante, pois estas podem transportar ACAS, que é rica em nutrientes, para regiões mais internas da plataforma continental e favorecer a produção primária do subsistema e, conseqüentemente, toda a biota associada. Além disso, a componente perpendicular das correntes é responsável pelas trocas de material e propriedades entre a Plataforma Continental e o talude e o oceano profundo

1.2 Circulação perpendicular em Plataformas Continentais

A estrutura vertical das velocidades perpendiculares à costa e a velocidade vertical associada são fundamentais para a melhor compreensão das ressurgências costeiras, segundo Lentz & Chapman (2004). De acordo com os mesmos autores, existem numerosos artigos e trabalhos científicos, que explicam de formas consistentes os principais modos de ressurgências costeiras, focando principalmente no fluxo paralelo à costa, enquanto muitos aspectos das circulações perpendiculares e verticais permanecem mal compreendidos.

Como os dados observacionais nos estudos que abordam a dinâmica perpendicular à costa são limitados, alguns modelos hipotéticos foram utilizados para confrontar dados não totalmente contínuos. Stommel & Leetmaa (1972) criaram um modelo com linha de costa infinita, largura da plataforma semi-infinita, fluxo médio constante proveniente de descarga fluvial da costa e profundidade que varia linearmente. O modelo em si descreve desde a circulação ocasionada puramente pelo

stress do vento, até a circulação ocasionada pela diferença de densidade (no caso, salinidade) na Bacia Central do Atlântico¹. Esse modelo indica que, mesmo em situações favoráveis à ressurgência, com altas velocidades perpendiculares à costa, as velocidades paralelas à costa ainda são pelo menos 4 vezes mais intensas. Entretanto, devido as suas limitações de resolução espacial, esse modelo não descreve o que ocorre em toda a coluna d'água.

Outro modelo bidimensional, com dinâmica linear, gradientes de pressão puramente barotrópicos e com transporte forçado pelo vento foi aplicado por Dever (1997), que confronta dados observacionais de verão e de inverno, na plataforma continental da Carolina do Norte. O modelo simulou bem o transporte perpendicular à costa durante o inverno, onde o transporte de superfície foi altamente correlacionado a dados observacionais, e explicado pelo transporte de Ekman tanto em superfície quanto na camada de fundo. Entretanto, esse modelo não gerou resultados próximos aos dados observacionais do verão, onde os transportes do interior da coluna d'água e da camada de fundo não responderam bem. O próprio autor sugere que a baixa correlação das velocidades perpendiculares entre o modelo proposto e os dados observacionais pode ser explicado por falhas no modelo, como processos não-lineares, gradientes de pressão baroclínica e forçantes remotas, e ainda o transporte forçado pelo vento também pode ser somado a outros processos, como vórtices de mesoescala, frentes de ressurgência e topografia variável.

Como os processos físicos que governam a circulação perpendicular à costa nas plataformas continentais são diferentes em cada região, modelos mais simples não são capazes de reproduzir grande parte das observações. Mesmo que a estrutura de velocidade perpendicular esteja associada ao balanço do momentum paralelo, o momento integrado permanece desconhecido, devido às incertezas das estimativas de *stress* de fundo, à força de Coriolis associada com as baixas velocidades perpendiculares e à dificuldade de medir precisamente os gradientes de pressão paralelos (LENTZ & CHAPMAN, 2004). Esses mesmos autores propuseram um modelo bidimensional no qual diferentes estratificações e batimetrias produzem variações na magnitude da divergência de fluxo do momentum perpendicular não-linear, e concluíram que as diferenças nos processos de ressurgência em diferentes costas dependem da relação entre o fluxo de momentum perpendicular não-linear com o *stress* do vento, representada pelo número de Burger:

¹ A Bacia Central do Atlântico (*Mid Atlantic Bight*) é a região costeira localizada na costa Leste dos Estados Unidos, estendendo-se desde a Carolina do Norte até o estado de Massachusetts

$$S = \frac{N\alpha}{f} \quad (1)$$

onde α representa o declive de fundo, N é a frequência de Brunt-Vaisala, e f é o parâmetro de Coriolis. Quando o número de Burger é pequeno, o fluxo de momentum perpendicular também é pequeno, e o *stress* de fundo balanceia o *stress* do vento. Logo, o fluxo de retorno ocorre principalmente na camada de fundo. Quando o número de Burger é maior ou igual a 1, a divergência do fluxo de momentum é relativamente grande, e contrabalança o *stress* do vento. Portanto, o fluxo de retorno ocorre principalmente no interior invíscido. Ainda, de acordo com Clarke & Brink (1985), quando o número de Burger é muito pequeno, a plataforma responde de forma barotrópica ao *stress* do vento. Assim, quando maior o parâmetro S , mais importante são os modos baroclínicos na dinâmica perpendicular à costa, enquanto um número de Burger (S) pequeno favorece um transporte barotrópico. A Figura 2, adaptada de Lentz e Chapman (2004) é uma comparação das velocidades perpendiculares médias, em diversas profundidades, entre as plataformas, em uma sequência crescente de S .

Figura 1.2: Velocidade média (m/s) da componente perpendicular à costa em fundeios da plataforma média do Noroeste da África, Norte da Califórnia, Oregon e Peru, respectivamente. Correntes positivas direcionam-se ao largo. O número adimensional de Burger para as regiões citadas são 0.19, 0.43, 0.95 e 1.35, na ordem em que aparecem. Figura adaptada de Lentz e Chapman (2004).

Ao analisar a Figura 1.2, percebe-se que a intrusão de águas mais densas ocorre predominantemente no fundo quando $S < 1$ (Noroeste da África) e à meia água quando S é próximo ou maior do que 1 (Oregon e Peru). Dottori e Castro (2009) analisaram essa situação para a plataforma do Estado de São Paulo, onde α foi estimado por uma regressão linear da batimetria entre a Ilha de São Sebastião e a quebra da plataforma, e a frequência média de Brunt-Väisälä (tanto para inverno quanto para verão) determinada por uma média dos diversos cruzeiros analisados. Esses autores

encontraram $S \ll 1$ em ambas as estações do ano, o que indica uma resposta média predominantemente barotrópica para a plataforma em resposta às forçantes subinerciais do vento. Ainda, os mesmos autores concluem que os movimentos subinerciais ficam confinados à plataforma continental.

A dinâmica do transporte perpendicular descrita em Lentz e Chapman (2004), para S próximo ou maior do que 1, ocorre quando existe um desligamento da camada de Ekman de fundo, ou seja, quando as velocidades observadas na camada de fundo não correspondem à resposta analítica do balanço de Ekman. A advecção de águas mais densas descendo o talude (ou a própria plataforma) induz uma mistura vertical, homogeneizando e afinando a camada de Ekman de fundo. Assim, a inclinação das isopícnais reduz a velocidade geostrófica da camada de fundo, e, conseqüentemente, reduz o transporte de Ekman (BENTHUYSEN et al., 2015) em um intervalo temporal exponencial (a relação entre S e τ_0 é inversamente e exponencialmente proporcional), dependendo da estratificação local (MACREADY & RHINES, 1993). Portanto, o afinamento da camada limite inferior é equilibrado por um transporte ageostrófico. O tempo necessário para que o desligamento da camada de fundo ocorra, caso S não seja muito menor do que 1, é:

$$\tau_0 = \frac{f}{(N\alpha)^2} \quad (2)$$

Onde τ_0 é a estimativa do tempo de desligamento da camada de fundo. Assim, quando maior o número de Burger, mais rápida será a resposta baroclínica ao *stress* do vento.

Palma et al. (2004b) realizaram experimentos numéricos de circulação em um oceano com salinidade e temperatura inicialmente constantes, utilizando diversas climatologias, e demonstraram que existe um fluxo total em direção ao largo em toda a plataforma do sudoeste do Atlântico, com exceção da região localizada entre as latitudes de 34°S e 43°S. Entretanto, Brink (1991) descreveu que rajadas de ventos, em escalas espaciais muito menores do que àquelas descritas em Palma, possuem um importante papel na definição da variabilidade das correntes perpendiculares.

1.3 Ondas de plataforma

No hemisfério sul, as correntes deixam o sistema de alta pressão à sua esquerda em balanços geostróficos. Quando essas estão no oceano aberto, elas podem formar células fechadas de circulação. Entretanto, em regiões costeiras, centros de alta e baixa pressão não estão necessariamente cercados por pressões uniformes, pois estes centros podem se encontrar com a costa. Isso gera fluxos pelas isóbaras (linhas de pressão constante) em apenas um lado dos centros de pressão, o que pode ocasionar aumento do nível d'água em uma extremidade e redução na outra. O movimento desses centros de alta e baixa pressão é comumente conhecido como ondas de Kelvin, que propagam para o Equador na parte ocidental da bacia oceânica, ocasionando a reversão de correntes costeiras (TOMCZAK, 2000).

Ondas de Kelvin necessitam de uma costa para se propagarem, mas não necessitam de uma Plataforma com declividade. Quando existe uma plataforma bem definida, principalmente nas margens continentais passivas, observa-se a presença de ondas confinadas costeiras. A camada de água transportada em uma plataforma que fica mais funda, por exemplo, tende a se estreitar para conservar volume. Quando isso ocorre, a coluna d'água começará a rotacionar para preservar vorticidade. Se o mecanismo que impõe a forçante for um *stress* de vento periódico, por exemplo, a presença da declividade irá gerar ondas também periódicas, deixando sua região de formação com a costa à sua esquerda. Essas ondas podem contribuir significativamente para a variabilidade do nível do mar e das correntes sobre a plataforma (TOMCZAK, 2000). Huhnnance (1977) descreveu ondas de frequência subinerciais em um oceano continuamente estratificado, confinadas na plataforma e no talude através de uma sequência infinita de modos discretos, que aumentam com a estratificação e se propagam deixando a costa à direita no Hemisfério Norte. Em três limites assintóticos as ondas adotaram formas especiais: ondas de Kelvin; ondas de plataforma barotrópicas (quando a estratificação é baixa) e ondas internas (baroclínicas), quando há grande estratificação. Brink (1991) descreveu essas ondas confinadas, assim como as correntes forçadas pelo vento em plataformas continentais, através de modelos com escalas de tempo maiores do que um dia, mas sempre menores que algumas semanas. Ele caracteriza essas ondas com períodos maiores do que os períodos inerciais como importante mecanismo de resposta do oceano às alterações atmosféricas e, quando elas estão no limite barotrópico como ondas longas, com velocidades de grupo na mesma direção que a velocidade de fase. Já quando essas ondas são curtas, a energia é propagada de forma oposta, permitindo a reflexão energética da onda. Ainda, Brink

(1991), analogamente a Clarke & Brink (1985) e Lentz & Chapman (2004), determinaram que quando o módulo do número de Burger é muito maior do que um, ondas estritamente confinadas não existem.

A teoria de ondas longas se demonstra próxima a dados observacionais quando utilizada para prever a variabilidade de dados do nível do mar e de correntes paralelas, mas não de correntes perpendiculares e de pressão, como observado em Chapman & Brink (1987) e descrito em Brink (1991). Modelos bidimensionais estocásticos, descritos através da aplicação de transformadas de Fourier nas equações de movimento por Brink (1991), permitiram sua resolução para cada frequência e número de onda associado. Foi indicado que picos pronunciados representavam rápidas mudanças de fase, demonstrando o importante papel dessas ondas na variabilidade das velocidades paralelas. Entretanto, as correntes perpendiculares não são dominadas por esses picos de ressonância, indicando que essas correntes são mais sensíveis às escalas de stress de vento paralelo tão pequenas que não constavam no espectro de vento do estudo em questão (escalas menores do que 10 km). Isso demonstra que rajadas de vento em sistemas pequenos poderiam causar grande variabilidade nas correntes perpendiculares.

1.4 Intrusão de ACAS na Plataforma Continental Sudeste Brasileira

A ACAS é a massa de água mais fria da PCSE, e possui alta concentração de nutrientes quando comparada à AT e AC (BRAGA & MÜLLER, 1998). Por isso, a intrusão da ACAS está associada a uma maior taxa de produção primária, propiciando excelentes condições para o desenvolvimento de ecossistemas costeiros e para a indústria pesqueira. Logo, existem diversos trabalhos sobre a intrusão e o afloramento da ACAS na PCSE, principalmente entre a região do Cabo de São Tomé e de Cabo Frio (limite norte da área de estudo). Já no trabalho de Emíllson (1960), ao descrever as massas da PCSE, é demonstrado que existem mecanismos de intrusão e mistura da ACAS e o resultado desta mistura foi denominado de Água de Plataforma.

A intrusão de ACAS na Plataforma continental ocorre em múltiplas escalas temporais. Castro (1996), Amor (2004) e Amor & Castro (2013) descrevem essas intrusões em escalas sazonal, subinercial e maregráfica. Quando existe o fechamento do ciclo da intrusão da ACAS com o seu afloramento na região costeira, denomina-se este processo como ressurgência.

Em escala sazonal, existe uma grande variabilidade espacial das massas de água. A Água Tropical predomina na PCSE durante o inverno, enquanto durante o verão existe penetração da ACAS em praticamente toda a plataforma. O vento possui um sinal sazonal bem definido e exerce um papel importante nessa intrusão (Amor, 2004). Como o vento é predominantemente de Norte/ Nordeste durante o verão, existe uma deflexão da água superficial em direção ao largo devido à dinâmica de Ekman, e assim, uma penetração de águas mais densas em direção à costa abaixo da camada de Ekman. Esse padrão de penetração sazonal da ACAS foi descrito para o largo de Ubatuba (Castro et al. 1987) e para o largo de Cabo Frio (Emillson, 1960; Miranda, 1982; Amor, 2004). Amor (2004), através da análise de dados hidrográficos e modelagem numérica, ainda descreve dois caminhos predominantes de intrusão: um entre a Baía de Guanabara e Cabo Frio, e outro entre Ponta Trindade e Ubatuba. Rodrigues & Lorenzzetti (2001), através de um modelo numérico de elementos finitos em duas camadas, determinaram o importante papel da topografia de Cabo Frio, que intensifica às correntes perpendiculares devido à divergência do transporte.

Processos de instabilidade de mesoescala também atuam como facilitadores para a intrusão de ACAS na Plataforma Continental Sudeste Brasileira. Silveira et al. (2000) determinaram que o crescimento temporal de vórtices estacionários da Corrente do Brasil geram fluxos perpendiculares, intensificando a penetração de ACAS sob as Águas Tropicais e Continentais.

Em escalas maregráficas, marés barotrópicas podem gerar marés internas que, por sua vez, resultam em termos de velocidades perpendiculares. As principais constituintes de maré na PCSE são as constituintes M2, S2, O1 e K1 (MESQUITA E HARARI, 1987). De acordo com Santos (2009), existe ao norte da região da PCSE uma amplitude máxima de 0,3 m, e uma amplitude mínima de 0,1 m próxima ao seu limite austral. Pereira et al. (2007) e Ruffato (2013) demonstraram que a componente maregráfica pode representar até 40% da matriz energética das correntes perpendiculares à costa na PCSE. Entretanto, como a razão de aspecto entre as escalas perpendicular e paralela à costa é muito pequena ($\delta \ll 1$), e as correntes paralelas tendem a convergir com as isóbatas devido ao estreitamento da PCSE, as correntes perpendiculares ficariam com um padrão pouco definido de variabilidade, devido à sua baixa intensidade quando comparado às correntes paralelas da Plataforma Continental.

Alguns estudos sobre a zonação de organismos, e suas intrusões com a ACAS são importantes para compreender o padrão de circulação perpendicular nas plataformas continentais e suas adjacências. Brandini et al. (2014) relataram ciclos de circulação perpendiculares de diatomáceas, em costas de contorno oeste similares à ciclos observados no contorno leste. Assim, o transporte de Ekman e intrusões de água

de fundo são importantes para a circulação de fitoplâncton em sistemas de ressurgência. Logo, as diatomáceas são levadas por mecanismos de intrusão da ACAS para zonas costeiras. Após um estresse biogeoquímico (falta de nutrientes ou limitação de luz) nesses ambientes, as diatomáceas afundam como esporos para evitar ressurgir e serem levadas em direção ao oceano através do transporte de Ekman. As diatomáceas são capazes de sobreviver em sedimentos de plataforma durante muitos anos, que se assemelha à escala temporal do ciclo hidrodinâmico proposto por estes autores. Cada intrusão durante o verão contribui para este mecanismo de transporte, determinando as importantes escalas sazonais do processo e um papel fundamental da componente perpendicular das correntes neste mecanismo.

2. HIPOTESE E OBJETIVOS

As correntes perpendiculares à costa são substancialmente menos intensas e, portanto, transportam menos massa que as correntes paralelas à costa. Entretanto, essas correntes podem transportar massas de água ricas em nutrientes para ambientes pobres, assim como são capazes de exportar água da plataforma continental para o talude e para o oceano aberto, o que as caracterizam por seu papel fundamental para a biota de ambientes costeiros e oceânicos. A hipótese desse trabalho é que o transporte perpendicular na costa norte do Estado de São Paulo e sul do estado do Rio de Janeiro é fortemente influenciado pela estratificação e batimentria da região. Assim, o objetivo principal deste trabalho é conhecer e descrever as principais características e a variabilidade das correntes perpendiculares à costa ao norte da PCSE. Para isso, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Estimar o número de Burger;
- Associar a estrutura vertical do transporte com o número de Burger estimado;
- Estimar os espectros das correntes perpendiculares, assim como descrevê-las através de EOFs, pseudodeslocamentos e correlacioná-las com dados de vento;
- Analisar os resultados de modelos numéricos que apresentam casos típicos na PCSE.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição da metodologia utilizada neste estudo e a base de dados empregada. Na seção 3.1 é apresentada a correntometria e a metodologia aplicada; a seção 3.2 apresenta a base de dados e o tratamento estatístico aos dados de vento utilizado; a seção 3.3 apresenta a metodologia, assim como os dados, utilizados para estimar o número de Burger. Ainda, a seção 3.4 apresenta as principais análises estatísticas (medidas de tendência central, histogramas, séries temporais, análises espectrais, pseudodeslocamento, funções ortogonais empíricas, correlações e análises harmônicas) utilizadas ao longo da apresentação dos resultados. Por fim, a seção 3.5 refere-se ao modelo numérico utilizado no presente trabalho.

3.1 Correntometria - Projeto DEPROAS

O Projeto Dinâmica do Ecossistema da Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul (DEPROAS) é um projeto interdisciplinar que possui como principal objetivo o estudo de processos físicos de penetração de ACAS nas plataformas interna e média na região norte da PCSE, principalmente na região de Cabo Frio. Os dados analisados neste estudo pertencem a este compartilhamento de dados oceanográficos da plataforma e talude continentais da região Sudeste brasileira. Os fundeios analisados englobam as radiais de Ubatuba, Baía de Guanabara e Cabo Frio (Figura 3.1), conforme o posicionamento geográfico e a posição das profundidades de coleta conforme a Tabela 3.1, onde FCF representa Fundeio de Cabo Frio, FUB representa Fundeio de Ubatuba, FBG representa Fundeio da Baía de Guanabara. Ainda, o número 1 representa a isóbata de 50 metros, o número 2 representa a isóbata de 100 metros e o número 3 representa a isóbata de 200 metros. Assim, FUB2, por exemplo, representa o fundeio da Radial de Ubatuba sobre a isóbata de 100 metros.

Figura 3.1 Mapa das posições das três radiais e seus respectivos fundeios na região Norte da Plataforma de São Paulo e Sul da Plataforma do Rio de Janeiro. A Tabela 3.1 apresenta informações sobre cada um dos fundeios.

Tabela 3.1: Posicionamento de cada fundeiro analisado do projeto DEPROAS, assim como suas respectivas profundidades locais e profundidades de coleta.

	Prof Local	Profundidades de coleta	Longitude	Latitude
FCF1	50	10, 30 e 44 metros	42° 07.34'W	22° 59.03'S
FCF2	100	23, 75 e 94 metros	41° 54.70'W	23° 05.44'S
FCF3	200	23, 85, 155 e 194 metros	41° 44.86'W	23° 44.45'S
FBG3	200	23, 85, 155 e 194 metros	42° 34.31'W	23° 43.42'S
FUB1	50	10, 30 e 44 metros	44° 53.86'W	23° 43.56'S
FUB2	100	23, 75 e 94 metros	44° 22.20'W	24° 23.50'S
FUB3	200	23, 85, 155 e 194 metros	44° 22.24'W	24° 23.48'S

Todos os fundeios possuíam aquisição de dados em 3 ou 4 profundidades distintas, de acordo com a isóbata sobre a qual se localizava (50, 100 ou 200 metros de profundidade). As aquisições dos dados de velocidades ocorreram entre o inverno de 2001 e o inverno de 2004 em 7 campanhas de períodos não necessariamente contínuos. Durante o período de cada campanha, os correntógrafos fixados em cada fundeio, ou os perfiladores acústicos de correntes (ADCP), registraram dados de correntes zonal e meridional.

Os correntógrafos utilizados para a aquisição de dados de velocidade de corrente foram o 2D-ACM (Falmouth Scientific 2-Dimensional Acoustic Current Meter), identificado na Figura 3.2. Este equipamento coleta e armazena dados de intensidade de velocidade instantânea em duas dimensões, juntamente com dados de direção em 3 eixos, dados de inclinação em 2 eixos, dados de temperatura, e outros sensores opcionais. Os dados de velocidade e inclinação podem ser gerados através de uma composição média de um intervalo de tempo. No presente trabalho, os correntógrafos foram programados para coletar dados no esquema *burst sampling*. Portanto, a cada 15 minutos iniciava-se um ciclo de aquisição de dados em alta frequência que durava 3 minutos. Durante este intervalo, os dados tinham suas médias calculadas a cada minuto.

Os dados de velocidade foram obtidos através de um sensor acústico com módulos mínimo e máximo de 0 cm/s e 600 cm/s, respectivamente. O equipamento possui uma sensibilidade de 1 cm/s, e uma resolução de 0,1 cm/s. A bússola possui uma acurácia de 2° e uma resolução de 0,01°, enquanto os dados de inclinação foram obtidos com uma acurácia de 0,5° e uma resolução de 0,01°.

O outro equipamento utilizado foi o ADCP (Figura 3.3), responsável pela coleta de dados em FCF2 (fundeio da radial de Cabo Frio, profundidade local de 100 metros). Este equipamento é da fabricante da SonTek & YSI e mede a velocidade através do efeito Doppler, utilizando-se transdutores acústicos. Feixes acústicos em frequências bem específicas e conhecidas são emitidos através de três transdutores, e suas reflexões, assim como variações na frequência do sinal acústico emitido, são captadas pelo equipamento e combinadas para o cálculo tridimensional da velocidade. O equipamento obtém velocidades de até 10 m/s. Sua sensibilidade varia entre 1% da velocidade medida e 0,5cm/s, enquanto sua resolução é de 0,1cm/s. Sua bússola possui uma acurácia de 2° e uma resolução de 0,1°, enquanto os dados de inclinação foram obtidos com uma acurácia de 1° e uma resolução de 0,1°.

Figura 3.2: Correntógrafo 2D-ACM da Falmouth Scientific.

Figura 3.3: Perfilador acústico de correntes da fabricante Sontec.

Os dados de velocidade foram coletados em intervalos de quinze minutos (correntógrafos) ou de meia hora (ADCP) e reamostrados, gerando séries de tempo com intervalo de amostragem a cada hora.

A coleta de dados foi dividida em uma campanha teste (dados não utilizados) e seis campanhas subsequentes entre 2001 e 2004. A Tabela 3.2, mostra o início e término do lançamento e recuperação dos correntógrafos (ou ADCP), que varia entre cada fundeio.

Tabela 3.2 Data de início e término do lançamento e recolhimento dos correntógrafos, para cada campanha de DEPROAS.

	Lançamento		Recolhimento	
	Início	Término	Início	Término
Campanha 1	11/12/2001	15/12/2001	18/03/2002	21/03/2002
Campanha 2	25/07/2002	28/07/2002	26/11/2002	18/11/2002
Campanha 3	07/01/2003	13/03/2003	10/02/2003	06/05/2003
Campanha 4	26/04/2003	05/05/2003	22/07/2003	02/09/2003
Campanha 5	21/08/2003	02/09/2003	20/02/2004	10/02/2004
Campanha 6	02/02/2004	11/02/2004	04/05/2004	12/05/2004

3.2 Dados de ventos

Os dados de ventos foram obtidos de reanálises globais (Kalnay et al., 1996) da plataforma do NCEP (*National Center for Environmental Protection*) e NCAR (*National Center for Atmospheric Research*). Esses dados são provenientes do resultado de uma reanálise de dados de diferentes fontes, através de um modelo numérico climático com resolução longitudinal e latitudinal de 2.5°. São disponibilizados em intervalos de 6 horas, e foram utilizados apenas os dados do período entre 1 de janeiro de 2000 e 31 de dezembro de 2004, sob as coordenadas 22°30'S e 42°30'W.

Em seguida, os dados de velocidade foram interpolados para períodos de hora em hora e filtrados utilizando-se um filtro Lanczos com janela de 40 horas. As figuras 3.4 e 3.5 demonstram as séries interpoladas no domínio do tempo (cinza) e filtradas com filtro Lanczos com janela de 40 horas (preto) para o primeiro trimestre de 2000.

Figura 3.4: Componente zonal do vento para o primeiro trimestre do ano 2000. A série cinza é a interpolação de hora em hora enquanto a série preta é a série filtrada com filtro Lanczos de janela de 40 horas.

Figura 3.5: Componente meridional do vento para o primeiro trimestre do ano 2000. A série cinza é a interpolação de hora em hora enquanto a série preta está filtrada com filtro Lanczos de janela de 40 horas.

3.3 Estimativa do Número de Burger e do tempo de desligamento

Para estimar o parâmetro de Burger (Equação 1) nos diferentes pontos amostrais do trabalho, assim como nas isóbatas de 50 e 100 metros ao largo da Baía de Guanabara, foi necessário estimar f (frequência de Coriolis), α (inclinação do fundo) e N (frequência de Brunt-Väisälä), representados pelas equações:

$$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin(\varphi) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta d} \quad (4)$$

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad (5)$$

Onde ω é a velocidade angular da Terra ao redor de seu eixo, φ é a latitude do fundeio, h é a profundidade, Δd é a distância entre duas profundidades, g é a gravidade local, ρ_0 é a densidade média e ρ é a densidade. O cálculo da densidade foi feito através de funções polinomiais descritas em Roquet et al. (2015), utilizando-se o GSW Toolbox (MCDUGALL & BARKER, 2011). Para o cálculo da densidade utilizou-se dados de temperatura e salinidade de verão obtidas em Rezende (2003), portanto, vale ressaltar que o número de Burger estimado representa casos típicos de situações durante esta estação. O cálculo da inclinação (α) deve ser feita através de seções batimétricas (LENTZ & CHAPMAN, 2004), portanto este cálculo foi realizado utilizando-se cartas náuticas da Marinha com resoluções de 1:300000 e 1:292800. Ainda, através das Equações 2, 3, 4 e 5 foi possível calcular o tempo de desligamento para a camada de Ekman de fundo.

3.4 Procedimentos estatísticos

As análises de dados foram realizadas na interface MATLAB 14a, através de rotinas estatísticas desenvolvidas para este trabalho, ou rotinas usuais que já se encontram disponíveis no próprio sistema. Todos os dados passaram por procedimentos estatísticos semelhantes.

Inicialmente, as séries temporais das componentes de corrente meridional e zonal foram reamostrados em intervalos de 1 hora. Em seguida, estas componentes foram decompostas em componentes de velocidade perpendicular e paralela à costa, levando em consideração à orientação da isóbata em que se localizava cada fundeio, que podia variar entre 45° e 90° no sentido horário em relação ao Norte geográfico. Para a

componente paralela valores positivos deixam à costa à sua esquerda, enquanto valores positivos das correntes perpendiculares se direcionam à costa.

Para uma análise inicial, todos os dados das componentes de velocidade perpendicular e paralela foram apresentados em uma única série temporal, que englobavam todas as campanhas dos períodos entre 2001 e 2004, e em histogramas de distribuição de velocidades em grupos de 2 em 2 centímetros por segundos. Algumas campanhas possuíam um número pequeno de dados espúrios nas séries temporais (ou *outliers* nos histogramas), enquanto outras possuíam em maior quantidade. A Figura 3.6 mostra um histograma de velocidades perpendiculares à costa do fundeio da isóbata de 100 metros da radial de Ubatuba, para o correntógrafo de 75 metros de profundidade. O eixo das abscissas apresenta as velocidades distribuídas em intervalos de 2 e 2cm/s, enquanto as ordenadas apresentam o número de casos de intervalos. Ainda, os círculos vermelhos indicam a média do conjunto. A distância entre cada círculo subsequente é de um desvio padrão (σ). Os dados obtidos acima ou abaixo de três desvios padrões foram considerados dados espúrios ou *outliers*, possivelmente associados à erros aleatórios durante suas aquisições. Segundo Emery e Thomson (2001) e Santos (2009) esses erros podem ser ocasionados por falhas elétricas ou mecânicas do equipamento, erros de leitura (devido a presença de pequenos organismos marinhos que se aderem aos sensores, partículas em suspensão ou embarcações) ou outros erros aleatórios dificilmente identificáveis.

Figura 3.6: Histograma de distribuição de velocidade perpendicular à costa, em faixas de 2 cm/s, da profundidade de 75 metros de FUB2. A média é aproximadamente 8cm/s, enquanto os limites $\bar{x} \pm 3\sigma$ são aproximadamente -31cm/s e 48cm/s, respectivamente. Portanto todos os valores fora deste intervalo foram considerados outliers.

Para todas as campanhas, os valores mais distantes que 3 desvios padrões da média foram descartados. Para preencher as lacunas originados pelo descarte destes dados, ou interrupções das coletas menores do que 12 intervalos (12 horas da série temporal), os dados foram interpolados linearmente, visto que a maioria dos métodos de análise necessitam de dados regularmente distribuídos no espaço ou tempo (Thomson & Emery, 1997). Campanhas com lacunas de dados maiores do que o período inercial, ou com problemas de aquisição, foram inteiramente descartadas.

Em seguida, para quantificar a importância de cada faixa de frequência no processo energético das correntes, foi realizada uma análise espectral para cada profundidade de coleta em cada fundeio. O método utilizado para o cálculo do espectro de frequência foi o método descrito em Welch (1967). Basicamente, transforma-se a série temporal $f(t)$ em sua correspondente função de espectro $F(\omega)$, isto é, trabalha-se no domínio da frequência e não do tempo para identificar os principais períodos de oscilação. A estimativa final do espectro em uma determinada frequência é obtida através da média das estimativas do peridiograma derivados de porções que se sobreponham à série original. Em seguida, cada série foi normalizada proporcionalmente ao valor de máximo.

Após a análise espectral para cada campanha, foi realizada uma análise para todo o período amostral. Para isso, além dos dados espúrios, foi removida tanto a média quanto a tendência de toda a série temporal. Em seguida, os intervalos entre campanhas que não possuíam dados de velocidades foram preenchidos com velocidades nulas (*zero padding*), com o intuito de suavizar a aparência do peridiograma (Thomson & Emery, 1997). Os peridiogramas obtidos através da metodologia de Welch estão apresentados na próxima seção. Note que, para a análise espectral, as séries temporais não foram filtradas. Assim, períodos menores que o subinercial (por exemplo, períodos maregráficos) estão presentes na análise.

Após a confecção dos espectros, eliminação e interpolação de dados, foi realizada uma filtragem das séries temporais, utilizando-se um filtro de Lanczos com uma frequência de corte subinercial (janela de 40 horas). As séries temporais das correntes perpendiculares e paralelas à costa (para todas as profundidades) estão apresentadas em gráficos de séries temporais, apresentados na próxima seção.

Após a quantificação das principais frequências para entender o comportamento temporal das séries, se realizou uma análise de Funções Empíricas Ortogonais (EOF) entre os dados de velocidades de um mesmo fundeio, visando distinguir comportamentos barotrópicos ou baroclínicos das colunas d'água, para ambas as

componentes. Os resultados desta análise também se encontram na próxima seção, apresentados individualmente para cada fundeio quando possível. Ainda, considerando-se os dados de velocidade perpendicular coletados localmente, calculou-se o pseudodeslocamento transversal da partícula baseado em fundeios estáticos. Assim, desconsiderando-se qualquer aceleração ou desaceleração do fluido, estimou-se o deslocamento de uma partícula ao longo de uma campanha, para cada nível de coleta. Esse cálculo foi realizado utilizando-se a velocidade perpendicular média de cada hora, ou seja, se o fluido possuía uma velocidade média de 20cm/s em determinado momento, significa que o percurso dele (desconsiderando aceleração) foi de 720 metros em uma hora. Assim, soma-se a distância através dos dados calculados de suas velocidades médias.

Castro (1996), Amor (2004) e Dottori & Castro (2009) determinaram os regimes de ventos como principal mecanismo para a variabilidade subinercial das correntes paralelas à costa, através de análises de dados hidrográficos, de correntógrafos e de modelagens numéricas com dados reais e padronizados de vento. Para compreender o papel do vento na variabilidade das correntes perpendiculares, foi estimada a correlação com atraso entre as correntes perpendiculares e os dados de ventos.

3.5 Modelo Numérico

O sECOM (Stevens Institute Estuarine and Coastal Ocean Hydrodynamic Model) é um modelo variante do POM (Princeton Ocean Model) (BLUMBERG AND MELLOR, 1987), do qual seu módulo de águas rasas é derivado do ECOMSED (BLUMBERG et al., 1999). É um modelo hidrostático, de superfície livre, equações primitivas, com coordenadas verticais de nível sigma-S (níveis proporcionais à batimetria local), e coordenadas horizontais ortogonais curvilíneas, com diferenciação espacial do tipo *Arakawa C*.

Uma grade ortogonal curvilínea foi delineada na Plataforma Continental Sudeste, (Figura 3.7). A resolução horizontal varia entre 270 metros e 2.8 quilômetros perpendicularmente à costa e entre 270 metros (regiões costeiras) e 3.0 quilômetros paralelamente. Note que há uma das melhores resoluções horizontais estão na região da plataforma continental, quebra e talude, onde o espaçamento da grade é menor. Regiões muito afastadas, longe da área de interesse, possuem as menores resoluções. A resolução vertical do modelo é de 21 níveis sigma-S, gerando uma resolução da

ordem de 1 ou 2 metros próximo à costa e da ordem de uma centena de metros nas regiões mais profundas do modelo. A mistura turbulenta vertical é parametrizada pelo padrão 2.5 de Mellor-Yamada. A rugosidade de fundo é de 0.001 m, e o coeficiente de arrasto mínimo estipulado foi de 0.003.

Figura 3.7 Grade e batimetria dos experimentos do modelo numérico

Foram realizados três experimentos numéricos na grade, onde os resultados apresentados descrevem as respostas numéricas sobre a radial de Ubatuba, conforme descritos no Quadro 1, caracterizados por E1 (experimento 1), E2 (experimento 2), E3 (experimento 3). Os modos apresentados pelo modelo são os modos Diagnóstico (D) ou Prognóstico (P).

Quadro 1: Experimentos (E) realizados no modelo numérico sECOM, de acordo com seu respectivo modo - Diagnóstico (D) ou Prognóstico (P) - caracterizando as variáveis vento, temperatura e salinidade.

E	M	Vento	Temperatura e Salinidade
E1	D	Vento de SW espacialmente constante	T e S constantes
E2	D	Vento de NE espacialmente constante	T e S constantes
E3	P	Vento de NE espacialmente constante	Termoclina entre 90 e 120 m

O modo diagnóstico mantém a temperatura e a salinidade fixadas espacialmente e temporalmente. Portanto, não existe variação espacial e temporal da termoclina, por exemplo, na resolução numérica no modo diagnóstico, e dessa maneira, não é registrado variação do gradiente de pressão. Portanto, nesse modo, o número de Burger se mantém constante na escala temporal. Já no modo prognóstico, o modelo altera os campos de temperatura e salinidade numericamente podendo criar, assim, alterações no gradiente de pressão baroclínico no tempo e no espaço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e a discussão destes organizados da seguinte maneira: primeiramente, na seção 4.1 será apresentado o número de Burger, o tempo de desligamento da camada de Ekman e suas consequências para a área de estudo. Em seguida, nas seções 4.2, 4.3 e 4.4, os dados observacionais do projeto DEPROAS da radial de Ubatuba, Baía de Guanabara e Cabo Frio foram tratados e analisados, conforme a descrição metodológica. Estes dados estão apresentados em subseções, ordenadas pelos fundeios de 50, 100 e 200 metros, respectivamente. Por fim, a seção 4.5 apresenta os resultados e discussão do modelo numérico utilizado no trabalho.

4.1 O número de Burger e o tempo de desligamento da camada de Ekman de fundo na PCSE

O número de Burger (Equação 1) indica a importância da estratificação local na dinâmica oceânica, e consequentemente pode ser usado para descrever a estrutura vertical da circulação perpendicular na Plataforma Continental e talude. A resposta oceânica ao balanço gerado pelos termos de atrito, Coriolis e gradiente de pressão é definida pelo tempo de desligamento da camada de Ekman de Fundo (Equação 2). Portanto, o número de Burger (S) e o tempo de desligamento da camada de fundo (τ_0), em horas, foram estimados para a região de estudo conforme a Tabela 4.1, utilizando os valores da frequência de Coriolis (f), declividade (α) e frequência de Brunt-Väisälä (N) com dados de temperatura e salinidade, previamente descritos através das equações 3, 4 e 5. Observa-se que f varia apenas 5.49% entre todos os casos observados (Tabela 4.1), pois ele depende da latitude, que varia aproximadamente 1.5° no domínio espacial (Tabela 3.1). Então, os diferentes valores de S e τ_0 são provenientes das variações de declividade local ou devido aos diferentes valores ocasionados pela estratificação vertical da coluna d'água. Assim, espera-se que as estações localizadas nas plataformas internas e médias possuem S menores do que as plataformas localizadas na plataforma externa. Conforme a tabela 4.1, a única exceção é a estação próxima à isóbata de 50 metros da radial de Cabo Frio, devido à sua singular batimetria local.

Tabela 4.1: frequência de Coriolis (f), inclinação (α), frequência de Brunt-Väisälä durante o verão (N), número de Burger (S) e tempo de desligamento (τ_0), em horas, estimados através das equações (1), (2), (3), (4) e (5), para as interseções entre as radiais de Cabo Frio, Baía de Guanabara e Ubatuba e as isóbatas de 50, 100 e 200 metros de profundidade.

Radial	Prof (m)	$f (rad. s^{-1})$	α	$N (rad. s^{-1})$	S	$\tau_0 (h)$
Cabo Frio	50	0.0000568	0.00644	0.0167	1.89	13.64
	100	0.0000571	0.00126	0.0130	0.29	591.16
	200	0.0000586	0.03323	0.0086	4.87	1.99
Baía de Guanabara	50	0.0000571	0.00172	0.0163	0.49	201.79
	100	0.0000573	0.00180	0.0151	0.48	215.45
	200	0.0000585	0.01000	0.0102	1.74	15.62
Ubatuba	50	0.0000585	0.00108	0.0268	0.49	193.97
	100	0.0000599	0.00180	0.0156	0.47	211.02
	200	0.0000601	0.01739	0.0090	2.61	6.81

O número de Burger determina o papel da estratificação na dinâmica local. De acordo com Lentz e Chapman (2004), um número de Burger pequeno (pouca estratificação da coluna d'água), indica um baixo fluxo perpendicular. Portanto, neste caso, o atrito de fundo é balanceado pelo atrito de superfície, e a intrusão da ACAS ocorreria dentro da camada de fundo. Entretanto, os mesmos autores previamente citados indicam que, para valores de S na ordem de 1 (ou maiores), existiria uma forte estratificação, onde o fluxo perpendicular de momentum geraria uma alta divergência, e este fluxo se balancearia com o *stress* do vento. Portanto, o fluxo principal (intrusão de ACAS) ocorreria no interior, acima da camada de fundo.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.1, as regiões da quebra da plataforma e talude (200 metros de profundidade) apresentam um alto valor para S , principalmente na radial de Cabo Frio ($S = 4.87$). Ainda, devido a sua distinta característica topográfica, a região da plataforma interna de Cabo Frio (50 metros de profundidade) também apresentou um alto Número de Burger (1.89). O que determina o alto número de Burger nessas regiões é a maior inclinação de fundo. Portanto, nesses locais, existe possivelmente um balanço entre o gradiente de pressão e o *stress* do vento. Logo, o caminho preferencial da intrusão da ACAS é acima da camada de Ekman de fundo. Assim, a resposta subinercial da circulação perpendicular é essencialmente baroclínica. Nessas regiões o tempo de desligamento da camada de fundo é sempre menor do que o período inercial.

As três regiões da Plataforma Média, assim como os fundeios das radiais de Ubatuba e Baía de Guanabara da Plataforma Interna, apresentaram pequenos valores de S (sempre entre 0.29 e 0.50). Assim, espera-se que a intrusão da ACAS ocorra preferencialmente na camada de Ekman de fundo, pois existe um balanço entre atrito de fundo com os termos de *stress* de vento. Como o tempo de desligamento da camada de Ekman é sempre maior do que uma semana, a resposta subinercial desses fundeios é essencialmente barotrópica.

4.2 Ubatuba

4.2.1 Isóbata de 50 metros

O primeiro fundeio da radial ao largo de Ubatuba encontra-se na isóbata de 50 metros, aproximadamente sob as coordenadas $044^{\circ}53,860$ W e $23^{\circ}43,560$ S. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 10, 30 e 44 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através de seis campanhas distintas conforme Tabela 3.1, e foram decompostos em velocidades paralela e perpendicular à costa, considerando-se a inclinação da isóbata de 45° em relação ao eixo Norte, no sentido horário.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS, foram verificados os seguintes incidentes para a isóbata de 50 metros do fundeio de Ubatuba: durante a campanha 3, o fundeio foi garateado e somente o correntógrafo de superfície (10 metros de profundidade) foi recuperado. Entretanto, no dia seguinte, o fundeio foi unhado e o correntógrafo de 30 metros de profundidade foi recuperado, mas o registro foi perdido para o correntógrafo de 44 metros. Assim, apenas a série temporal para 10 metros de profundidade foi aproveitada. Já a campanha 4 foi atrasada devido ao rompimento do cabo de fundo que liga os ramos do fundeio. Foram recuperados os três correntógrafos, sendo que o de 30 metros de profundidade não apresentou nenhum registro. A recuperação do restante do fundeio ocorreu no dia posterior. Durante a campanha 5 os correntógrafos de 44 e 30 metros de profundidade foram perdidos. Embora a campanha 6 não tenha apresentado quaisquer problemas, esse fundeio foi realizado em data posterior aos fundeios dos outros pontos amostrais, pois na ocasião não havia equipamento disponível. Por fim, todos os correntógrafos apresentaram registros aparentemente coerentes durante as campanhas 1 e 2.

Inicialmente, os dados das componentes paralelas e perpendiculares estão apresentados através de histogramas, onde sinais positivos deixam a costa à sua esquerda ou se direcionam para a costa, respectivamente. Nos histogramas abaixo, o eixo vertical indica o número de casos para cada banda de velocidade no eixo horizontal (bandas de 2cm/s). Os círculos vermelhos indicam a média para cada histograma e a distância entre cada círculo indica um desvio padrão. Cada figura apresenta os histogramas dos correntógrafos de 10, 30 e 44 metros de profundidade, respectivamente.

Figura 4.1 : Histogramas de distribuição de velocidade paralelas do Fundeio de 50 metros de Ubatuba, para as profundidades de 10, 30 e 44 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.

Figura 4.2: Histogramas de distribuição de velocidade perpendiculares do Fundeio de 50 metros de Ubatuba para as profundidades de 10, 30 e 44 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam para a costa.

É possível observar, através de uma análise inicial das Figuras 4.1 e 4.2, que existe uma média de fluxo bem baixo que deixa a costa à sua esquerda na superfície (5cm/s), quando analisamos as correntes paralelas. Para as componentes perpendiculares, as médias de velocidade estão próximas de zero, embora indiquem um fluxo preferencial em direção à costa em todos os três níveis de coleta. Também, é possível observar um aumento da variabilidade dos dados das componentes perpendiculares no sentido superfície-fundo, devido às envergaduras dos três histogramas. Logo, a componente perpendicular de velocidade de superfície apresenta um maior desvio padrão quando comparado às profundidades de 30 e 44 metros (17 cm/s, 10cm/s e 8cm/s, respectivamente). Ainda, o histograma de superfície dessa componente é enviesado para a direita (robustez à sua esquerda), indicando moda e mediana menores do que a média. Portanto, fluxos de água superficiais para a costa são menos constantes, mas mais intensos.

Após o conjunto de dados passar pelo controle de qualidade descrito anteriormente, são apresentados na Figura 4.3 as séries temporais de velocidade perpendicular e paralelo para a profundidade de 10 metros das campanhas 1, 4, 5 e 6.

Já para o nível de 30 metros foram utilizados os dados da campanha 1 e 3, enquanto foram usados os dados das campanhas 2 e 4 para a profundidade de 44 metros.

Figura 4.3 Séries de dados do Fundeio 1 de Ubatuba: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente.

Na Figura 4.3, as velocidades paralelas estão representadas através da cor vermelha, enquanto a cor azul representa a componente perpendicular da velocidade. Não existe nenhum período de coleta concomitante para as três profundidades. Antes de filtrar os dados para retirar ruídos de alta frequência, foi realizado a análise harmônica (PAWLOWICZ, 2002) com as principais componentes de maré para compreender a sua importância na determinação da velocidade em direção à costa.

A importância da maré na determinação da variabilidade das correntes perpendiculares é maior na meia água quando comparada aos registros próximos à superfície e ao fundo. Mesmo assim, esses valores estão aquém aos valores observados em outros fundeios do mesmo estudo (isóbata de 50 metros de Cabo Frio ou isóbatas de 200 metros de todas as radiais), e a outros trabalhos dessa Plataforma. Castro (1996) definiu que a maré poderia representar até 43% da variância das correntes normais em alguns fundeios (esses valores estão coerentes à radial de Cabo Frio). Ainda, esses valores são mais representativos na variabilidade da componente perpendicular do que na variabilidade das componentes paralelas, quando comparados

os mesmo pontos e campanhas, também conforme descrito por Castro (1996). Por fim, nota-se que outros processos (vento, por exemplo) são mais importantes na definição das correntes perpendiculares à costa.

Como o objetivo do trabalho é compreender e descrever a importância da variabilidade das componentes perpendiculares, estas foram interpoladas de hora em hora e filtradas utilizando-se um filtro Lanczos com janela de 40 horas. Os gráficos da Figura 4.4 demonstram estes procedimentos iniciais para os níveis de 10, 30 e 44 metros, respectivamente. É possível observar que a maior parte dos dados de superfície encontra-se no intervalo de velocidade $[-50, 50]$ cm/s, e essa faixa é ainda mais restritiva nas velocidades de fundo e meia água.

Figura 4.4: Séries de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 1 de Ubatuba: em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente.

Para identificar e quantificar os períodos mais energéticos, são apresentados os espectrogramas de frequência para cada campanha individualmente, de ambas componentes, após interpolação e remoção de médias e tendências (Figuras 4.5, 4.6,

4.7 e 4.8). É possível identificar um maior espalhamento energético nas componentes perpendiculares, indicando processos importantes em diferentes escalas de tempo, enquanto os processos energéticos mais importantes para as correntes paralelas são bastante concentrados na banda subinercial, com frequência entre 0,1 e 0,5 ciclos por dia, ou seja, eventos que ocorrem entre 2 e 10 dias.

Figura 4.5: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 10 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 4, 5 e 6, respectivamente.

Figura 4.6: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 30 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 3, respectivamente.

Figura 4.7: Ubatuba fundeio 1 – profundidade de 44 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 2 e 4, respectivamente.

É possível observar também que, independente da componente de velocidade analisada, as bandas associadas à maré diurna e semi-diurna são mais importantes no

fundo do que na superfície. Ainda, no geral, os gráficos demonstram uma maior importância da baixa frequência nas componentes paralelas de velocidade.

Ainda, foi estimado o espectrograma para cada profundidade da componente perpendicular (10, 30 e 44 metros) após interpolar as séries, compatibilizá-las, remover as médias e tendências e aplicar o procedimento de *zero padding* entre campanhas (Figura 4.8). Os principais processos de superfície e meia água estão associados à baixa frequência (período da ordem de alguns dias). Entretanto, os processos de fundo estão possivelmente associados às bandas diurnas de maré, a exemplo do espectro de fundo (Figura 4.8), onde o pico predominante é de aproximadamente um ciclo por dia. Ainda, é possível observar diversas bandas de alta frequência em meia água. Entretanto, é bom enfatizar que este nível apresentou o menor número de coletas de dados considerando-se todas as campanhas.

Figura 4.8: Ubatuba fundeio 1 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades 10, 30 e 44m, respectivamente.

Para poder compreender melhor o fluxo perpendicular em toda coluna d'água, foi estimado o pseudodeslocamento para as campanhas 1 e 4, pois estas eram as duas únicas campanhas com séries simulatâneas para mais de uma profundidade neste fundeio. Na campanha 1 (Figura 4.9), foram coletados dados de 10 metros (azul claro) e 23 metros (azul médio) durante o verão de 2001-2002. Dados positivos de distância (em quilômetros) indicam percurso para a costa. É possível observar um fluxo quase constante, com poucos períodos de inversão, predominantemente para a costa tanto

em meia água quanto próxima à superfície. Apesar de não haver registros simultâneos nos três níveis de profundidades, existe possivelmente um transporte em toda a coluna d'água, condizente com a estimativa de um baixo número de Burger para a região.

A Figura 4.10 apresenta o pseudodeslocamento durante a campanha 4 (outono-inverno de 2003), onde a cor azul escura representa o deslocamento de fundo (44 metros) enquanto o azul claro representa o de superfície (10 metros de profundidade). É possível observar uma intrusão de água de fundo para a costa, e um transporte de superfície para o largo. Ainda, observa-se algumas inversões de deslocamento (3~4) em períodos menores que um mês, para ambas profundidades. Assim, essas inversões ocorrem em escalas típicas de ventos do quadrante sudoeste (frequências quase-semanais). Observa-se um comportamento distinto entre a campanha de verão e de outono/inverno para a mesma estação.

Figura 4.9: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 10 e 30m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 50 m (Ubatuba) entre dezembro de 2001 e fevereiro de 2002.

Figura 4.10: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 10 e 44m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 50 m (Ubatuba) entre abril e julho de 2003.

O coeficiente de correlação com atraso entre as componentes paralela e perpendicular dos ventos descritos anteriormente foram correlacionados com a componente perpendicular de velocidade, e são apresentados na Figura 4.11. No geral, a componente paralela de vento demonstrou coeficientes com valores ligeiramente mais altos (-0,5 e -0,4, respectivamente), excetuando-se a campanha 6. Assim, a componente paralela do vento é mais importante na variabilidade da componente perpendicular de corrente, conforme já descrito por Chapman & Brink (1987). Ainda, é importante observar que a componente perpendicular de velocidade d'água responde com algum atraso ou avanço ao vento, mas não fica claro se este atraso se deve a diferente localização dos pontos de coleta das séries de vento e corrente ou a algum outro processo.

Figura 4.11: **Ubatuba (50 m)** Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha.

4.2.2 Isóbata de 100 metros

O segundo fundeio da radial ao largo de Ubatuba encontra-se na isóbata de 100 metros, aproximadamente sob as coordenadas $44^{\circ}39,0' \text{ W}$ e $24^{\circ}04,0' \text{ S}$. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 23, 75 e 94 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através de seis campanhas distintas, conforme a Tabela 3.1, e foram decompostos em velocidades paralela e perpendicular à costa, considerando-se a inclinação da isóbata de 45° em relação ao eixo Norte, no sentido horário.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS, foram verificados os seguintes incidentes: durante a campanha 1, a carapaça da bóia do correntógrafo de 75 metros de profundidade estava danificada. Entretanto, os correntógrafos apresentaram registros. Na campanha 3, os registros de 75 e 94 metros de profundidade foram corrompidos. Na campanha 4, os correntógrafos de 23 e 75 metros de profundidade perderam as constantes de calibração, logo seus registros foram perdidos. Na campanha 5, os correntógrafos dos níveis 75 e 94 metros foram danificados. Ainda, o correntógrafo de 23 metros de profundidade registrou coleta apenas até o dia 14/01/2004. As campanhas 2 e 6 não registraram problemas aparentes.

Da mesma forma como representado no fundeio da radial de Ubatuba de 50 metros, os dados das componentes paralelas e perpendiculares estão apresentados através de histogramas, onde sinais positivos deixam a costa à sua esquerda para correntes paralelas e se direcionam para a costa para correntes perpendiculares a costa. Nos histogramas abaixo, o eixo vertical indica o número de casos para cada banda de velocidade no eixo horizontal (bandas de 2cm/s). Cada figura apresenta os histogramas dos correntógrafos de 23, 75 e 94 metros de profundidade, respectivamente.

Figura 4.12: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 100 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 75 e 94 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.

Figura 4.13: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 100 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 75 e 94 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam para a costa.

É possível observar, através de uma análise inicial das Figuras 4.12, que existe uma média de fluxo que deixa a costa à sua direita em toda coluna d'água, de forma mais intensa na superfície. Entretanto, para a componente perpendicular (Figura 4.13), existe uma inversão da média dos dados de velocidades, notando-se uma maior variabilidade tanto em superfície quanto no fundo. Em termos gerais, existe um fluxo médio para a costa em superfície e meia água, e para o largo nas camadas de fundo.

Desconsiderando os dados não recuperados e os dados espúrios, são apresentados os dados de velocidade perpendicular e paralela (cm/s) para a profundidade de 23 metros das campanhas 1, 5 e 6. Já para o nível de 75 metros foram utilizados os dados da campanha 1, 2 e 6, enquanto foi utilizado apenas os dados da campanha 2 para o correntógrafo de fundo (94 metros).

Figura 4.14: série de dados do Fundeio 2 de Ubatuba (100m): em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades de 23, 75 e 94m, respectivamente.

Considerando a importância das marés na variabilidade das correntes perpendiculares, a análise harmônica determinou uma baixa representatividade em superfície (máximo de 8% da variabilidade prevista). De certa forma, esses dados são semelhantes ao fundeio da isóbata de 50 metros da radial de Ubatuba, onde a maré

possui um papel mais importante na determinação das correntes no interior do fluido (próximo de 30%). Dados de análise espectral também demonstram maior importância para a maré em meia água (Figura 4.18) no fundeio próximo à isóbata de 100 metros.

Depois de ser determinada a importância da maré na variabilidade dos dados de correntes perpendiculares, esses dados foram interpolados de hora em hora e filtrados conforme metodologia previamente definida (Figura 4.15). Devido aos problemas operacionais das coletas de dados, esse fundeio não possui séries simultâneas nas três profundidades, impossibilitando a análise através de funções ortogonais empíricas, que será apresentada posteriormente.

Figura 4.15: Série de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 2 de Ubatuba: em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades 23, 75 e 94m, respectivamente.

Para identificar as principais escalas temporais de variabilidade das correntes foram estimados os espectros apresentados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18. Os processos mais importantes estão associados à eventos subinerciais (entre 0.1 e 0.3 ciclos/dia) e à maré diurna e semi-diurna. Para os correntógrafos localizados a 23 e 75 metros de profundidade (Figuras 4.16 e 4.17), nota-se uma variabilidade entre as

campanhas de verão e inverno. Entretanto, em ambas estações, existe um predomínio energético subinercial para as correntes paralelas enquanto as correntes perpendiculares apresentam picos subinerciais e maregráficos. Castro (1996) e Ruffato (2011) estimaram em aproximadamente 40% a importância das marés na variabilidade das correntes perpendiculares da Plataforma Média da região, semelhante ao encontrado. Para o correntógrafo de fundo (Figura 4.18), o pico subinercial é predominante em ambas componentes, com a maré desempenhando, também, um papel bastante relevante.

Figura 4.16: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 5 e 6, respectivamente.

Figura 4.17: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 75 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2 e 6, respectivamente.

Figura 4.18: Ubatuba fundeio 2 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para a campanha 4. A primeira figura (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda (vermelha) apresenta dados para a componente paralela.

De maneira geral, neste fundeio, observa-se que os processos mais energéticos são os subinerciais (entre 0,2 e 0,5 ciclos por dia), principalmente nas camadas de superfície e fundo. As frequências diurna e semi-diurna também desempenham um papel importante na componente perpendicular de velocidade, principalmente em seu interior.

Assim como feito para o fundeio de 50 metros, também foi estimado o espectro para este fundeio considerando-se toda as campanhas com uma única série temporal, depois de feitos os devidos tratamentos matemáticos. Figura 4.19 apresenta estes espectrogramas após remoção de tendência, média, *zero-padding* e *prewhitening*. Observa-se picos da maré diurna em todas as profundidades, principalmente no correntógrafo localizado à meia água (75 metros). Ainda, nota-se picos subinerciais (< 0.3 ciclos/dia) nas camadas de superfície e fundo (23 e 94 metros de profundidade). Vale ressaltar que o número de Burger (S) calculado para essa região é 0.47, então os termos de atrito de superfície e de fundo são de primeira ordem na dinâmica subinercial.

Figura 4.19: Ubatuba fundeio 2 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades de 23, 75 e 94m, respectivamente

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam o pseudodeslocamento de fluxo para as profundidades de 75 e 94 metros, e para as profundidades de 23 e 75 metros, em diferentes campanhas (campanha 2 e campanha 6). Observa-se que no período de inverno (Figura 4.20), existe uma intrusão de água para a costa em meia água, enquanto no fundo a água se desloca em direção ao oceano aberto.

Figura 4.20: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 75 e 94m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 100 m (Ubatuba) entre fevereiro e abril de 2004. O eixo das ordenadas representa a distância percorrida em km. Distâncias positivas representam fluxo para a costa.

Já no verão de 2004 (Figura 4.21), os dados de pseudodeslocamento indicam um fluxo para à costa, em toda a camada analisada (23 e 75 metros de profundidade).

Figura 4.21: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23 e 75m (claro e escuro, respectivamente), para isóbata de 100 m (Ubatuba) entre fevereiro e abril de 2004. O eixo das ordenadas representa a distância percorrida em km. Distâncias positivas representam fluxo para a costa.

Os dados decompostos de ventos paralelos (azul) e ventos perpendiculares (vermelho) descritos anteriormente foram correlacionados com a componente perpendicular de velocidade e são mostrados na Figura 4.22. No geral, a componente paralela de vento demonstrou coeficientes com módulos ligeiramente mais altos ($\sim -0,5$). Ainda, o atraso encontra-se na faixa de -6 a 6 horas. O mesmo não foi observado para a correlação entre dados do correntógrafo de 75 metros e 94 metros durante a última campanha (outono de 2004), onde a correlação de dados de vento perpendiculares com a corrente perpendicular supera a correlação das correntes perpendiculares com ventos paralelos. De forma geral, a componente paralela do vento é mais importante na variabilidade da componente perpendicular de corrente, conforme descrito por Chapman & Brink (1987). Ainda, os módulos dos coeficientes de correlação (tanto para o vento paralelo quanto para o vento perpendicular) são maiores para os dados obtidos pelo correntógrafo localizado à 23 metros. Isso possivelmente ocorre porque a resposta subinercial ao *stress* do vento é mais importante na superfície.

Figura 4.22: Ubatuba (100 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Planos sem gráfico significam que as campanhas possuem problemas amostrais.

4.2.3 Isóbata de 200 metros

O terceiro fundeio da radial ao largo de Ubatuba encontra-se próximo à isóbata de 200 metros de profundidade, sob as coordenadas $44^{\circ}22,243' \text{ W}$ e $24^{\circ}23,480' \text{ S}$. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através das seis campanhas distintas descritas na Tabela 3.1, e foram decompostos em velocidades paralela e perpendicular à costa, considerando-se a inclinação da isóbata de 45° em relação ao eixo Norte, rotacionados no sentido horário.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS foram verificados os seguintes incidentes: na campanha 1, uma boia Benthos foi estourada, junto ao correntógrafo de 85 metros de profundidade. Ainda, foi encontrado um segmento de espinhel emaranhado ao *frame* do correntógrafo à 155 metros, com o cabo torcido. Apesar disso, todos os correntógrafos apresentaram registros. Já a campanha 3 apresentou uma interrupção da coleta dos dados para a profundidade de 85 metros em 19/04/2003. O registro de superfície (23 metros) foi corrompido nesta campanha. Na campanha 5, os correntógrafos dos níveis 23 e 85 metros foram quebrados e alagados. Os demais tiveram registro interrompido em 14/01/2004. Entretanto, para as campanhas 2, 4 e 6, todos os correntógrafos apresentaram registros aparentemente compatíveis. Portanto, as séries temporais deste fundeio apresentaram menos problemas na aquisição de dados, se comparadas às séries dos fundeios próximos à isóbata de 50 e 100 metros.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram as distribuições de velocidade para este fundeio em cada um de seus correntógrafos. As correntes médias paralelas à costa (23 e 85 metros) direcionam-se para o sul, acompanhando o fluxo da corrente do Brasil, com valores médios de -18cm/s e -12cm/s em 23 e 85 metros, respectivamente. Ainda, nos registros de 155 e 194 metros, a média de velocidade é muito baixa, muito próximo de zero mas, ainda assim, em sentido contrário àquele observado no 2 correntógrafos mais próximos à superfície (2 cm/s e 3 cm/s , respectivamente). Para a componente perpendicular, a velocidade média nos correntógrafos de 23, 85 e 155 tem um fluxo médio em direção à costa, com valores de 19cm/s , 11cm/s e 3cm/s , respectivamente. Entretanto, na camada de fundo (correntógrafo em 193 metros), a velocidade perpendicular é para o largo, indicando uma inversão no transporte médio na coluna d'água. Essas medidas iniciais demonstram um comportamento similar registrado na Plataforma do Peru, onde existe um transporte para a costa entre as camadas de superfície e fundo, descritas por Lentz e Chapman (2004). Esse comportamento é semelhante pois em ambos os fundeios (Peru e Ubatuba – 200 metros) $S > 1$. Como o tempo estimado para o desligamento da camada de Ekman de fundo (Tabela 4.1) é de

6.81 horas, o termo de gradiente de pressão é de primeira ordem para a resposta subinercial.

Figura 4.23: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.

Figura 4.24 Histogramas de distribuição de velocidade perpendiculares do Fundeio de 200 metros de Ubatuba, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.

Grande parte dos dados foram coletados simultaneamente para as quatro profundidades, conforme as séries temporais abaixo apresentadas na Figura 4.25. Ainda, as correntes perpendiculares foram tratadas estatisticamente conforme as metodologias descritas no subcapítulo 3.5, e estão apresentadas na Figura 4.26. Conforme observa-se nas Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26, há uma maior variabilidade dos dados mais superficiais (desvios de 18cm/s, 16cm/s, 14cm/s e 11cm/s para os níveis de 23, 85, 155 e 194 metros, respectivamente). Ainda, comparando-se dados de velocidade perpendicular da série filtrada (Figura 4.26) e não filtrada (Figura 4.25), percebe-se uma eliminação de velocidades maiores do que 0.55 cm/s.

Figura 4.25: Ubatuba fundeio 3 – em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares das velocidades, em cm/s. Profundidades de 23, 85, 155 e 194m, respectivamente.

Figura 4.26: série de dados das correntes perpendiculares do Fundeio 3 de Ubatuba (200m): em preto, a série original, e em cinza, série filtrada. Profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente.

Os espectros também foram estimados para todos os correntógrafos deste fundeio, seguindo metodologia descrita anteriormente e já apresentada para outros fundeios. Os picos energéticos para as velocidades registradas pelos correntógrafos de 23 e 85 metros de profundidade se encontram entre 0.1 e 0.3 ciclos por dia (fenômenos da escala temporal entre 3 e 10 dias), portanto os processos mais importantes nos dois correntógrafos mais superficiais são os subinerciais com períodos acima de 3 dias (Figuras 4.27 e 4.28). As velocidades registradas à 155 metros de profundidade (Figura 4.29) possuem dois picos de frequência: um no domínio maregráfico (entre 1 e 2 ciclos por dia) e outro de baixa frequência (0.1 e 0.3 ciclos por dia). Para o correntógrafo de fundo (Figura 4.30), o sinal associado à maré é predominante em ambas as decomposições. Portanto, percebe-se uma predominância subinercial na superfície que tende a decair com a profundidade, onde, na camada de fundo, a maré passa a exercer um papel importante, principalmente nas correntes perpendiculares.

Figura 4.27: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2 (parcialmente), 4 e 5, respectivamente.

Figura 4.28: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 85 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4 e 6, respectivamente.

Figura 4.29: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Figura 4.30: Ubatuba fundeio 3 – profundidade de 194 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Os espectrogramas para toda a série temporal da componente perpendicular, após remoção de média, remoção de tendência, *zero-padding* e o *prewhitening* é apresentado na Figura 4.31. Os processos temporais de baixa frequência das correntes perpendiculares (0.1~0.3 ciclos/dia) são observados nos correntógrafos localizados em 23 e 85 metros de profundidade. No correntógrafo localizado a 155 metros de profundidade, observa-se dois picos de frequência, associados à frequência subinercial e a frequência de maré. Já para o correntógrafo de fundo (155 metros de profundidade), a faixas entre maré diurna e semi-diurna (1~ciclos/dia) é mais intensa, portanto a maré exerce um importante papel na dinâmica de fundo.

O resultado obtido pelos espectros de frequência assemelha-se ao obtido por Pereira e Castro (2007), onde existe um forte sinal semidiurno próximo ao talude, principalmente associada a componente M2 (período de 12.42 horas). Os mesmos autores descrevem, através de modelos numéricos, que fluxos baroclínicos de energia são propagados ao largo. Como o número de Burger é maior do que 1 ($S = 2.61$), o transporte preferencial de água gerada pelos termos de *stress*, gradiente de pressão e Coriolis ocorre acima da camada de fundo. Desta maneira, existem correntes geradas pela maré em toda a coluna d'água. Entretanto, estas correntes exercem um papel proporcionalmente mais importante na camada de fundo.

Figura 4.31: Ubatuba fundeio 3 – diagrama de espectros de dados de velocidades perpendiculares interpolados, compatibilizados, após remoção de média, tendência e aplicação de zero padding para intervalos sem amostragem maiores do que 12 horas. Profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, respectivamente.

Ao calcular o pseudodeslocamento para o período de novembro de 2001 a fevereiro de 2002, observa-se um fluxo nas quatro profundidades superiores (23, 85 e 155 metros) para a costa, mais intenso na superfície (Figura 4.32), equiparável às velocidades apresentadas pelo histograma. Da mesma maneira, o fundo exporta água para o talude e oceano aberto, com intensidade bem menor do que na superfície,, indicando um comportamento baroclínico. Não fica claro, entretanto, que esta exportação de água é ocasionada pela dinâmica balanceada entre os termos de gradiente de pressão, Coriolis e *stress*, por correntes residuais de maré ou por ambos os processos atuando em diferentes escalas e intensidades.

Da mesma maneira, o pseudodeslocamento calculado para o inverno de 2002 e para o outono de 2003 (Figuras 4.33 e 4.34) demonstra um fluxo para a costa nos fundeios de 23, 85 e 155 metros de profundidade, enquanto existe uma exportação de água para o largo na camada de fundo, com intensidade equiparável aquelas observadas nas camadas mais superficiais. Nota-se, portanto, uma diferença sazonal nestes processos: enquanto no verão o transporte para a costa decai com a profundidade e é bastante reduzido na camada de fundo, no inverno o transporte quantificado com o pseudodeslocamento ocorre com mesma ordem de grandeza nos três níveis de registro acima da camada de fundo, onde a intensidade é significativamente maior do que a observada durante o verão. Assim, as diferentes estratificações de verão e inverno também desempenham um papel relevante no transporte perpendicular à costa, tanto nas camadas mais superficiais quanto no fundo. Portanto, existe uma variação sazonal do número de Burger não descrita neste estudo.

Figura 4.32: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre novembro de 2001 e fevereiro de 2002.

Figura 4.33: Pseudodeslocamento em km para profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre junho e dezembro de 2002. A profundidade de 23 metros apresenta dados somente até agosto de 2002.

Figura 4.34: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre março e julho de 2003.

Com o objetivo de compreender o comportamento da coluna d'água como um todo, calculou-se os principais modos do perfil de velocidade perpendicular, apresentados nas Figuras 4.35 a 4.40.

As Figuras 4.35, 4.37 e 4.39 apresentam a importância de cada modo, assim como a importância acumulada em termos da variabilidade total. Percebe-se que tanto para a campanha 1, quanto para as campanhas 3 e 4, o primeiro modo (barotrópico) explica aproximadamente 60% da variabilidade total da coluna. A importância deste modo para a corrente perpendicular é menor do que a estimada por Castro (1996) e Ruffato (2013) para as correntes paralelas, onde o modo barotrópico pode explicar valores acima de 90% da variabilidade.

Os modos mais importantes registrados foram o modo barotrópico e o primeiro modo baroclínico, este com importância média acima de 20%. Ainda, durante o inverno (Figuras 4.37 e 4.38) o modo barotrópico é menos importante do que os outros modos, corroborando os resultados obtidos com o pseudodeslocamento e descritos anteriormente.

Como, no fundo, o fluxo médio é de exportação de água da plataforma para o talude e oceano aberto e o modo barotrópico transporta água, na média, no sentido contrário, o 1º e 2º modos baroclínicos desempenham um papel fundamental na camada de fundo, mostrando que a estratificação é primordial neste processo. Ainda, através da

figura 4.31 nota-se que, no fundo, o período de maré diurna é o mais energético e, portanto, os fluxos de energia de marés baroclínicas desempenham um importante papel na exportação de água do fundo para o largo.

Figura 4.35 A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Ubatuba

Figura 4.36: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a primeira campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

Figura 4.37: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 3 de Ubatuba.

Figura 4.38: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

Figura 4.39: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a quarta campanha 4 do Fundeio 3 de Ubatuba.

Figura 4.40: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 4ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

As componentes do vento paralelo e perpendicular descritos anteriormente foram correlacionados com a componente perpendicular de velocidade (Figura 4.41). De forma análoga ao fundeio de 100 metros de profundidade, a componente paralela de vento demonstrou coeficientes com módulos ligeiramente mais altos ($\sim -0,5$) do que a componente perpendicular ($\sim 0,35$). Ainda, o tempo de resposta encontra-se na faixa de -6 a 6 horas. Portanto, a componente paralela do vento é mais importante na variabilidade da componente perpendicular de corrente, conforme descrito por Chapman & Brink (1987), onde coeficientes mais altos seriam esperados para correlações com a componente paralela de velocidade. Ainda, o tempo de resposta aos ventos perpendiculares e paralelos são ligeiramente maiores nos correntógrafos próximos ao fundo. Isso demonstra uma grande importância da variabilidade das correntes associada ao *stress* de vento próximo à isóbata de 200 metros. Portanto, mesmo que o fundeio esteja próximo ao sistema da Corrente do Brasil, o vento de mesoescala é importante para determinar as oscilações subinerciais da componente perpendicular do sistema.

Figura 4.41: Ubatuba (200 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Planos sem gráfico significam que as campanhas possuem problemas amostrais.

4.3 Baía de Guanabara

4.3.1 Isóbata de 200 metros

Foi analisado apenas um fundeio na radial da Baía de Guanabara, que estava localizado sobre a isóbata de 200m, nas coordenadas de $042^{\circ} 34,31W$ e $23^{\circ}43,42S$ (Figura 1.1). Os dados de Correntes perpendiculares e paralelas, considerando uma inclinação de 45° rotacionados em sentido horário em relação ao Norte Geográfico, e decompostos de modo que valores positivos na componente perpendicular apontam para a costa e positivos na componente paralela deixam à costa a sua esquerda.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS (Tabela 3.1), foram verificados os seguintes incidentes: na campanha 1, uma bóia Benthos foi estourada junta ao correntógrafo de 194 metros. Entretanto, todos os correntógrafos apresentaram registros. Na campanha 2, os cabos estavam extremamente retorcidos com alguns pontos de formação de gaiolas. O correntógrafo de superfície (23m) teve rompimento mecânico da haste dos transdutores e estava envolto por um saco plástico preto. Além disto, o cabo estava enrolado no correntógrafo de 85 metros, inclusive em volta dos transdutores. Ainda, o correntógrafo de fundo (194m) não registrou nenhum dado. A campanha 3 apresentou um interrompimento do registro de velocidades à 85 metros de profundidade no dia 17 de abril. Todos os correntógrafos apresentaram dados aparentemente coerentes durante a campanha 4. Na campanha 5 foram perdidos a boia de topo, duas boias Nautilus e o correntógrafo de 23 metros de profundidade. Os demais correntógrafos apresentaram registro. Já o correntógrafo de 23 metros de profundidade apresentou registro com muitas falhas durante toda a campanha 6.

Através de uma análise estatística inicial, desconsiderou-se os dados das campanhas 4, 5 e 6 nas profundidades de 85, 155 e 194 metros. As Figuras 4.42 e 4.43 mostram os histogramas dos dados de velocidade das componentes paralela e perpendicular, respectivamente. Para a componente paralela (Figura 4.42) existe uma maior variabilidade dos dados de superfície, onde o fluxo é para o sudoeste. Em termos médios, ocorre uma inversão na velocidade na coluna d'água. Já para as correntes perpendiculares (Figura 4.43), ocorre um fluxo médio para a costa na superfície e para o largo no fundo.

Figura 4.42: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros da Baía de Guanabara, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.

Figura 4.43: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 200 metros da Baía de Guanabara, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.

As séries temporais das componentes paralela e perpendicular geradas encontram-se registradas na Figura 4.44. Nota-se que os registros mais intensos para ambas as componentes são representados próximo à superfície (23 metros) e acima da camada de Ekman de Fundo (155 metros). Após a descrição inicial das séries de dados, essas passaram pelo controle de qualidade, descritos em 3.4.

Figura 4.44: série de dados do Fundeio 3 da Baía de Guanabara: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 23, 85, 155 e 194 metros, respectivamente.

Em seguida, confeccionou-se o espectro de frequência para ambas as componentes, em todas as campanhas registradas na Tabela 3.1 e apresentados na Figura 4.44. Dessa forma, as Figura 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48 apresentam os espectros normalizados para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, respectivamente. Para os dados próximos à superfície (Figura 4.45) existe uma predominância espectral em ambas as componentes para períodos subinerciais (entre 0.1 e 0.3 ciclos por dia). Para registros de velocidades à 85 metros de profundidade (Figura 4.46), o período subinercial ainda é o mais energético. Entretanto, nota-se um pico energético diurno (1 ciclo por dia) na componente perpendicular. O mesmo ocorre

nos dados das profundidades de 155 e 194 metros: existe um grande pico subinercial acompanhado de um pico consideravelmente menor, porém ainda importante, de maré diurna predominantemente na componente perpendicular à costa (Figuras 4.47 e 4.48).

Figura 4.45: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 23 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 4.46: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 85 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.47: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados para a componente paralela. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.48: Baía de Guanabara, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: espectros normalizados, para a campanha 1. A primeira figura (azul) apresenta os espectros para a componente perpendicular de velocidade, enquanto a segunda (vermelha) apresenta dados para a componente paralela.

Em seguida, realizou-se o cálculo do pseudodeslocamento nos diversos níveis de profundidade para o verão de 2001-2002 (Figura 4.49) e para o inverno de 2002 (Figura 4.50). Distâncias positivas representam fluxo para a costa. Durante o verão,

percebe-se um fluxo quase constante de água para a costa nas profundidades de 23, 85 e 155 metros de profundidade. Os maiores valores de pseudodeslocamento ocorrem logo acima da camada de fundo, em 155 metros de profundidade. Este perfil é semelhante ao descrito para as plataformas de Oregon e Peru por Lentz e Chapman (2004), onde S é aproximadamente 1. Existe um desligamento da camada de Ekman de fundo menor do que o período inercial. Portanto, o fundo possui uma dinâmica distinta do resto da coluna d'água, e exporta água para o largo. Esse resultado assemelha-se ao descrito para o fundeio de 200 metros da radial de Ubatuba. Em ambos os casos, o número de Burger é maior do que 1.

Não existe registro do pseudodeslocamento de fundo durante o inverno de 2002 (Figura 4.50). Entretanto, ocorre inversões no sentido de deslocamento de água para os fundeios em meia água. Durante o inverno, o sentido predominante do fluxo na superfície é para a costa, enquanto abaixo da superfície existe um fluxo ao largo. As grandes variações entre os perfis de inverno e verão também foram observadas numericamente e estão associadas as variações sazonais da estratificação.

Com o objetivo de compreender o comportamento da coluna d'água como um todo, calculou-se os principais modos do perfil de velocidade perpendicular, apresentados nas Figuras 4.51 a 4.54. Ainda, as figuras 4.52 e 4.54 apresentam a importância de cada modo, assim como a importância acumulada em termos da variabilidade total. Percebe-se que tanto para a campanha 1 quanto para a campanha 4, o primeiro modo estatístico explica aproximadamente 80% da variabilidade total da coluna e é similar ao primeiro modo baroclínico. Resultado semelhante foi obtido por Castro (1996). Esse modo demonstra uma grande amplitude associada à intrusão de água acima da camada de fundo (155 metros). Neste mesmo modo, a amplitude do ponto mais profundo é praticamente nula, mostrando que o desligamento da camada realmente ocorre em períodos menores que o subinercial, como apresentado na Tabela 4.1. Esse perfil de velocidade é típico de locais onde $S > 1$.

Assim, a intrusão de ACAS ocorre possivelmente acima da camada de fundo, pois o fundo exporta água para o largo.

Figura 4.49: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre dezembro de 2001 e março de 2002.

Figura 4.50: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85 e 155 (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (Ubatuba) entre junho e outubro de 2002.

Figura 4.51: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 1ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

Figura 4.52: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Ubatuba.

Figura 4.53: Amplitudes do 1º, 2º e 3º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85 e 155 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa. Dados de velocidades para a profundidade de 194 metros foram desconsiderados.

Figura 4.54: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 3 de Ubatuba. Dados de velocidades para a profundidade de 194 metros foram desconsiderados.

Os dados decompostos de ventos paralelos (azul) e ventos perpendiculares (vermelho) também foram correlacionados com a componente perpendicular de velocidade do fundeio próximo à isóbata de 200 metros na radial da Baía da Guanabara (Figura 4.55). A componente paralela de vento demonstrou coeficientes com módulos ligeiramente mais altos na superfície. Nos fundeios localizados à meia água, as correlações entre vento perpendicular e corrente perpendicular e vento paralelo e corrente perpendicular são semelhantes, incluindo também o tempo de resposta. Os coeficientes de correlação para o fundeio da Baía de Guanabara são consideravelmente menores do que o fundeio localizado à mesma profundidade na radial de Ubatuba. Possivelmente, o *stress* do vento não é o termo de primeira ordem na dinâmica local, e o termo de gradiente de pressão, assim como a Corrente do Brasil, podem exercer um papel importante no controle da circulação perpendicular à costa.

Figura 4.55: Baía de Guanabara (200 m) Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.

4.4 Cabo Frio

4.4.1 Isóbata de 50 metros

O primeiro fundeio da radial ao largo de Cabo Frio encontra-se na isóbata de 50 metros de profundidade, aproximadamente sob as coordenadas 042°07,340' W e 22° 59,030' S. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 10, 30 e 44 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através de seis campanhas distintas conforme mostra a Tabela 1, e foram decompostos em velocidades paralelas e perpendiculares à costa, considerando-se a isóbata de 50 metros de profundidade alinhada ao eixo Leste-Oeste.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS, foram verificados os seguintes incidentes: a boia estava fora da posição durante a campanha 1. Um dos ramos estava rompido, o que causou a perda do correntógrafo do nível de 44 metros. Entretanto, os outros dois correntógrafos apresentaram registros aparentemente satisfatórios. Na tentativa de garatear o cabo de fundo durante a campanha 2, o frame do correntógrafo de 30 metros de profundidade foi engatado e sofreu muita deformação e os cabos que atavam as extremidades do fundeio romperam. O correntógrafo de 44 metros de profundidade não foi recuperado. Para a campanha 4, todos os registros foram lidos, entretanto o correntógrafo de 10 metros de profundidade teve esgotamento de bateria e registrou coleta de dados somente até o dia 30/08/2003. Esse mesmo correntógrafo (10 metros de profundidade) foi perdido durante a campanha 5. Já para a campanha 6, o fundeio foi recuperado totalmente em duas etapas, onde a coleta dos dados do nível de 30 metros foi interrompida em 08/03/2004 durante a primeira etapa. Numa segunda etapa, o correntógrafo de 44 metros de profundidade foi coletado e apresentou registros coerentes. Desta maneira, o histograma com as médias e desvios padrões das velocidades encontram-se nas Figuras 4.56 e 4.57.

Nota-se que este fundeio apresentou velocidades médias aproximadamente nulas, tanto para a componente perpendicular quanto para a corrente paralela, com exceção dos dados superficiais (10 m) que possuem velocidade preferencial para a costa e deixam a costa à esquerda, respectivamente. Entretanto, apesar do histograma indicar baixa variância dos dados, estas séries possuem grande variabilidade temporal indicado pelo pseudodeslocamento nos diversos níveis de amostragem (Figuras 4.61, 4.62, 4.63 e 4.64).

Figura 4.56: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 50 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 10, 30, e 44, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda.

Figura 4.57: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 50 metros de Cabo Frio, para as profundidades de 10, 30 e 44, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.

Após eliminação de dados espúrios, as séries foram representadas temporalmente através da Figura 4.58. Nesta, percebe-se que os maiores registros de velocidade, em todos os níveis, pertencem à componente paralela.

Figura 4.58: série de dados do Fundeio 1 da radial de Cabo Frio: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 10, 30 e 44 metros, respectivamente.

Lacunas de até 12 horas foram interpoladas linearmente. Ainda, antes de filtrá-la conforme metodologia previamente apresentada, estimou-se o espectro energético de frequência em cada nível, para cada campanha e profundidade, apresentados pelas figuras 4.58 e 4.59. Diferentemente dos resultados encontrados em Ubatuba, onde existia uma variação entre as frequências mais energéticas para as componentes paralela e perpendicular, aqui existe uma grande variabilidade sazonal. Assim, períodos subinerciais são mais energéticos no verão enquanto períodos de maré diurna e semidiurna são mais energéticos no inverno (Tabela 3.2). Este comportamento de pico de frequência subinercial mais importante durante o inverno está associado à correlação entre correntes e ventos, que também é maior nessa estação (Figura 4.67).

Figura 4.59: Cabo Frio, fundeio 1 - profundidade de 10 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 4.60 Cabo Frio, fundeio 1 - profundidade de 30 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Em seguida, após aplicação de filtro Lanczos com janela de 40 horas, foi estimado o pseudodeslocamento das três profundidades em três períodos de verão (Figuras 4.61, 4.63 e 4.64) e um período de inverno (Figura 4.62). Entretanto, este último período não possui registro de pseudodeslocamento na camada de fundo. De maneira geral, entre todas as estações, este fundeio foi o que apresentou, com maior frequência, casos de inversões de transporte.

A representação dos principais modos e suas amplitudes para um período de inverno está representado através de funções ortogonais empíricas (Figura 4.65), onde o 2º modo baroclínico é responsável por aproximadamente 80% da variabilidade dos dados nesta estação (Figura 4.66). Este resultado assemelha-se ao encontrado por Lentz & Chapman em plataformas onde $S > 1$, como a do Peru ($S = 1.49$), onde o transporte gerado pela subsidência ocorre acima da camada de fundo.

A Figura 4.67 apresenta a correlação entre corrente perpendicular e vento perpendicular e corrente perpendicular e vento paralelo à costa. Esses índices de correlação são menores do que os índices registrados entre vento paralelo e corrente paralela em Castro (1996) e Ruffato (2013), porém superiores aos índices registrados nos outros fundeios. Portanto, apesar do vento ser a principal forçante para as correntes paralelas à costa, ele também é importante na determinação das correntes perpendiculares.

Mesmo considerando as inversões temporais de transporte nos diversos níveis, os dados de velocidade perpendicular possuem alta correlação com ventos perpendiculares e, principalmente, paralelos. Dessa maneira, o transporte registrado em Cabo Frio possui uma alta correlação com a resposta do vento paralelo em relação à geometria da costa, como descrito em Rodrigues e Lorenzetti (2001). Entretanto, nota-se diferenças significativas entre o período de inverno e verão, que pode ser explicado diretamente pela frequência de entrada de ventos do quadrante sul ou pela maior estratificação de verão. Como o transporte nas frequências subinerciais é mais energético no verão, a entrada de ACAS (ou exportação de AC) ocorre em maior escala nesta estação. Vale ressaltar que, durante o inverno, os casos de transporte da água costeira ocorreram principalmente em meia água (Figuras 4.62 e 4.65).

Figura 4.61: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 10 e 23 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 50m (Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002.

Figura 4.62: Pseudodeslocamento, em km, para as profundidades de 10 e 23 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre julho e novembro de 2002.

Figura 4.63: Pseudodeslocamento, em km, para as profundidades de 23 e 44 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre janeiro e abril de 2003.

Figura 4.64: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 10, 23 e 44 m (do mais claro para o mais escuro), próximo à isóbata de 50m (Cabo Frio) entre fevereiro e março de 2004.

Figura 4.65: Amplitudes do 1º, 2º e 3º modos, respectivamente, para as profundidades de 10, 30 e 44 metros de profundidade, durante a 2ª campanha. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

Figura 4.66: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a segunda campanha do Fundeio 1 de Cabo Frio.

Figura 4.67: Cabo Frio (50 m) Índice de correlação por tempo (horas) entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.

4.4.2 Isóbata de 100 metros

O segundo fundeio da radial ao largo de Cabo Frio encontra-se na isóbata de 100 metros de profundidade, aproximadamente sob as coordenadas $41^{\circ}54,700'$ W e $23^{\circ}05,444'$ S. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 23, 75 e 94 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através de seis campanhas distintas conforme mostra a Tabela 1, e foram decompostos em velocidades paralela e perpendicular à costa, considerando-se a isóbata de 100 metros de profundidade inclinada em 60° em sentido horário ao eixo Norte-Sul. Diferentemente dos outros fundeios, as duas primeiras campanhas foram realizadas com correntógrafos em cada nível de profundidade, enquanto as campanhas subsequentes foram realizadas com ADCP.

Foram verificados os seguintes incidentes durante as campanhas do projeto DEPROAS: na campanha 1, foi resgatada a parte inferior do fundeio, com os dois correntógrafos de fundo. Já na campanha 2, o fundeio foi deslocado. Por isso, parte do cabo estava laçado ao correntógrafo de superfície (23 metros de profundidade); ainda, este correntógrafo estava intensamente coberto de algas e uma boia Benthos, inicialmente colocada acima do correntógrafo de superfície desapareceu. Durante as campanhas seguintes (3, 4, 5 e 6), a coleta de dado ocorreu com um ADCP. Na campanha 3, os registros foram aparentemente consistentes. A manutenção não foi realizada durante a campanha 4, mas mesmo assim os dados coletados para a campanha 5 estavam aparentemente consistentes. Entretanto, a coleta da campanha 6 demonstrou que o registro das campanhas anteriores foi aparentemente fragmentado. Apenas um curto período de tempo (06/2/2004 a 22/03/2004) poderia ser aproveitado.

Devido aos diversos problemas registrados em todos os níveis deste fundeio, principalmente à 23 metros de profundidade, o número de casos em cada faixa do histograma (Figura 4.68) está reduzido se comparado a todos os outros fundeios, de todas as outras radiais. É possível que isto tenha ocorrido devido à troca de equipamentos (correntógrafo para ADCP) durante as campanhas. Desta maneira, a série de dados apresentada na Figura 4.69 apresenta apenas os níveis de 75 e 94 metros de profundidade.

Figura 4.68: Fundeio de 100 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 74 e 94 metros, respectivamente. Os dois histogramas superiores representam a distribuição da componente paralela enquanto os dois histogramas inferiores apresentam velocidades perpendiculares. Velocidades positivas deixam a costa a esquerda e se direcionam à costa, respectivamente.

Figura 4.69: série de dados do Fundeio 2 de Ubatuba: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades de 75 e 94m, respectivamente. Dados de velocidades para 23 metros foram desconsiderados.

Tanto a análise espectral quanto o pseudodeslocamento foram calculados com base nos dados dos níveis de 75 e 94 metros de profundidade. Assim, através da análise das Figuras 4.70 e 4.71, nota-se uma variabilidade principalmente sazonal. Esta variabilidade não é tão marcante entre os dados coletados à 75 e 94 metros de profundidade e nem entre as componentes perpendicular e paralela. Ainda, como existe uma correlação intermediária entre dados de vento, principalmente registrado no inverno - campanha 2 (Figura 4.73) – percebe-se que as oscilações subinerciais estão associados principalmente às alterações do regime de vento entre verão e inverno.

A correlação calculada entre dados de ventos perpendicular e paralelo com as correntes perpendiculares encontra-se na Figura 4.73. Os maiores módulos dos índices são encontrados para ventos paralelos (aproximadamente 0.6), enquanto existe baixa relação (0.3) entre correntes perpendiculares e vento perpendicular à costa.

Figura 4.70: Cabo Frio, fundeio 2 – profundidade de 75 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.71 Cabo Frio, fundeio 2 – profundidade de 94 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas.

Figura 4.72: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 75 e 94m m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 100 m (radial de Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002.

Figura 4.73: **Cabo Frio (100 m)** Índice de correlação por tempo entre corrente perpendicular e componente paralela do vento (azul) e corrente perpendicular e componente perpendicular do vento (vermelho). A disposição de linha indica a profundidade do fundeio, e cada coluna indica uma campanha. Plano sem gráfico significa que a campanha possui problemas amostrais.

4.4.3 Isóbata de 200 metros

O terceiro fundeio da radial ao largo de Cabo Frio encontra-se na isóbata de 200 metros de profundidade, aproximadamente sob as coordenadas $41^{\circ} 44,86' W$ e $23^{\circ} 44,45' S$. A posição de cada correntógrafo deste fundeio é de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade. Os dados de velocidade de cada profundidade do fundeio foram obtidos através de seis campanhas distintas conforme mostra a Tabela 1, e foram decompostos em velocidades paralelas e perpendiculares à costa, considerando-se a isóbata de 200 metros de profundidade inclinada em 45° no sentido horário em relação ao eixo Norte-Sul.

Durante as campanhas do projeto DEPROAS, foram verificados os seguintes incidentes neste fundeio: durante a campanha 2, uma bóia Benthos, próxima ao liberador, estava quebrada; o correntógrafo de 85 metros de profundidade estava inundado. Já na campanha 6, o correntógrafo de 23 metros de profundidade não apresentou registro. Para as outras campanhas (1, 3, 4 e 5), todos os correntógrafos apresentaram registros aparentemente coerentes.

As Figuras 4.74 e 4.75 apresentam os histogramas de velocidades perpendicular e paralela à costa, respectivamente. Próximo à superfície, a velocidade média é aproximadamente 13cm/s deixando à costa a sua direita. Ou seja, o fluxo acompanha o deslocamento de água da corrente do Brasil em quase toda a coluna d'água (exceto 155 metros de profundidade). Ainda, o desvio em todos os níveis da componente paralela é maior, indicando possivelmente uma maior variabilidade dos dados, principalmente devido à curtose do histograma.

Figura 4.74: Histogramas de distribuição de velocidade perpendicular do Fundeio de 200 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas se direcionam à costa.

Figura 4.75: Histogramas de distribuição de velocidade paralela do Fundeio de 200 metros da radial de Cabo Frio, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194, respectivamente. Velocidades positivas deixam a costa à sua esquerda.

Em seguida, as séries temporais foram interpoladas para lacunas até 12 horas e os dados espúrios removidos, para todo o período amostral (Figura 4.76). Nota-se que, mesmo antes de filtrá-la, a série de dados possui módulos máximos de velocidade (tanto paralela quanto perpendicular) menor do que 50cm/s. Com a série interpolada, realizou-se a análise espectral seguindo metodologia previamente descrita para os níveis de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade (Figuras 4.77, 4.78, 4.79 e 4.80).

A Figura 4.77 demonstra um pico subinercial na banda de 0.1 a 0.3 ciclos/dia (período de até 10 dias) para o nível de 23 metros em ambas profundidades, com exceção da campanha 3 para a componente perpendicular. À medida que se aumenta a profundidade, a maré diurna passa a exercer um papel mais importante, principalmente sobre a componente perpendicular na camada de fundo (Figura 4.80) em que duas das três campanhas analisadas possuem um pico maregráfico na componente normal à costa. Esse mesmo comportamento foi observado tanto na isóbata de 200 metros da Baía de Guanabara como na isóbata de 200 metros da radial de Ubatuba. Portanto, a maré exerce um papel importante na determinação das correntes perpendiculares, principalmente próximo ao fundo nas isóbatas de 200 metros. Esse comportamento está associado ao rápido desligamento da camada de Ekman de fundo (menor do que 12 horas, tabela 4.1), onde a resposta subinercial ao vento ocorre acima desta.

Figura 4.76: série de dados (cm/s) do Fundeio de 200 metros de Cabo Frio: em vermelho são decomposições paralelas e azuis são decomposições perpendiculares. Profundidades 23, 85, 155 e 194 metros, respectivamente.

Figura 4.77: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 23 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Figura 4.78: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 85 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 3 e 4 respectivamente.

Figura 4.79: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 155 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Figura 4.80: Cabo Frio, fundeio 3 – profundidade de 194 metros: diagramas de espectros, separados para cada campanha. A primeira linha (azul) apresenta dados de velocidades perpendiculares, enquanto a segunda linha (vermelha) apresenta dados de velocidades paralelas. As colunas representam as campanhas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Após a série ser interpolada e filtrada, calculou-se o pseudodeslocamento para cada campanha (Figuras 4.81, 4.82 e 4.83) e os modos de velocidade através de funções ortogonais empíricas (Figuras 4.84 e 4.85). Durante o período de verão (Figuras 4.81 e 4.83) nota-se uma predominância no transporte para a costa nos níveis mais rasos (23 e 85 metros) e ao largo nas maiores profundidades (155 e 194 metros), com registros de inversão do deslocamento em todos os níveis. Estas inversões são caracterizadas por transportes em toda a coluna em direção à costa, possivelmente devido às variações subinerciais associadas ao vento. O pseudodeslocamento de inverno (Figura 4.82) possui um comportamento geral semelhante.

A análise das funções empíricas ortogonais para a primeira campanha demonstra que o perfil de correntes perpendiculares se comporta de forma análoga ao esperado para as correntes paralelas, de forma predominantemente barotrópica (Figura 4.84), com aproximadamente 72% da variabilidade explicada por este modo (Figura 4.85). É possível que isto ocorra devido a geometria costeira atípica da região, aliada à sua batimetria diferenciada.

Figura 4.81: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbata de 200 m (radial de Cabo Frio) entre dezembro de 2001 e março de 2002.

Figura 4.82: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 155 e 194 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbara de 200 m (radial de Cabo Frio) entre julho e novembro de 2002.

Figura 4.83: Pseudodeslocamento em km para as profundidades de 23, 85 e 155 m (do mais claro para o mais escuro), para isóbara de 200 m (radial de Cabo Frio) entre janeiro e abril de 2003.

Figura 4.84: Amplitudes do 1º, 2º, 3º e 4º modos, respectivamente, para as profundidades de 23, 85, 155 e 194 metros de profundidade, durante a 1ª campanha de Cabo Frio. Amplitudes negativas representam velocidades para a costa.

Figura 4.85: A importância de cada modo na determinação da variância (em azul) e importância acumulada (em vermelho), durante a primeira campanha do Fundeio 3 de Cabo Frio.

4.5 Resultado do modelo numérico

Foram realizados 3 experimentos numéricos utilizando o modelo sECOM. Esses experimentos se diferenciam entre os modos diagnóstico (os campos de salinidade e temperatura se mantêm constantes) e prognóstico, padrão de vento (vento de Nordeste espacialmente constante ou vento de Sudoeste espacialmente constante) e ainda entre os campos de salinidade e temperatura (TS homogêneo, termoclina entre 90 e 120 metros de profundidade), conforme Quadro 3.1. Todos os resultados experimentais foram descritos para a radial de Ubatuba, com os dados das correntes perpendiculares plotados nas Figuras 4.86, 4.87, 4.88.

Os experimentos diagnósticos 1 e 2 (Figuras 4.86 e 4.87) foram realizados em um oceano idealizado, onde os campos TS são constantes em toda a coluna da água. Como a água é homogênea e não existe variação temporal nos campos de temperatura e salinidade neste modo, o termo de gradiente de pressão baroclínico se mantém nulo. Portanto, a dinâmica observada se assemelha à dinâmica clássica de Ekman, tanto para o caso de ressurgência costeira gerada por ventos do quadrante Nordeste (Figura 4.87), quanto para casos de subsidências gerado por vento de quadrante sudoeste (Figura 4.86) onde a topografia é suave. Situações semelhantes ao modelo numérico foram parcialmente observados na Plataforma Média de toda a área de pesquisa (fundeios de 100 metros), principalmente na radial de Ubatuba. Isso possivelmente ocorre porque nestes ambientes, o número de Burger (S) é menor do que 1 e o termo de Coriolis se contrabalança com os termos de atrito. Ainda, nestes fundeios, os espectros de superfície e meia água possuem picos subinerciais e existe alta correlação com ventos paralelos e perpendiculares e correntes perpendiculares. Diferentemente do modelo diagnóstico, os correntógrafos próximos ao fundo sob a isóbata de 200 metros (corentógrafos à 194 metros de profundidade), registrou-se correntes exportando água para o talude. Assim, há uma indicação que ocorre o desligamento da camada de fundo em frequências subinerciais na região da radial onde $S > 1$ próximo à quebra da plataforma. Este resultado assemelha-se ao valor calculado de 6.81 horas para o tempo de desligamento da camada de Ekman de fundo no fundeio FUB3 (isóbata de 200 metros). Portanto, respostas com períodos superiores ao τ_0 não apresentam são análogas à dinâmica clássica de Ekman, pois a camada de fundo é desligada.

Figura 4.86: E1 - corrente perpendicular à costa (m/s) no transecto de Ubatuba em regime de vento, caracterizado por vento de sudoeste espacialmente constante. Campos iniciais de temperatura e salinidades constantes. Correntes negativas fluem ao largo. Eixo das abscissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m).

Figura 4.87: E2 - corrente perpendicular à costa (m/s) no transecto de Ubatuba em regime de vento de nordeste espacialmente constante. Campos iniciais de temperatura e salinidades constantes. Correntes negativas fluem para a costa. Eixo das abscissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m).

O experimento E3 foi realizado no modo prognóstico com vento de Nordeste espacialmente constante e termoclina localizada entre 90 e 120 metros de profundidade, onde os resultados são apresentados para 1, 3 e 5 dias de simulação (Figura 4.88).

Percebe-se, qualitativamente, que o primeiro dia de resposta do modelo numérico no modo prognóstico é similar ao experimento 1 (no modo diagnóstico), onde a resposta do oceano também é similar à dinâmica de Ekman nas regiões de declividade mais suave. Entretanto, a partir do terceiro dia de vento NE constante, com o ajuste sofrido pelos dados de temperatura e salinidade, a região próxima à isobata de 200 metros de profundidade apresenta um comportamento semelhante aos dados observacionais de Ubatuba para o fundeio de 200 metros: a coluna d'água age de forma predominantemente baroclínica, com intrusão de água em profundidades médias e pequena exportação de água de fundo ao largo nas camadas mais profundas. Este comportamento fica ainda mais evidente no quinto dia de simulação, onde as velocidades de fundo se aproximam de 15 cm/s para o largo. Esses resultados são também evidenciados nos dados de pseudodeslocamento para a radial de Ubatuba, tanto no fundeio de 100 metros quanto para o fundeio de 200 metros de profundidade. A principal diferença entre o modelo e os dados das funções ortogonais empíricas e pseudodeslocamento é a intensidade da velocidade das correntes perpendiculares em superfície e meia água: enquanto o modelo demonstra qualitativamente velocidades para a costa na metade superior da coluna d'água (1º baroclínico), a função ortogonal empírica (assim como o pseudodeslocamento) indicam uma intrusão de água exclusivamente em meia profundidade (2º baroclínico). Essa diferença está relacionada ao número de Burger entre o real e o modelado (Lentz & Chapman, 2004), possivelmente devido às diferenças do perfil hidrográfico (M) real e o perfil idealizado utilizado pelo experimento numérico. Como existe exportação de água na camada de fundo próximo à isóbata de 200 metros, percebe-se que os termos não lineares de fluxo de momentum exercem papel importante na circulação perpendicular. Mesmo que a Figura 4.31 registre um pico maregráfico na camada de fundo, esta não é a única forçante responsável pela exportação de fundo ao largo, ou seja, o termo baroclínico de pressão exporta água próxima ao fundo em períodos maregráficos (dados observacionais) e em períodos subinerciais (dados de modelo).

Figura 4.88: E3- corrente perpendicular à costa (m/s), através de modelo prognóstico, no transecto de Ubatuba com vento espacialmente constante e de verão e termoclina entre 90 e 120 metros. Correntes negativas fluem ao largo. Eixo das abscissas representa a distância (km) da costa, enquanto as ordenadas representam a profundidade (m).

5 CONCLUSÕES

A estrutura da picnoclina, e consequentemente o número de Burger, é fundamental na determinação do perfil vertical de velocidades perpendiculares à costa. Portanto, a dinâmica de circulação perpendicular à costa é diferente para regiões (ou condições) com números de Burger relativamente distintos. Isto pode ser observado através dos dados de pseudodeslocamento nos diferentes fundeios da radial de Ubatuba, onde o fluxo predominante para a costa varia sazonalmente na camada de fundo tanto na Plataforma Interna quanto na Plataforma Média (Figuras 4.9, 4.10, 4.20 e 4.21). Todavia, o fluxo para a costa ocorre durante todo o ano acima da camada de fundo (profundidades menores do que 155 metros) no fundeio localizado próximo à quebra da Plataforma Continental, com transporte para o largo perto do leito oceânico (Figuras 4.32, 4.33 e 4.34). Assim, os resultados de velocidade perpendicular no experimento numérico 3 (E3 - Figura 4.88), que possui uma termoclina entre 90 e 120 metros de profundidade, assemelha-se qualitativamente aos dados observacionais descritos, ocorrendo um transporte acima da camada de fundo onde $S > 1$ (próximo à quebra da plataforma).

O tempo de desligamento, que diminui com o aumento do número de Burger, determina o período em que a dinâmica de Ekman de fundo atua em uma determinada situação. Logo, as regiões de estudo com $S > 1$ apresentaram o tempo de desligamento da camada de Ekman de fundo em períodos menores do que o subinercial (13.64, 1.99, 15.62 e 6.81 horas para os fundeios FCF1, FCF3, FBG3 e FUB3, respectivamente). Portanto, nestes ambientes, a intrusão da ACAS ocorre preferencialmente acima da camada de Ekman de fundo. Outro resultado é que esta resposta essencialmente subinercial da circulação perpendicular é baroclínica.

O vento sinótico, principalmente sua componente paralela, exerce um papel importante na determinação da variabilidade das correntes perpendiculares à costa, principalmente onde o número de Burger é menor do que 1. Entretanto, ela possuiu valores médios de correlação com as correntes perpendiculares muito abaixo do que o descrito em Castro (1996) e Ruffato (2013) para as correntes paralelas.

A maré pode representar até 40% da variabilidade dos dados das correntes perpendiculares à costa, próximo ao fundo. Entretanto, nos níveis superiores, a maré tem uma influência uma ordem de grandeza menor do que o vento. Portanto, tanto as forçantes subinerciais quanto as forçantes maregráficas são importantes para determinar a variabilidade das correntes perpendiculares assim como sua estrutura vertical.

Nos locais onde o número de Burger é maior do que 1 (Isóbata de 50 metros de Cabo Frio e 200 metros da Baía de Guanabara e Ubatuba), o transporte para à costa ocorre preferencialmente em meia água, com perfil de velocidade perpendicular tipicamente baroclínico. Ainda, nestes casos, observa-se transporte nulo ou para o largo de água na camada de fundo. O mesmo não foi observado na isóbata de 200 metros da radial de Cabo Frio.

O transporte de água para o oceano aberto nas camadas de fundo está associado a picos espectrais de maré diurna ou semidiurna. Este resultado assemelha-se ao obtido por Pereira e Castro (2007), onde existe um forte sinal semidiurno próximo ao talude, principalmente associada a componente M2 (período de 12.42 horas). Os mesmos autores descrevem, através de modelos numéricos, que fluxos baroclínicos de energia são propagados para o largo. Desta maneira, as correntes geradas pela maré em toda a coluna d'água exercem um papel proporcionalmente mais importante na camada de fundo, principalmente onde $S > 1$. Entretanto, resultados de simulações numéricas também identificaram este comportamento de exportação de água para o largo, mesmo desconsiderando a maré. Como o número de Burger é maior do que 1 nestas regiões, o transporte preferencial de água para a costa gerada pelos termos de *stress*, gradiente de pressão e Coriolis ocorre acima da camada de fundo.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AMOR, C. C. **Intrusões da água Central do Atlântico Sul sobre a plataforma continental situada entre a Ilha de São Sebastião (SP) e o Cabo de São Tomé.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. 2004

AMOR, C. C.; CASTRO, BM. Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between Sao Sebastiao (24° S) and Cabo Sao Tome (22° S). **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 5-14, 2014.

BARANGE, M; PILLAR, SC. Cross-shelf circulation, zonation and maintenance mechanisms of *Nyctiphanes capensis* and *Euphausia hanseni* (Euphausiacea) in the northern Benguela upwelling system. **Continental Shelf Research**, v. 12, n. 9, p. 1027-1042, 1992.

BENTHUYSEN, J; THOMAS, L.N. & LENTZ, S.J. Rapid Generation of Upwelling at a Shelf Break Caused by Buoyancy Shutdown. **J. Phys. Oceanogr.**, 45, 294–312. 2015.

BLUMBERG, A. F. & G. L. MELLOR. A description of a threedimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, **Coastal Estuarine Sci.**, vol. 4, edited by N. S. Heaps, pp. 1–16, AGU, Washington, D. C. 1987.

BLUMBERG, A. F., L. A. KHAN & J. ST. JOHN. Three-dimensional hydrodynamic model of New York Harbor region, **J. Hydraul. Eng.**, 125(8), 799–816. 1999.

BRAGA, E.S.; MÜLLER, T.J. Observation of regeneration of nitrate, phosphate and silicate during upwelling off Ubatuba, Brazil, 23°S. **Continental Shelf Research**, v. 18 - 8, p 915–922, 1998.

BRANDINI, F. P. et al. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 61-75, 2014.

BRINK KH. Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the Continental Shelf. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 23: 389–412, 1991.

CASTRO, BM; MIRANDA, LB de; MIYAO, SY. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. **Bolm Inst. oceanogr., S Paulo**, v. 35, n. 2, p. 135-151, 1987.

CASTRO, BM. Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo. **Tese de Livre Docência, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, 1996.

CASTRO, BM & MIRANDA, LB. Physical oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S. Capítulo de *The Sea: The Global Coastal Ocean, Regional Studies and Syntheses*, organizado por Robison, AR & Brink, KH, 1998.

CASTRO, BM. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 15-23, 2014.

CHAPMAN, DC.; BRINK, KH. Shelf and slope circulation induced by fluctuating offshore forcing. **Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)**, v. 92, n. C11, p. 11741-11759, 1987.

CLARKE, AJ.; BRINK, K. H. The response of stratified, frictional flow of shelf and slope waters to fluctuating large-scale, low-frequency wind forcing. **Journal of Physical Oceanography**, v. 15, n. 4, p. 439-453, 1985.

DEVER, EP. Wind-Forced Cross-Shelf Circulation on the Northern California Shelf*. **Journal of Physical Oceanography**, v. 27, n. 8, p. 1566-1580, 1997.

DOTTORI, M; CASTRO, BM. The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. **Ocean dynamics**, v. 59, n. 4, p. 603-614, 2009.

EMÍLSSON, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. **Bolm Inst. oceanogr**, v. 11, n. 2, p. 101-112, 1961.

FARRELL, TM.; BRACHER, D; ROUGHGARDEN, J. Cross-shelf transport causes recruitment to intertidal populations in central California. **Limnology and Oceanography**, v. 36, n. 2, p. 279-288, 1991.

HUTHNANCE JM. On trapped waves over a continental shelf. **Journal of Fluid Mechanics**, 69: 689–704, 1975.

HUTHNANCE, JM. Waves and currents near the continental shelf edge. **Progress in Oceanography**, v. 10, n. 4, p. 193-226, 1981.

KALNAY et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.

LENTZ, SJ.; CHAPMAN, DC. The Importance of Nonlinear Cross-Shelf Momentum Flux during Wind-Driven Coastal Upwelling. **Journal of Physical Oceanography**, v. 34, n. 11, p. 2444-2457, 2004.

MCDUGALL, T.J. & P.M. BARKER. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox, 28pp., SCOR/IAPSO WG127, ISBN 978-0-646-55621-5. 2011.

MIRANDA, L.B. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) a Ilha de São Sebastião (SP). **Livre Docência Thesis, Universidade de São Paulo**, 1982.

KVINGE, T. On the special current and water level variations in the channel of São Sebastião. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, 16:23-38, 1967.

PALMA, ED.; MATANO, RP.; PIOLA, AR. A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. **Journal of Geophysical Research: Oceans** (1978–2012), v. 109, n. C8, 2004a.

PALMA, ED., MATANO, R. P., PIOLA, AR., & SITZ, LE. A comparison of the circulation patterns over the Southwestern Atlantic Shelf driven by different wind stress climatologies. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 24, 2004b.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929-937, 2002.

PEREIRA, A. F, CASTRO, B.M., CALADO, L., & DA SILVEIRA, I. C. A. Numerical simulation of M2 internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current. **Journal of Geophysical Research: Oceans** (1978–2012), v. 112, n. C4, 2007.

PEREIRA, A. F. & CASTRO, B.M. Internal Tides in the Southwestern Atlantic off Brazil: Observations and Numerical Modeling. **Journal of Physical Oceanography**, v.37, p. 1512-1526. 2007.

REZENDE, J. H. M., 2003. Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste durante o verão. **Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo**. 120 p.

RODRIGUES, RR.; LORENZZETTI, JA. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, n. 4, p. 371-394, 2001.

ROQUET, F., G. MADEC, T. J. MCDUGALL & P. M. BARKER. Accurate polynomial expressions for the density and specific volume of seawater using the TEOS-10 standard. **Ocean Modelling**, 90, pp. 29-43. 2015.

RUFFATO, DG. **Circulação na Plataforma Continental Interna e Média do Estado de São Paulo durante o verão: estudos numéricos**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. 2013.

SILVEIRA, ICA, SCHMIDT, ACK., CAMPOS, EJD., DE GODOI, SS., & IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000.

STOMMEL, H & LEETMAA, A. Circulation on the continental shelf. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, U.S.A. 69: 3380-3384, 1972.

THOMSON, RE.; EMERY, WJ. Data analysis methods in physical oceanography. Newnes, 2014.

TOMCZAK M. 2000. Coastal trapped waves and other oscillations. Lecture notes Chapter 8, acesso em: ["http://www.es.flinders.edu.au/mattom/ShelfCoast/chapter08.html"](http://www.es.flinders.edu.au/mattom/ShelfCoast/chapter08.html)

WELCH, PD. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on audio and electroacoustics**, v. 15, n. 2, p. 70-73, 1967.