



ONDAS CONFINADAS COSTEIRAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL
SUL-SUDESTE DO BRASIL

Bruna Reis Leite França

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

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

ONDAS CONFINADAS COSTEIRAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL
SUL-SUDESTE DO BRASIL

Bruna Reis Leite França

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

Examinada por:

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

Prof. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc

Prof. Ricardo de Camargo, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO DE 2013

França, Bruna Reis Leite

Ondas Confinadas Costeiras na Plataforma Continental Sul-Sudeste do Brasil/Bruna Reis Leite França. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XII, 77 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 73 – 77.

1. Ondas Confinadas Costeiras. 2. Ondas de Plataforma. 3. Maré Meteorológica. I. Paiva, Afonso de MoraesII. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram com a elaboração desse projeto.

Ao Programa de Engenharia Oceânica (PEnO) da Coppe/UFRJ pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional.

Ao meu orientador, Afonso de Moraes Paiva, pelos ensinamentos, pelas ideias e pelo acompanhamento ao longo do mestrado. Por respeitar os meus limites e ao mesmo tempo incentivar a ir além deles.

À equipe da REMO/UFRJ pela disponibilização das simulações utilizadas na dissertação.

Ao Vladimir e a Mariela pelo esclarecimento de dúvidas referente aos resultados dos experimentos.

Ao Guilherme Mill pelas indicações de referências e pelas sugestões durante as análises.

Aos colegas do Grupo de Processos Oceânicos (GruPO) do programa de Engenharia Oceânica (PEnO) da Coppe/UFRJ pelas sugestões, pela amizade, pelos incentivos e por tornar o período de pesquisa mais agradável.

À Marise pela solicitude em ajudar nos processos burocráticos.

Ao CNPQ pelo financiamento, permitindo a realização desse trabalho.

E por fim um agradecimento especial a minha família, ao Antonio e aos meus amigos pelo incentivo e apoio durante essa etapa.

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

ONDAS CONFINADAS COSTEIRAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUL-SUDESTE DO BRASIL

Bruna Reis Leite França

Agosto/2013

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

As ondas confinadas costeiras (OCCs) observadas na costa brasileira foram investigadas a partir de simulações numéricas com alta resolução espacial no período de 2004 a 2006. Observou-se que ao longo da propagação dessas ondas para nordeste há um declínio acentuado da velocidade de propagação principalmente em Cabo Frio e em Abrolhos. As velocidades acima de Cabo Frio tornam-se mais lentas, decaindo em mais que a metade em relação as velocidades observadas ao sul dessa região. Em geral as maiores amplitudes de elevação do nível do mar e as maiores componentes de velocidade paralelas à costa com frequência subinercial foram identificadas na isobatimétrica de 20 m com valores superiores a 30 cm e próximos a 0,4 m/s respectivamente. Ao se afastar da costa esses valores decaem significativamente, principalmente no campo de elevação. As OCCs apresentaram uma marcada estrutura barotrópica sendo esta predominante em períodos de verão e de inverno. Entretanto, no verão a componente baroclínica apresentou-se superior em relação ao inverno principalmente nas regiões de Cabo Frio e de Macaé, regiões em que ocorre maior estratificação da coluna d'água possivelmente devido ao avanço de águas frias de fundo associado a ressurgência. A área de geração das OCCs observadas na costa brasileira foi identificada na Argentina, na região compreendida entre 40°S e 45°S.

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

COASTAL TRAPPED WAVES IN BRAZILIAN'S SHELF

Bruna Reis Leite França

August/2013

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

The Coastal Trapped Waves (CTWs) observed on the Brazilian coast were investigated using high spacial resolution numerical simulations in the period from 2004 to 2006. Along the wave propagation to the Northeast it was observed a sharp decrease in the velocity, mainly in Cabo Frio and Abrolhos. The speeds up Cabo Frio become slower decaying by more than half relative speeds observed south of the region. In general, the highest sea levels and velocity components parallels to the coast often subinercial were identified in 20 m isobath with values greater than 30 cm and near 0.4 m/s respectively. Moving away from the coast, these values have declined significantly, mainly in the field of level. The OCCs have showed a marked barotropic structure which is prevalent during summer and winter periods. However, in summer, the baroclinic component was superior in comparison to winter period, mainly in Cabo Frio and Macae regions , where greater water column stratifications occur possibly due to the advance of bottom cold waters associated to upwelling phenomenon. The generation area of the CTWs observed along the borders of Brazilian coast was identified in Argentina, in the region between 40°S and 45°S.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Área de Estudo	7
2.1 Plataforma Continental Brasileira	7
2.2 Forçantes de Vento na Costa Brasileira	11
3 Metodologia	14
3.1 Modelagem Numérica – HYCOM	14
3.1.1 Comparação GLOSS X HYCOM	18
3.2 Critério Clarke & Brink (1985)	21
3.3 Funções Ortogonais Empíricas	22
4 Resultados e Discussões	25
4.1 Períodos Típicos das Ondas Subinerciais na Costa Brasileira	25
4.2 Variação da Velocidade de Propagação das OCCs ao Longo da Costa Brasileira	28
4.3 Velocidades de Corrente Associadas às Ondas Subinerciais	37
4.4 Condições Barotrópicas e Baroclínicas das OCCs	39
4.5 Área de Geração	62
5 Conclusões	69
Referências Bibliográficas	73

Lista de Figuras

1.1	Campos de elevação (cm) com frequência subinercial obtidos por modelagem numérica indicando a passagem de uma onda confinada costeira na costa brasileira no período compreendido entre 5/07/2005 e 12/07/2005. . .	6
2.1	Batimetria (m) e localização da Plataforma Leste Brasileira (PLB), da Plataforma de Abrolhos-Campos (PAC), da Bacia Sul Brasileira (BSB) e da Plataforma Sul Brasileira (PSB) que abrangem a área de estudo. . . .	8
2.2	Campos médio de tensão de vento durante janeiro (esquerda) e julho (direita). Fonte: Adaptado de SAMUELS e COX (1987).	12
3.1	Batimetria (m) do experimento em $1/4^\circ$ e localização dos domínios em $1/12^\circ$ (retângulo roxo) e $1/24^\circ$ (retângulo preto) simulados no HYCOM. .	15
3.2	Localização dos fundeios virtuais P1, P2, P3 e P4 das seções de Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Ilha Fiscal, Cabo Frio, Macaé e Piúma. . . .	17
3.3	Batimetria (m) da área de estudo e localização das séries de elevação do nível do mar do GLOSS.	19
3.4	Comparação entre as séries do nível médio dos experimentos do HYCOM com $1/4^\circ$ e com $1/24^\circ$ de resolução e com os dados do GLOSS referentes a Salvador, Macaé, Ilha Fiscal, Cananéia e Imbituba.	20
4.1	A: Densidade espectral do nível médio (cm^2/s^2) do GLOSS (linha tracejada) e do HYCOM (linha cheia) para os pontos analisados, exceto Salvador. A linha tracejada cinza indica o intervalo de confiança. B: Coeficiente de coerência obtido por espectro cruzado entre as séries do dado e do modelo referente aos quatro pontos analisados. Os valores acima da linha tracejada indicam uma confiança estatística superior a 99 %	26
4.2	Hovmoller do nível médio (cm), com período entre 3 e 20 dias, ao longo da costa no domínio $1/24^\circ$. As linhas tracejadas em $23^\circ S$ e $18^\circ S$ indicam a localização dos pontos onde ocorrem variações na velocidade de propagação das OCCs e as setas os trechos 1 e 2.	29

4.3	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio $1/24^\circ$ compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2004 respectivamente com período entre 3 e 20 dias.	30
4.4	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio $1/24^\circ$ compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2005 respectivamente com período entre 3 e 20 dias.	31
4.5	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio $1/24^\circ$ compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2006 respectivamente com período entre 3 e 20 dias.	32
4.6	Correlação entre pontos A1(34°S) e A2(25°S) e entre os pontos A3(22°S) e A4(18°S), pontos extremos do Trecho 1 e do Trecho 2 respectivamente. Ponto vermelho indica correlação máxima dos trechos.	33
4.7	Densidade espectral (cm^2/s^2) das séries de elevação ao longo da isobatimétrica de 20 m no domínio $1/24^\circ$ compreendendo períodos entre 3 e 20 dias.	35
4.8	Hovmoller do nível médio (cm) e da componente de velocidade (m/s) paralela à costa com períodos entre 3 e 20 dias nas isobatimétricas de 20 m, 50 m, 100 m e 200 m.	38
4.9	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Rio Grande.	40
4.10	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Imbituba.	41
4.11	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Cananéia.	42
4.12	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Ilha Fiscal.	43
4.13	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Cabo Frio.	44
4.14	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Macaé.	45
4.15	Seção de temperatura média de Cabo Frio durante o verão e o inverno de 2005.	48
4.16	Seção de temperatura média de Macaé durante o verão e o inverno de 2005.	48
4.17	Crítério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2 e P3 na seção de Piúma.	49
4.18	Hovmoller de N^2 aplicado ao ponto P2 de Cabo Frio durante o ano de 2005.	51
4.19	Hovmoller de N^2 aplicado ao ponto P3 de Cabo Frio durante o ano de 2005.	51

4.20	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Rio Grande obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	53
4.21	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Imbituba obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	53
4.22	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Cananéia obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	54
4.23	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Ilha Fiscal obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	54
4.24	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Cabo Frio obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	55
4.25	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Macaé obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	55
4.26	Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Piúma obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.	56
4.27	Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o período compreendido entre 2004 e 2006.	57
4.28	Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o verão de 2005.	59
4.29	Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o inverno de 2005.	60
4.30	Hovmoller do nível médio (cm) na isobatimétrica de 20 m no domínio $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.	62
4.31	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2004 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica a região de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.	64

4.32	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2005 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.	65
4.33	Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2006 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.	66
4.34	Variância do campo de elevação (cm^2) em profundidades inferiores a 200 m filtrado no domínio de $1/4^\circ$, entre 2004 e 2006.	67
4.35	Energia Cinética Turbulenta (cm^2/s^2) em profundidades inferiores a 200 m no domínio de $1/4^\circ$. Foram considerados u e v filtrados para o cálculo no período compreendido entre 2004 e 2006.	68

Lista de Tabelas

3.1	Profundidades dos pontos P1, P2, P3 e P4 dos fundeios virtuais	17
3.2	Marégrafos - GLOSS.	19
4.1	Velocidade de propagação do Trecho 1.	34
4.2	Velocidade de propagação do Trecho 2.	34
4.3	Declividade Média da Plataforma	44
4.4	Frequência Média de Brunt-Vaisala das Seções	47

Capítulo 1

Introdução

As ondas confinadas costeiras (OCCs) são ondas de baixa frequência que propagam-se ao longo de margens continentais com a costa à sua direita no hemisfério norte e à sua esquerda no hemisfério sul, com períodos que variam desde alguns dias até semanas. Essas ondas representam uma parte importante da dinâmica em mesoescala e da variabilidade das correntes ao longo da plataforma, visto que além de causarem variações no nível do mar (Figura 1.1), são responsáveis por flutuações nas correntes longitudinais à linha de costa.

WANG e MOOERS (1976) ao classificarem as OCCs identificam a presença de dois mecanismos básicos responsáveis pelo aprisionamento de ondas à costa com frequência subinercial: o efeito da presença de uma margem continental e a declividade de fundo. Tais mecanismos estão associados as ondas de Kelvin (OK) e as ondas de plataforma (OP) respectivamente, as quais compõem as OCCs com frequência subinercial (MYSAK, 1980). As ondas de Kelvin (OK) são ondas gravitacionais, sob influência da rotação, junto a uma fronteira lateral com velocidade

normal à fronteira nula, induzindo um fluxo de massa paralelo à costa. Essas ondas de amplitudes com decaimento exponencial em direção ao oceano são mantidas por um equilíbrio entre a força de Coriolis e um gradiente de pressão normal à costa. As ondas de plataforma (OP) são ondas de vorticidade com frequência subinercial que dependem das variações da profundidade, assim como da rotação da Terra. As ondas de plataforma são aprisionadas sobre a margem continental induzidas pela conservação de vorticidade potencial. O alongamento ou a compressão da coluna d'água gera uma diferença de vorticidade que tende a dirigí-la para sua posição original, mantendo-a confinada à costa (WANG e MOOERS, 1976) .

O comportamento de ondas subinerciais na costa brasileira foi abordado por CASTRO e LEE (1995) ao observarem ondas de plataforma (OP) ao longo da costa sudeste do Brasil com maiores amplitudes ao sul, decrescendo ao se propagarem para nordeste com velocidades de propagação em torno de 10 m/s. Os maiores picos de energia associados aos dados de nível do mar, pressão atmosférica e ventos foram observados principalmente em duas faixas temporais, entre 9 e 12 dias e entre 6 e 7 dias. Para as maiores densidades espectrais dos dados, os autores observaram o nível do mar respondendo predominantemente a ventos com orientação SSW-NNE e SSE-NNW, respectivamente. Em ambas as bandas o nível do mar foi bem correlacionado com ventos mais ao sul indicando a maior influência de forçantes remotas na geração das ondas subinerciais.

MOREIRA (2008) observou que a simultaneidade das inversões do vento com as correntes entre Cabo Frio e Cabo de São Tomé indica a pronta resposta do oceano à forçantes de vento em passagens de frentes frias durante o inverno. Em condições de frentes frias, as quais ocorrem em média entre 3 a 5 vezes ao mês, as

perturbações atmosféricas com origem polar geralmente propagam-se para nordeste com formação de centros de baixa pressão. Eventos extremos de elevação do nível do mar em Santos também foram identificados por CAMPOS *et al.* (2010) pelos mesmos ventos de sudoeste, os quais apresentaram velocidades acima de 8 m/s. Variações sazonais foram identificadas com o outono e a primavera respondendo aos eventos de maiores e menores amplitudes em ondas de baixa frequência, respectivamente.

Embora o trabalho de CASTRO e LEE (1995) não apresente cobertura suficiente que aponte a área de geração das ondas de plataforma continental (OPC) no litoral brasileiro, estes autores observaram que os dados de nível do mar com frequência subinercial para cada ponto da costa analisado apresentaram correlações máximas com dados de vento de estações distando entre 100 e 500 km mais ao sul, com defasagem de 0,5 a 1 dia. A maior variância da velocidade do vento associada aos menores desvios de orientação seguindo a linha de costa em Arvoredo, Santa Catarina, sugere, segundo esses autores, um possível indicador que as ondas de plataforma (OP) estão sob maior influência da forçante de vento nessa região. A intensificação do fenômeno associado as ondas subinerciais na porção mais ao sul da costa brasileira também foi observada por CAMARGO *et al.* (1999) através da análise de séries de elevação ao longo de vários pontos da costa, incluindo Ubatuba, Santos, Cananéia, Paranaguá, Florianópolis e Punta del Este, no Uruguai. Os autores observaram o aumento significativo das amplitudes associadas a baixa frequência assim como o aumento de ocorrências de eventos extremos nos pontos mais ao sul da área estudada. Tal fator indica a relação das ondas subinerciais com os sistemas meteorológicos na porção sul, os quais são mais intensos nessa região, causando portanto efeitos mais significativos em ondas de baixa frequência.

Em geral as ondas confinadas à plataforma continental apresentam um comportamento essencialmente barotrópico em resposta a forçantes de vento ao longo do litoral brasileiro. Ao analisar dados de fundeios de Cabo Frio e de Ubatuba durante o inverno de 2003, RAHY (2006) identificou na porção interna e intermediária da plataforma perturbações em fase nas correntes ao longo da profundidade, característica associada a barotropicidade. MOREIRA (2008) observou característica semelhante ao analisar dados de correntógrafos na Bacia de Campos, na porção intermediária da plataforma. CASTRO e LEE (1995) identificaram a dominância do modo barotrópico respondendo a valores superiores a 80% nos registros de elevação com frequência subinercial em Cabo Frio, Rio de Janeiro, Ubatuba, Cananéia e São Francisco durante o inverno de 1978 a partir da aplicação da análise de funções ortogonais empíricas (EOF).

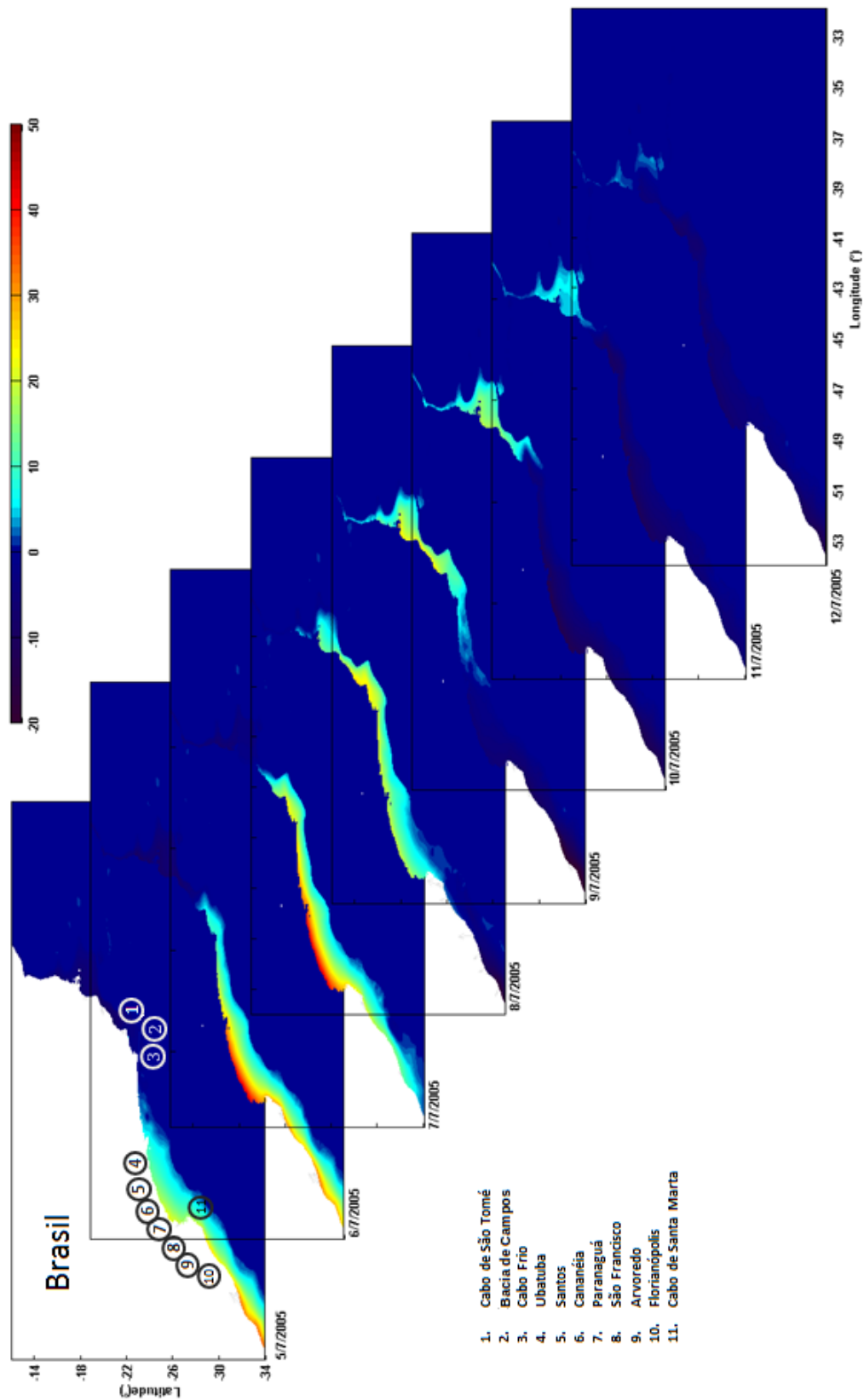
DOTTORI e CASTRO (2009) também identificaram a barotropicidade das ondas na plataforma continental de São Paulo na análise de EOF respondendo a valores superiores a 80% da variância dos dados de correntômetros localizados na porção interna e intermediária da plataforma. O mesmo comportamento foi observado através do critério de CLARKE e BRINK (1985) aplicado a dados hidrográficos para a mesma região, o qual define a condição barotrópica de ondas em resposta a forçantes de vento a partir da frequência de Brunt-Vaisala, declividade de fundo na plataforma e o parâmetro de Coriolis. A barotropicidade foi observada em situações de verão e inverno, embora o verão apresente maiores estratificações. Por outro lado a análise de EOF aplicada a regiões próximas ao fundo e da quebra de plataforma, na altura de Santos, permitiram identificar a predominância do 1º modo baroclínico, o qual respondeu a 58% da variância. Os autores concluem que a intensificação do

sinal baroclínico na porção externa da plataforma possivelmente está associada a maior interação da plataforma continental com processos oceânicos offshore e com a menor correlação das correntes com os ventos originados de frentes frias, os quais possuem maior correlação com dados de corrente mais próximos à costa.

A literatura aponta diversas questões associadas às ondas subinerciais, as quais são investigadas em várias regiões do mundo, incluindo a caracterização do comportamento barotrópico e/ou baroclínico associado às variações sazonais, a dissipação significativa de energia cinética em regiões onde a topografia muda abruptamente, além da geração de correntes de fundo (MARTINEZ e ALLEN, 2004; SCHUMANN e BRINK, 1990).

O fenômeno associado ao confinamento de ondas subinerciais na costa do Brasil foi estudado principalmente nas porções sudeste da plataforma. No presente trabalho, de forma a estender as análises da dinâmica das OCCs à distintos pontos da costa brasileira serão utilizados experimentos de modelagem numérica em alta resolução. A partir de simulações desenvolvidos pelo grupo REMO (Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica) aplicadas ao modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) têm-se por objetivos específicos:

- Analisar as transformações sofridas pelas ondas ao longo da sua propagação na costa brasileira.
- Caracterizar o campo de correntes associado às OCCs.
- Analisar as características em condição barotrópica e baroclínica.
- Identificar os locais de geração das OCCs observadas na costa do Brasil.



1. Cabo de São Tomé
2. Baía de Campos
3. Cabo Frio
4. Ubatuba
5. Santos
6. Cananéia
7. Paranaguá
8. São Francisco
9. Arvoredo
10. Florianópolis
11. Cabo de Santa Marta

Figura 1.1: Campos de elevação (cm) com frequência subinercial obtidos por modelagem numérica indicando a passagem de uma onda confinada costeira na costa brasileira no período compreendido entre 5/07/2005 e 12/07/2005.

Capítulo 2

Área de Estudo

2.1 Plataforma Continental Brasileira

A área de estudo se estende às regiões entre 12°S e 34°S e 32°W e 55°W. Essa região, segundo a caracterização de CASTRO e MIRANDA (1998), envolve parte de quatro plataformas continentais, a Plataforma Leste Brasileira, a Plataforma de Abrolhos-Campos, a Bacia Sul Brasileira e a Plataforma Sul Brasileira.

A porção mais ao norte da área de estudo corresponde a Plataforma Leste Brasileira. Localizada entre 8°S e 15°S (Figura 2.1), essa é a região da plataforma continental brasileira mais estreita e rasa, com largura típica de 15 km e profundidades da quebra de plataforma entre 50 e 60 m. Próximo a 13°S esses valores ainda podem chegar a 10 km e 40 m de profundidade, respectivamente .

AMORIM (2011) ao analisar seções com profundidades superiores a 100 m da plataforma externa, entre 13°S e 13°40'S, identificou a termoclina dessa região ocupada principalmente pela Água Central do Atlântico Sul (ACAS) , ocupando profundidades próximas a 150 m no verão e 220 m no inverno.

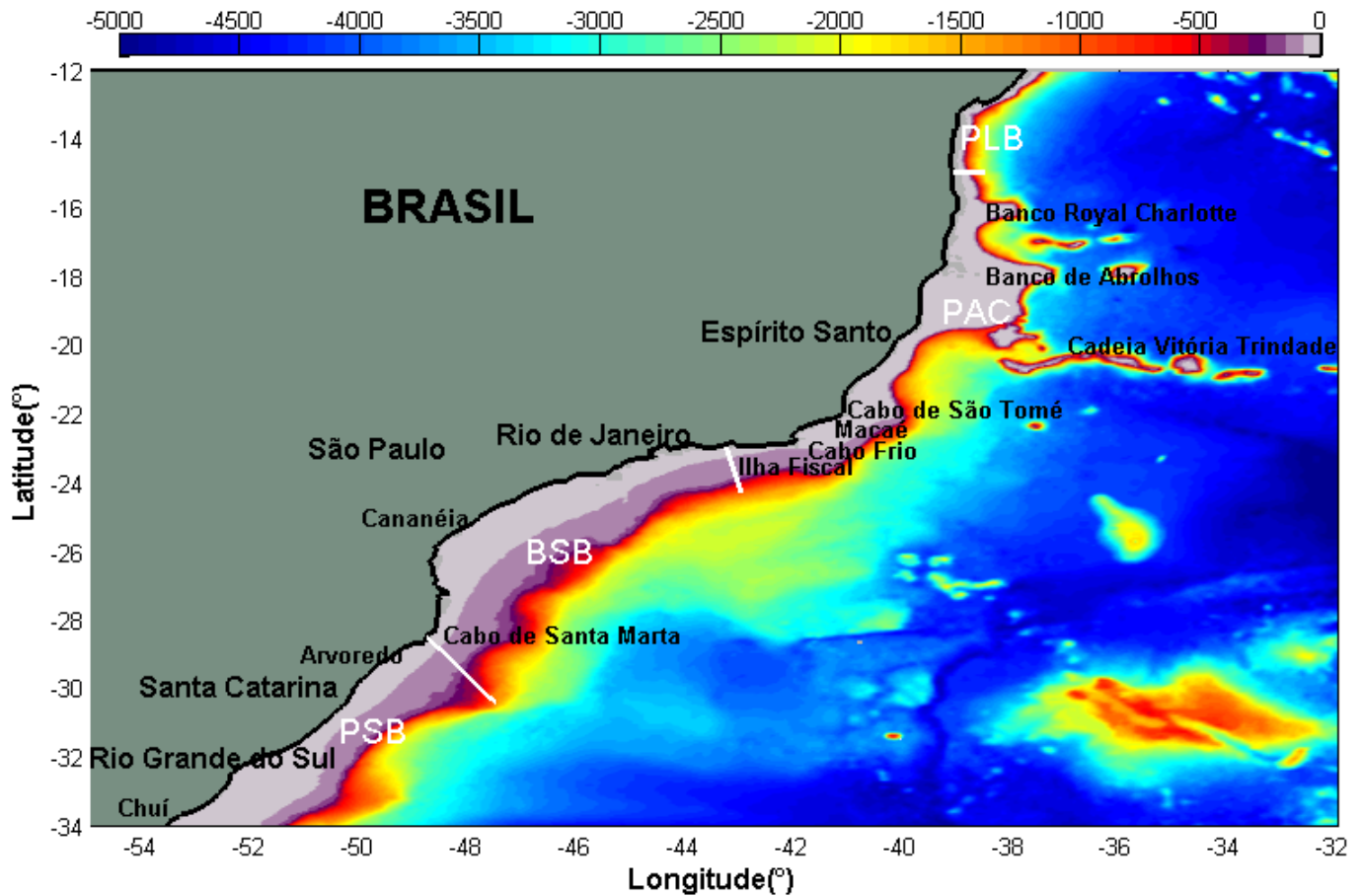


Figura 2.1: Batimetria (m) e localização da Plataforma Leste Brasileira (PLB), da Plataforma de Abrolhos-Campos (PAC), da Bacia Sul Brasileira (BSB) e da Plataforma Sul Brasileira (PSB) que abrangem a área de estudo.

Entre 15°S e 23°S CASTRO e MIRANDA (1998) definem a Plataforma de Abrolhos-Campos, a qual é caracterizada por uma complexa topografia. Ao norte, a plataforma com largura de 35 km é limitada por bancos que emergem de grandes profundidades como o Banco Royal Charlotte e o Banco de Abrolhos. Próximo a esses bancos, a largura da plataforma pode chegar a valores superiores a 100 km e 190 km respectivamente. Ao sul, na região de Campos, a plataforma torna-se mais estreita aproximando-se de 80 km. Essa região é localizada entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, onde as profundidades da quebra de plataforma atingem valores entre 60 e 100 m na maior parte da região. Em torno de 20°S é identificada outra estrutura geomorfológica, a Cadeira Vitória-Trindade, uma longa cadeia formada de ilhas oceânicas e montes submarinos culminando a leste nas Ilhas de Trindade e Martin Vaz. Estas feições topográficas localizadas perpendicularmente a costa, ao longo dos paralelos de 20° e 21°S, geram gradientes batimétricos bastante acentuados influenciando na circulação local. LIMA e LENTINI (2009) identificaram a camada de mistura dessa região entre 10 m e 25 m no verão e em profundidades superiores a 100 m no inverno. Parte dessa variação foi atribuída a intensidade dos ventos que são mais amenos durante o verão, próximo a 6,6 m/s, enquanto que no inverno esse valor é mais acentuado com uma média de 8,0 m/s.

A Bacia Sul Brasileira localiza-se entre 23°S e 28.5°S na costa sudeste do Brasil, extremidades correspondentes a Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. A Bacia Sul Brasileira possui um formato de lua crescente com as porções mais amplas na parte central chegando a 230 km de largura e com as porções mais estreitas em Cabo Frio com 50 km de largura e no Cabo de Santa Marta com 70 km. O comprimento da linha de costa da Bacia Sul Brasileira é de aproximadamente 1100

km e ao norte a orientação típica da linha de costa NE-SW muda abruptamente para E-W. A topografia é geralmente suave, com isóbatas paralelas à linha de costa e a quebra de plataforma é encontrada entre 120 e 180 m de profundidade. Essa região tende a ser verticalmente homogênea devido a processos de mistura associados aos ventos e a maré, entretanto, observa-se uma forte termoclina e picnoclina nas profundidades de 25 m a 30 m durante o verão. Durante o inverno, a camada de mistura é geralmente bem desenvolvida sobre a maior parte da plataforma, com a coluna d'água mostrando apenas pequenas variações de temperatura e densidade sobre essas profundidades (MIRANDA, 1982). As correntes na porção intermediária da plataforma possuem um fluxo predominante para sudoeste durante todo o ano com velocidades médias em torno de 0,4 e 0,5 m/s associadas a frequência subinercial. Por outro lado, inversões da corrente para nordeste são observadas com velocidade média entre 0,3 e 0,4 m/s durante o inverno, período em que as inversões são mais frequentes devido o aumento da passagem de frente frias trazendo ventos de sudoeste (CASTRO e MIRANDA, 1998). Na porção externa da plataforma CASTRO e MOREIRA (1994) identificaram a partir de dados de correntógrafo em Santos que as correntes possuem um fluxo predominantemente para sudoeste com velocidades médias entre 0,4 e 0,5 m/s. STECH (1990) observou que principalmente no inverno o campo de vento superficial na Bacia Sul Brasileira é altamente influenciado pela passagem de sistemas frontais, os quais ocorrem com períodos entre 6 e 11 dias. Considerando que a tensão de vento é um dos principais mecanismos de forçantes de baixa frequência da circulação costeira, espera-se que os sistemas frontais tenham um papel significativo na determinação da variabilidade do fluxo nesta faixa de frequência.

A linha de costa e a topografia da Plataforma Sul Brasileira localizada entre o Cabo de Santa Marta e o Chuí (33,48°S) são relativamente suaves com a profundidade da quebra da plataforma localizada na isóbata de 180 m. Ao norte a plataforma é mais estreita, com 110 km de largura, e mais ampla ao sul com 170 km. A parte mais externa da plataforma é fortemente influenciada pelas duas principais correntes de contorno oeste, a Corrente do Brasil (CB) e a Corrente das Malvinas (CM). Do outono ao início do inverno MIRANDA (1971) observa que a configuração da termoclina e da picnoclina indica um fluxo para norte em camadas superficiais que penetra a Plataforma Sul Brasileira a partir do seu limite mais ao sul. Essas estruturas podem ser identificadas por núcleos com baixas temperaturas ($T < 16^\circ$) e salinidades ($S < 32$).

2.2 Forçantes de Vento na Costa Brasileira

Parte importante da hidrodinâmica na plataforma é uma resposta à interação dos ventos. Essa forçante, a qual varia em direção, persistência e magnitude, combina-se com outros fatores como a largura e a topografia da plataforma atribuindo assim características hidrodinâmicas diferenciadas ao longo da costa.

A climatologia da porção Equatorial e da porção Subtropical do Atlântico Sul foi descrita por SAMUELS e COX (1987) através da análise do campo médio da tensão de vento na região (Figura 2.2). Os autores observaram que durante o verão os ventos de leste-nordeste predominam entre 15°S e 35°S. Por outro lado, no inverno os ventos de leste-nordeste são confinados a uma região menor, nas latitudes compreendidas entre 20°S e 25°S. Ao sul de 25°S os ventos de oeste-sudoeste prevalecem e os ventos de sudeste são mais intensos.

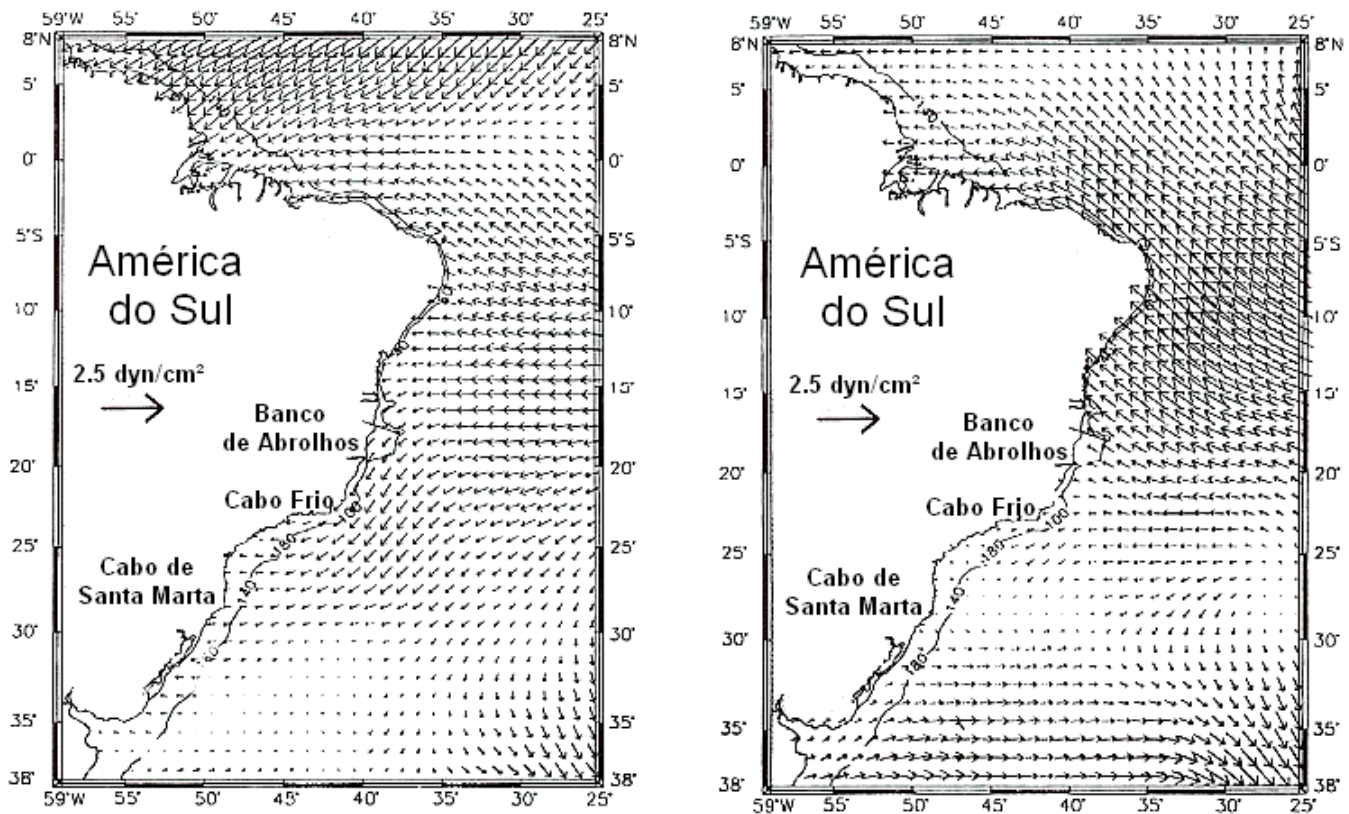


Figura 2.2: Campos médio de tensão de vento durante janeiro (esquerda) e julho (direita). Fonte: Adaptado de SAMUELS e COX (1987).

A caracterização da escala sinótica dos ventos mostra que na área de estudo há uma passagem contínua de ventos de oeste oriundos de jatos polares e frentes frias. Nas frequências subinerciais e especialmente durante o inverno, o campo de vento superficial é altamente influenciado pela passagem de sistemas frontais. Considerando que o vento é uma das principais forçantes em baixa frequência na circulação costeira, estes sistemas possuem um papel significativo na variabilidade do fluxo subinercial (STECH e LORENZZETTI, 1992).

OLIVEIRA (1986) mostra que a frequência de passagens das frentes tende a diminuir em direção ao Equador e aumentar durante o inverno. Entre 20°S e 25°S o mínimo de ocorrência de 3 vezes por mês ocorre em fevereiro e máximo de 5 vezes por mês em outubro, em média. A plataforma continental entre 20°S e 34°S é afetada

por ventos de diferentes direções devido a passagem de sistemas frontais. STECH e LORENZZETTI (1992) a partir de imagens de satélite, cartas meteorológicas sinóticas e dados de ventos costeiros fizeram um modelo conceitual da passagem de um sistema frontal na Bacia Sul Brasileira. Dentre as principais características destaca-se a velocidade de deslocamento de 500 km/dia das frentes com direção sudoeste-nordeste e o tempo médio de dois dias para cruzar a Bacia Sul Brasileira.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Modelagem Numérica – HYCOM

As ondas subinerciais ao longo da costa do Brasil foram analisadas a partir de duas simulações com distintas resoluções implementadas pelo grupo de pesquisa REMO (Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica) utilizando o modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) . O HYCOM é um modelo de circulação oceânica que utiliza equações primitivas, o qual é desenvolvido em diferenças finitas na horizontal e com coordenadas verticais híbridas, podendo utilizar coordenadas isopicnais, sigma ou z (BLECK, 2002).

Com o objetivo de analisar as OCCs na costa brasileira foi utilizada uma simulação compreendendo as latitudes entre 12°S e 34°S e longitudes entre 32°W e 55°W. Esse experimento foi aninhado a uma simulação para a região da METAREA-V com 1/12° de resolução, que por sua vez foi aninhada em uma simulação de média resolução (1/4°) para todo o Atlântico (PAIVA *et al.*, 2012). Além da alta resolução espacial (1/24°), esse experimento considera forçantes sinóticas e utiliza

uma base topográfica de alta resolução com informações batimétricas adicionais de cartas náuticas, fatores que favorecem uma representação realística do fenômeno estudado.

Para a identificação da área de geração das ondas subinerciais da região foi utilizada a simulação em $1/4^\circ$, cujo domínio é maior do que a simulação em $1/24^\circ$, englobando as latitudes entre 78°S e 50°N e as longitudes entre 98°W e 21°E , abrangendo portanto o oceano Atlântico Sul e Equatorial e parte do Atlântico Norte (Figura 3.1). Para ambos os experimentos foram analisados os resultados referentes aos anos compreendidos entre 2004 e 2006.

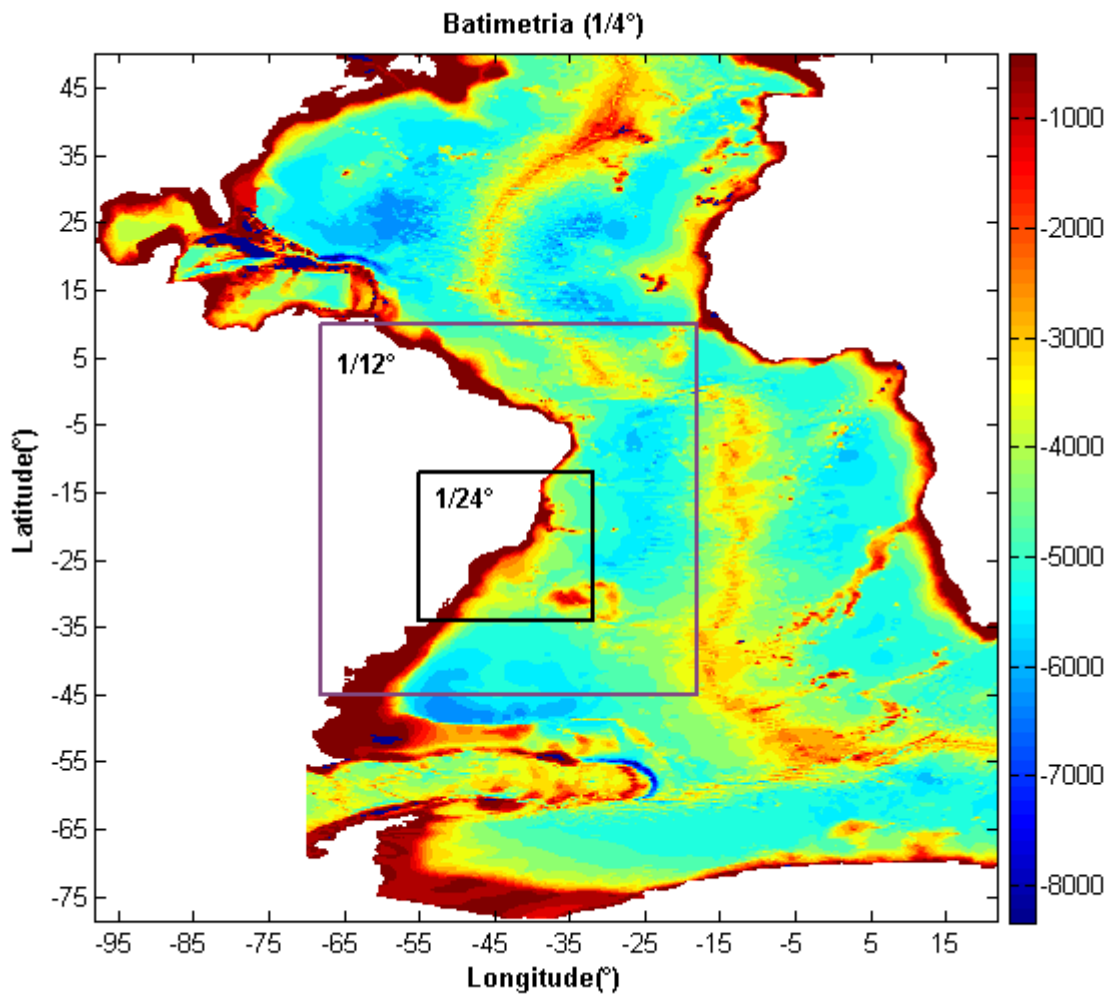


Figura 3.1: Batimetria (m) do experimento em $1/4^\circ$ e localização dos domínios em $1/12^\circ$ (retângulo roxo) e $1/24^\circ$ (retângulo preto) simulados no HYCOM.

Para o domínio com $1/24^\circ$ de resolução foram discretizadas 21 camadas na vertical de densidade σ_θ e a batimetria foi interpolada para o domínio de modelagem a partir da base Etopo 2, sendo esta posteriormente ajustada com informações batimétricas de folhas de bordo pertencentes à Marinha do Brasil. As forçantes na interface ar-mar foram calculadas a partir de campos atmosféricos sinóticos com resolução de 6h da reanálise 1 do NCEP (Kanamitzu et al., 2002). Nessa simulação a maré foi prescrita nos contornos levando em consideração as oito principais constantes harmônicas (M2, S2, N2, K2, O1, P1, K1, Q1), interpoladas a partir dos resultados do modelo TPXO4.2 <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>. Essa simulação foi inicializada em junho de 2003 e estende-se até 2010.

As variáveis da primeira camada e as variáveis bidimensionais de elevação do nível do mar e das componentes de velocidade barotrópica foram armazenadas com uma resolução horária pelo modelo. Porém os resultados das camadas restantes foram salvas com resoluções temporais inferiores, compreendendo períodos diários. Com o fim de refinar a análise vertical das ondas subinerciais foram previamente definidos fundeios virtuais no experimento de $1/24^\circ$, os quais foram salvos com maiores resoluções temporais e espaciais. Dessa forma a temperatura, a salinidade e as componentes de velocidade foram salvas com uma resolução de 40 min em intervalos de 5 m de profundidade nestes fundeios. Formando seções perpendiculares à costa, foram definidos quatro pontos (Tabela 3.1) nas regiões de Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Cabo Frio, Ilha Fiscal, Macaé e Piúma (Figura 3.2). Considerando que alguns arquivos foram corrompidos durante o armazenamento dos 'fundeios' (profundidades em azul na tabela 3.1), estes foram substituídos pelos resultados diários do modelo nas mesmas localizações.

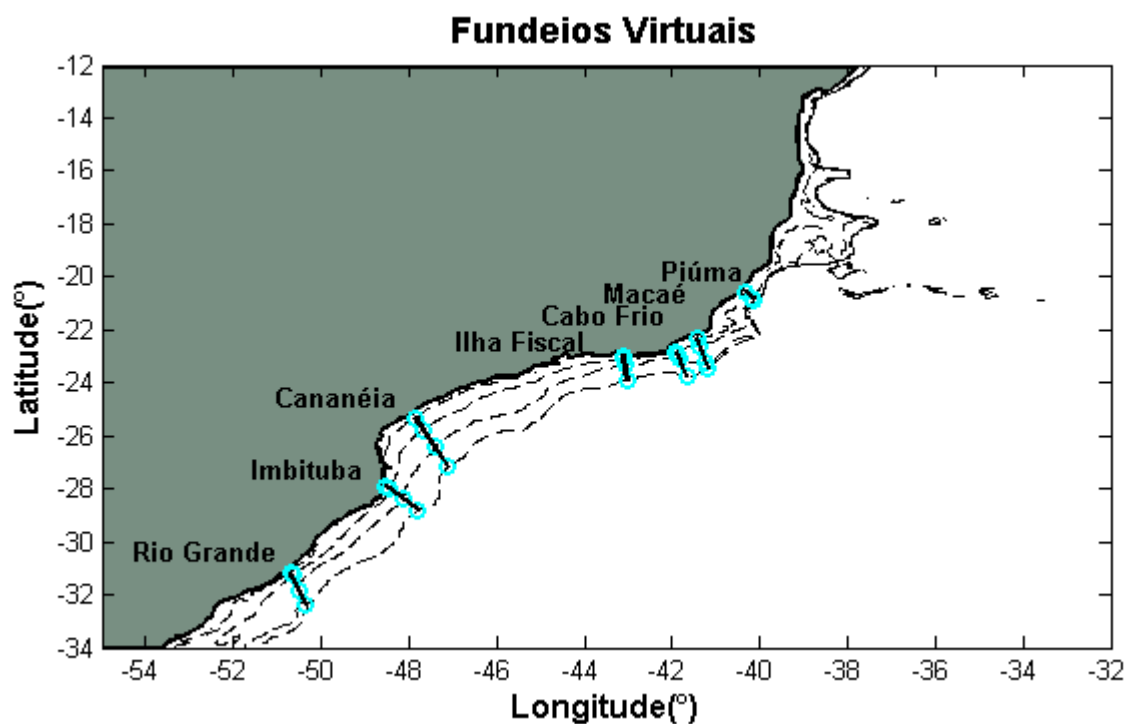


Figura 3.2: Localização dos fundeios virtuais P1, P2, P3 e P4 das seções de Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Ilha Fiscal, Cabo Frio, Macaé e Piúma.

Tabela 3.1: Profundidades dos pontos P1, P2, P3 e P4 dos fundeios virtuais

Seções	Pontos			
	P1	P2	P3	P4
Piúma	15 m	60 m	90 m	
Macaé	15 m	45 m	90 m	175 m
Cabo Frio	20 m	45 m	95 m	150 m
Ilha Fiscal	15 m	45 m	95 m	175 m
Cananéia	15 m	45 m	95 m	180 m
Imbituba	20 m	45 m	95 m	185 m
Rio Grande	15 m	45 m	95 m	160 m

Para a análise das ondas subinerciais no experimento em $1/24^\circ$ os resultados extraídos foram submetidos ao filtro passa-baixa *butter* com período de corte de 72h. Dessa forma foram eliminadas as frequências associadas à maré astronômica, obtendo-se a oscilação em baixa frequência, ou seja, a onda resultante das

componentes subinerciais.

A simulação em $1/4^\circ$ teve a batimetria interpolada a partir da base GEBCO “General Bathymetric Chart of the Oceans” (GEBCO, 2009) e semelhante ao experimento $1/24^\circ$ foi utilizada a forçante atmosférica com escala sinótica baseada nos campos atmosféricos de 6 em 6hs da reanálise 1 do NCEP. Esta simulação foi iniciada a partir do campo de janeiro de uma simulação com forçantes climatológicas integrada para 30 anos e compreende o período entre 2003 e 2010.

3.1.1 Comparação GLOSS X HYCOM

A representatividade do nível médio nos experimentos em $1/24^\circ$ e $1/4^\circ$ foi analisada a partir da comparação de dados com os resultados do modelo. Para esse fim foram selecionados 5 pontos com dados horários de elevação do nível do mar obtidos por marégrafos ao longo da costa brasileira, os quais estão disponíveis no site do programa GLOSS (Global Sea Level Observing System) . As estações analisadas incluíram Salvador, Macaé, Ilha Fiscal, Cananéia e Imbituba (Figura 3.3), pontos estes que apresentaram maior continuidade temporal nos dados e períodos mais longos de medição dentre as estações do GLOSS(Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Marégrafos - GLOSS.

Estação	Posição	Período de Medição	Responsável
Salvador	12°58'S / 38°31'W	2004 a 2007	IBGE / CHM
Macaé	22°14'S / 41°28'W	2001 a 2006	IBGE
Ilha Fiscal	22°56'S / 43°08'W	1963 a 2007	CHM
Cananéia	25°01'S / 47°56'W	1954 a 2006	USP
Imbituba	28°08'S / 48°24'W	2001 a 2006	IBGE

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística .

CHM: Centro de Hidrografia da Marinha .

USP: Universidade de São Paulo .

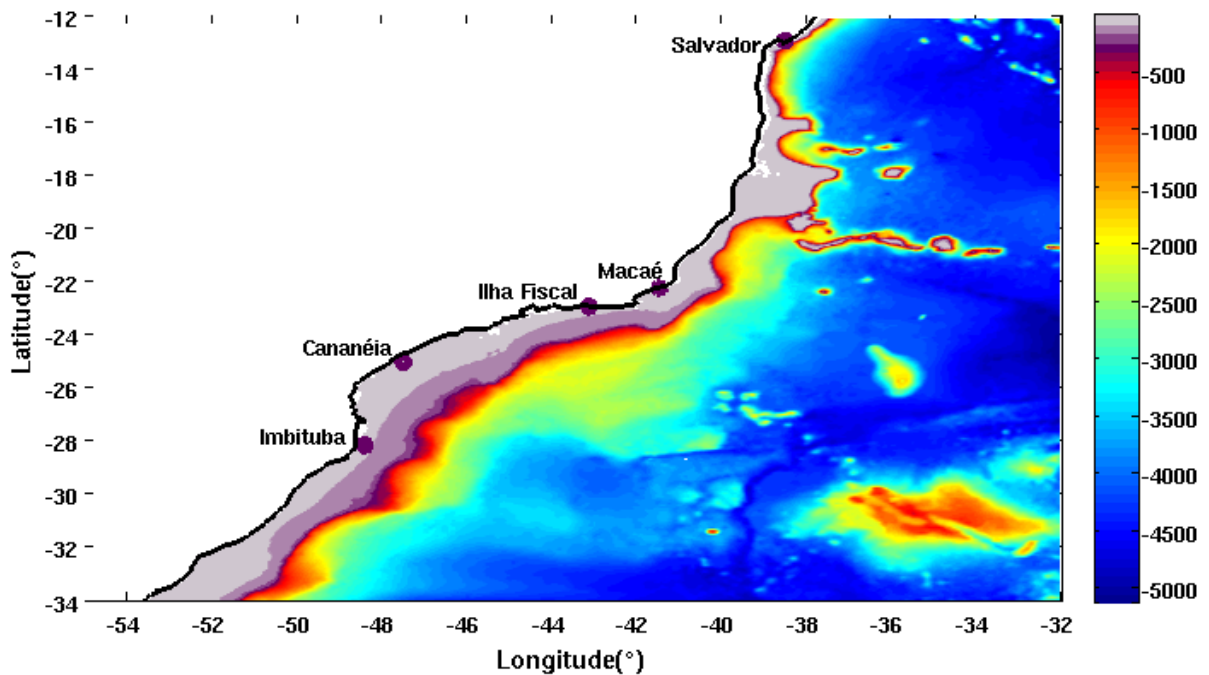


Figura 3.3: Batimetria (m) da área de estudo e localização das séries de elevação do nível do mar do GLOSS.

Os dados e as séries de elevação obtidas pelo experimento em $1/24^\circ$ foram filtrados pelo filtro *butter* passa-baixa e a figura 3.4 ilustra a grande semelhança entre as séries dos experimentos e dos dados referentes a Salvador, Macaé, Ilha Fiscal, Cananéia e Imbituba, incluindo a compatibilidade da faixa de amplitudes e das feições características de cada ponto principalmente entre os resultados do experimento em $1/24^\circ$ e o dos dados do GLOSS (Figura 3.4).

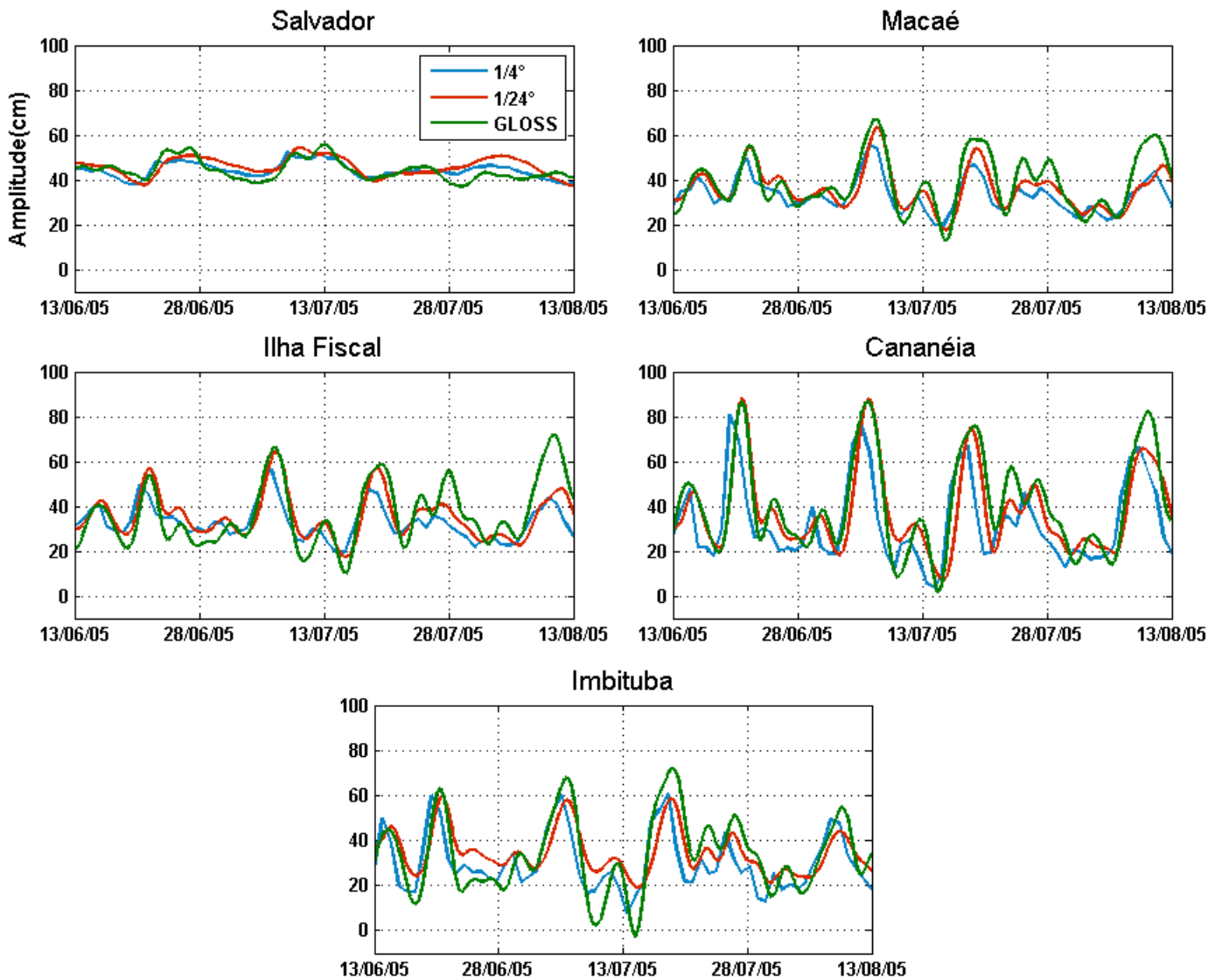


Figura 3.4: Comparação entre as séries do nível médio dos experimentos do HYCOM com $1/4^\circ$ e com $1/24^\circ$ de resolução e com os dados do GLOSS referentes a Salvador, Macaé, Ilha Fiscal, Cananéia e Imbituba.

3.2 Critério Clarke & Brink (1985)

O critério de Clarke & Brink (1985) é um modelo analítico que assume que as ondas longas possuem frequências inferiores à frequência inercial, com escalas longitudinais muito maiores que as escalas perpendiculares à costa e que são forçadas por ventos subinerciais. Esse critério permite identificar em que condições as OCCs forçadas pelo vento possuem um comportamento barotrópico sendo possível analisar as variações da barotropicidade das ondas em função da distância da costa, da variação da topografia de fundo e da estratificação. Sendo assim, o uso desse parâmetro permite analisar o comportamento das OCCs para diferentes pontos da plataforma ao longo da costa. O critério se reduz a

$$N^2 \alpha^2 f^{-2} \ll 1 \quad (3.1)$$

onde N^2 é o valor médio da frequência de Brunt-Vaissala na plataforma, α é a declividade média do fundo da plataforma e f é o parâmetro de Coriolis.

A frequência de Brunt-Vaissala, definida por:

$$N^2 = \frac{-g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3.2)$$

foi calculada utilizando séries de temperatura e salinidade extraídas do experimento de 1/24°. Já a declividade média da plataforma foi definida a partir da base topo-

gráfica utilizada na simulação em $1/24^\circ$ do HYCOM.

3.3 Funções Ortogonais Empíricas

As funções ortogonais empíricas ou EOF (Empirical Orthogonal Functions) constituem um método amplamente utilizado nas geociências introduzido por LORENZ (1956), o qual tem por objetivo particionar a variância de um grupo de séries temporais distribuídas espacialmente. Ao decompor a variabilidade espacial e temporal das séries dos dados em termos de funções ortogonais ou modos estatísticos, torna-se possível associar processos físicos a fenômenos em diferentes escalas espaciais e temporais contidos em cada modo. É importante salientar que não há necessariamente relação direta entre os modos estatísticos da EOF e os modos dinâmicos, visto que os modos dinâmicos possuem restrições físicas associadas as equações governantes e as condições de contorno (LEBLOND e MYSAK, 1978). O método é empírico porque a decomposição é feita a partir dos dados sem assumir previamente comportamentos espaciais e temporais, o que também torna o procedimento da EOF uma entre diversas técnicas inversas (EMERY e THOMSON, 1998; KAIHATU *et al.*, 1997; KUNDU e ALLEN, 1976)).

As análises de EOF são amplamente encontradas em ambos domínios, no tempo e na frequência (EMERY e THOMSON, 1998). No presente trabalho, as análises são feitas no domínio do tempo. Os autovetores podem ser ordenados em termos de porcentagem da variância total, e os autovalores definem os modos estatísticos (KAIHATU *et al.*, 1997).

A decomposição dos campos de velocidade em modos dinâmicos e em “funções ortogonais empíricas”, foi desenvolvida por KUNDU *et al.* (1975). Nesse traba-

lho os autores consideram v_k os valores de uma variável escalar em função do tempo, no caso dados referentes à componente meridional da velocidade $t_k (k = 1, 2, \dots, K)$ e da profundidade $z_i (i = 1, 2, \dots, N)$

A matriz de coeficientes de correlação é definida como:

$$R(z_i, z_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K v_k(z_i) v_k(z_j) \quad (3.3)$$

Os autovetores $\phi_n(z_j)$ de uma matriz real e simétrica são definidos através da equação:

$$\sum_{i=1}^N R(z_i, z_j) \phi_n(z_i) = \lambda_n \phi_n(z_j), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3.4)$$

os quais são chamados autofunções ortogonais empíricas e obedecem a condição de ortogonalidade:

$$\sum_{i=1}^N \phi_n(z_i) \phi_m(z_i) = \lambda_{nm} \quad (3.5)$$

Os autovalores (λ_n) são a variância de vários modos, cuja soma resultam na energia total. As séries temporais de ϕ_n podem ser expandidas nos termos:

$$v_k(z_i) = \sum_{n=1}^N E_{kn} \phi_n(z_i) \quad (3.6)$$

onde a expansão de coeficiente é dado por:

$$E_{kn} = \sum_{i=1}^N v_k(z_i) \phi_n(z_i) \quad (3.7)$$

representando as amplitudes modais (E_{kn}), as quais são correlacionadas com o tempo.

Esse método foi aplicado às séries da componente v de velocidade, componente dominante no fluxo das OCCs, em seções definidas em Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Cabo Frio, Ilha Fiscal, Macaé e Piúma contendo pontos mais próximos e mais afastados da costa. Com o fim de redefinir o sistema de coordenadas em relação a linha de costa, a componente meridional de velocidade foi rotacionada de forma que esta ficasse orientada paralela à costa. A nova componente ($vrot$) foi obtida a partir da relação:

$$vrot = -u \sin(\theta) + v \cos(\theta) \quad (3.8)$$

onde θ representa o ângulo de rotação entre os sistemas de coordenadas.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Períodos Típicos das Ondas Subinerciais na Costa Brasileira

A análise espectral foi aplicada às séries de elevação do GLOSS nos pontos de Imbituba, Cananéia, Ilha Fiscal, Macaé e Salvador e nas séries extraídas da simulação em $1/24^\circ$ para os mesmos pontos, as quais foram filtradas eliminando períodos inferiores a 3 dias. Em conjunto foi realizado o espectro cruzado entre as séries do dado e do modelo com o fim de obter o coeficiente de coerência com confiança estatística superior a 99% entre as duas séries de cada ponto analisado.(Figura 4.1)¹.

¹Considerando que as séries de elevação de Salvador não apresentaram energia significativa referente a banda subinercial, essa estação não foi incluída na figura

Em geral observou-se a presença de 3 faixas temporais onde ocorrem os maiores valores espectrais associados as séries de elevação com frequência inercial do GLOSS e do HYCOM :

1. 20 a 25 dias
2. 12 a 16 dias
3. 5 a 11 dias

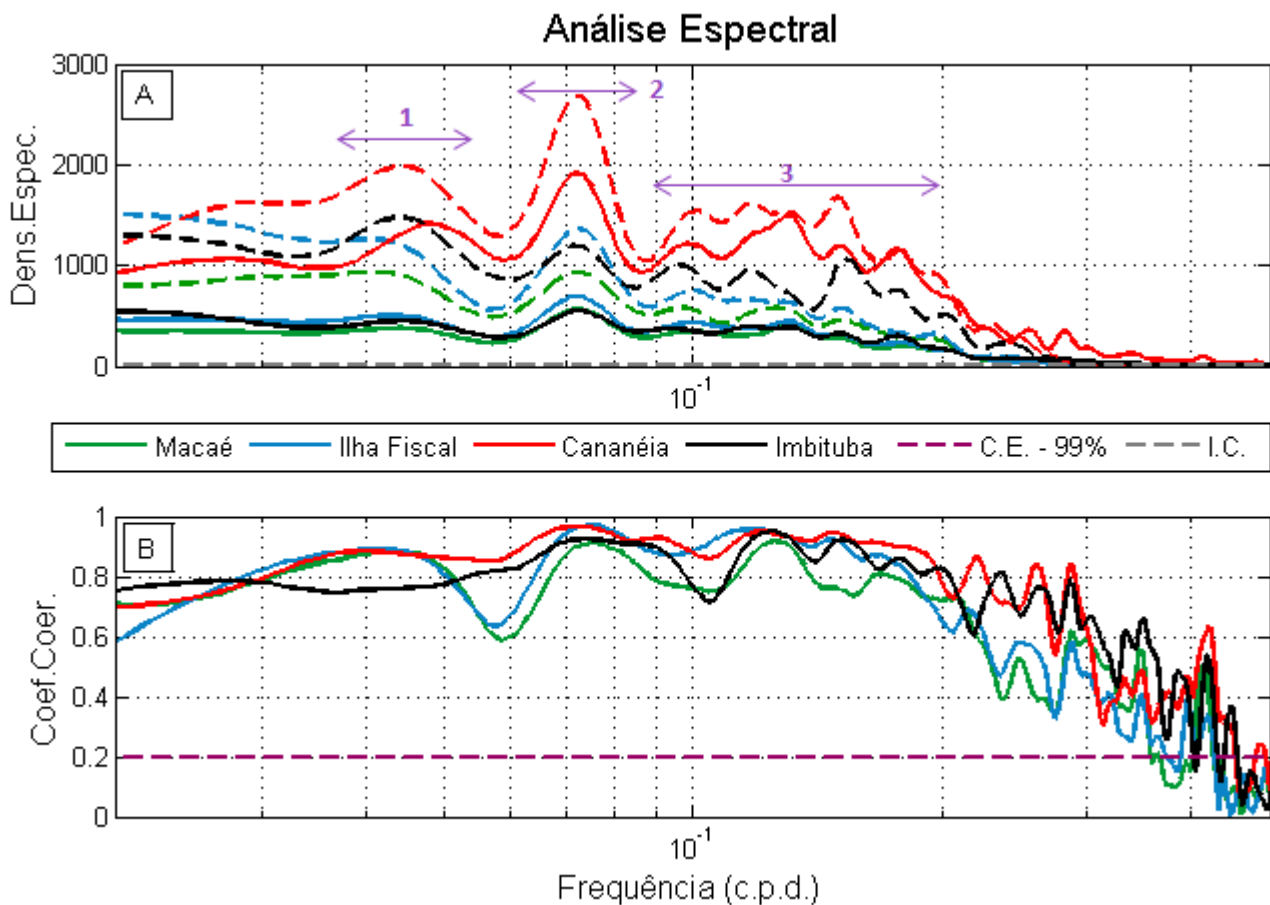


Figura 4.1: A: Densidade espectral do nível médio (cm^2/s^2) do GLOSS (linha tracejada) e do HYCOM (linha cheia) para os pontos analisados, exceto Salvador. A linha tracejada cinza indica o intervalo de confiança. B: Coeficiente de coerência obtido por espectro cruzado entre as séries do dado e do modelo referente aos quatro pontos analisados. Os valores acima da linha tracejada indicam uma confiança estatística superior a 99 %

Observa-se a partir da análise espectral que todas as feições de máximos de densidade espectral estão acima do intervalo de confiança e o espectro cruzado indica que há grande coerência entre as séries de elevação dos dados e do modelo para cada ponto analisado. Os valores de coeficiente de coerência em geral são superiores a 0,8 para a maioria das feições de significativas densidades espectrais.

A faixa associada às menores frequências, com períodos entre 20 e 25 dias, é identificada nas séries filtradas de elevação do GLOSS e do HYCOM somente em Cananéia dentre os pontos analisados. Imbituba e Ilha Fiscal apresentam densidade espectral associada a essa faixa, entretanto identificada somente nos dados. Em Ilha Fiscal, por outro lado, não é observada energia significativa associada a essa faixa de períodos. O pico energético de menor frequência assemelha-se ao encontrado por RAHY (2006) em dados de corrente de Ubatuba, de Cabo Frio e do Rio de Janeiro durante o inverno de 2003, com períodos entre 18 e 23 dias, o qual apresentou-se mais energético nas porções da plataforma continental externa. Tal fator indica que a energia associada às menores frequências possivelmente está relacionada a processos oceânicos offshore, como a dinâmica da Corrente do Brasil.

O pico de máxima densidade espectral foi observado em todos os pontos analisados com períodos entre 12 e 16 dias. CASTRO e LEE (1995) observaram a maior densidade espectral em Cabo Frio, Rio de Janeiro, Ubatuba e Cananéia nos dados de elevação, de pressão atmosférica e de forçantes de vento durante o inverno de 1978 com períodos entre 9 e 12 dias seguida da faixa entre 6 e 7 dias. No presente trabalho os períodos de 6 e 7 dias fazem parte da faixa que engloba vários picos espectrais entre 5 e 11 dias. A diferença entre os períodos obtidos e os períodos observados por CASTRO e LEE (1995) pode estar associada a fatores

como as distintas localizações dos pontos analisados, incluindo a sua distância da costa e o período de análise.

4.2 Variação da Velocidade de Propagação das OCCs ao Longo da Costa Brasileira

A propagação das ondas associadas às OCCs ao longo da costa foi analisada a partir da evolução temporal do nível médio em função da latitude. Os gráficos de evolução temporal, conhecidos como Hovmollers, foram gerados a partir de séries de elevação do nível do mar em diversos pontos à costa na isobatimétrica de 20 m. Com o fim de delimitar a análise das ondas subinerciais ao processo das OCCs, as séries foram submetidas ao filtro butter passa-banda. Dessa forma foram analisadas somente as ondas com períodos compreendidos entre 3 e 20 dias, eliminando sinais com frequência subinercial associado à dinâmica da CB e às variações intrasazonais.

A análise dos Hovmollers permitiu identificar a presença de ondas propagando-se com maiores amplitudes ao sul do domínio decrescendo ao propagar-se para nordeste como é ilustrado na Figura 4.2 compreendendo o período entre 19/01/05 e 19/02/2005 e que é observado ao longo de todo o período analisado (Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5).

Destaca-se o abrupto declínio das amplitudes das ondas subinerciais em latitudes próximas a 23°S e posteriormente em 18°S, regiões associadas a Cabo Frio e a Abrolhos respectivamente. As máximas amplitudes ², com valores em torno de 40 cm ao sul de 23°S decaem para 10 a 20 cm ao ultrapassar Cabo Frio e em

²As amplitudes são referenciadas nesse trabalho como as diferenças verticais entre os valores médios e os valores máximos das oscilações

geral não chegam a 10 cm após Abrolhos. Particularmente em Cabo Frio ocorre uma variação significativa na velocidade de propagação das ondas, a qual é identificada no Hovmoller pela inclinação das feições lineares representando as cristas e os cavados das ondas subinerciais. De forma geral foram identificados dois trechos lineares, um compreendido entre 34°S e 25°S (Trecho 1) e o outro entre 22°S e 18°S (Trecho 2), embora sejam observados eventos em que as ondas ultrapassam latitudes acima de 18°S.

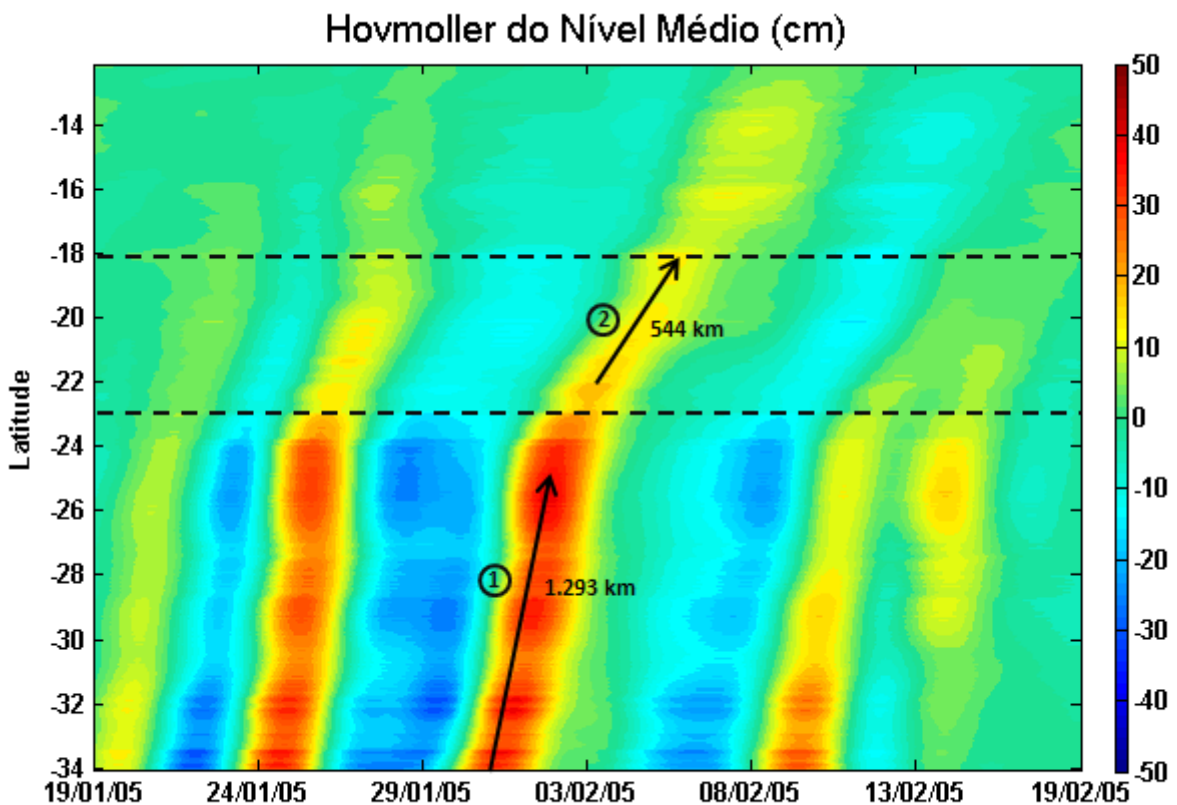


Figura 4.2: Hovmoller do nível médio (cm), com período entre 3 e 20 dias, ao longo da costa no domínio $1/24^\circ$. As linhas tracejadas em 23°S e 18°S indicam a localização dos pontos onde ocorrem variações na velocidade de propagação das OCCs e as setas os trechos 1 e 2.

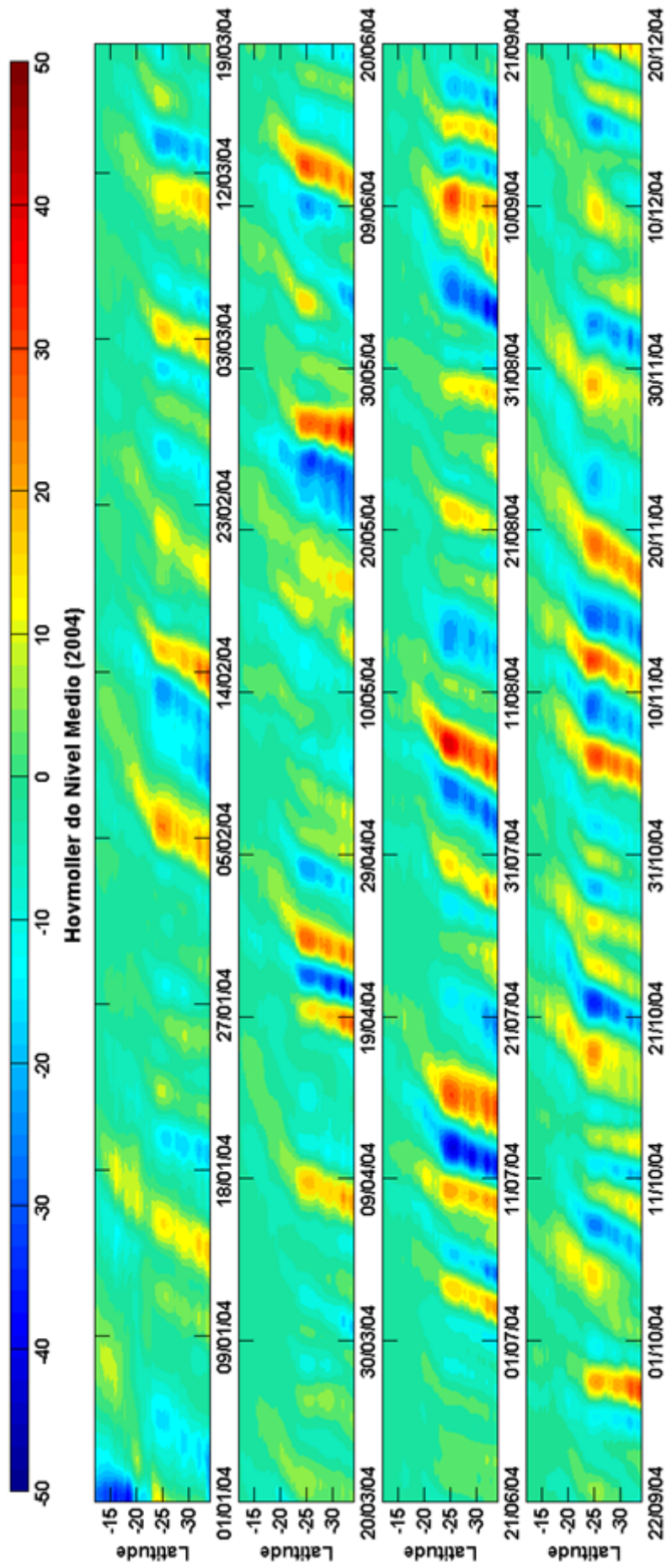


Figura 4.3: Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio 1/24^o compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2004 respectivamente com período entre 3 e 20 dias,.

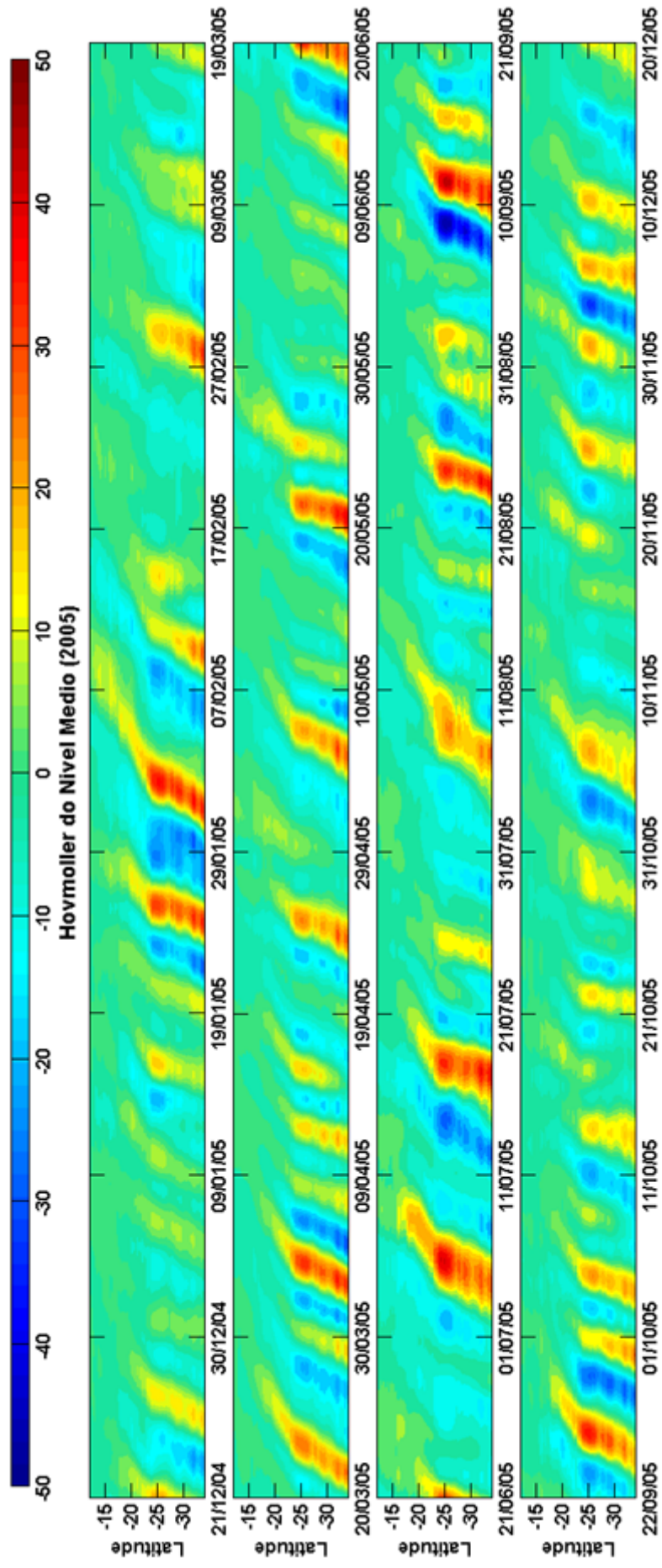


Figura 4.4: Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio $1/24^\circ$ compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2005 respectivamente com período entre 3 e 20 dias.

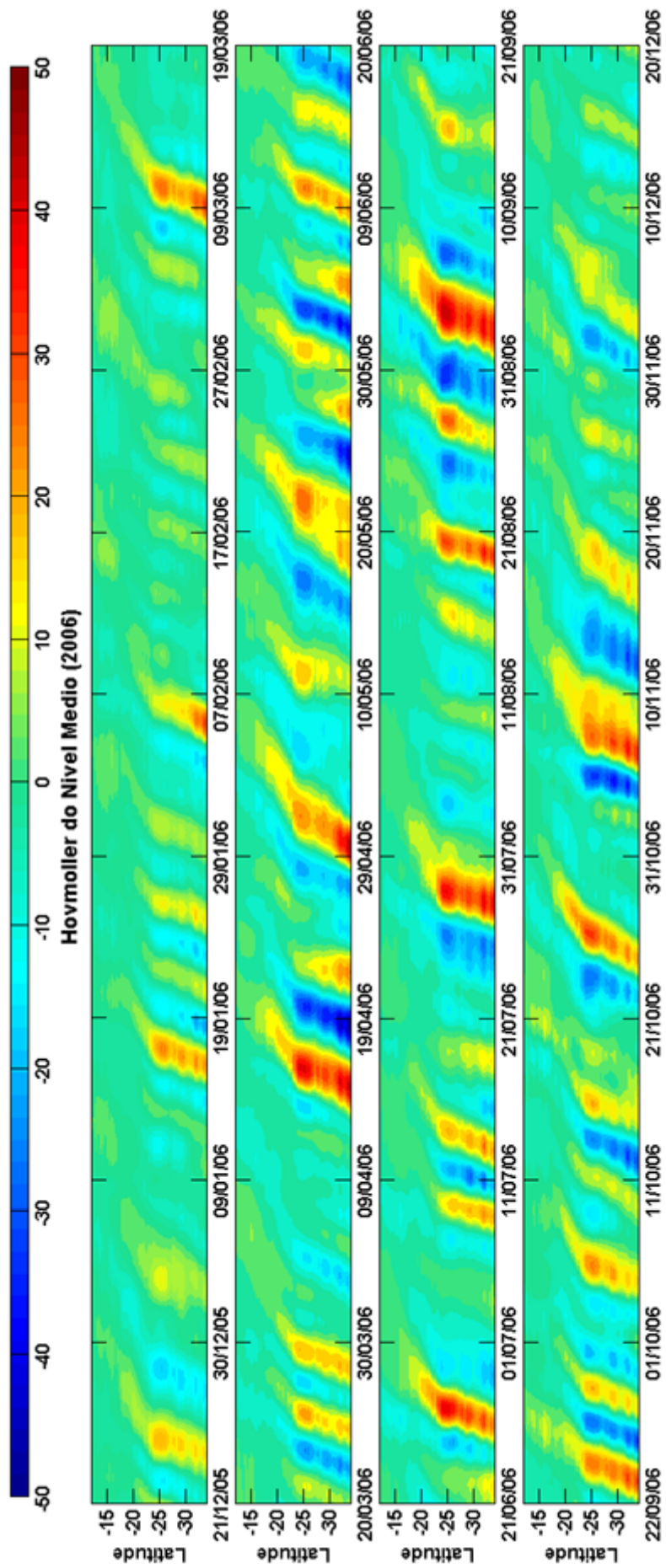


Figura 4.5: Hovmöller do nível médio (cm) ao longo da isobatimétrica de 20 m da costa brasileira no domínio 1/24^o compreendendo os períodos de verão, outono, inverno e primavera de 2006 respectivamente com período entre 3 e 20 dias.

A velocidade de propagação das OCCs foi calculada utilizando-se duas formas distintas. Na primeira foi identificado o tempo médio de propagação a partir da correlação ('lag correlation') entre as séries dos pontos extremos (Figura 4.6) dos trechos identificados na Figura 4.2.

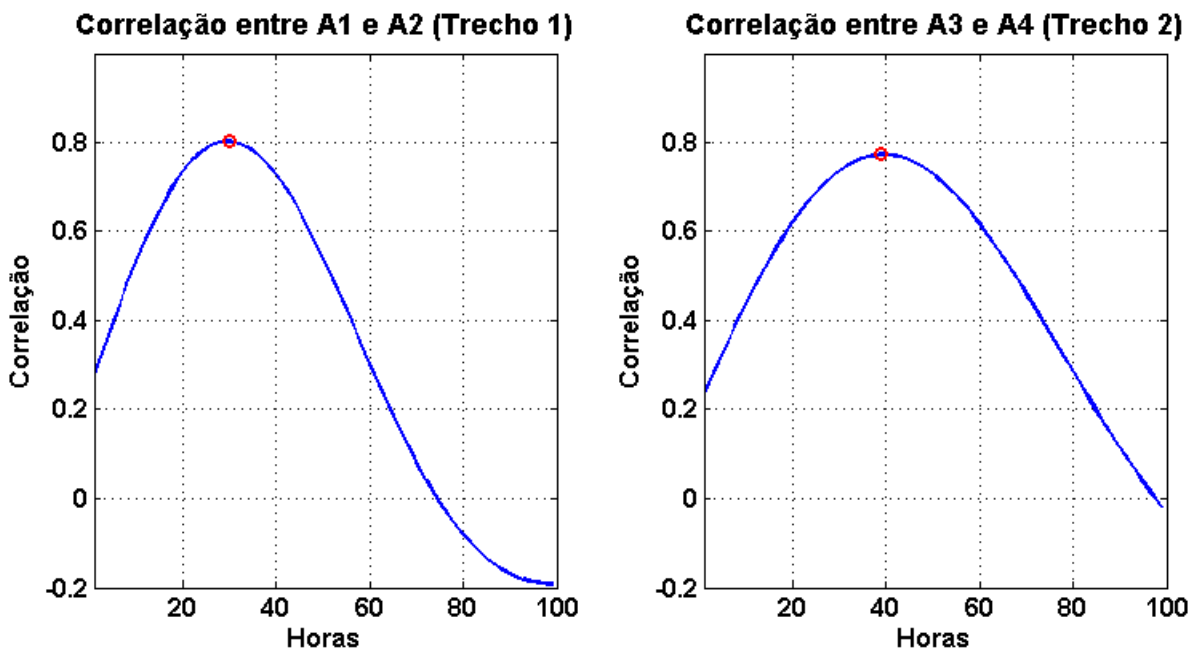


Figura 4.6: Correlação entre pontos A1(34°S) e A2(25°S) e entre os pontos A3(22°S) e A4(18°S), pontos extremos do Trecho 1 e do Trecho 2 respectivamente. Ponto vermelho indica correlação máxima dos trechos.

Na segunda forma foi identificado no Hovmoller o tempo de propagação de cada crista para as duas extensões selecionadas ao longo dos anos compreendidos entre 2004 e 2006. A partir da localização de cada ponto utilizado na confecção do Hovmoller foram obtidas as distâncias de cada inclinação respeitando a sinuosidade da linha de costa. As velocidades médias das ondas foram definidas considerando os dois métodos e foram por fim comparadas (Tabela 4.1 e Tabela 4.2).

Tabela 4.1: Velocidade de propagação do Trecho 1.

	Trecho 1 (1.293 km)		
	Tempo Médio (h)	Velocidade Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
Hovmoller		15,0	6,5
Correlação	30	11,9	

Tabela 4.2: Velocidade de propagação do Trecho 2.

	Trecho 2 (544 km)		
	Tempo Médio (h)	Velocidade Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
Hovmoller		4,1	1,7
Correlação	39	3,8	

Observam-se as maiores velocidades de propagação associadas à seção mais ao sul do domínio, onde também são identificadas no desvio padrão as maiores variações. Por outro lado, o trecho situado acima dos 22°S apresenta um declínio acentuado da velocidade de propagação, cujos valores são inferiores a metade das velocidades calculadas no trecho 1. Destaca-se ainda que a diferença entre as velocidades de propagação do trecho 1 e do trecho 2 são superiores aos desvios padrões calculados. Tal fator indica que o abrupto decaimento das velocidades de propagação após a região de Cabo Frio é representativo ainda que ocorram possíveis erros associados ao cálculo desse parâmetro.

O espectro do nível médio aplicado a pontos ao longo do domínio na isobatimétrica de 20 m e com períodos entre 3 e 20 dias ³ (Figura 4.7) permite identificar valores máximos de energia associada às OCCs concentrados ao sul do domínio e estendendo-se até 23°S, região correspondente a Cabo Frio. Em latitudes acima de 23°S os valores de densidade espectral são mínimos, principalmente ao norte de 18°S.

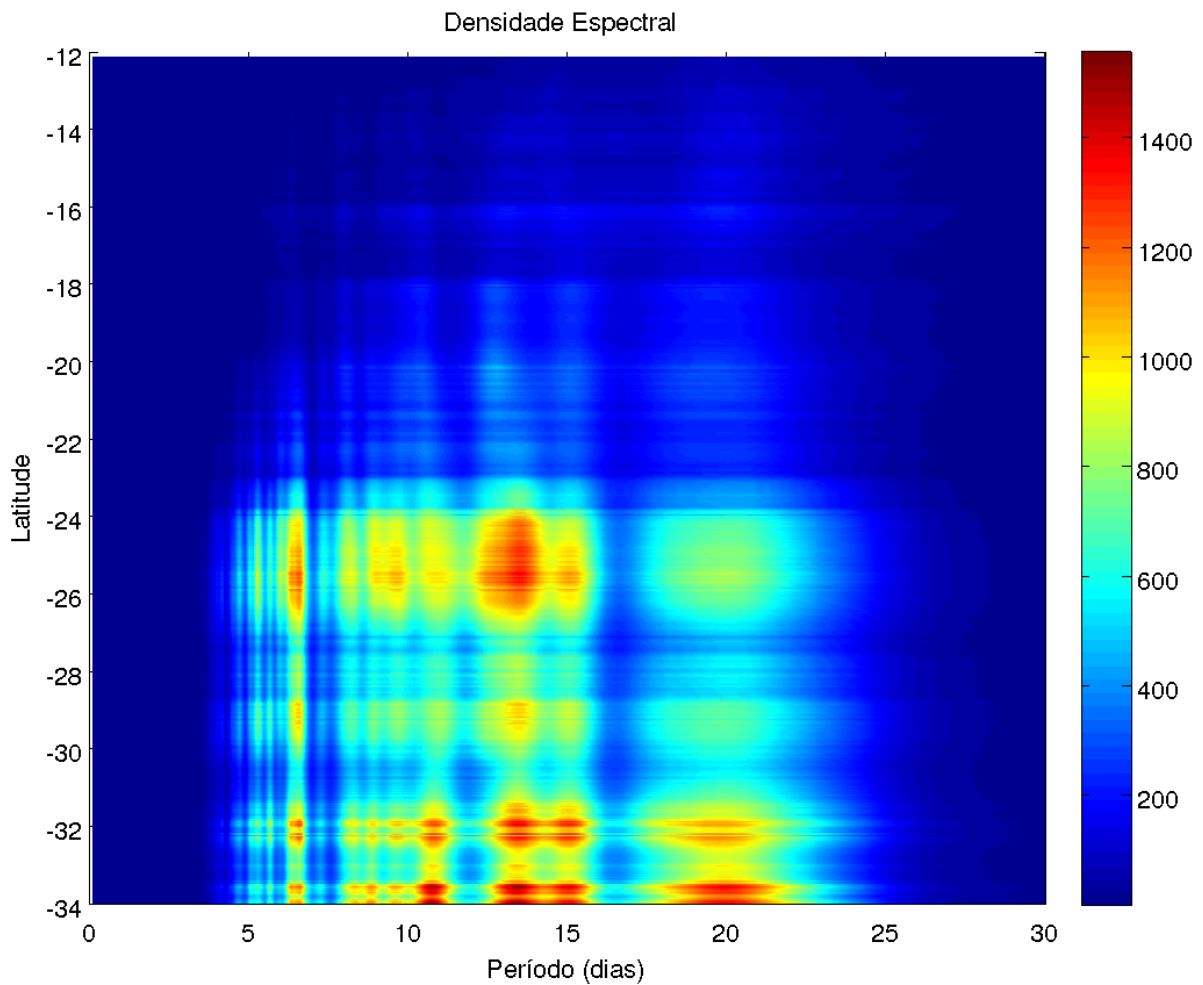


Figura 4.7: Densidade espectral (cm^2/s^2) das séries de elevação ao longo da isobatimétrica de 20 m no domínio $1/24^\circ$ compreendendo períodos entre 3 e 20 dias.

³Os períodos de corte definidos no filtro passa-banda utilizado são 3 e 20 dias, entretanto no processo de filtragem esses valores em geral não são exatos podendo incluir ou cortar parte das séries com períodos próximos aos limites definidos.

Embora não seja identificada nas análises a causa do acentuado declínio da velocidade de propagação das OCCs em Cabo Frio observa-se que o período de propagação das ondas não apresenta variação significativa ao norte da região citada (Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5). Sendo assim, o comprimento das ondas subinerciais é a possível propriedade das ondas a sofrerem variação na região de Cabo Frio.

4.3 Velocidades de Corrente Associadas às Ondas Subinerciais

Os campos de corrente das OCCs foram analisados em conjunto com o nível médio para pontos mais próximos e mais afastados da costa. Para esse fim foram selecionados pontos ao longo de todo o domínio em $1/24^\circ$ nas isobatimétricas de 20 m, 50 m, 100 m e 200 m. Nesses pontos foram extraídas séries de elevação e da componente de velocidade barotrópica paralela à costa com resolução horária, as quais foram filtradas por banda de frequência compreendendo períodos entre 3 e 20 dias e foram gerados Hovmollers.

A figura 4.8 ilustra a variabilidade do nível médio e da componente de velocidade em função da distância da costa. Observa-se que na isobatimétrica de 20 m as amplitudes de elevação são mais significativas, podendo atingir valores em torno de 30 cm. Por outro lado, ao se afastar da costa é observado um declínio acentuado das amplitudes onde os valores máximos na isobatimétrica de 50 m é próximo a 4 cm e tende a zero nos pontos localizados na isobatimétrica de 200 m, indicando que as ondas são significativamente confinadas na porção interna e média da plataforma. As oscilações da componente de velocidade analisada acompanham o nível médio com as velocidades positivas associadas à crista e as velocidades negativas ao cavado, fator que caracteriza as OCCs como ondas progressivas. No campo de velocidade observam-se que as velocidades ao se afastarem da costa também tendem a diminuir, principalmente em latitudes abaixo de 24°S , com os pontos na isobatimétrica de 20 m com velocidades máximas em torno de 0,6 m/s enquanto que em 200 m aproximam-se de 0,2 m/s.

A variação da velocidade de propagação na região próxima aos 23°S é identificada tanto no Hovmoller de elevação como no Hovmoller de velocidade em todas as profundidades analisadas.

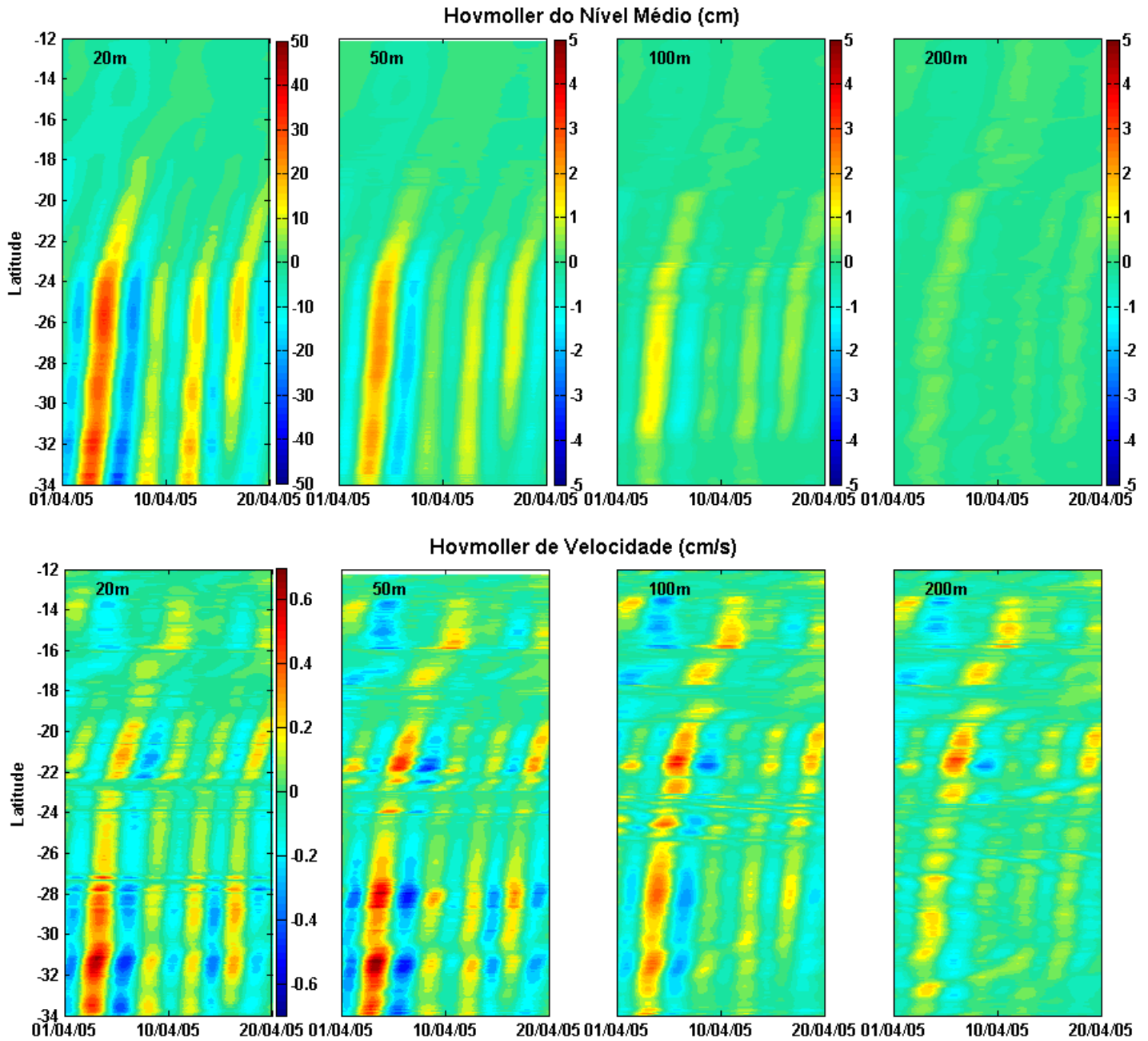


Figura 4.8: Hovmoller do nível médio (cm) e da componente de velocidade (m/s) paralela à costa com períodos entre 3 e 20 dias nas isobatimétricas de 20 m, 50 m, 100 m e 200 m.

4.4 Condições Barotrópicas e Baroclínicas das OCCs

A caracterização das OCCs em função do seu comportamento barotrópico e baroclínico foi realizada a partir de duas metodologias, o critério de Clark & Brink (1985) e a EOF (funções ortogonais empíricas). O Critério de Clark & Brink (1985) foi aplicado às séries de temperatura e de salinidade dos 'fundeios' com a maré filtrada para cada ponto das seções predefinidas e as séries com frequência subinercial das componentes paralelas à costa de velocidade para os mesmos pontos foram submetidas à EOF.

O critério de Clarke & Brink (1985) tem como parâmetros a declividade média da plataforma (α), o parâmetro de Coriolis (f) e a frequência média de Brunt-Vaisala ($\overline{N^2}$). Tendo por objetivo avaliar a variabilidade temporal do índice de barotropicidade foram aplicados ao critério os valores médios na vertical de N^2 ; entretanto foi mantida a variação temporal ao longo do período analisado.

Considerando que o critério empregado estabele como parâmetro que os valores inferiores a 1 inferem um caráter barotrópico à série, observamos que na seção de Rio Grande a barotropicidade é predominante, a qual apresenta índices não ultrapassando a 0,2 (Figura 4.10).

Embora a variação sazonal nessa região não seja acentuada, observa-se uma elevação do índice nos períodos de verão nos quatro pontos analisados.

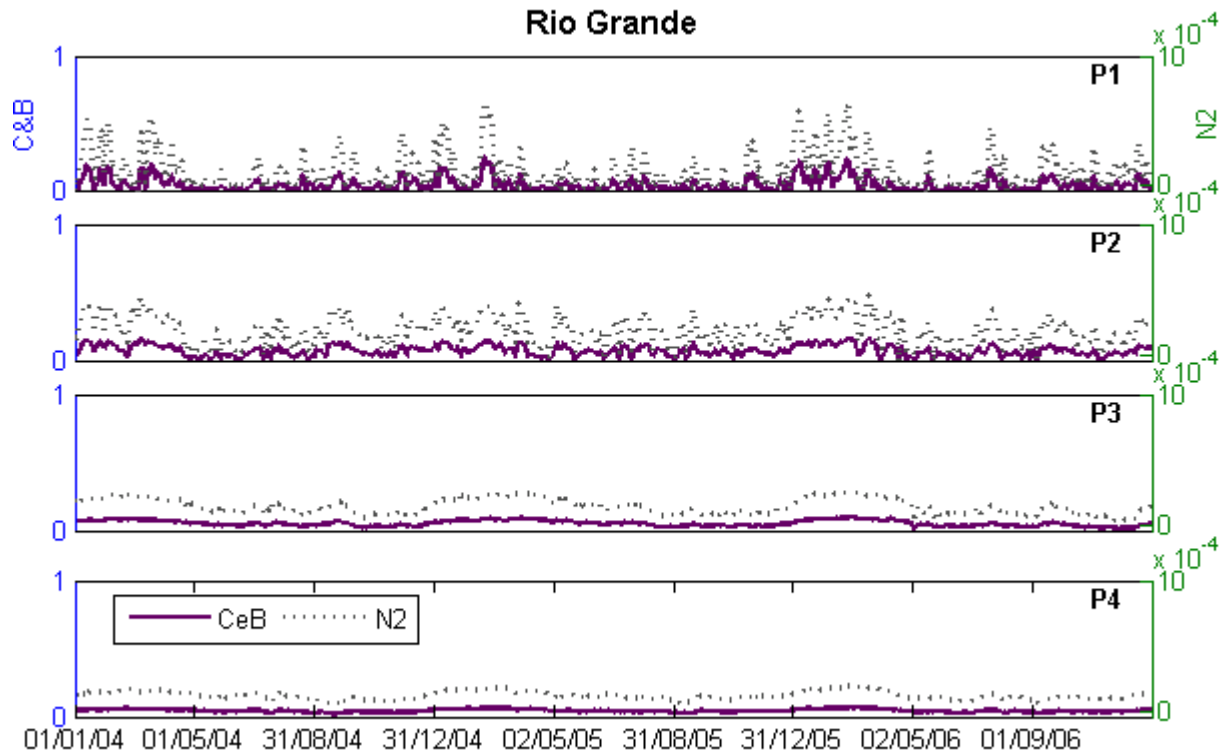


Figura 4.9: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Rio Grande.

Em Imbituba a variação sazonal é mais evidente em relação a seção anterior, com a elevação do índice associado ao critério de Clarke & Brink durante o verão dos quatro pontos e dos três anos analisados. Tal fator indica que nos períodos de verão há uma intensificação do comportamento baroclínico nessa região, ainda que apresente um comportamento predominantemente barotrópico.

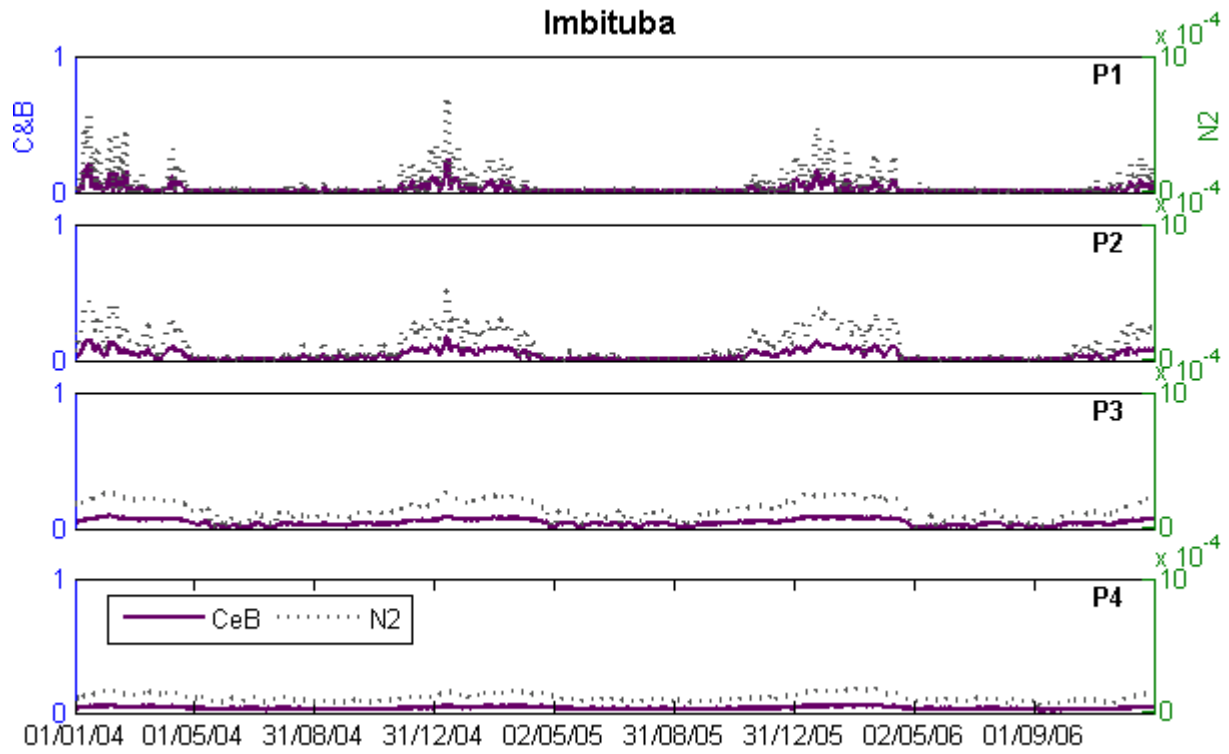


Figura 4.10: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Imbituba.

Na seção de Cananéia a barotropicidade é predominante, a qual apresenta índices com valores quase nulos (Figura 4.11). Os maiores valores ocorrem pontualmente durante o verão dos três anos analisados, onde aproximam-se de 0,4 em P1 e ao se afastar da costa esses valores pontuais diminuem. Observa-se que o aumento do critério ocorre progressivamente a partir de novembro, com os picos ocorrendo em janeiro e o seu declínio para valores próximos de zero ocorrendo nos meses de abril e maio, relação também observada na frequência de Brunt-Vaisala.

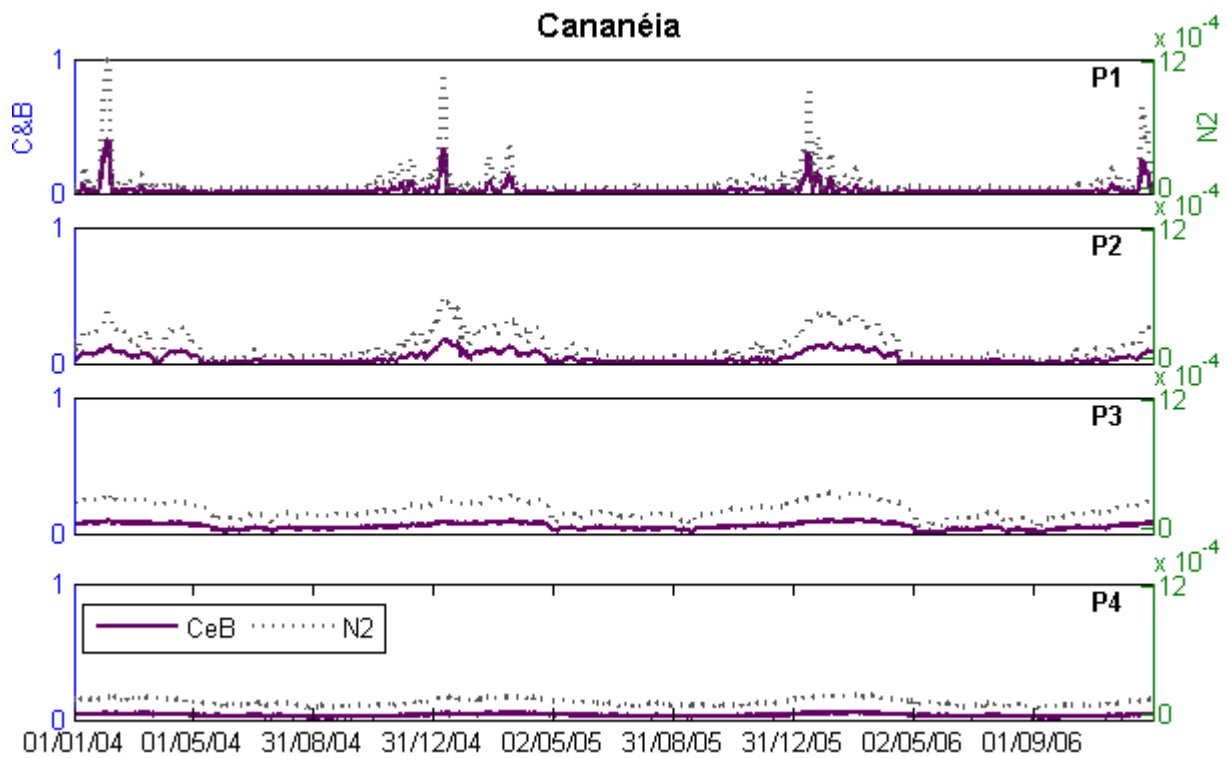


Figura 4.11: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Cananéia.

Na seção de Ilha Fiscal os índices apresentaram pouca variação ao se afastar da costa e semelhante a Cananéia observam-se valores aproximando-se de zero, o que indica um comportamento essencialmente barotrópico, com exceção dos períodos de verão em que ocorre um aumento do índice (Figura 4.12).

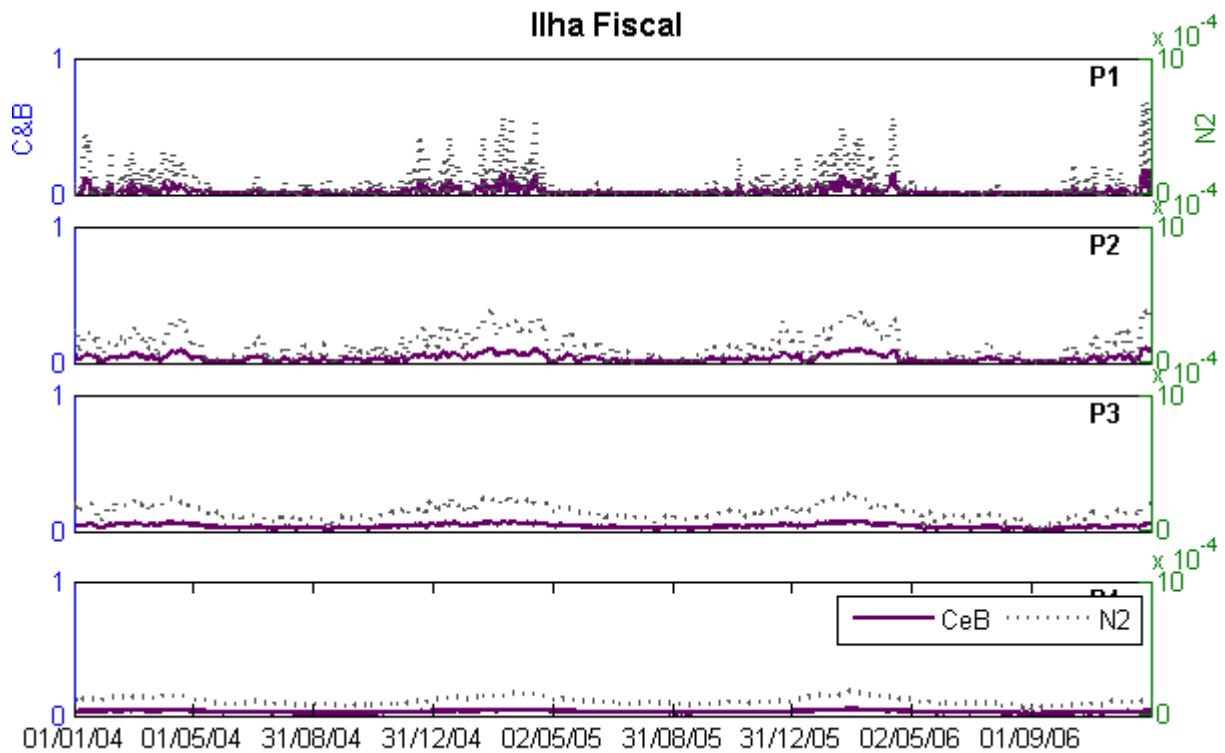


Figura 4.12: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Ilha Fiscal.

Em Cabo Frio, ponto analisado com maior declividade da plataforma (Tabela 4.3 ⁴), os valores de N^2 e dos índices foram maiores do que os observados nas seções anteriores.

⁴RG: Rio Grande, Imb: Imbituba, Can: Cananéia, CF: Cabo Frio, IF: Ilha Fiscal, MC: Macaé e Pm: Piúma

Tabela 4.3: Declividade Média da Plataforma

	Seções dos Fundeios Virtuais						
	RG	Imb	Can	CF	IF	MC	Pm
$\alpha(10^{-3})$	1,4	1,3	1,1	2,2	1,6	1,7	1,0

Embora o critério tenda a zero no ponto P1, são observados valores aproximando-se de 0,7, de 0,4 e de 0,3 no ponto P2, P3 e P4 respectivamente durante o verão dos 3 anos analisados (Figura 4.13). Observa-se portanto a intensificação da componente baroclínica nessa região em relação às seções mais ao sul. A progressão dos valores ocorre entre setembro e outubro, por outro lado ocorre um declínio acentuado do critério em maio dos anos analisados especialmente no ponto P2.

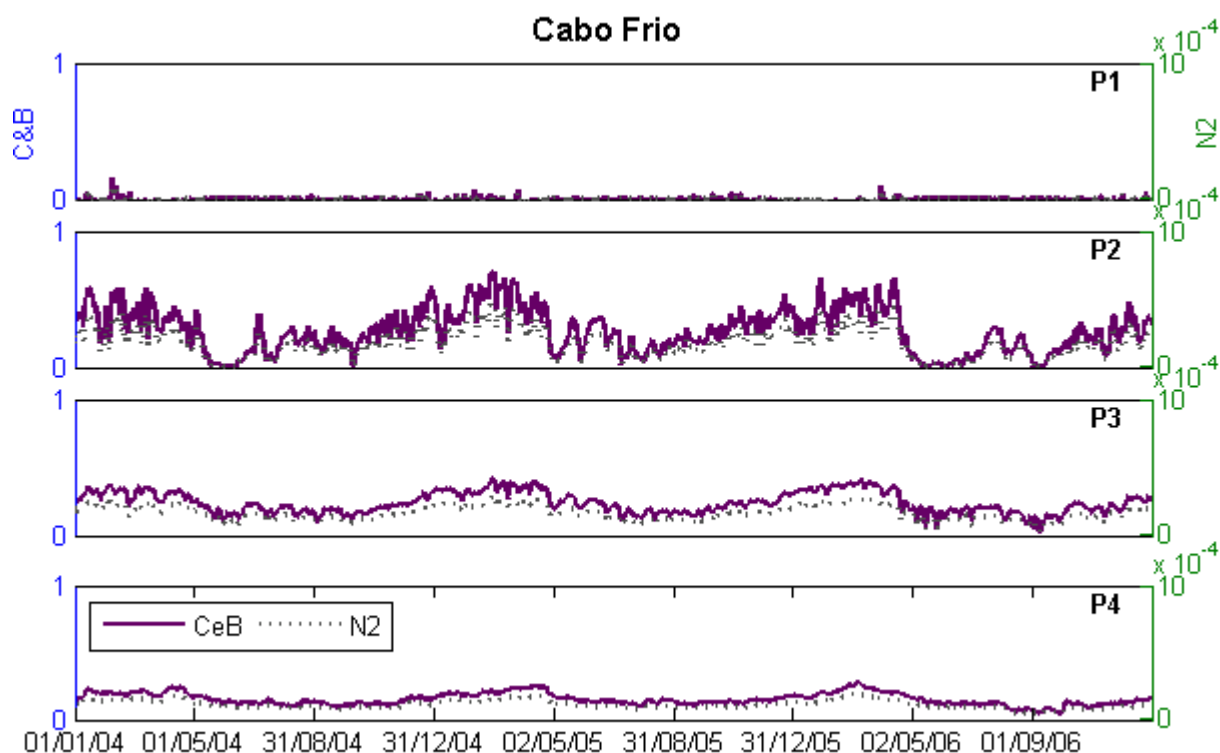


Figura 4.13: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Cabo Frio.

Os pontos P1 e P2 de Macaé apresentaram valores máximos em torno de 0,8 e 0,5 respectivamente durante o verão (Figura 4.14). Os índices tenderam a aumentar no final da primavera e a diminuir bruscamente em meados de outono, aproximando-se de zero. Ao contrário de Cabo Frio, em que a estratificação é significativa somente a partir do ponto P2, em Macaé já é observado valores acentuados em N^2 e nos índices. Nos pontos P3 e P4 os valores não ultrapassaram a 0,3 e a variabilidade associada ao período de verão é muito pequena durante os 3 anos analisados. As maiores médias verticais das frequência de Brunt-Vaisala são observadas nessa seção, com P1 e P2 respondendo aos pontos de maiores estratificações dentre toda a análise (Tabela 4.4).

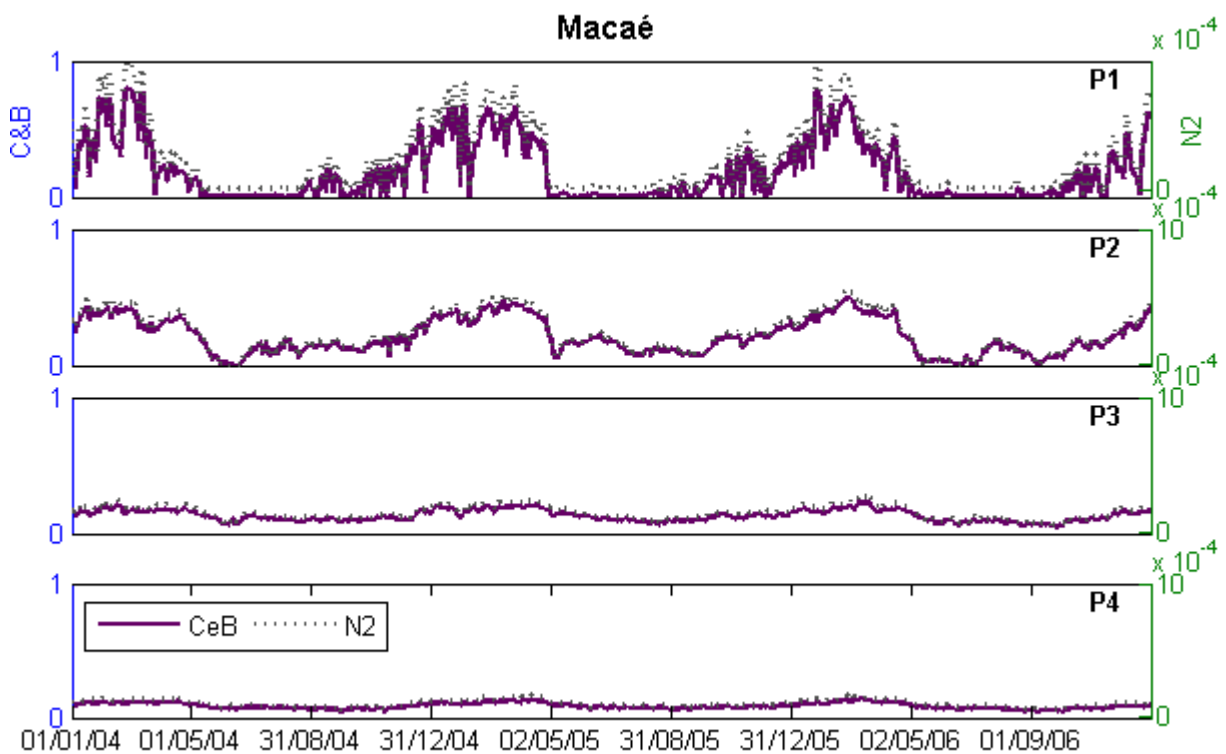


Figura 4.14: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2, P3 e P4 na seção de Macaé.

Os maiores valores do critério de Clarke e Brink e de N^2 observados nas

seções de Cabo Frio e Macaé indicam que essas regiões apresentam uma maior estratificação, principalmente no verão. A partir de seções de temperatura média compreendendo os pontos P1, P2, P3 e P4 das duas seções durante o verão e o inverno de 2005 é possível identificar as maiores temperaturas em superfície no verão, assim como um avanço de águas mais frias em regiões mais costeiras, principalmente em Macaé (Figura 4.15 e Figura 4.16).

Em Cabo Frio, a isoterma de 18°C, limite superior da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), ocupa profundidades próximas a 50 m a partir dos 15 km da seção durante o verão, por outro lado no inverno essas águas sofrem um recuo, sendo identificadas a partir de profundidades superiores a 70 m a partir de 20 km. O avanço da ACAS caracteriza o fenômeno típico dessa região, a ressurgência, a qual ocorre no verão com o avanço das águas mais profundas e mais frias para regiões mais rasas (CAMPOS *et al.*, 2000; VALENTIN *et al.*, 1987). As águas mais quentes em superfície e o fenômeno de ressurgência gera um gradiente térmico favorecendo a maior estratificação nessa região durante essa época do ano. Nas seções de temperatura, a região correspondente ao ponto P1 de Cabo Frio não apresenta estratificação significativa durante o verão e o inverno, fator refletido nos valores mínimos e a não ocorrência de sazonalidade nos índices para esse ponto. Por outro lado, a partir do ponto P2 são observadas maiores estratificações principalmente no verão.

Em Macaé a estratificação térmica ainda é mais evidente da observada em Cabo Frio, fator refletido nos valores máximos do critério calculados para essa seção. Observa-se ainda o avanço de águas mais frias durante o verão em que a isoterma de 19° é identificada nos primeiros 50 m dos primeiros 10 km da seção. Por outro lado no inverno a mesma é observada próximo aos 40 km da seção. Tal fator sugere que

o fenômeno da ressurgência observado em Cabo Frio estende-se a regiões vizinhas como é o caso de Macaé. Na porção das seções de temperatura correspondente ao ponto P1 de Macaé já é observada uma estratificação significativa, assim como a presença de sazonalidade com o verão apresentando gradientes térmicos superiores aos observados no inverno. Um comportamento semelhante é observado nos pontos P2, P3 e P4 com as maiores estratificações ocorrendo durante o verão.

Tabela 4.4: Frequência Média de Brunt-Vaisala das Seções

	Seções dos Fundeios Virtuais						
$\overline{N^2}(10^{-4})$	RG	Imb	Can	CF	IF	MC	Pm
P1	1,05	0,51	0,55	0,04	0,65	1,98	0,001
P2	1,89	0,98	1,20	1,76	1,19	2,35	0,76
P3	1,46	1,32	1,79	1,60	1,36	1,54	1,17
P4	1,26	1,07	1,18	1,08	1,06	1,05	

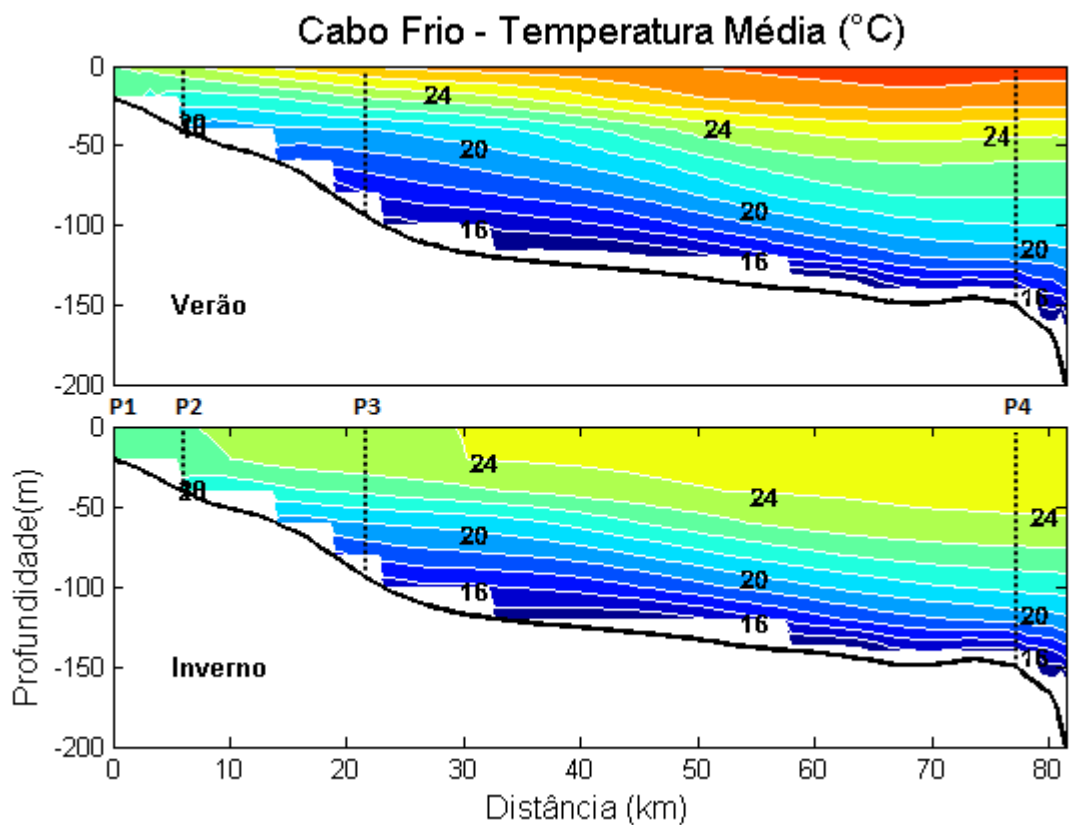


Figura 4.15: Seção de temperatura média de Cabo Frio durante o verão e o inverno de 2005.

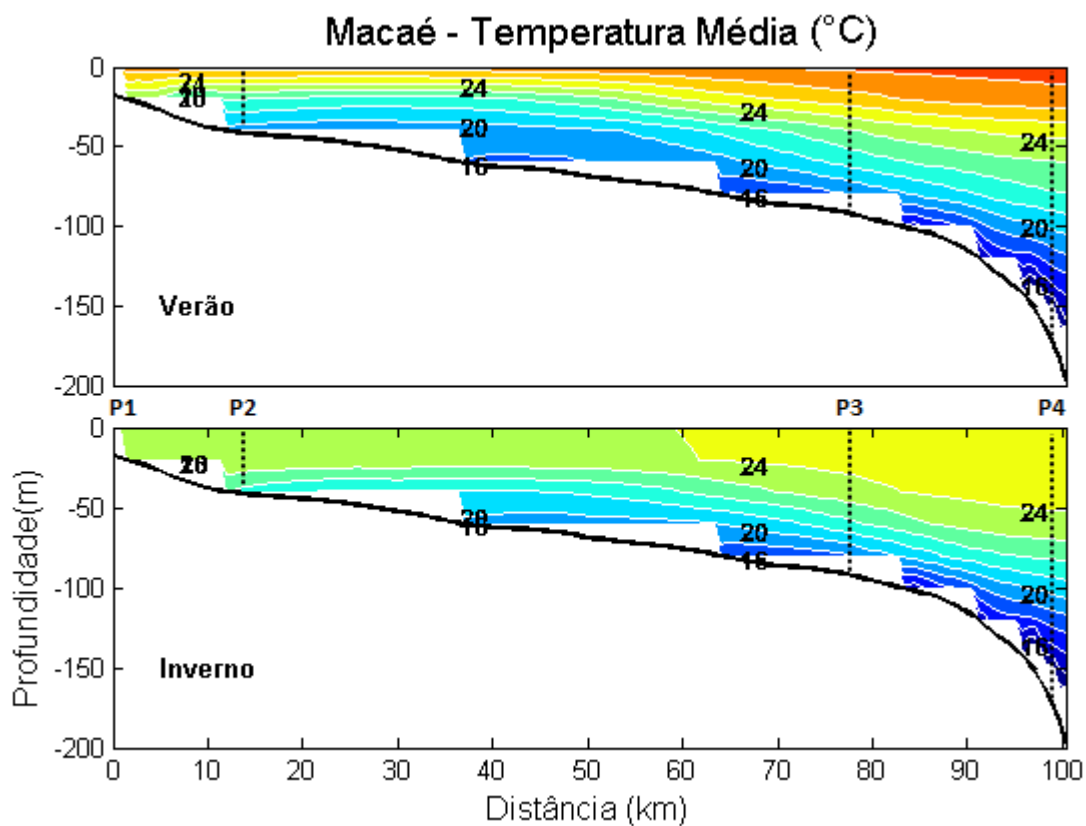


Figura 4.16: Seção de temperatura média de Macaé durante o verão e o inverno de 2005.

Na seção de Piúma (Figura 4.17), região com menor declividade dentre os pontos analisados e em geral com as menores estratificações, os índices são muito pequenos, com os valores máximos aproximando-se de 0,2 sendo observados em P2. Ao contrário das seções de Cabo Frio e Macaé, a seção de Piúma é essencialmente barotrópica.

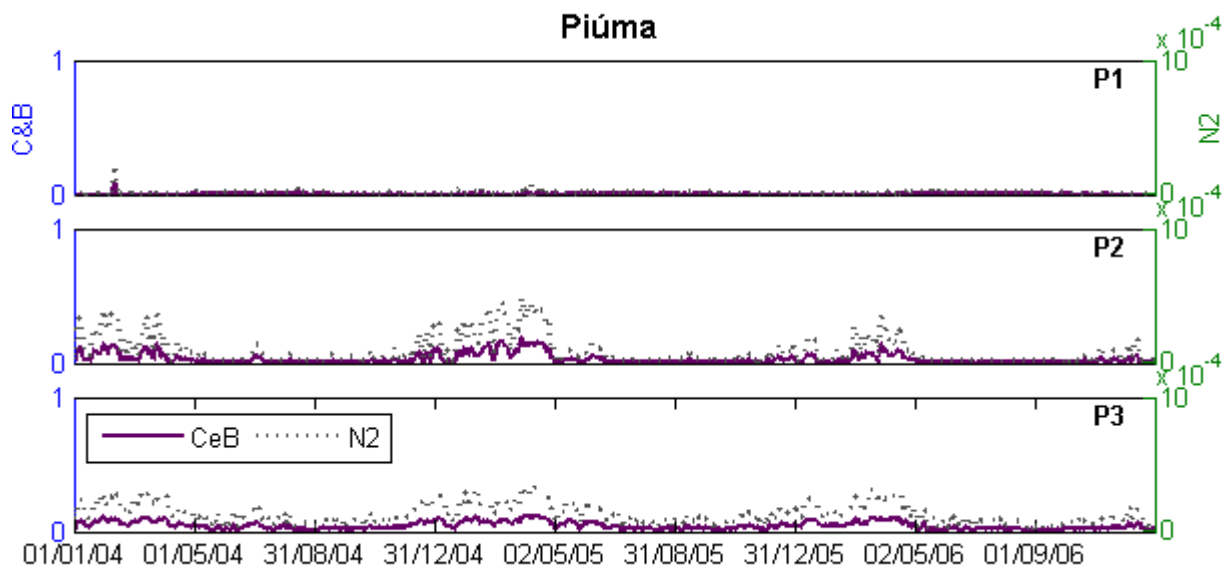


Figura 4.17: Critério de Clarke & Brink(1985) aplicado aos pontos P1, P2 e P3 na seção de Piúma.

O critério de Clarke & Brink (1985) aplicado às séries de temperatura e de salinidade das seções de Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Ilha Fiscal, Cabo Frio, Macaé e Piúma nos permite portanto identificar a predominância do comportamento barotrópico nas seções, em que a maioria dos índices são muito menores que 1. Entretanto, em todas as seções analisadas observa-se a elevação desses índices no período de verão dos três anos analisados. Destacam-se as seções de Cabo Frio e Macaé em que foram observados valores intermediários, em torno de 0,5 e valores próximos a 1 como ocorre no ponto P2 de Cabo Frio e no ponto P1 de Macaé, indicando a intensificação do sinal baroclínico nessas seções.

É importante destacar que os índices foram obtidos a partir do valor médio vertical de N^2 . Sendo esse parâmetro função do gradiente vertical de densidade, as maiores médias de N^2 tendem a ser observadas em regiões em que os gradientes de densidade estão associados a pequenas profundidades. Isso implica na elevação do índice utilizado, inferindo o aumento do sinal baroclínico principalmente nas porções da plataforma continental interna, o que não significa que na plataforma média e externa não ocorram estratificações significativas. As médias mais elevadas de N^2 em regiões mais rasas são ilustradas na seção de Cabo Frio. O Hovmoller de N^2 em função da profundidade ilustra que o ponto P2 de Cabo Frio apresenta valores máximos próximo a superfície, nos primeiros 20 m, estendendo-se à toda a coluna d'água (45 m) principalmente durante o verão (Figura 4.18). No ponto P3 (Figura 4.19), o qual abrange uma profundidade mais extensa (95 m), a média vertical de N^2 é minimizada em relação ao ponto P2 por incluir pontos mais profundos em que os valores são mínimos. Considerando que o ponto P2 representa as profundidades de maior estratificação e sendo N^2 o parâmetro mais influente do Critério de Clarke & Brink(1985), os valores do critério empregado são máximos nesse ponto. Entretanto, ambos pontos apresentam uma estratificação significativa, influenciando no aumento do índice nessa região em relação às seções analisadas ao sul de Cabo Frio.

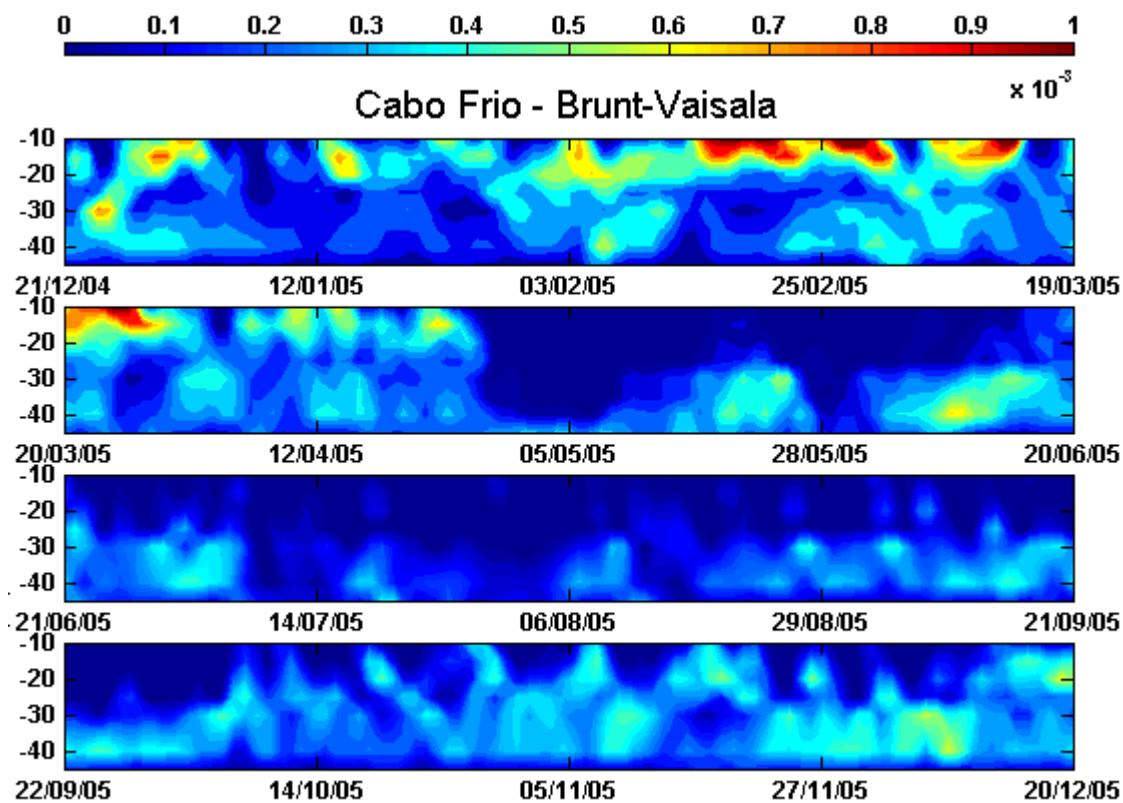


Figura 4.18: Hovmoller de N^2 aplicado ao ponto P2 de Cabo Frio durante o ano de 2005.

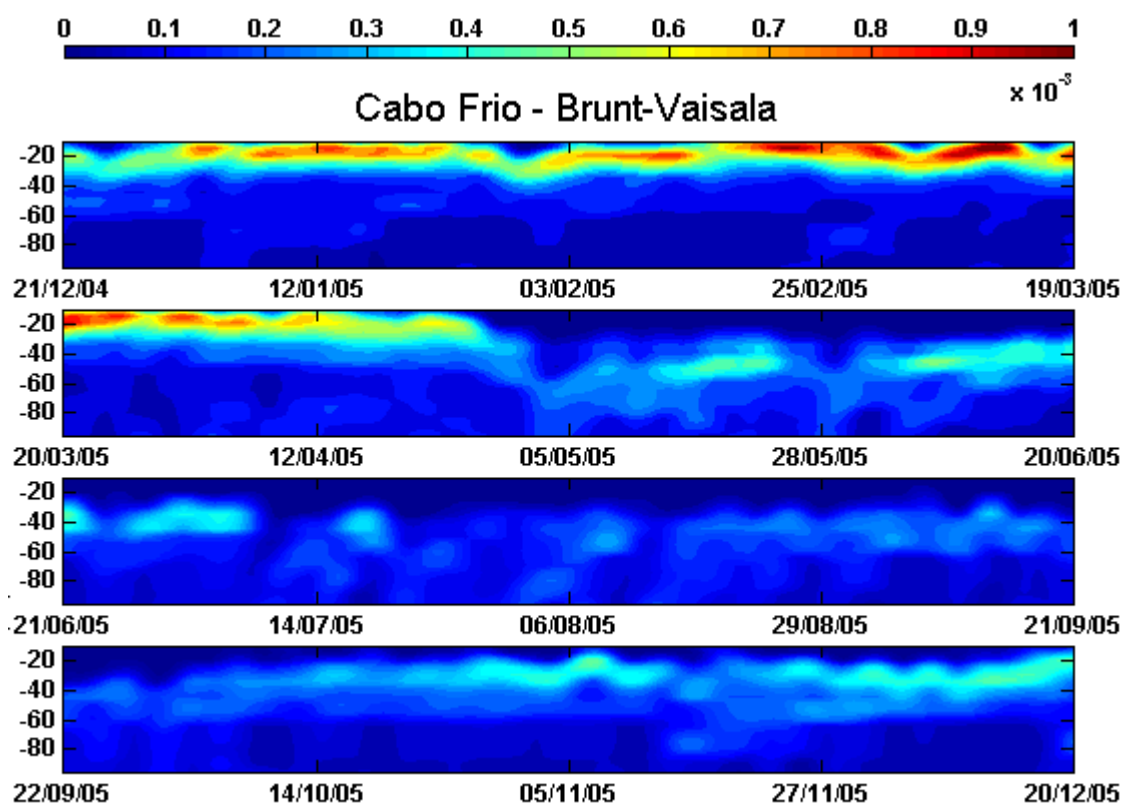


Figura 4.19: Hovmoller de N^2 aplicado ao ponto P3 de Cabo Frio durante o ano de 2005.

Além da aplicação do Critério de Clark & Brink (1985) às séries de temperatura e de salinidade das seções predefinidas, foi aplicada a EOF às séries das componentes de velocidade paralelas à costa com frequência subinercial dos fundeios virtuais. Essa metodologia foi utilizada com o fim de analisar o comportamento barotrópico e baroclínico das ondas confinadas costeiras a partir do campo de velocidade e relacioná-la ao comportamento obtido a partir do campo de massa.

Os perfis dos modos estatísticos das seções analisadas foram obtidos a partir da aplicação da EOF aos anos compreendidos entre 2004 e 2006. Em geral identificou-se nos pontos das seções o 1º modo representando um perfil com pouca variação vertical ao longo da profundidade (Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25 e Figura 4.26). Por outro lado, no 2º modo ocorrem inversões de sinal em profundidades intermediárias da coluna d'água. Tais características definem o caráter barotrópico do 1º modo e o caráter baroclínico do 2º modo.

As variâncias associadas ao 1º e ao 2º modo das séries entre 2004 e 2006 para todas as seções analisadas indicam a predominância do modo barotrópico (Figura 4.27). A maioria dos pontos apresentam valores a partir de 90% da variância associada ao 1º modo, exceto o ponto P2 de Cabo Frio e o ponto P1 de Macaé, os quais apresentam valores próximos a 10% da variância associada ao 2º modo e o ponto P4 de Rio Grande em que esse valor ultrapassa 20%.

Modos Estatísticos - Rio Grande

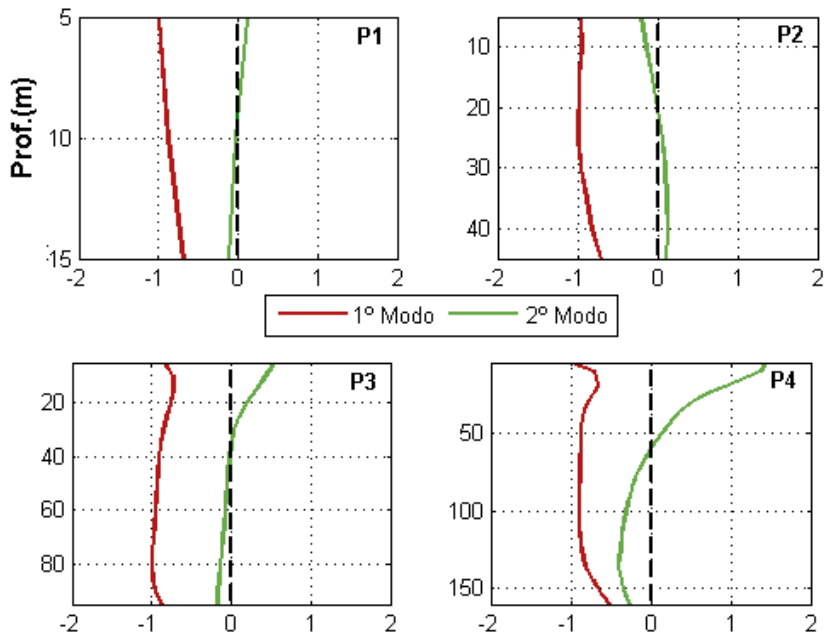


Figura 4.20: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Rio Grande obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Imbituba

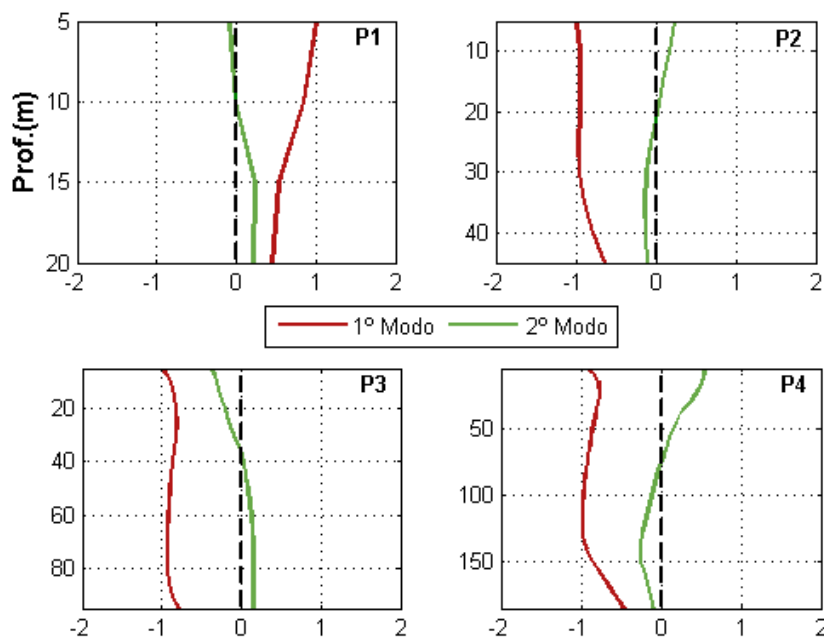


Figura 4.21: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Imbituba obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Cananéia

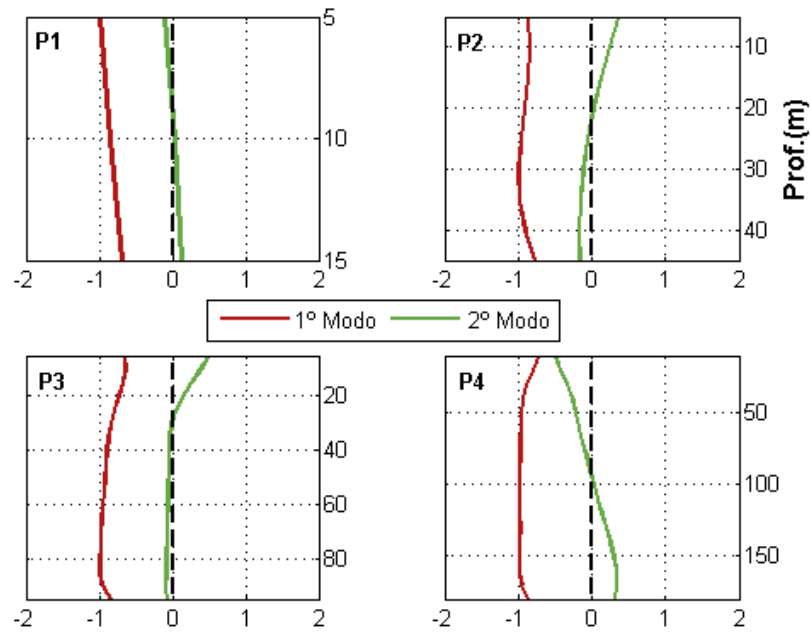


Figura 4.22: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Cananéia obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Ilha Fiscal

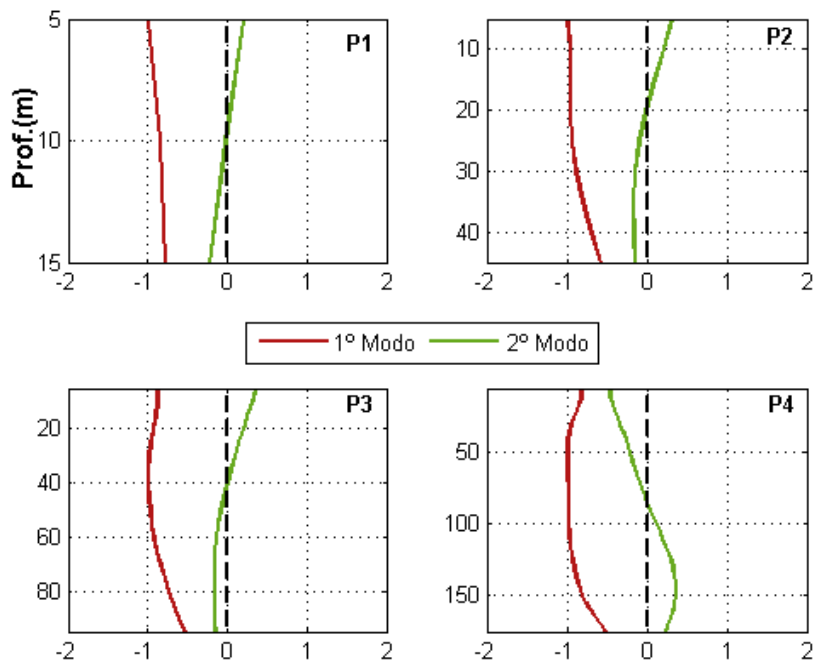


Figura 4.23: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Ilha Fiscal obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Cabo Frio

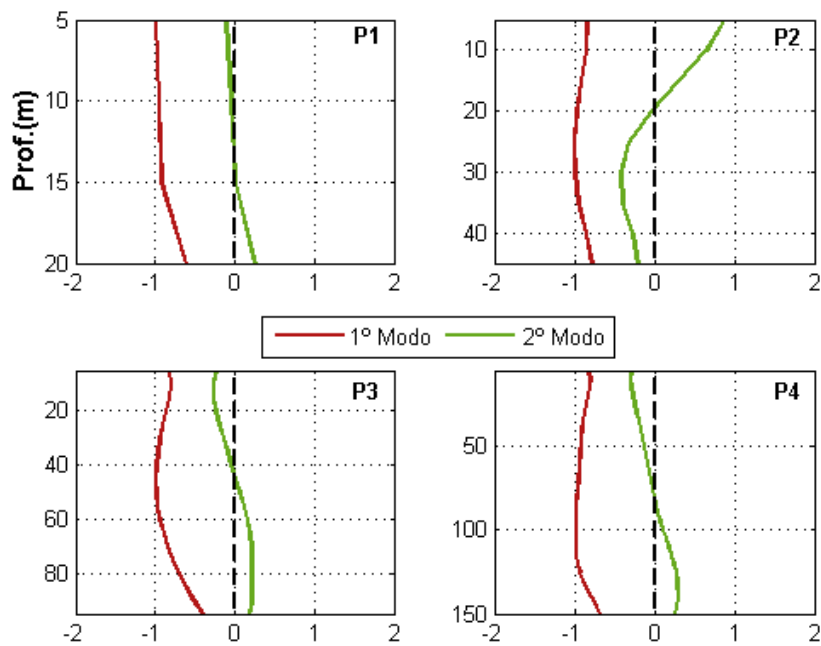


Figura 4.24: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Cabo Frio obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Macaé

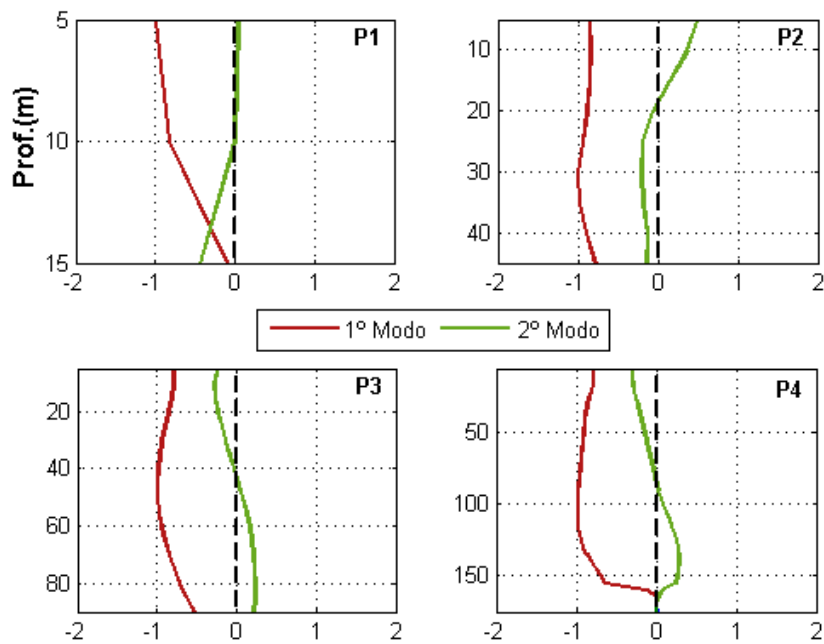


Figura 4.25: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Macaé obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

Modos Estatísticos - Piúma

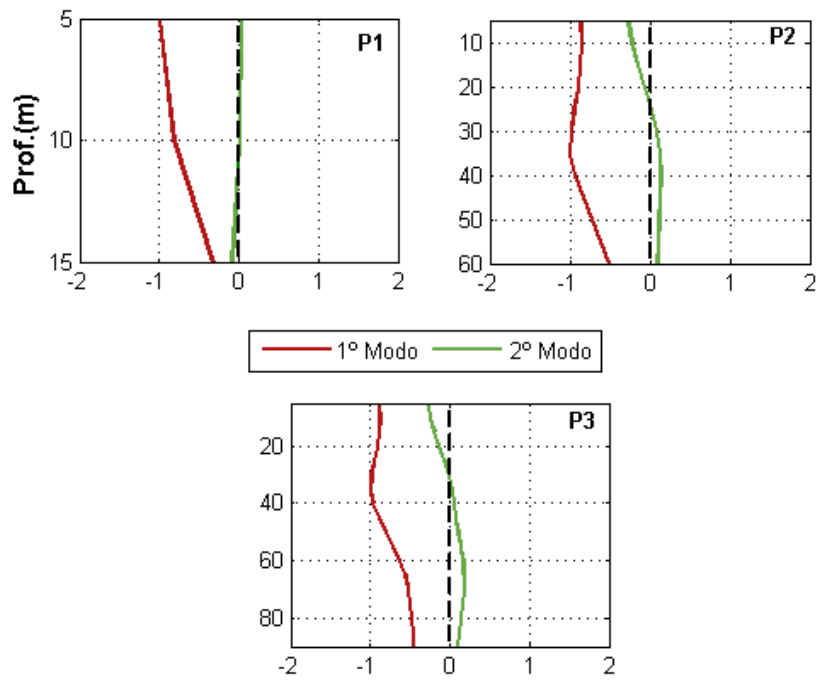


Figura 4.26: Perfis verticais dos modos estatísticos da seção de Piúma obtidos pela aplicação da EOF às séries da componente de velocidade paralela à costa com frequência subinercial.

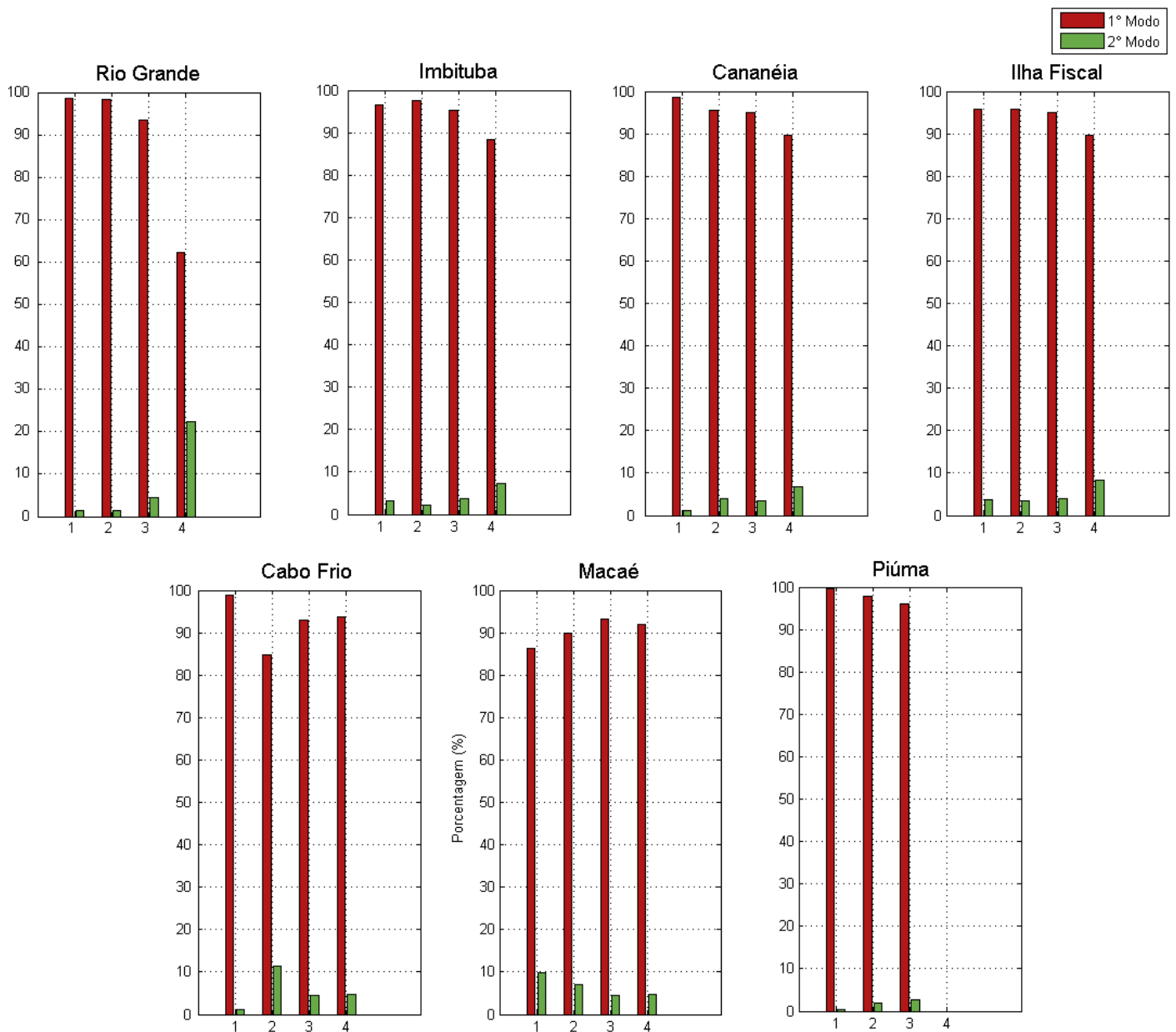


Figura 4.27: Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o período compreendido entre 2004 e 2006.

Considerando que no critério de Clarke & Brink (1985) foi observada uma variabilidade associada ao comportamento barotrópico e baroclínico em função da sazonalidade, a aplicação da EOF foi realizada para períodos distintos, de verão e de inverno de 2005. Durante o verão observa-se a predominância do comportamento barotrópico (Figura 4.28) com a maioria dos pontos das seções analisadas respon-

dendo a valores a partir de 90% da variância associada ao 1º modo. Entretanto, destaca-se que em Cabo Frio e Macaé há uma intensificação do 2º modo, o qual responde a valores em torno de 10% da variância nos pontos P2 de Cabo Frio e Macaé. No ponto P4 de Rio Grande e no ponto P1 de Macaé esse valor é superior a 20%. Os maiores valores do parâmetro utilizado no critério de Clarke & Brink (1985) durante o verão principalmente no ponto P2 de Cabo Frio e nos pontos de P1 e P2 de Macaé, também são identificados nos valores associados ao 2º modo da EOF aplicada à velocidade. No inverno, por outro lado, é identificado o comportamento essencialmente barotrópico, com a variância das séries respondendo a valores a partir de 90% do 1º modo para todos os pontos, exceto o ponto P4 de Rio Grande (Figura 4.29).

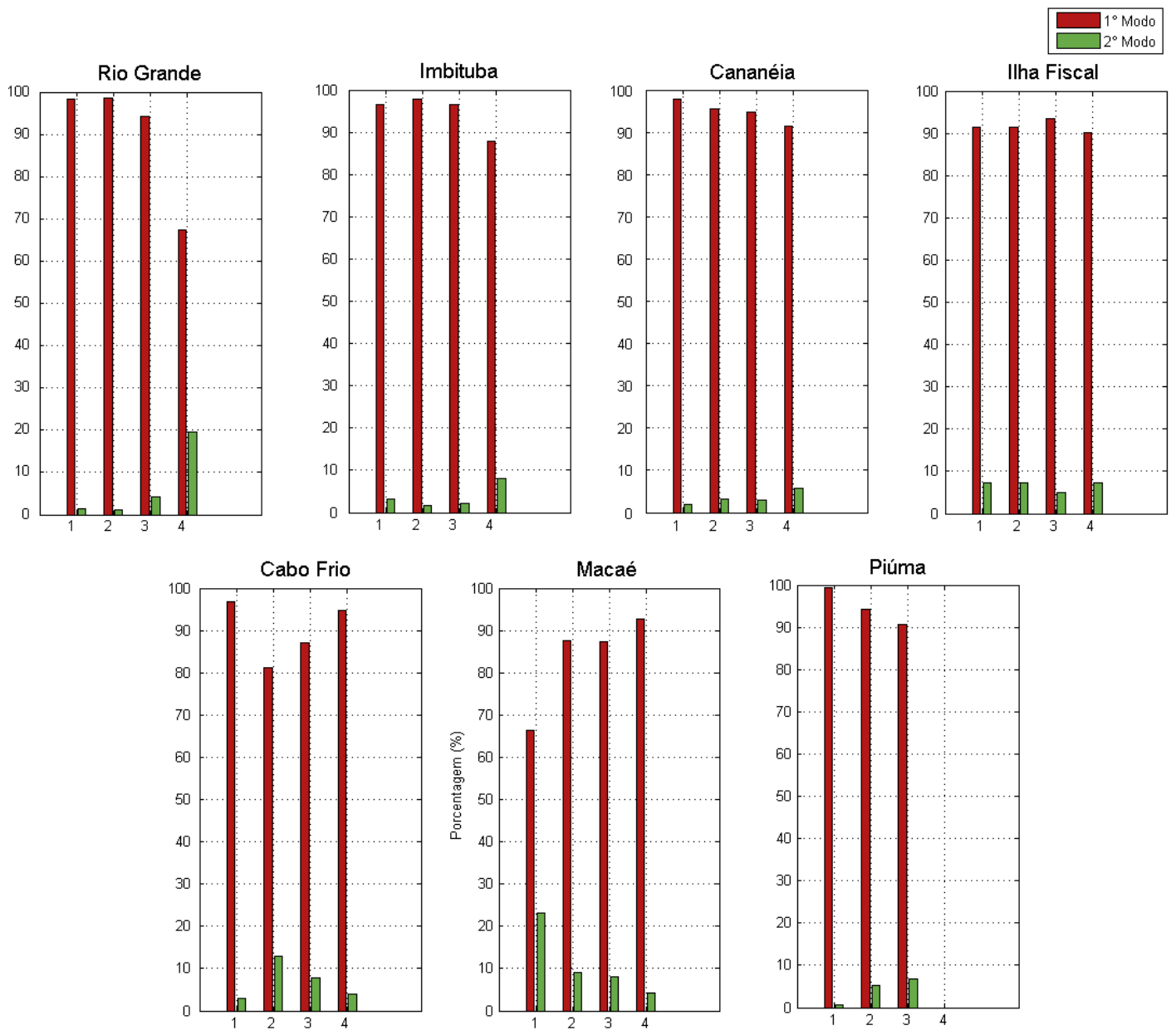


Figura 4.28: Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o verão de 2005.

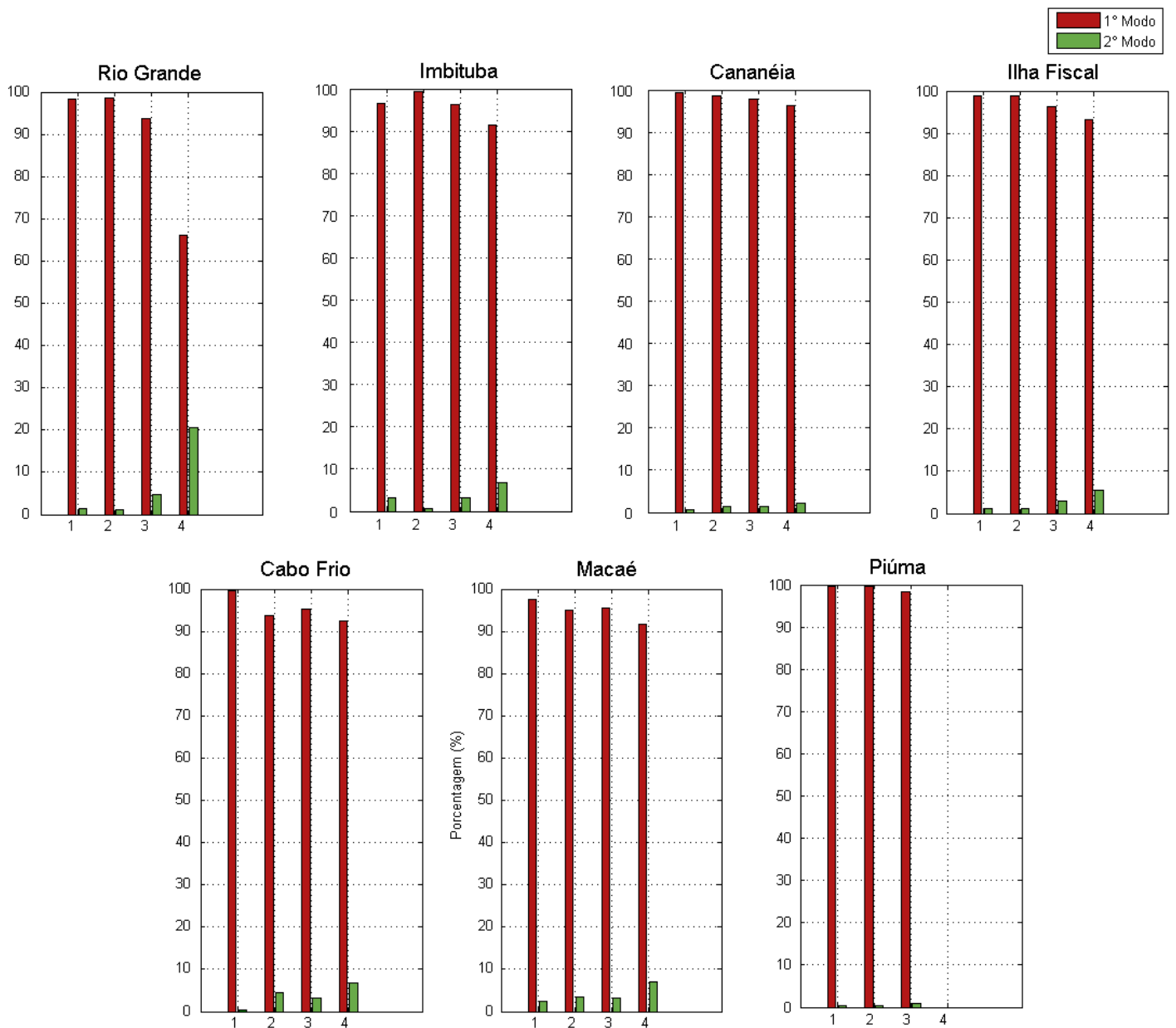


Figura 4.29: Representação em porcentagem do 1º Modo e do 2º Modo nos pontos P1, P2, P3 e P4 das seções analisadas durante o inverno de 2005.

No período de inverno é observada uma tendência dos valores associados ao 2º modo aumentarem nas regiões externas à plataforma, fator evidenciado na seção de Macaé (Figura 4.29). Nessa seção o perfil associado ao 1º modo do ponto P4 (Figura 4.25) indica que a EOF detectou uma combinação entre o modo barotrópico e o modo baroclínico. Enquanto que nos primeiros 150 m o perfil apresenta

um comportamento barotrópico, abaixo de 150 m o 1º modo possui um comportamento baroclínico. Tal fator possivelmente está relacionado ao fato do ponto P4 estar localizado na quebra da plataforma (Figura 4.16), região em que a influência de fenômenos de mesoescala são mais influentes do que em regiões da plataforma continental interna e que podem afetar a estratificação da coluna d'água principalmente ao fundo. Comportamento semelhante também foi verificado por DOTTORI e CASTRO (2009) ao aplicarem a análise de EOF em Santos. Os autores concluíram que a maior interação da plataforma continental com processos oceânicos offshore e a menor correlação das correntes com os ventos originados de frentes frias explicariam uma maior baroclinicidade nessa região. Destaca-se ainda a seção de Rio Grande cujo ponto mais externo da plataforma apresenta uma maior influência do sinal baroclínico em relação aos outros pontos tanto para períodos de verão e inverno. Tal fator indica que essa região possivelmente está sob influência contínua de fenômenos de mesoescala na porção externa da plataforma.

Portanto observamos que embora o comportamento barotrópico seja dominante há regiões e períodos em que o modo baroclínico pode exercer uma maior influência no comportamento das ondas subinerciais. Assim como observado no critério de Clarke & Brink (1985), o qual é função de campo de massa, a análise de EOF aplicada às componentes de velocidade paralelas à costa permite identificar que as regiões da plataforma interna de Cabo Frio e Macaé apresentam uma intensificação do modo baroclínico durante o verão em relação aos outros pontos analisados. A partir da análise de EOF também foi possível identificar que porções da plataforma externa incluindo as regiões de quebra da plataforma e de proximidade com fundo podem apresentar uma elevação do modo baroclínico.

4.5 Área de Geração

A identificação da área de geração das ondas confinadas costeiras observadas na costa brasileira foi feita a partir das análises dos resultados de elevação do nível do mar e de velocidade barotrópica da simulação em $1/4^\circ$, a qual abrange um maior domínio estendendo-se a 78°S no seu limite mais ao sul. As séries de elevação foram definidas na isobatimétrica de 20 m e filtradas pelo filtro butter passa-banda, obtendo-se as ondas com períodos entre 3 e 20 dias.

A análise da evolução das amplitudes dessas ondas ao longo do tempo para cada latitude compreendida entre 5°S e 55°S , como ilustrado na Figura 4.30, permitiu identificar uma faixa de latitudes onde observa-se a possível origem do sinal das OCCs.

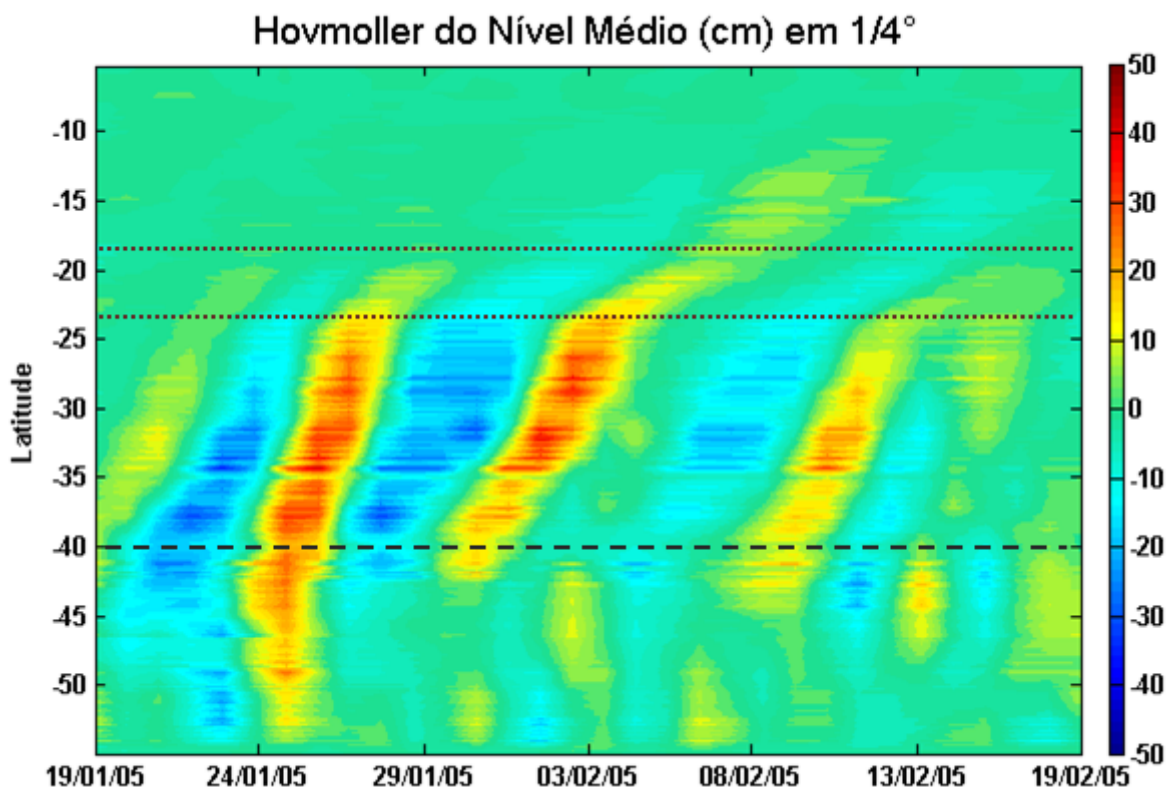


Figura 4.30: Hovmoller do nível médio (cm) na isobatimétrica de 20 m no domínio $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.

Embora sejam observadas ondulações em todo o domínio, a propagação das ondas para norte ocorre em geral a partir das proximidades de 40°S. Tal comportamento repete-se em todo o período analisado (Figura 4.31, Figura 4.32 e Figura 4.33). Entretanto, é importante destacar que há eventos em que a propagação dessas ondas em direção ao Equador é identificada em latitudes mais ao sul. No dia 13/02/2004, por exemplo, tal comportamento é observado a partir de aproximadamente 50°S. A variabilidade quanto a área de geração das ondas subinerciais possivelmente está associada às variabilidades associados aos fenômenos meteorológicos que ocorrem na região.

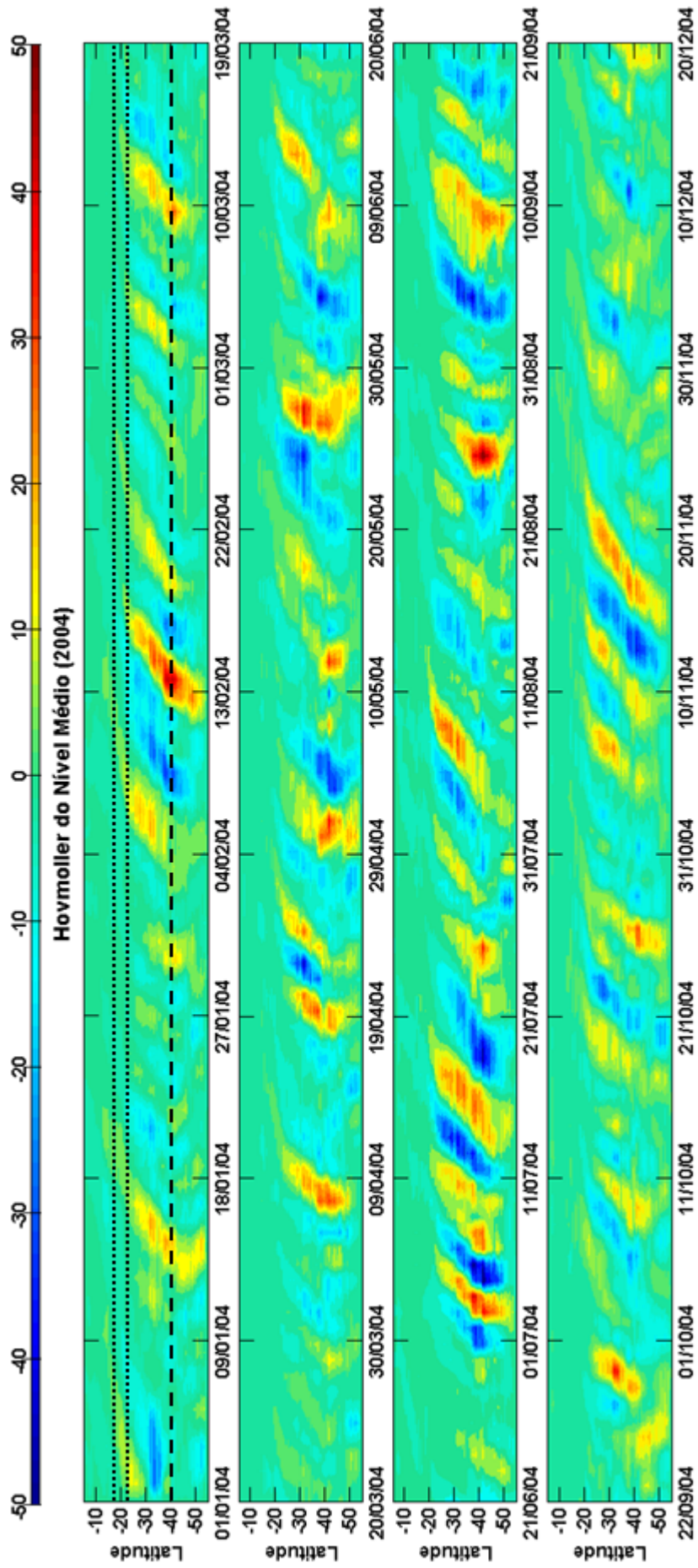


Figura 4.31: Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2004 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica a região de origem das OCS e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.

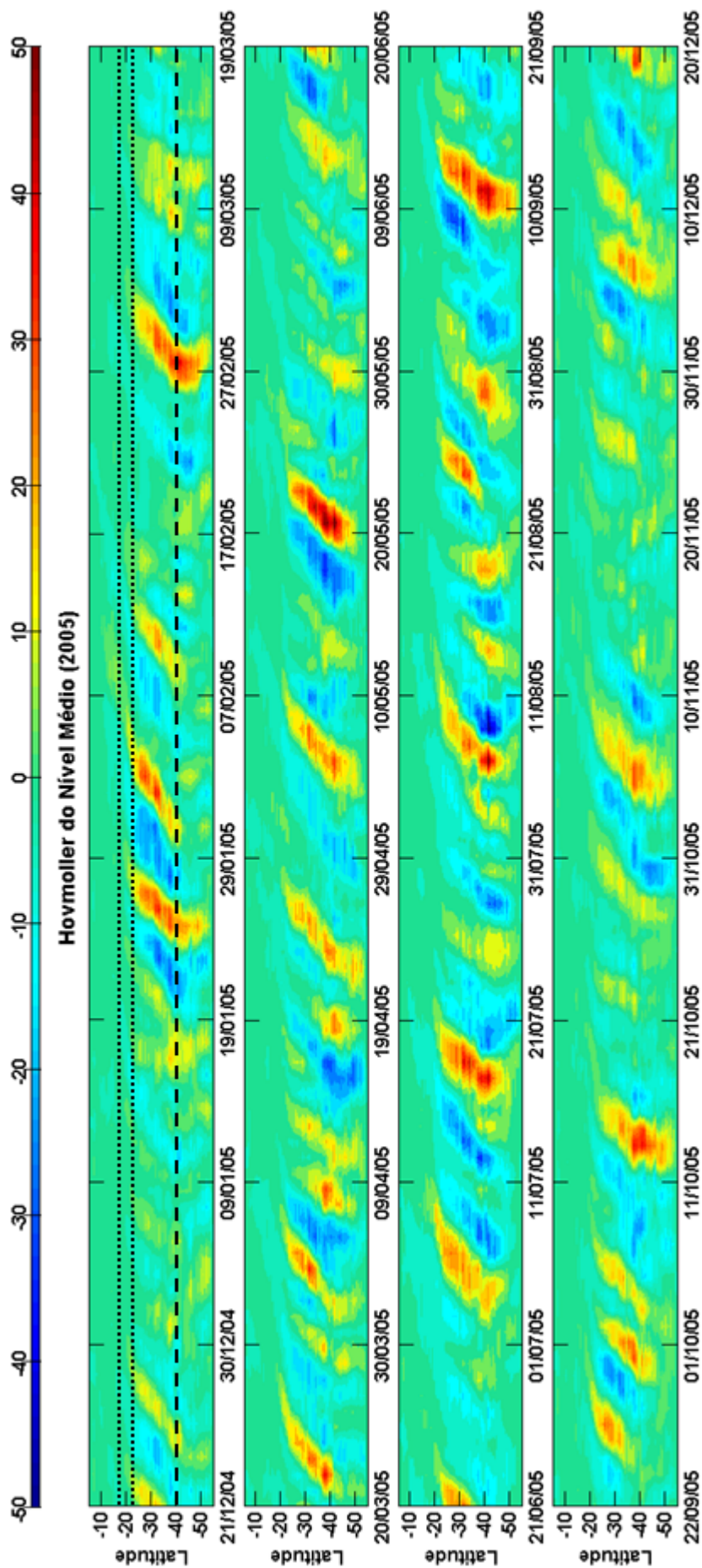


Figura 4.32: Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2005 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.

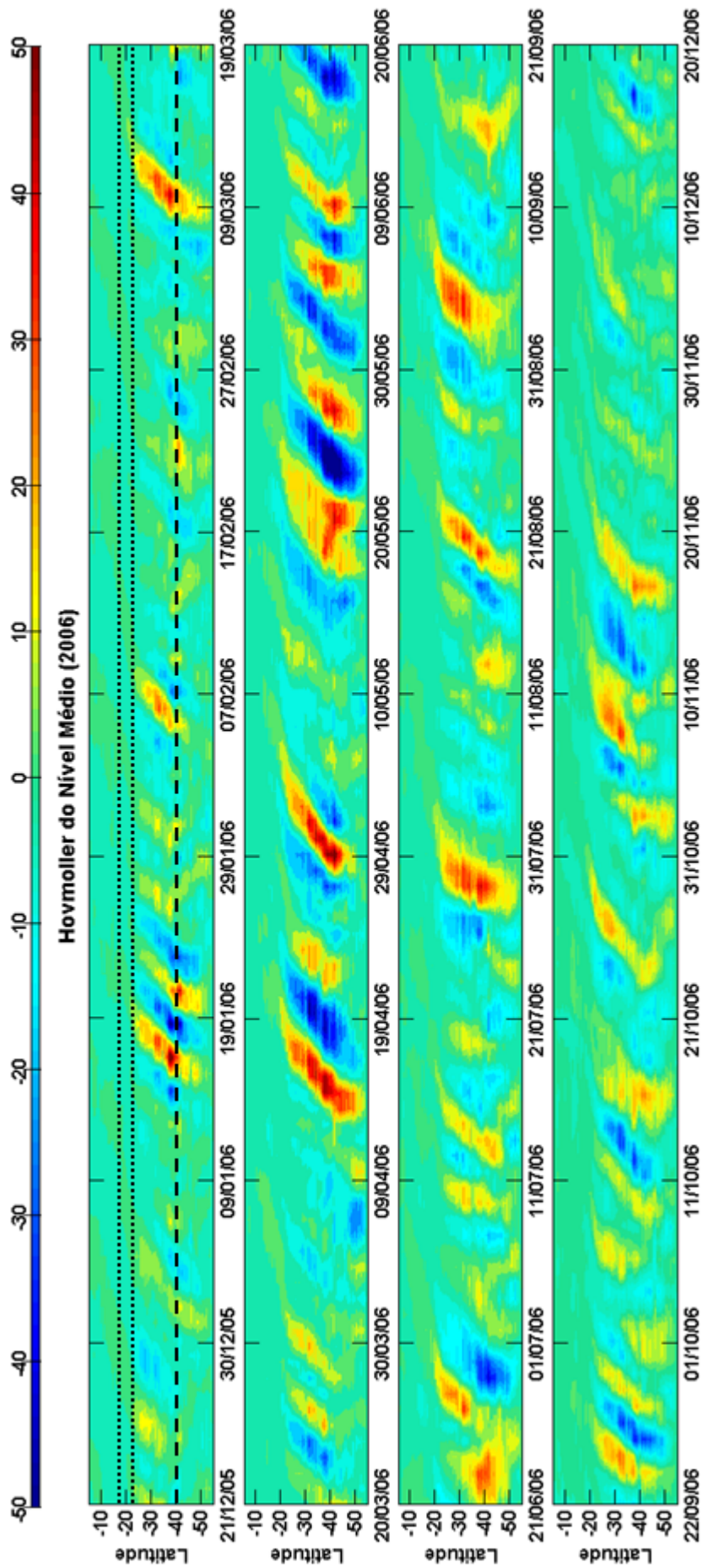


Figura 4.33: Hovmoller do nível médio (cm) ao longo da costa correspondente ao verão, outono, inverno e primavera de 2006 no domínio de $1/4^\circ$. A linha tracejada indica o ponto de origem das OCCs e as linhas pontilhadas as regiões onde são observados declínios na velocidade de propagação das ondas subinerciais.

As regiões onde há maior variabilidade das perturbações associadas às OCCs, indicando serem as regiões sob maior influência das forçantes que geram as OCCs, foram identificadas a partir da variância de elevação e da energia cinética turbulenta no experimento em $1/4^\circ$. A variância do campo de elevação foi obtido considerando profundidades inferiores a 200 m e ondas com períodos entre 3 e 20 dias. Observou-se que os valores máximos de variância das ondulações em baixa frequência estão compreendidos entre aproximadamente 42°S e 32°S , cujos máximos variam entre 250 a 300 cm^2 . Valores inferiores, entre 100 e 150 cm^2 são observados entre 45°S e 23°S . (Figura 4.34).

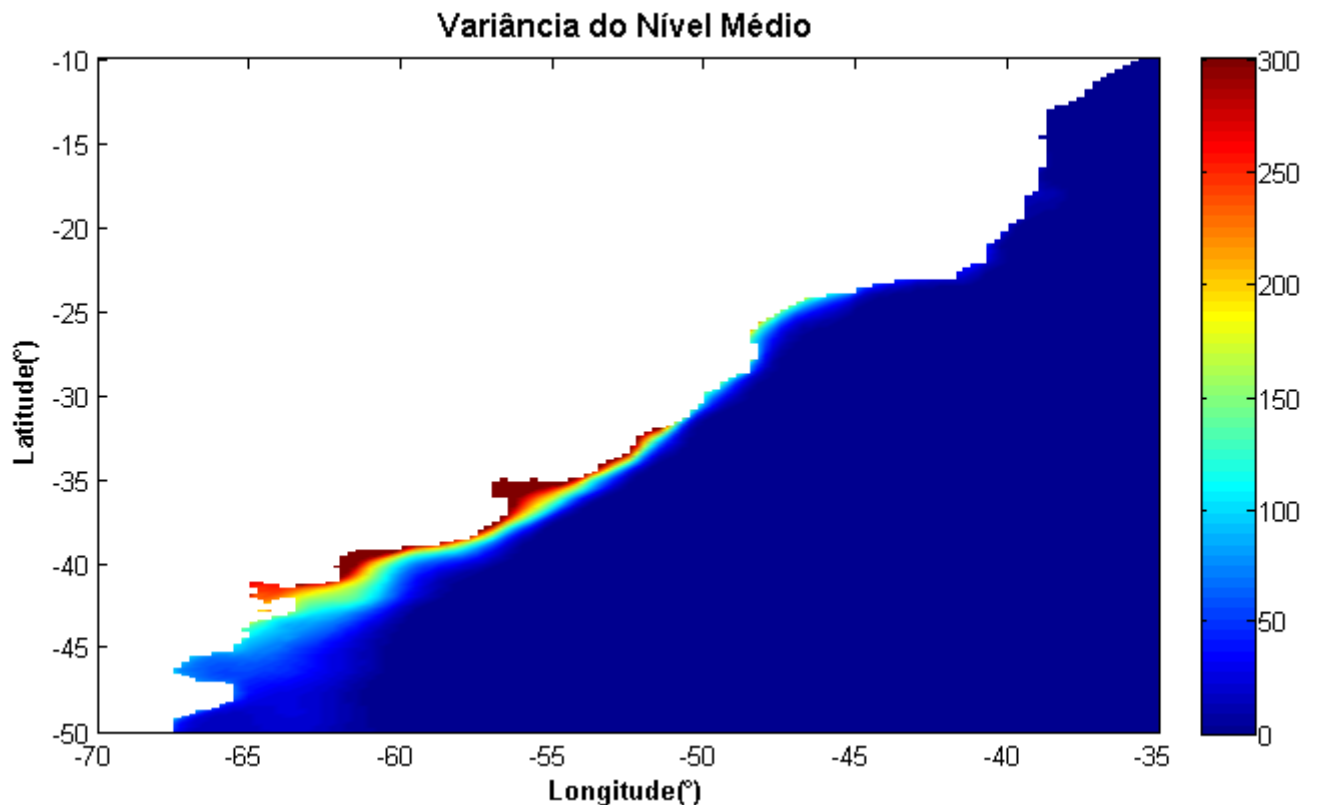


Figura 4.34: Variância do campo de elevação (cm^2) em profundidades inferiores a 200 m filtrado no domínio de $1/4^\circ$, entre 2004 e 2006.

No campo de energia cinética turbulenta obtido através de u e v barotrópicos com períodos entre 3 e 20 dias do mesmo experimento observou-se valores máximos em latitudes compreendidas entre 20°S e 42°S (Figura 4.35). Portanto observa-se a partir do campo de elevação e de velocidade a presença das OCCs a partir de latitudes próximas a 40°S no seu limite mais ao sul indicando que a zona de geração na costa do Brasil ocorre nessa região.

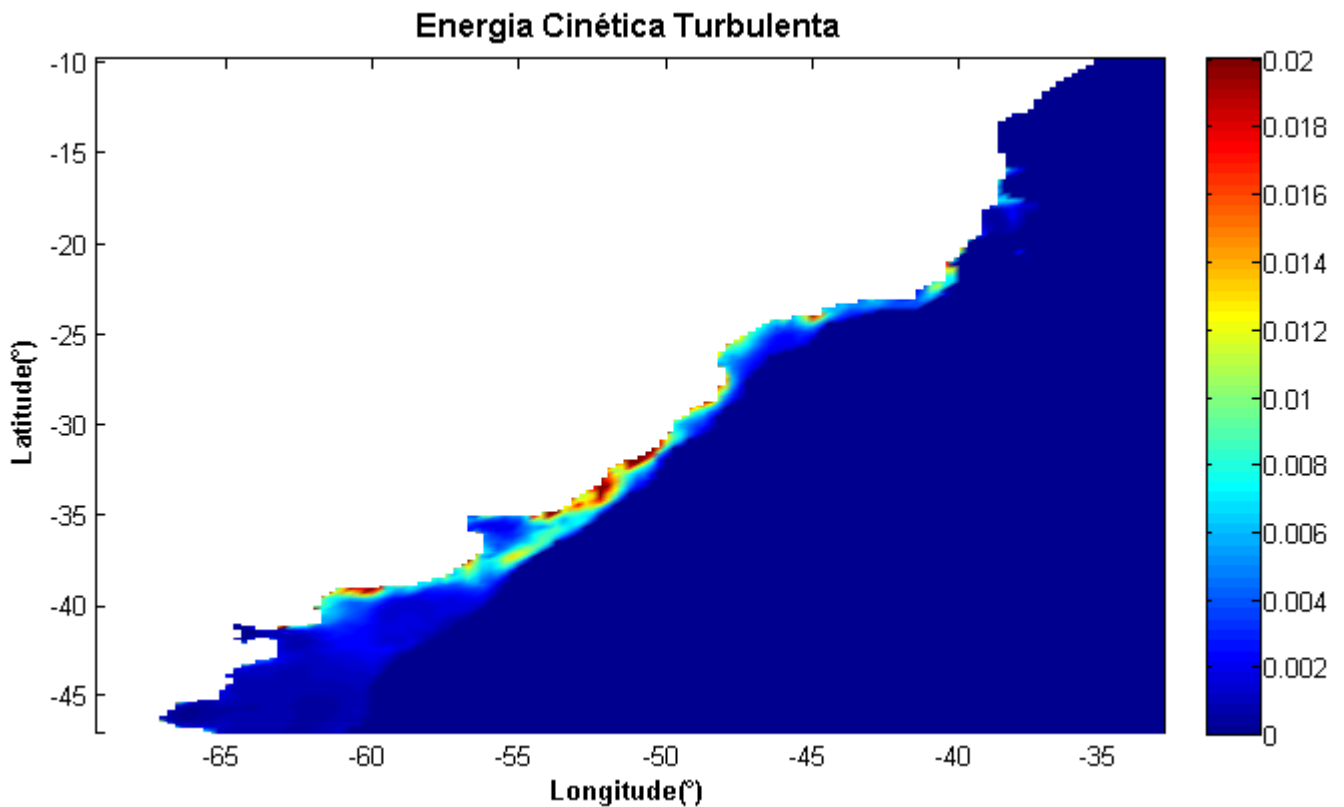


Figura 4.35: Energia Cinética Turbulenta (cm^2/s^2) em profundidades inferiores a 200 m no domínio de $1/4^\circ$. Foram considerados u e v filtrados para o cálculo no período compreendido entre 2004 e 2006.

Capítulo 5

Conclusões

As ondas confinadas costeiras observadas na costa brasileira foram investigadas a partir de modelagem numérica, incluindo duas simulações em alta resolução espacial ($1/24^\circ$ e $1/4^\circ$) realizadas no modelo HYCOM no contexto da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO). Na simulação de maior resolução foram analisados os períodos característicos, a variabilidade da velocidade de propagação ao longo da costa, o campo de elevação e de velocidade e o comportamento barotrópico e baroclínico associado as ondas subinerciais. A simulação em $1/4^\circ$ por compreender um domínio maior do que o experimento em $1/24^\circ$ foi utilizado na identificação da área de geração dessas ondas.

A análise espectral de elevação de superfície aplicada a 4 pontos ao longo da costa brasileira (Macaé, Ilha Fiscal, Cananéia e Imbituba) permitiu identificar 3 faixas temporais em que as ondas subinerciais apresentam maior energia. O pico de maior densidade espectral, o qual foi observado em todos os pontos analisados engloba os períodos entre 12 e 16 dias. A faixa entre 20 e 25 dias, períodos possivelmente associados à dinâmica da CB e às variações intrasazonais, aparece em seguida

em relação a representatividade espectral e posteriormente a faixa que engloba vários picos entre 5 e 11 dias.

A propagação das ondas subinerciais com fluxo para nordeste ao longo da área de estudo apresentou variações de velocidade ao longo do seu percurso. Observou-se que ocorre um declínio abrupto da velocidade de propagação dessas ondas em duas regiões principais, nos pontos localizados a 23°S e a 18°S, associados a Cabo Frio e a Abrolhos respectivamente. A celeridade da onda foi analisada em dois trechos durante 2004 a 2006, o trecho 1 compreendido entre 25°S e 34°S e o trecho 2 entre 18°S e 22°S. As séries extremas dos dois trechos foram submetidas a duas metodologias distintas para o cálculo das velocidades médias de propagação das ondas subinerciais, sendo as maiores velocidades médias associadas ao trecho mais ao sul do domínio com valores próximos a 15 m/s e 12 m/s. Por outro lado o trecho 2 apresentou velocidades médias em torno de 4 m/s nas duas formas de obtenção da velocidade. O tempo médio de propagação das ondas subinerciais no trecho 1 foi de 30 h e no trecho 2 esse valor foi de 39 h. A maior variabilidade de velocidade foi associada ao trecho 1 com desvio padrão próximas a 6 m/s, enquanto que no trecho 2 esse valor foi próximo de 2 m/s.

Para uma maior compreensão do fenômeno das OCCs seria interessante em trabalhos futuros investigar as possíveis causas do declínio da velocidade de propagação considerando fatores como variações na direção da linha de costa, na declividade da plataforma e nas forçantes de vento remotas oriundas do Atlântico Sul. Adicionalmente a dispersão de energia das ondas subinerciais poderia ser investigada considerando as interações dessas ondas com processos oceânicos.

As amplitudes associadas às ondas subinerciais são identificadas com mai-

ores valores na isobatimétrica de 20 m ultrapassando a 30 cm. Ao se afastar da costa esses valores decaem para valores próximos a 4 cm em regiões com 50 m de profundidade e tendem a zero em pontos localizados na isobatimétrica de 100 m. Observou-se nas isobatimétricas de 20 m, 50 m, 100 m e 200 m que as componentes de velocidade paralelas à costa acompanham o nível médio, as quais são positivas nas cristas das ondas e negativas nos cavados, caracterizando as ondas confinadas costeiras como ondas progressivas. Ao se afastarem da costa as velocidades decaem principalmente em latitudes abaixo de 24°S, em que as velocidades são observadas próximas a 0,4 m/s na plataforma continental interna e em torno de 0,2 m/s na plataforma continental externa.

O comportamento dinâmico das ondas subinerciais na plataforma brasileira foi analisado a partir de duas metodologias. No critério de Clark & Brink (1985) foram utilizados os índices termohalinos ao longo da coluna d'água para pontos mais próximos e mais afastados da costa. O critério define que valores muito inferiores a 1 caracterizam um comportamento barotrópico das ondas analisadas. Em Rio Grande, Imbituba, Cananéia, Ilha Fiscal e Piúma os valores do critério calculados foram muito pequenos caracterizando a predominância do sinal barotrópico. Porém, durante o verão observou-se uma intensificação do sinal baroclínico nos três anos analisados. Dentre as seções analisadas Cabo Frio e Macaé apresentaram os índices mais elevados com valores próximos a 0,7 e 0,8 respectivamente durante o verão, período em que foi identificada uma maior estratificação da coluna d'água com águas superficiais mais quentes e a progressão de águas mais frias e profundas para regiões mais rasas devido a ressurgência.

A segunda metodologia utilizada na análise do comportamento dinâmico das

OCCs foi a EOF, a qual foi aplicada aos resultados da componente de velocidade paralela à costa para os mesmos pontos onde foram aplicados o critério de Clark & Brink (1985). Observou-se a predominância do modo barotrópico, o qual apresentou em geral valores superiores a 90% da variância das seções analisadas, exceto alguns pontos da plataforma interna de Cabo Frio e Macaé em que a variância associada ao modo baroclínico apresentou valores entre 10% e 20% e o ponto da plataforma continental externa em Rio Grande, em que esse valor aproximou-se de 20% . No inverno todos os pontos das seções analisadas apresentaram valores da variância das séries associadas ao modo barotrópico acima de 90%, com exceção do ponto P4 de Rio Grande em que esse valor aproximou-se de 70%.

Quanto a área de geração das OCCs observadas na costa brasileira, identificou-se a propagação para norte das ondas subinerciais na proximidades de 40°S, na plataforma continental Argentina. O campo de variância do nível médio e de energia cinética turbulenta do domínio entre 50°N e 78°S apresentou os maiores valores a partir das latitudes entre 42°S e 45°S, na Argentina, indicando ser essa a região em que as OCCs são geradas.

Referências Bibliográficas

- AMORIM, F. N., 2011, *A Dinâmica Sazonal da Plataforma Continental a Leste Brasileira entre 10°S e 16°S*. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo.
- BLECK, R., 2002, “An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic - Cartesian Coordinates”, *Ocean Modelling*, v. 27, pp. 55–58.
- CAMARGO, R., HARARI, J., CARUZZO, A., 1999, “Basic Statistics of Storm Surges over the South-Western Atlantic Ocean.” *Afro-America GLOSS News*, v. Vol. 3(2), pp. p. 12–14.
- CAMPOS, E. J., VELHOTE, D., SILVEIRA, I. C., 2000, “Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders”, *Geophysical Research*, v. 27, pp. 751–754.
- CAMPOS, R. M., CAMARGO, R., HARARI, J., 2010, “Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudeste do Atlântico Sul.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, pp. 175–184.

- CASTRO, B. M., LEE, T. N., 1995, “Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf”, *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. C8, pp. 16.
- CASTRO, B. M., MIRANDA, B. L., 1998, “Physical Oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S”, *The Sea*, v. 11, n. 1, pp. 209–251.
- CASTRO, B. M., MOREIRA, J. R. G. B., 1994. “Current measurements in the Santos continental margin.” .
- CLARKE, A. J., BRINK, K. H., 1985, “The response of stratified, frictional flow of shelf and slope waters to fluctuating large-scale, low-frequency wind forcingClarkeBrink,”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 15, pp. 439–453.
- DOTTORI, M., CASTRO, B. M., 2009, “The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds”, *Ocean Dynamics*, v. 59, pp. 603–614.
- EMERY, W. J., THOMSON, R. E., 1998, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon.
- KAIHATU, J. M., HANDLER, R. A., MARMORINO, G. O., et al., 1997, “Empirical orthogonal functions analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, pp. 927–940.

- KUNDU, P. K., ALLEN, J. S., 1976, "Some three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast", *Journal of Physical Oceanography*, v. 6, pp. 181–199.
- KUNDU, P. K., ALLEN, J. S., SMITH, R. L., 1975, "Modal decomposition of the velocity field near the Oregon Coast", *Journal of Physical Oceanography*, v. 5, pp. 683–704.
- LEBLOND, P. H., MYSAK, L. A., 1978, *Waves in the ocean*. Elsevier.
- LIMA, L. N., LENTINI, C. A., 2009. "Variabilidade sazonal da profundidade da camada de mistura na região do Complexo Recifal dos Abrolhos e da Cadeia Vitória-Trindade baseada em dados de ventos derivados do satélite QuikSCAT". . Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 6533-6540.
- LORENZ, E., 1956, *Empirical orthogonal functions and statistical weather predictions*. Relatório Técnico 1, Massachusetts Institute of Technology.
- MARTINEZ, J., ALLEN, J. S., 2004, "A Modeling Study of Coastal-Trapped Wave Propagation in the Gulf of California. Part I: Response to Remote Forcing", *Journal of Phy*, v. 34, pp. 1313–1331.
- MIRANDA, B. L., 1971, *Relatório sobre as condições oceanográficas na plataforma continental do Rio Grande do Sul*. Relatório Técnico 14, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo.

- MIRANDA, B. L., 1982, *Análise de massas de água da plataforma continental e da região adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP)*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- MOREIRA, D. L., 2008. “Correntes subinerciais e ondas confinadas costeiras presentes na Bacia de Campos, RJ”. .
- MYSAK, A. L., 1980, “Topographically trapped waves”, *Annual Reviews Fluid Mechanics*, v. 12, pp. 45–76.
- OLIVEIRA, A. S., 1986. “Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia.” .
- PAIVA, A. M., GABIOUX, M., COSTA, V. S., et al., 2012, *Base Hidrodinâmica SSE. REMO – Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica*. Relatório técnico, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- RAHY, M., 2006, *Correntes sub-inerciais e ondas de plataforma continental da costa sudeste do Brasil*. Tese de Mestrado, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo.
- SAMUELS, B., COX, M., 1987, “Data Set Atlas for Ocean Modeling”, *Ocean Model*, v. 75, pp. 1–3.
- SCHUMANN, E. H., BRINK, K. H., 1990, “Coastal-trapped waves of the coast of south Africa: generation, propagation and current structures”, *Journal of P*, v. 20, pp. 1206–1218.

STECH, J. L., 1990, *Um estudo comparativo da dinâmica da circulação de invernos entre as plataformas continentais das costas sudeste do Brasil e dos Estados Unidos utilizando um modelo numérico*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

STECH, J. L., LORENZZETTI, J. A., 1992, “The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts.” *Geophysical Research*, v. 97, pp. 9507–9520.

VALENTIN, J. L., ANDRÉ, D. L., JACOB, S., 1987, “Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two-dimensional structure and variability during a wind cycle”, *Continental Shelf Research*, v. 7, pp. 77–88.

WANG, D. P., MOOERS, C. N. K., 1976, “Coastal trapped waves in a continuously stratified ocean”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 6, pp. 853–863.