

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CENTRO DE ESTUDOS DO MAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

EDUARDO ANDREUS MEGLIN STEIN

**ESTRUTURA VERTICAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO
EMBAIAMENTO SUL BRASILEIRO, 25,5°S**

PONTAL DO PARANÁ
2013

EDUARDO ANDREUS MEGLIN STEIN

**ESTRUTURA VERTICAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO
EMBAIAMENTO SUL BRASILEIRO, 25,5°S**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Orientador:

Dr. Mauricio Almeida Noernberg.

PONTAL DO PARANÁ

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SIBI - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar

S819e Stein, Eduardo Andreus Meglin
Estrutura vertical da plataforma continental interna do embaiamento sul brasileiro, 25,5°S. / Eduardo Andreus Meglin Stein. – Pontal do Paraná, 2013.
34f.; 29 cm.

Orientador: Dr. Mauricio Almeida Noernberg.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

1. Oceanografia física . 2. Plataforma interna do Paraná. 3. ADP - Perfilador Acústico de Correntes. 4. Correntes costeiras. I.Título. II. Mauricio Almeida Noernberg. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.47



CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

Centro de Estudos do Mar - Setor Ciências da Terra - UFPR

Avn. Beira-mar, s/nº - Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - Brasil
Tel. (41) 3511-8644 - Fax (41) 3511-8648 - www.cem.ufpr.br - E-mail: pgsisco@ufpr.br

TERMO DE APROVAÇÃO

Eduardo Andreus Meglin Stein

Estrutura Vertical da Plataforma Continental Interna de São Paulo, 25,5°S

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre(a) em Sistemas Costeiros e Oceânicos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Dr(a). Maurício Almeida Noernberg
Orientador(a) e Presidente(a)

Dr(a). Eduardo Marone (CEM/UFPR)
Membro Examinador(a)

Dr(a). Ricardo de Camargo (IAG/USP)
Membro Examinador(a)

Pontal do Paraná, 05/12/2012.

Dedico este trabalho à minha namorada Larissa, aos meus pais, e a todos os colegas do Grupo de Física Marinha do CEM.

RESUMO

Nesse estudo foi verificada uma série de dados de correntes costeiras obtidos na plataforma continental interna do Paraná, entre fevereiro de 2009 e janeiro de 2010. Os objetivos principais foram analisar as variações da estrutura vertical das correntes, ainda pouco estudados nessa parte da costa, e obter conhecimento sobre os mecanismos controladores das correntes. No verão, ventos do quadrante Sul resultam no aumento de temperatura nas camadas mais profundas da costa, e a ação de ventos de Norte favorece a penetração de águas frias nas camadas mais profundas. Ventos do quadrante sul geram correntes mais estáveis e uniformes, com a corrente fluindo na mesma direção em todas as profundidades. Os ventos do quadrante norte resultam em padrões mais heterogêneos do movimento das correntes na coluna de água. A variação nos fluxos longitudinal e transversal foi maior na camada central da coluna de água durante todas as estações do ano. A defasagem entre a ação do vento e a resposta das correntes longitudinais a costa foi superior a 15 horas durante o verão, enquanto que no inverno as maiores correlações foram com a componente transversal da corrente.

ABSTRACT

In this study, we examined a series of coastal currents data obtained off the coast of Paraná between February, 2009 and January, 2010. The main objectives of the study were to analyze the variation in the vertical structure of currents, which have not been studied on that part of the coast, and gain insights into the mechanisms controlling these currents. In the summer, winds from the southern quadrant resulted in increased temperatures in the deeper ocean layers, and wind action from the north favored the penetration of cold water into the deep layers. With regards to the vertical structure of the currents, winds from the southern quadrant generated more stable and uniform currents, with the current flowing in the same direction at all depths. Winds from the northern quadrant resulted in more heterogeneous patterns of current movement in the water column. The variation in along-shore and cross-shore flows was greatest in the central layer of the water column during all seasons. The time delay between wind action and the response of along-shore currents was greater than 15 hours during the summer, while during the winter, the strongest correlation was found between wind and the cross-shore component of the current.

Palavras-chave: Plataforma interna do Paraná, ADP, Baixa frequência, Correntes costeiras.

Keywords: Paraná inner shelf, ADP, low frequency, coastal currents.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDO COM A LOCALIZAÇÃO DO PONTO DO FUNDEIO (ADP) E DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS. 1 – ILHA DO MEL, 2 – PONTAL DO SUL E 3 – ITAPOÁ. 2
- FIGURA 2. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA DE FUNDO DURANTE TODO O PERÍODO DO FUNDEIO. 8
- FIGURA 3. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DA DIREÇÃO E INTENSIDADE DOS VENTOS NAS TRÊS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS. VALORES NEGATIVOS INDICAM VENTOS DO QUADRANTE N E POSITIVOS DO QUADRANTE S. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 9
- FIGURA 4. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES. VALORES NEGATIVOS INDICAM CORRENTES DO QUADRANTE S E POSITIVOS DO QUADRANTE N. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS..... 10
- FIGURA 5. VARIABILIDADE SAZONAL DAS CORRENTES E VETOR MÉDIO EM TRÊS CAMADAS DA COLUNA DA ÁGUA – 3,6 M (A), 13,2 M (B), 24 M (C). AS LINHAS BATIMÉTRICAS REPRESENTAM AS ISÓBATAS DE 10, 20 E 50 METROS. AS ELIPSES FORAM DESLOCADAS PARA MELHOR VISUALIZAÇÃO. O PONTO DO FUNDEIO ESTÁ LOCALIZADO NO CENTRO DA ELIPSE REFERENTE AO INVERNO. 11
- FIGURA 6. DENSIDADE ESPECTRAL DE BAIXA FREQUÊNCIA DA COMPONENTE LONGITUDINAL (ACIMA) E TRANSVERSAL (ABAIXO) DO VENTO..... 12
- FIGURA 7. DENSIDADE ESPECTRAL DE BAIXA FREQUÊNCIA DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA CORRENTE, PARA AS PROFUNDIDADES 3,6M(A), 7,2M(B), 13,2M(C), 19,2M(D) E 24M(E). 13
- FIGURA 8. DENSIDADE ESPECTRAL DE BAIXA FREQUÊNCIA DA COMPONENTE TRANSVERSAL DA CORRENTE, PARA AS PROFUNDIDADES 3,6M(A), 7,2M(B), 13,2M(C), 19,2M(D) E 24M(E). 13
- FIGURA 9. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA DE FUNDO E DA DIREÇÃO E INTENSIDADE DOS VENTOS NA ESTAÇÃO DE PONTAL DO SUL ENTRE 15 DE MARÇO E 15 DE ABRIL DE 2009. VALORES NEGATIVOS INDICAM VENTOS DO QUADRANTE N E POSITIVOS DO QUADRANTE S. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 14

FIGURA 10. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES ENTRE 15 DE MARÇO E 15 DE ABRIL DE 2009. VALORES NEGATIVOS INDICAM CORRENTES DO QUADRANTE S E POSITIVOS DO QUADRANTE N. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 15

FIGURA 11. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE TRANSVERSAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, ENTRE 15 DE MARÇO E 15 DE ABRIL DE 2009. VALORES POSITIVOS INDICAM FLUXOS PARA LESTE..... 16

FIGURA 12. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, ENTRE 15 DE MARÇO E 15 DE ABRIL DE 2009. VALORES POSITIVOS INDICAM CORRENTES FLUINDO PARA NORTE..... 17

FIGURA 13. CORRELAÇÃO ENTRE AS COMPONENTES DO VENTO E DA CORRENTE SUPERFICIAL ENTRE 15 DE MARÇO E 15 DE ABRIL DE 2009..... 17

FIGURA 14. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA DE FUNDO E DA DIREÇÃO E INTENSIDADE DOS VENTOS NA ESTAÇÃO DE PONTAL DO SUL PARA AGOSTO DE 2009. VALORES NEGATIVOS INDICAM VENTOS DO QUADRANTE N E POSITIVOS DO QUADRANTE S. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS..... 18

FIGURA 15. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES PARA AGOSTO DE 2009. VALORES NEGATIVOS INDICAM CORRENTES DO QUADRANTE S E POSITIVOS DO QUADRANTE N. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 19

FIGURA 16. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE TRANSVERSAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, PARA O MÊS DE AGOSTO DE 2009. VALORES POSITIVOS INDICAM FLUXOS PARA LESTE. 20

FIGURA 17. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, PARA O MÊS DE AGOSTO DE 2009. VALORES POSITIVOS INDICAM CORRENTES FLUINDO PARA NORTE..... 21

FIGURA 18. CORRELAÇÃO ENTRE AS COMPONENTES DO VENTO E DA CORRENTE SUPERFICIAL PARA O MÊS DE AGOSTO DE 2009..... 22

FIGURA 19. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DA TEMPERATURA DE FUNDO E DA DIREÇÃO E INTENSIDADE DOS VENTOS NA ESTAÇÃO DE PONTAL DO SUL ENTRE 15 DE DEZEMBRO E 15 DE JANEIRO DE 2010. VALORES

NEGATIVOS INDICAM VENTOS DO QUADRANTE N E POSITIVOS DO QUADRANTE S. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 22

FIGURA 20. VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES ENTRE 15 DE DEZEMBRO E 15 DE JANEIRO DE 2010. VALORES NEGATIVOS INDICAM CORRENTES DO QUADRANTE S E POSITIVOS DO QUADRANTE N. COM VISTA A UMA MELHOR VISUALIZAÇÃO NOS GRÁFICOS, FORAM PLOTADOS DADOS OBTIDOS A CADA 2 HORAS. 23

FIGURA 21. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE TRANSVERSAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, ENTRE 15 DE DEZEMBRO E 15 DE JANEIRO DE 2010. VALORES POSITIVOS INDICAM FLUXOS PARA LESTE..... 24

FIGURA 22. SÉRIES TEMPORAIS FILTRADAS DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA CORRENTE NAS PROFUNDIDADES (A) 3,6M, (B) 7,2M, (C) 13,2M, (D) 19,2M E (E) 24M, ENTRE 15 DE DEZEMBRO E 15 DE JANEIRO DE 2010. VALORES POSITIVOS INDICAM FLUXO PARA NORTE..... 25

FIGURA 23. CORRELAÇÃO ENTRE AS COMPONENTES DO VENTO E DA CORRENTE SUPERFICIAL ENTRE 15 DE DEZEMBRO E 15 DE JANEIRO DE 2010. 26

FIGURA 24. PLUMA ESTUARINA SOBRE A PLATAFORMA RASA DO PARANÁ (ADAPTADO DE NOERNBERG, 2001). 32

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. DADOS E MÉTODOS | 5 |
| 2.1 Corrente e Temperatura | 5 |
| 2.2 Vento..... | 5 |
| 2.3. Preparação e análise dos Dados..... | 5 |
| 3. RESULTADOS | 8 |
| 3.1 Variabilidade temporal..... | 8 |
| 3.1 Análise Espectral..... | 12 |
| 3.3 Resposta das correntes a eventos na escala de dias | 14 |
| 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO | 27 |
| 5. AGRADECIMENTOS | 33 |
| 6. REFERÊNCIAS | 34 |

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a circulação costeira e a estrutura hidrográfica da plataforma continental da região do Embaiamento Sul Brasileiro (SBB – South Brazilian Bight), situada na porção Norte da costa sudeste do Brasil (Figura 1), como um todo é restrito a uma gama de estudos descritivos realizados pontualmente com baixa escala temporal, em sua maioria no litoral do estado de São Paulo. As primeiras investigações sobre a estrutura física do SBB ocorreram próximas à região do canal de São Sebastião (23,5°S), e demonstraram que ventos de quadrante Sul geram correntes para Nordeste, enquanto que ventos do quadrante Norte geram correntes opostas, e a resposta das correntes coincide com a frequência de eventos sinóticos atmosféricos (Emilsson, 1961; Kvinge, 1967). Castro & Lee (1995) encontraram maior energia nos eventos associados à passagem de sistemas frontais, com fluxo de correntes para Nordeste principalmente no inverno, devido à intensificação da passagem de frentes frias formadas na região polar. O intervalo de tempo entre dois sistemas frontais consecutivos variam tipicamente entre 3 e 15 dias (Castro & Lee, 1995). Em uma escala mais ampla também atua sobre o SBB o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, gerando ventos de Leste e Nordeste, que são intensificados no verão.

A estrutura vertical das correntes dessa região é regida por dois domínios hidrodinâmicos com características físicas diferentes, sendo um interior e costeiro, e outro exterior, separados por uma zona frontal térmica que fica bem definida no inverno (Castro *et. al.*, 1987). Durante o verão, a região costeira tem uma estratificação de massa em duas camadas, gerada pelo desenvolvimento da termoclina sazonal que se intensifica devido à intrusão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) em direção à costa nas camadas subsuperficiais. No inverno, a coluna da água fica mais homogênea, devido ao empilhamento recorrente na costa pelo transporte de águas mais frias da região Sul. Estudos numéricos retificaram esse padrão sazonal da penetração da ACAS nas camadas mais profundas (Silva *et. al.*, 2004), confirmando que a dinâmica da circulação do SBB é controlada tanto pelos eventos atmosféricos, quanto pela circulação da corrente do Brasil (CB).

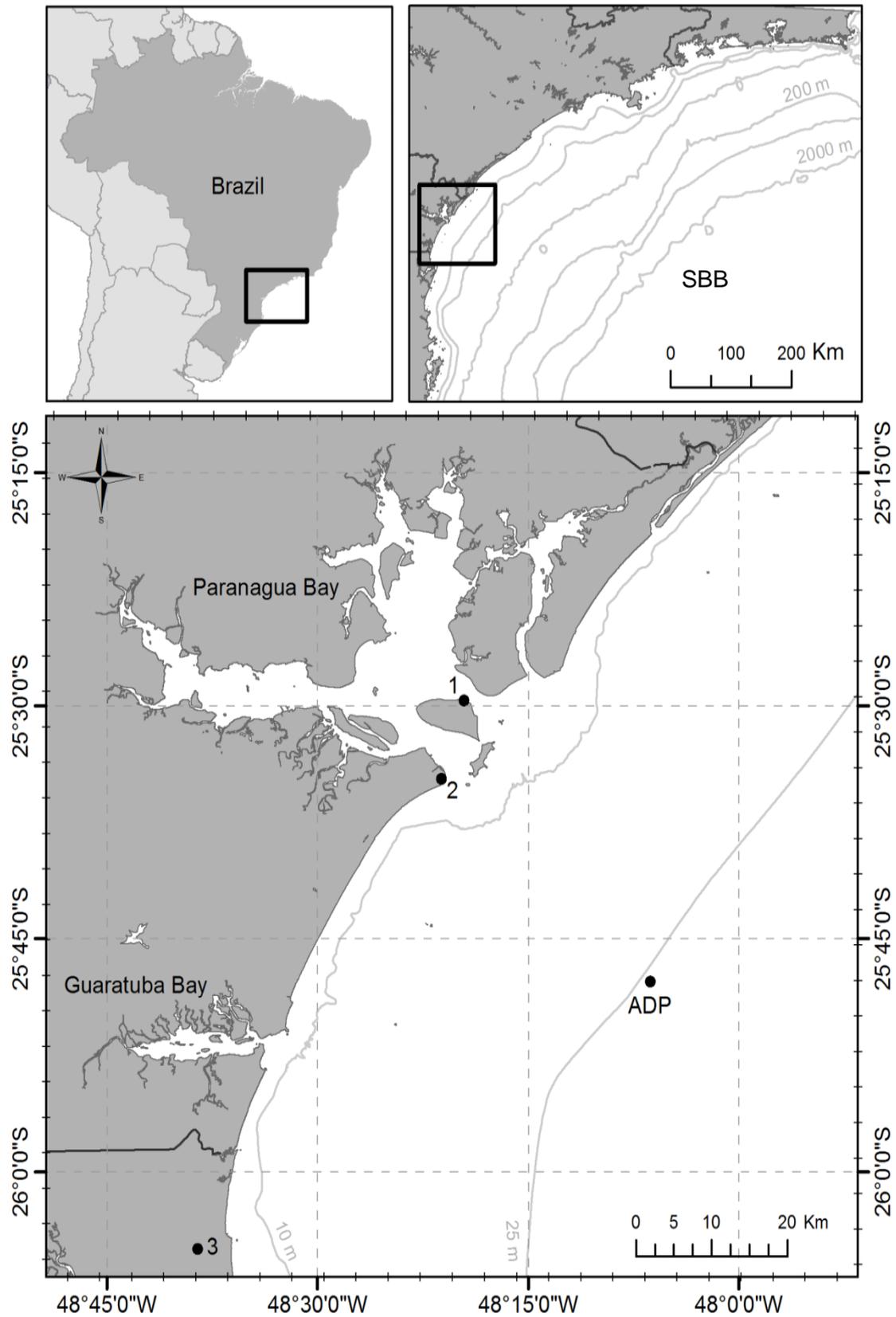


Figura 1. Área de estudo com a localização do ponto do fundeio (ADP) e das estações meteorológicas. 1 – Ilha do Mel, 2 – Pontal do Sul e 3 – Itapoá.

Em estudo sobre a influência dos sistemas atmosféricos sobre a estrutura das correntes da plataforma interna e média do estado de São Paulo, Dottori & Castro, (2009) evidenciaram que a resposta das correntes subinerciais em relação aos ventos é principalmente barotrópica. Na região ao largo da cidade de Rio Grande, RS, Zavialov *et. al.*, (2002) realizaram o primeiro trabalho com equipamentos fundeados na plataforma continental sudeste (PCSE), concluindo que a dominância de frequência de energia das correntes corresponde aos períodos de 2 a 10 dias, associados assim às forçantes meteorológicas. No entanto, próximo ao inverno há um decréscimo na correlação entre os dados de vento e corrente, atribuído ao impacto da estratificação salina formada na camada superficial causada pela descarga de água doce. Isto resulta no isolamento das camadas mais profundas das forçantes atmosféricas. Pesquisas posteriores na região da PCSE identificaram o vento como a principal forçante da hidrodinâmica (Möller *et al.*, 2008) e a parcela barotrópica representando praticamente toda variância da estrutura da coluna da água, uma vez que o sinal de maré é desprezível naquelas latitudes (Costa & Möller, 2011). Na desembocadura do Rio da Prata o vento também atua como força predominante na hidrodinâmica, no entanto a resposta baroclínica aparece representando cerca da metade da variância da coluna da água devido ao elevado aporte de água doce do Rio da Prata (Simionato *et. al.*, 2006; Simionato *et. al.*, 2007).

As correntes do SBB também sofrem influência principalmente da zona costeira, através da descarga de água doce de diversos rios e estuários que desaguam na região (Castro *et. al.* 2005). As diferenças isopícnais geradas pela descarga de água doce geram um gradiente de pressão baroclínico, que forçam as correntes a se deslocarem para Norte, especialmente durante a passagem de sistemas frontais. Essa direção pode ser invertida pela ação persistente do Anticiclone Subtropical, que gera ventos de direção Leste e Nordeste.

O comportamento hidrodinâmico da plataforma interna do Paraná, na porção mais ao sul da SBB ainda é pouco conhecido. Essa região sofre a influência direta das baías de Paranaguá e Guaratuba no PR, Cananéia-Iguape em SP e de São Francisco do Sul em SC, e os trabalhos desenvolvidos na região acabam restritos aos ambientes estuarinos. Camargo & Dias (2000) modelaram dados de vento na escala de dias sobre a Baía de Paranaguá e visualizaram que os fluxos diurnos dos ventos são influenciados pela linha de costa irregular e pelo relevo da região. Em alguns casos foi possível observar uma diferença de 90° a até 180° entre as médias de vento do interior da baía de Paranaguá e da região costeira. Noernberg *et. al.*, (2007) determinaram que a região do canal de navegação da Baía de Paranaguá é controlada principalmente pelas correntes de maré, atuando principalmente sobre a

componente transversal das correntes. Porém, em situações de agitação marítima a componente longitudinal passa ganhar importância nos processos hidrodinâmicos.

Considerando as características da morfologia costeira e o diferenciado aporte continental associado aos estuários na região, o comportamento hidrodinâmico e a resposta da estrutura vertical das correntes na plataforma interna do Paraná pode não ser a mesma das encontrados em outras áreas da SBB. Desta maneira, o trabalho tem como objetivo principal a análise da estrutura vertical das correntes na plataforma continental interna do Paraná através de uma série temporal de 342 dias, e a identificação das principais forças moduladoras da coluna da água nesta região.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1 Corrente e Temperatura

Foram utilizados 342 dias de dados de correntes e temperatura obtidos pelo correntômetro acústico – ADP (*Acoustic Doppler Profiler*) Sontek/YSI fundeado em 19 de fevereiro de 2009 próximo à isóbata de 30 metros, a aproximadamente 36 km da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), em 25° 47' 46.4" S e 48° 06' 15" O (Figura 1), e retirado em 27 de janeiro de 2010.

O ADP, com frequência de 1 MHz, registrou dados médios da intensidade e direção das correntes durante um minuto a cada trinta minutos para células verticais de 1,2 m. A temperatura foi registrada apenas na camada mais profunda. Esse fundeio integra os dados obtidos pelo projeto “Características Hidrográficas da Plataforma Rasa Paranaense (CNPq n.º 480428/2007-7)”.

2.2 Vento

Dados horários de direção e intensidade do vento, obtidos por três estações meteorológicas, foram utilizados para o mesmo período dos dados de correntes. As estações utilizadas foram Ilha do Mel - PR (25°29'40" S, 48°19'33" O), Pontal do Sul – PR (25°34'46" S , 48°34'46" O), pertencente ao Centro de Estudos do Mar, e Itapoá - SC (26°04'53" S , 48°38'30" O) (Figura 1). As estações Ilha do Mel e Itapoá pertencem ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

2.3. Preparação e análise dos Dados

Primeiramente foi realizada uma inspeção nas séries temporais para identificar períodos com problemas nas leituras dos valores, ou perda de informações. Por precaução, os valores de correntes com profundidades menores que 3,6 m foram descartados, uma vez que podem ocorrer problemas com dados de correntes próximos à superfície, causados por uma redução acima do normal no nível do mar (Simionato *et. al.*, 2005; Simionato *et. al.*, 2006), ou pela passagem de sistemas frontais, que podem gerar turbulência e conseqüentemente introduzirem ruídos indesejáveis. Desta forma, foram analisadas 18 camadas ao longo da coluna da água.

Nos dados de vento foram encontrados períodos sem informação, possivelmente devido a problemas e falhas nos sensores. Os valores mais

consistentes foram os obtidos pela estação meteorológica de Pontal do Sul, que apresentou menor frequência de erro de leitura (cerca de 7%) na série analisada. Intervalos pequenos sem dados de vento (< 6 horas) foram preenchidos através de interpolação linear, para períodos maiores foi efetuada uma regressão linear com os dados de vento disponíveis na estação de Itapoá. Essa estação foi à escolhida por apresentar a maior correlação com a de Pontal do Sul ($r=0,4$).

Para uniformizar a frequência dos dados de vento e correntes, foram utilizados os valores horários das correntes para as análises e correlações. As séries de vento e corrente tiveram as devidas correções magnéticas e de orientação da costa corrigidas e os vetores decompostos em uma componente transversal (u) e outra longitudinal à linha de costa (v), seguindo o método de Miranda *et. al.* (2002). No sentido longitudinal os valores positivos indicam ventos de Sul e correntes fluindo para Norte, para o sentido transversal os valores positivos indicam correntes para Leste (em direção ao oceano).

Para eliminar os sinais de alta frequência (brisa do vento, maré e período inercial, este correspondente a aproximadamente 28h para a região de estudo) foi utilizado um filtro de passa-baixa do tipo Lanczos-Cosseno (Thompson, 1983), com uma frequência de corte de 1/40 horas, que remove 95% das oscilações com frequências menores que 1/25 horas.

As oscilações dominantes na série de dados foram determinadas através da análise espectral que particiona a variância em função da frequência, baseada na transformada Rápida de *Fourier* (FFT – *Fast Fourier Transform*). Esta técnica permite a caracterização detalhada da distribuição da variância de cada uma das séries no domínio da frequência (Emery & Thomson, 2004). Para análise de correntes, diversos autores (Simionato *et. al.*, 2005; Costa & Moller, 2011) basearam esta análise no método de Welch (1967), utilizando uma janela do tipo *Hanning*, com sobreposição de 50% e intervalo de confiança de 95%. Esta metodologia se faz necessária para aumentar a confiabilidade estatística da análise, embora exista a perda de resolução espectral.

A análise da variação das correntes no tempo e espaço foi realizada através da determinação dos eixos de maior e menor variabilidade das correntes, bem como o ângulo entre eles, e representados na forma de elipses (Preisendorfer & Mobley, 1988). Para uma melhor compreensão sobre diferentes períodos da série, esses dados foram separados sazonalmente em três profundidades, as quais representam as camadas de superfície, meio e fundo da coluna da água.

Realizadas as primeiras análises, notou-se a ampla variabilidade anual nas variáveis medidas. Para compreender de forma mais clara as estruturas encontradas,

foram selecionados três períodos, de 30 dias cada, que apresentaram respostas distintas às forçantes atuantes. Tais períodos correspondem ao final do verão e início da primavera de 2009, ao inverno do mesmo ano, e ao início do verão de 2010. Por questões práticas, somente cinco camadas das correntes, correspondentes às profundidades de 3,6 m, 7,2 m, 13,2 m, 19,2 m e 24 m, são apresentadas.

Nesses três períodos foram realizadas as análises das componentes longitudinal e transversal à costa para as cinco camadas. Também foram realizadas análises da defasagem das correntes em relação ao vento pelas componentes filtradas através do método de correlação cruzada descrito em (Emery & Thomson, 2004).

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidade temporal

A temperatura de fundo apresentou alta variabilidade nos dois períodos de verão amostrados (Figura 2). Para esses períodos os valores oscilaram entre 20 e 26°C na escala de dias. A partir de abril, a temperatura cai mais uniformemente até atingir um mínimo de 18,3°C em primeiro de agosto. A partir de então começa a aumentar progressivamente até início de dezembro.

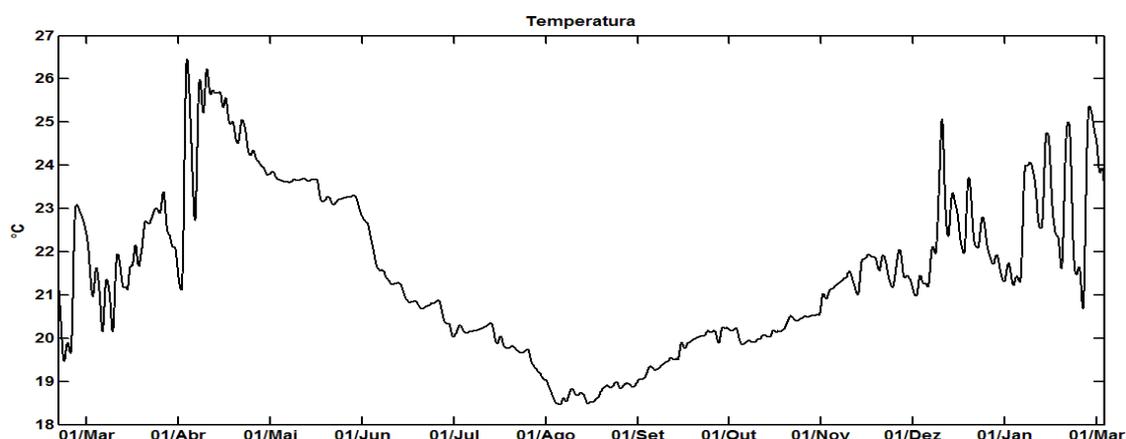


Figura 2. Variabilidade de baixa frequência da temperatura de fundo durante todo o período do fundeio.

A intensidade e direção dos ventos obtidos simultaneamente nas estações meteorológicas da Ilha do Mel, Pontal do Sul e Itapoá apresentaram ventos mais intensos de quadrante Sul (Figura 3), principalmente em Pontal do Sul. Os ventos do quadrante Norte aparecem com maior frequência nas outras duas estações. Ao final da série foram encontradas falhas de captação dos dados na estação Ilha do Mel e Pontal do Sul. A estação de Itapoá apresentou pequenas falhas em diversos períodos do ano.

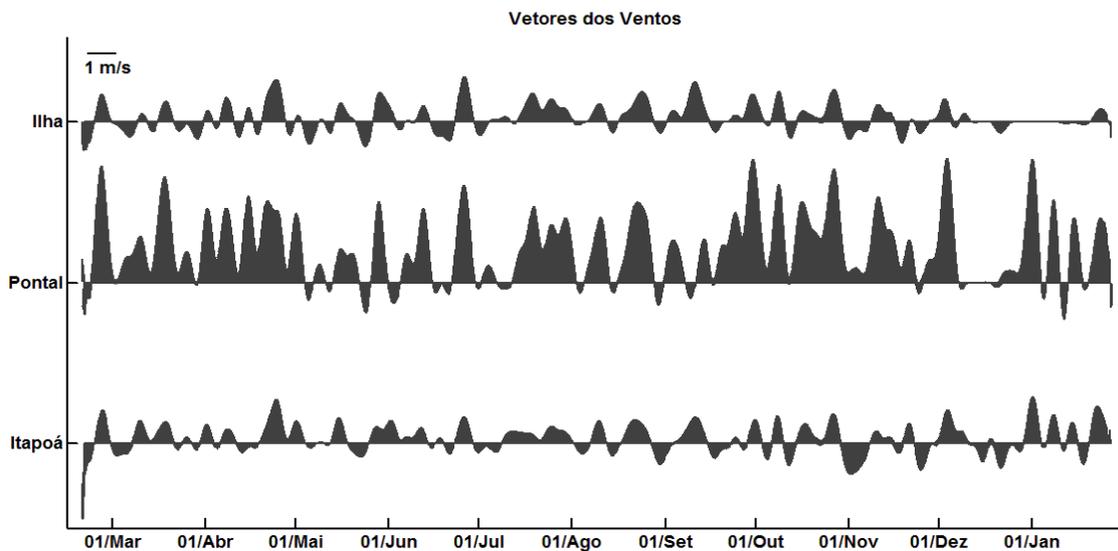


Figura 3. Variabilidade de baixa frequência da direção e intensidade dos ventos nas três estações meteorológicas. Valores negativos indicam ventos do quadrante N e positivos do quadrante S. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

A variabilidade das intensidades e direções das correntes em todos os níveis da coluna da água são apresentados na figura 4. A primeira característica que emerge desta figura é a variabilidade em sua estrutura vertical na escala de poucos dias durante todo o ano. A velocidade das correntes varia de acordo com a profundidade, na primeira metade da série nota-se um padrão semelhante na estrutura das camadas superficiais ($> 10\text{m}$), com uma pequena atenuação de intensidade nas camadas centrais, e posterior ganho de velocidade a partir dos 14 metros de profundidade. Na segunda metade da série as intensidades se mantêm preservadas ao longo da coluna da água, com um ganho de velocidade entre 8 e 14 metros. A direção das correntes é preservada verticalmente para quase todo o período.

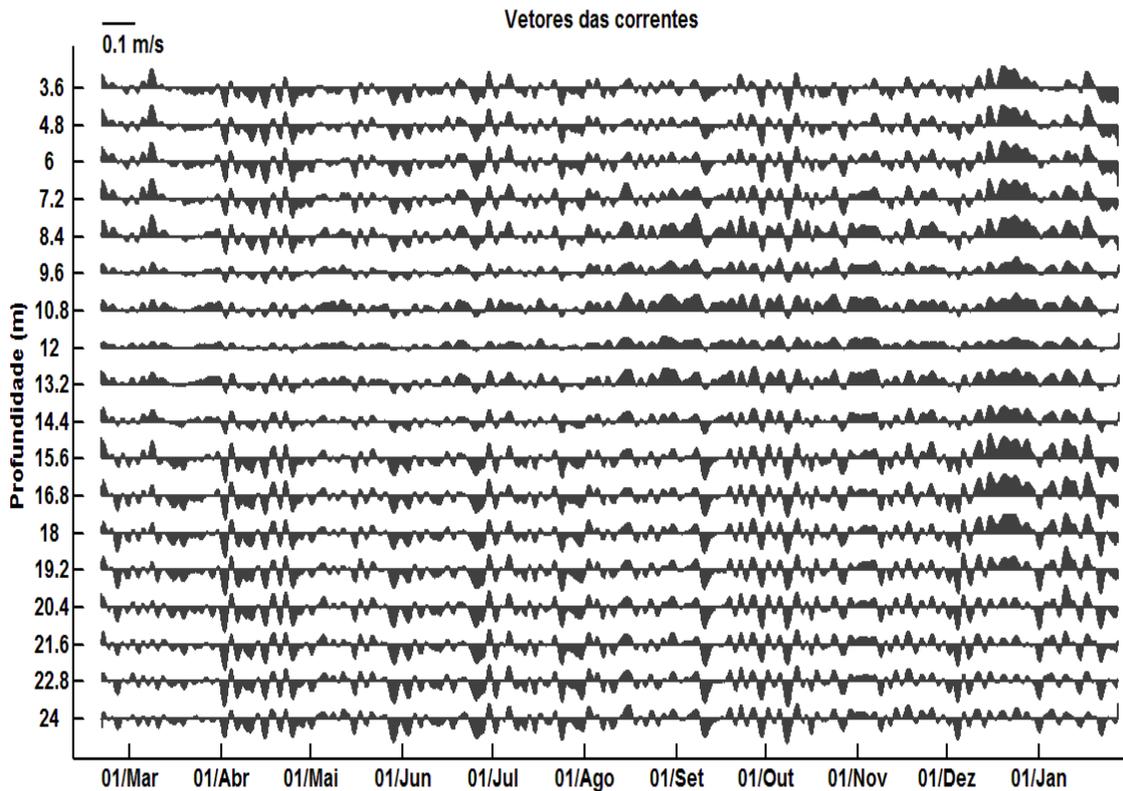


Figura 4. Variabilidade de baixa frequência das correntes nas diferentes profundidades. Valores negativos indicam correntes do quadrante S e positivos do quadrante N. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

A variabilidade sazonal das correntes na camada superficial (Figura 5a) foi maior na primavera, com o eixo de maior variabilidade cruzando as isóbatas paralelamente à costa, no sentido Norte/Sul. Porém, também há influência do eixo perpendicular nesta estação, indicando movimentos de corrente nesse sentido. O vetor médio deste período é próximo a zero. A variação encontrada no outono e inverno são semelhantes, com a maior variabilidade encontrada no eixo longitudinal a costa. Nesses períodos o eixo de menor variação apresenta menor influência. No outono o vetor médio está voltado para Nordeste, com velocidade próxima dos 4 cm/s, enquanto que no inverno o vetor médio está voltado para Noroeste, com cerca de 2 cm/s. No verão a variabilidade do eixo transversal é maior que no outono e inverno, mas o principal eixo é o longitudinal a costa. Nessa estação o vetor médio está voltado para Sudoeste, com cerca de 3 cm/s. Na camada intermediária (Figura 5b) o eixo das maiores variabilidades estão orientados no sentido Sudoeste/Nordeste, mais inclinados em relação as linhas batimétricas. No verão, o eixo principal está alinhado com a batimetria. Na primavera são encontradas as maiores variabilidades no eixo paralelo à costa, mas também há influência do eixo transversal. O vetor médio está em

direção a costa, com cerca de 20cm/s. Nas demais estações há uma variabilidade semelhante, com o inverno tendo a maior influência do eixo perpendicular a costa. Os vetores médios estão em direção a costa, apresentando intensidade média de aproximadamente 15 cm/s. Na camada mais profunda (Figura 5c) encontramos as variabilidades no outono e inverno acompanhando o sentido das linhas batimétricas, no sentido Sudoeste/Nordeste, enquanto na primavera e verão os eixos principais estão mais inclinados em relação a batimetria. No entanto, as variações são bem reduzidas e as médias dos vetores para todas as estações ficam próximas a zero.

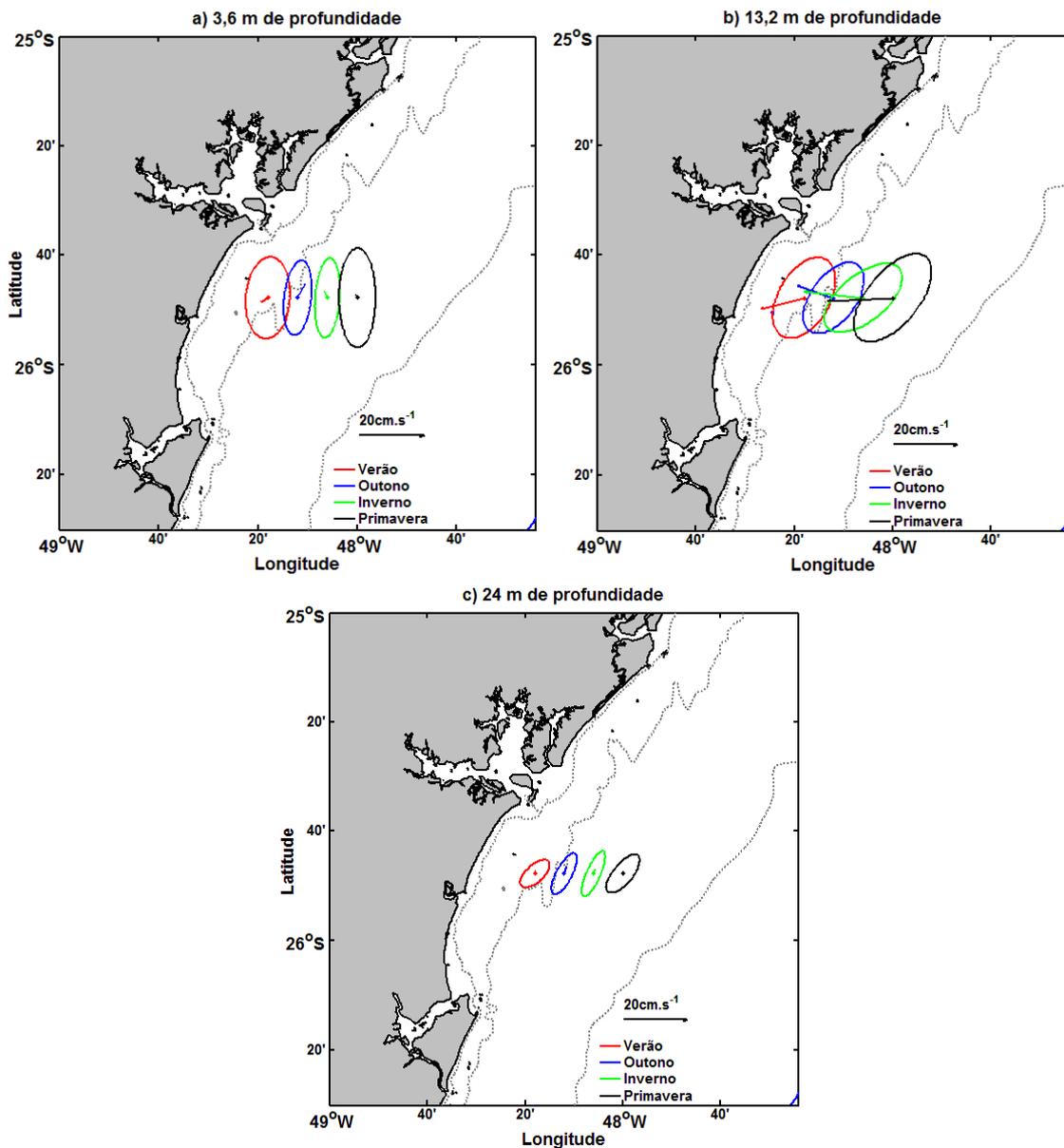


Figura 5. Variabilidade sazonal das correntes e vetor médio em três camadas da coluna da água – 3,6 m (a), 13,2 m (b), 24 m (c). As linhas batimétricas representam as isóbatas de 10, 20 e 50 metros. As elipses foram deslocadas para melhor visualização. O ponto do fundeio está localizado no centro da elipse referente ao inverno.

3.1 Análise Espectral

As estimativas de densidade espectral calculadas para as componentes longitudinal e transversal da série de dados de vento filtrados indicam picos de energia distintos. Para a componente longitudinal as maiores amplitudes ocorrem nos períodos de 4,4 dias, 5 dias, 6,4 dias e 17 dias, enquanto que na componente transversal os picos mais energéticos se encontram nas frequências de 3,3 dias, 5,2 dias, 10,7 dias e 31 dias (Figura 6).

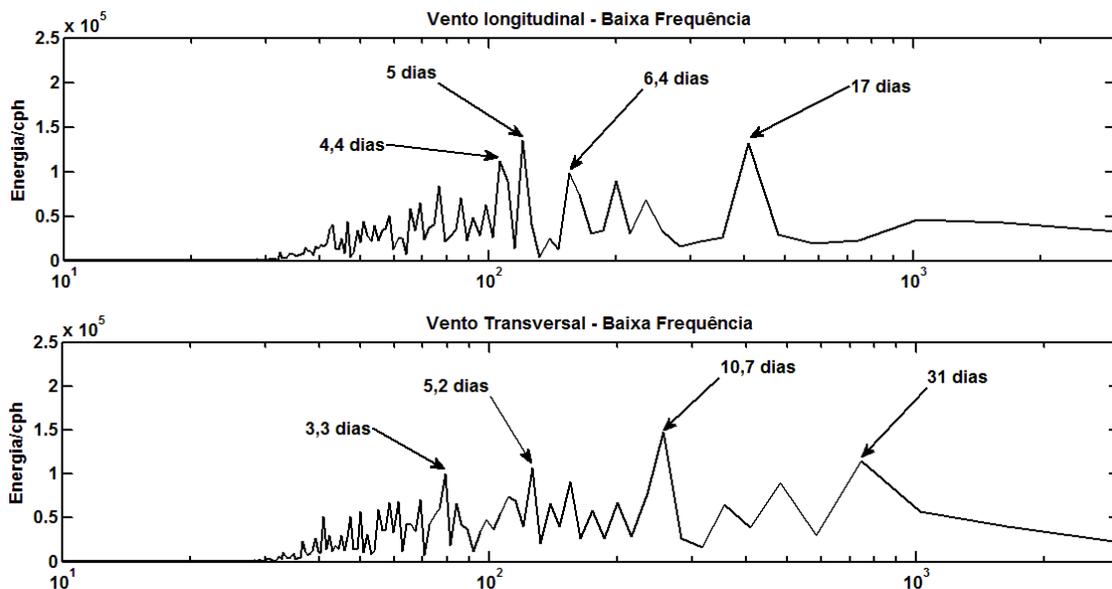


Figura 6. Densidade espectral de baixa frequência da componente longitudinal (acima) e transversal (abaixo) do vento.

A mesma análise foi realizada para os dados de corrente para cinco profundidades. A componente longitudinal não apresenta picos de energia predominantes nas camadas analisadas, as frequências ficam centradas entre 2 e 42 dias. Vale ressaltar que as maiores amplitudes energéticas são encontradas na camada intermediária, e as menores na camada de fundo (Figura 7). Os espectros de baixa frequência da componente transversal também não apresentam picos pronunciados, com as maiores frequências encontradas entre 3 e 42 dias. A camada central é a mais energética, e a de fundo a que apresenta os menores valores (Figura 8).

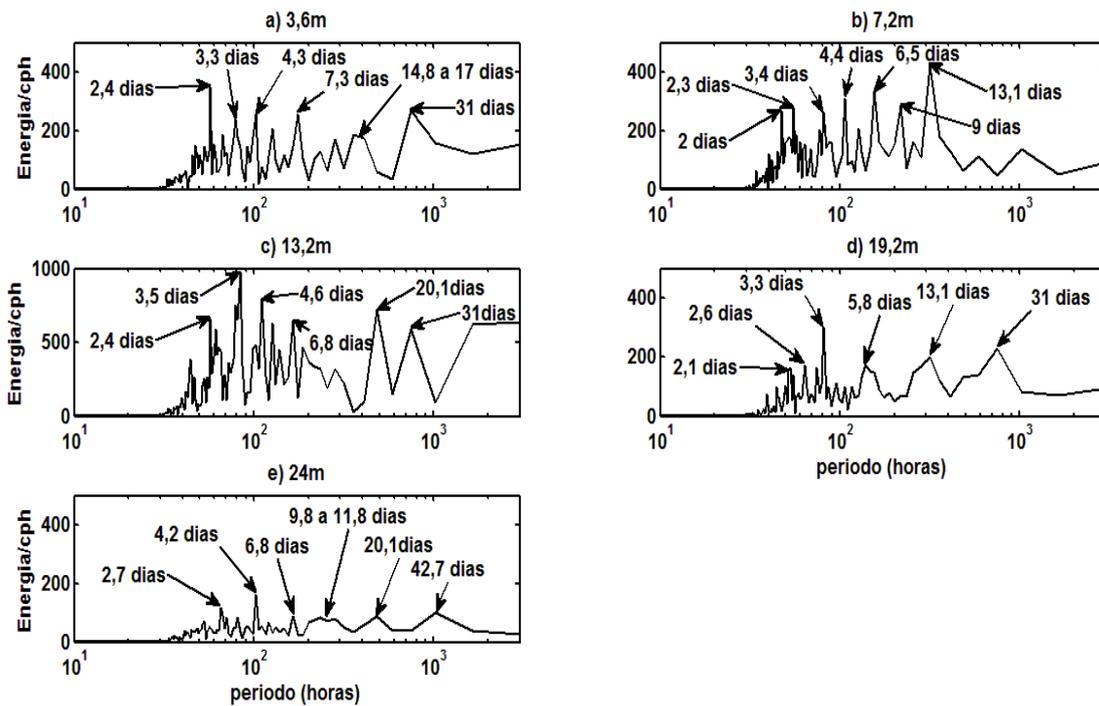


Figura 7. Densidade espectral de baixa frequência da componente longitudinal da corrente, para as profundidades 3,6m(a), 7,2m(b), 13,2m(c), 19,2m(d) e 24m(e).

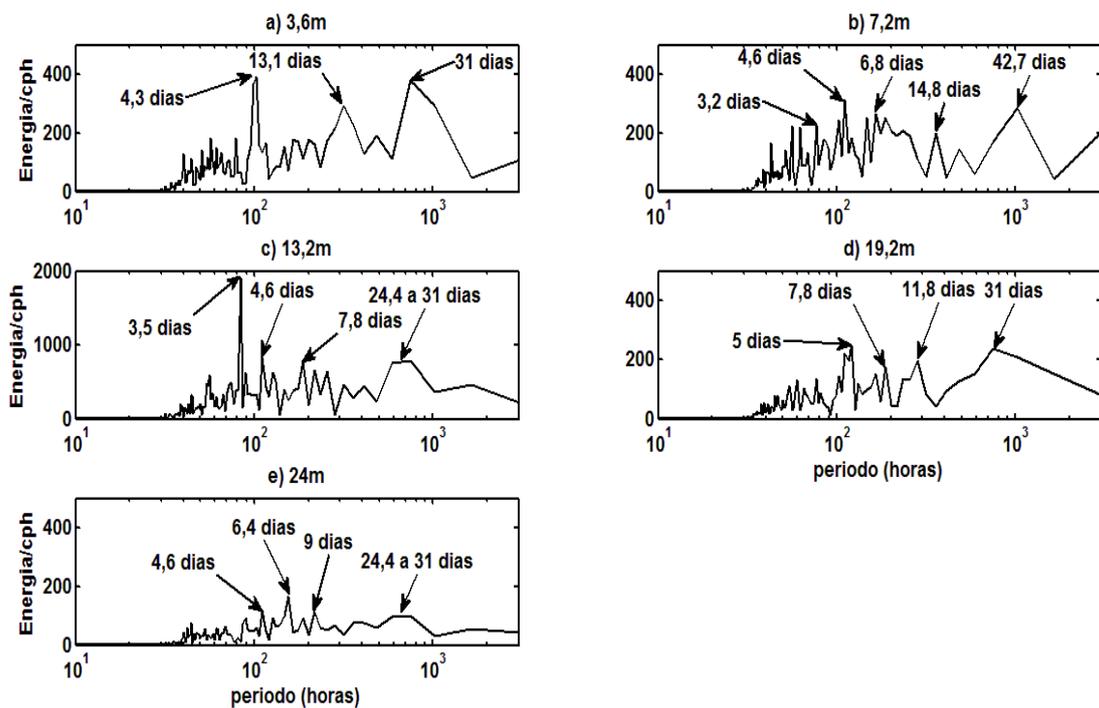


Figura 8. Densidade espectral de baixa frequência da componente transversal da corrente, para as profundidades 3,6m(a), 7,2m(b), 13,2m(c), 19,2m(d) e 24m(e).

3.3 Resposta das correntes a eventos na escala de dias

A análise de eventos na escala de dias foi concentrada em três períodos de 30 dias com diferentes processos atuando sobre a coluna da água.

No período entre 15 de março e 15 de abril de 2009 a variação de temperatura na primeira quinzena permaneceu relativamente constante, ficando entre 22 e 23°C, mesmo com a presença de ventos de quadrante Sul entre os dias 15 e 20 de março (Figura 9). Um aumento maior que 5°C na temperatura é observado em aproximadamente 48 horas no início de abril, logo após a passagem de ventos intensos do quadrante Sul. Em seguida há uma inversão na direção dos ventos, levando a um decaimento de aproximadamente 3°C entre 03/04 e 05/04, chegando próximo dos 23°C. Em 05/04 ventos de Sul voltam a atuar, permanecendo constantes por seis dias. Nesse período a temperatura volta a aumentar para cerca de 26°C, permanecendo relativamente constante até o final da série analisada, mesmo com a incidência de ventos de Norte no dia 13/04.

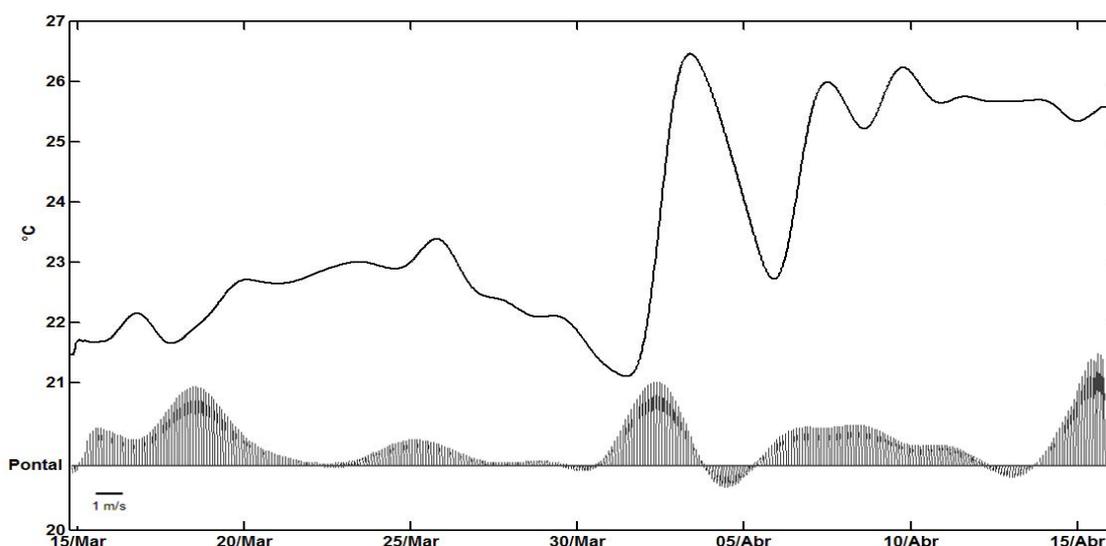


Figura 9. Variabilidade de baixa frequência da temperatura de fundo e da direção e intensidade dos ventos na estação de Pontal do Sul entre 15 de março e 15 de abril de 2009. Valores negativos indicam ventos do quadrante N e positivos do quadrante S. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

As correntes desse período indicam uma alta variabilidade na estrutura vertical da coluna da água, com inversões no sentido das correntes ocorrendo na escala de poucos dias. Nos primeiros cinco dias observa-se uma preservação da direção e das intensidades ao longo da estrutura vertical (Figura 10). Próximo ao dia 25 de março nota-se a intensificação de correntes fluindo para o quadrante Norte nas camadas

intermediárias, entre 8 e 14 metros. Em primeiro de abril ocorre à inversão no sentido das correntes, seguido de uma diminuição de intensidade. No dia 5 de abril ocorre outra inversão de sentido, mais evidente na camada intermediária. Nos dias seguintes é vista uma estrutura de correntes fluindo para Sul de forma homogênea em toda a coluna da água, permanecendo relativamente constante até o final do período analisado. Essas inversões de sentido em abril correspondem aos períodos de ventos do quadrante Sul.

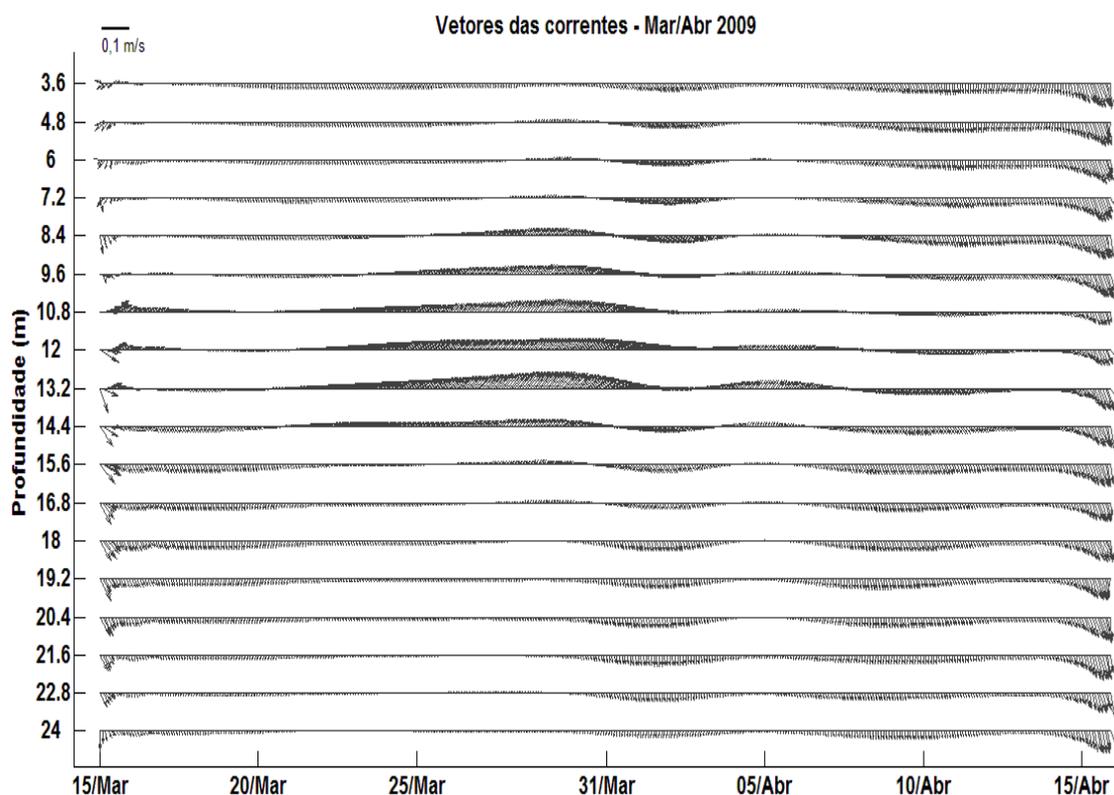


Figura 10. Variabilidade de baixa frequência das correntes nas diferentes profundidades entre 15 de março e 15 de abril de 2009. Valores negativos indicam correntes do quadrante S e positivos do quadrante N. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

A corrente transversal apresenta respostas diferentes de acordo com as profundidades, com a camada intrermediária apresentando as maiores intensidades (Figura 11). Próximo a 25 de março há um aumento de intensidade para Leste nas três primeiras camadas, mantendo-se durante cerca de dois dias, enquanto que nas camadas mais profundas esse fluxo é negativo, fluindo para oeste. Desta forma, a água flui em direção ao oceano na superfície e para a costa no fundo. Próximo a 3 de abril a camada superficial apresenta uma amplitude negativa, indicando corrente superficial em direção a costa. Esse sentido também é observado nas próximas três

camadas, no entanto, na camada mais profunda o sentido é o inverso, o que indica a entrada de água na costa pela superfície e a saída pelo fundo. Esse padrão também é observado próximo ao dia sete de abril. Esses dois últimos períodos destacados da série correspondem a ocorrência de ventos mais intensos do quadrante Sul e ao aumento de temperatura da camada profunda.

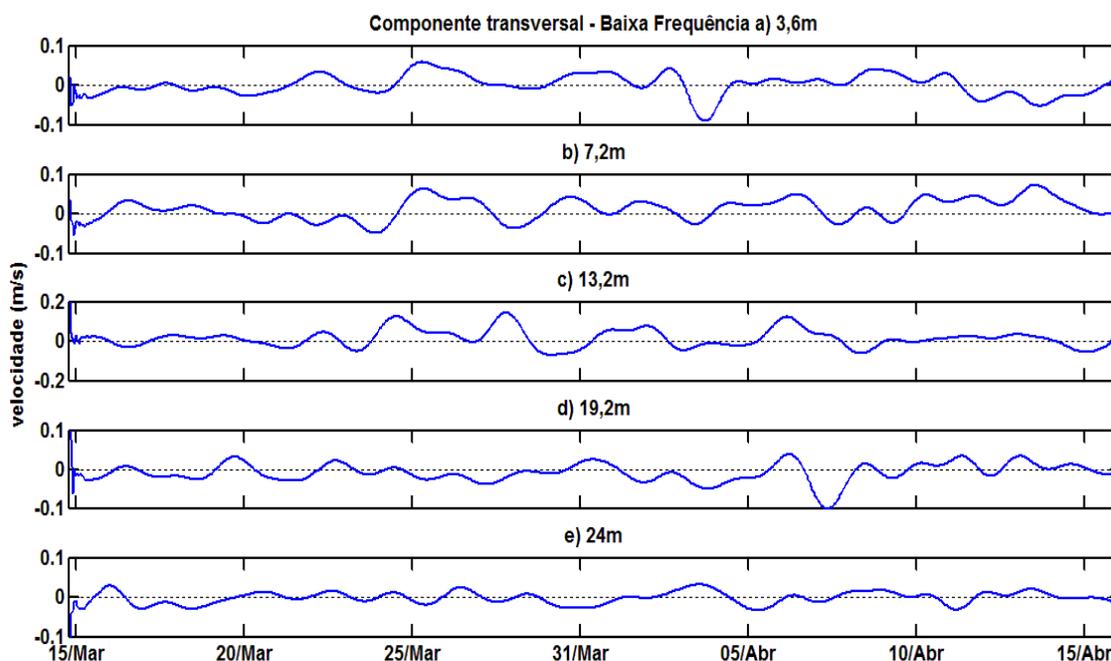


Figura 11. Séries temporais filtradas da componente transversal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, entre 15 de março e 15 de abril de 2009. Valores positivos indicam fluxos para Leste.

A corrente longitudinal também apresenta diferentes respostas em relação as camadas analisadas, com as intensidades e direções nas profundidades de 13,2 e 19,2 metros destoando de forma mais evidente das demais camadas (Figura 12). As primeiras duas camadas se mantém relativamente constantes durante os 10 primeiros dias da série, com valores próximos a zero. Nas duas camadas subsequentes pode ser observada uma oscilação mais marcada de sentido da corrente. Próximo ao dia 25 de março nota-se a presença de correntes fluindo para Norte nas três primeiras camadas, seguidas por uma suave inversão de fluxo nas maiores profundidades. No mês de abril as inversões de sentido das correntes são seguidas em todas as camadas, praticamente para todos os dias, ocorrendo na maioria dos perfis uma diminuição da intensidade do fluxo com o aumento da profundidade. Esse perfil é bem evidente no dia 9 de abril, em que os fluxos são para Norte, diminuindo de intensidade a medida em que se aumenta a profundidade.

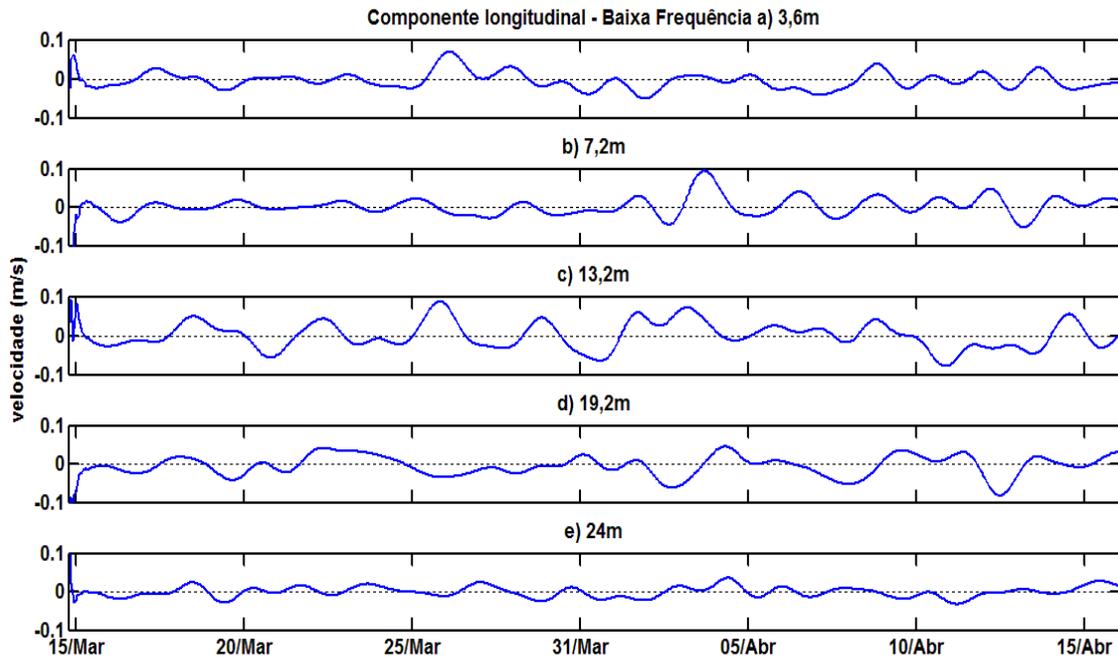


Figura 12. Séries temporais filtradas da componente longitudinal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, entre 15 de março e 15 de abril de 2009. Valores positivos indicam correntes fluindo para Norte.

As análises de correlação cruzada entre as componentes do vento e da corrente superficial (3,6 m) que apresentaram significância estão demonstradas na figura 13. O vento longitudinal apresentou correlação ($r = 0,26$) com a corrente longitudinal após 15 horas de defasagem, enquanto que o vento transversal foi correlato com a corrente transversal ($r = 0,23$), com atraso de fase de 10 horas. Para esse período o vento não apresentou uma correlação significativa com as camadas mais profundas da coluna da água.

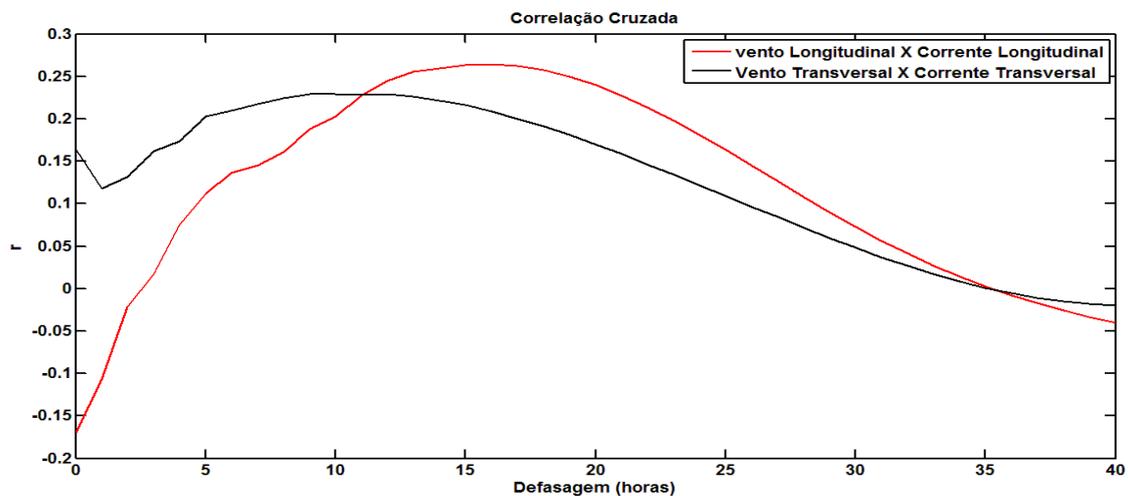


Figura 13. Correlação entre as componentes do vento e da corrente superficial entre 15 de março e 15 de abril de 2009.

A variação de temperatura permaneceu relativamente constante no mês de agosto de 2009, variando entre 18,5 e 19,5°C. Embora as oscilações presentes sejam mais sutis, pode-se notar um aumento de aproximadamente 0,5°C na temperatura no dia cinco, coincidente com a passagem de ventos do quadrante Sul. Próximo ao dia 10 ocorre um decaimento da temperatura, juntamente com o início dos ventos de Norte. Entre 15/08 e 25/08 os ventos de quadrante Sul aparecem mais intensos e contínuos, e a temperatura se eleva gradativamente até o final do período, mesmo com a inversão dos ventos no final do período, onde é registrado o valor máximo para essa série (19,3°C).

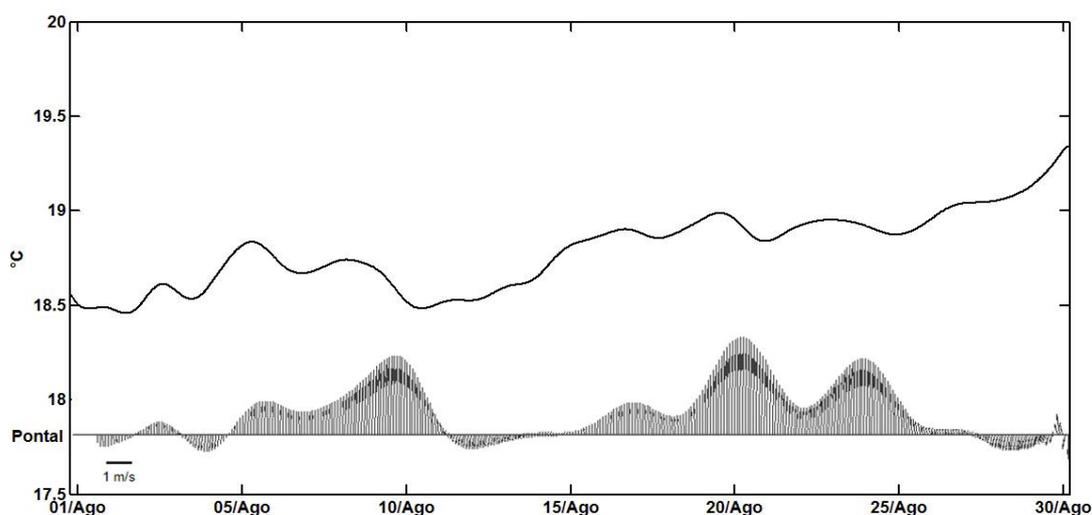


Figura 14. Variabilidade de baixa frequência da temperatura de fundo e da direção e intensidade dos ventos na estação de Pontal do Sul para agosto de 2009. Valores negativos indicam ventos do quadrante N e positivos do quadrante S. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

As correntes desse período indicam uma maior preservação da estrutura com relação à profundidade, e uma menor variabilidade ao longo de todo o mês (Figura 15). Nos primeiros cinco dias observa-se uma preservação da direção e das intensidades ao longo da estrutura vertical. As camadas intermediárias entre 8 e 14 metros são as mais intensas durante todo o mês, com sentido de correntes predominantemente para Norte. Nas camadas superficiais e profundas ocorrem algumas inversões de sentido ao longo do mês. Dois eventos podem ser destacados com as maiores intensidades, próximos aos dias 15 e 30 de agosto, com a corrente fluindo para Norte em todas as profundidades.

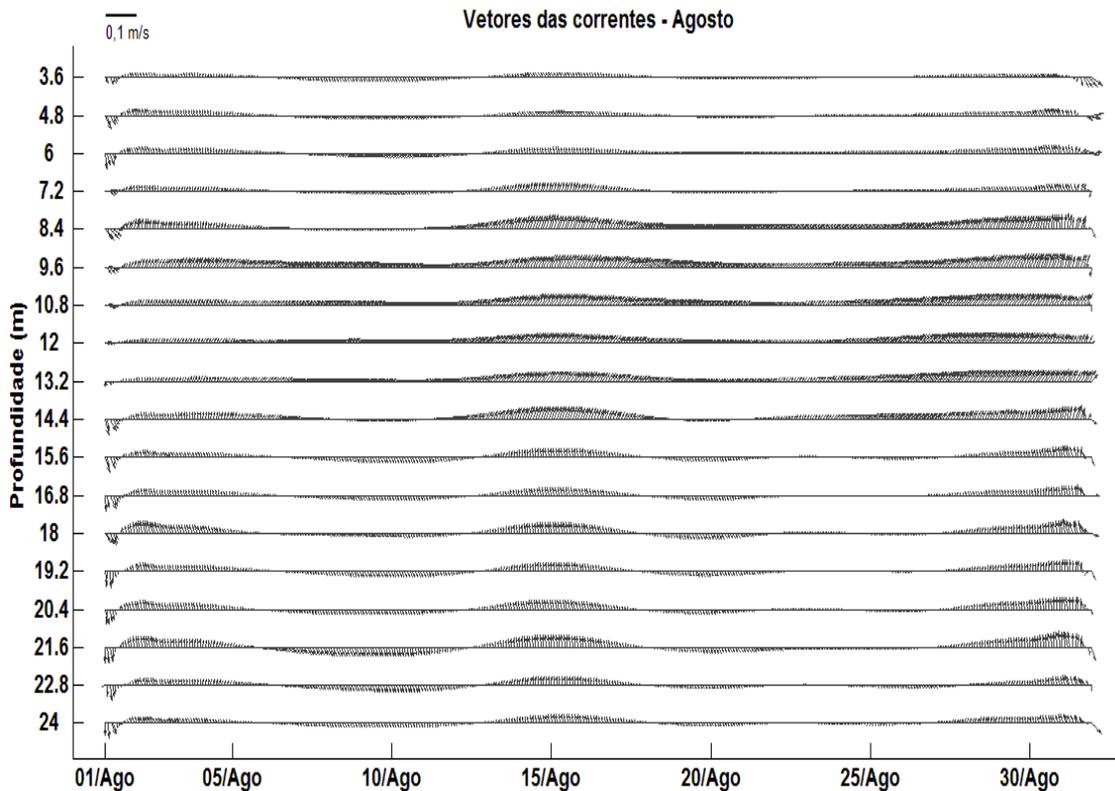


Figura 15. Variabilidade de baixa frequência das correntes nas diferentes profundidades para agosto de 2009. Valores negativos indicam correntes do quadrante S e positivos do quadrante N. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

A componente transversal apresenta oscilações de sentido ao longo de todo o mês, com as maiores intensidades encontradas na camada intermediária, por vezes destoando das direções encontradas nas demais camadas (Figura 16). Em 5 de agosto nota-se correntes fracas em direção ao oceano nas duas primeiras camadas, no entanto, a partir dos 13 metros há uma inversão de sentido com uma intensificação de fluxo, também registrado aos 19,2 metros, ocorrendo uma estabilização mais ao fundo. Próximo ao dia 9 de agosto nota-se um fluxo superficial em direção a costa, que tem seu sentido invertido a partir do meio da coluna da água. No dia 15 observa-se um fluxo em direção ao oceano em todas as profundidades. Entre os dias 20 e 25 é possível notar uma estabilidade na estrutura vertical, com os sentidos quase sempre preservados e de baixa intensidade. Próximo ao dia 27 observa-se um fluxo em direção ao oceano, que se intensifica na camada intermediária, seguido por uma queda de velocidade.

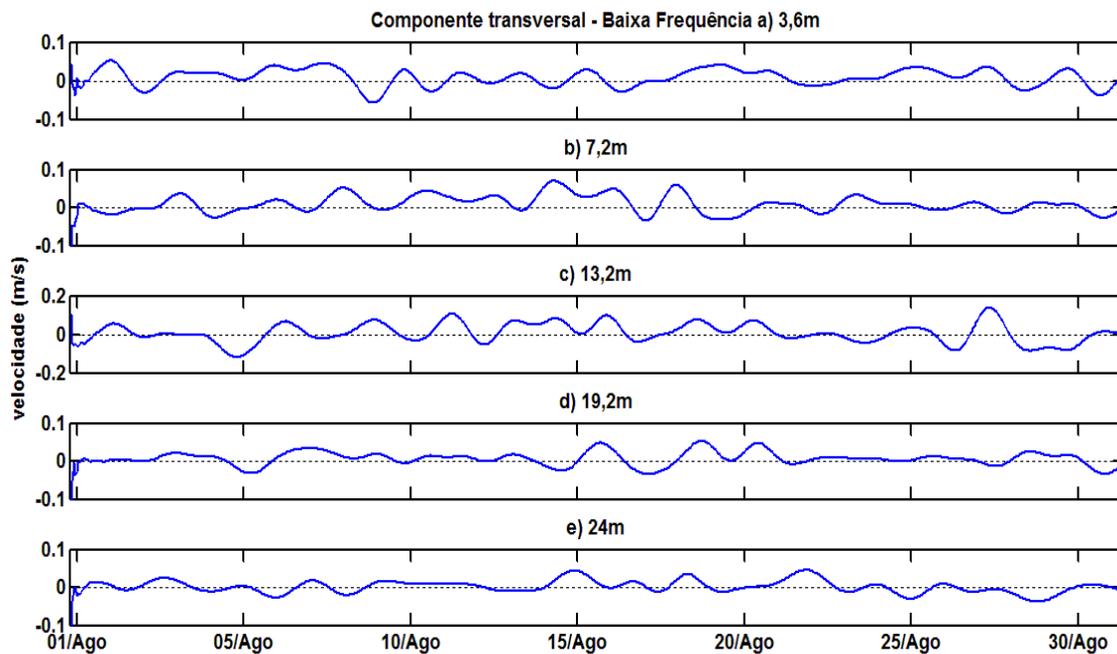


Figura 16. Séries temporais filtradas da componente transversal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, para o mês de agosto de 2009. Valores positivos indicam fluxos para Leste.

A corrente longitudinal também apresenta diferentes respostas em relação as camadas analisadas, com os fluxos muitas vezes oscilando os sentidos de acordo com as camadas analisadas. No início do mês é observada uma preservação do sentido da corrente, fluindo para Norte em todas as camadas, com as intensidades diminuindo a medida em que a profundidade aumenta (Figura 17). Próximo ao dia 12 o fluxo superficial é para Norte, invertendo o sentido a partir dos 13,2 metros, com diminuição de intensidade na última camada. No dia 19 o fluxo se mantém constante para Norte até os 24 metros, quando ocorre a inversão de sentido para Sul. Para este dia a maior intensidade foi observada no meio da coluna da água. No dia seguinte houve uma inversão do fluxo superficial, agora para Sul, seguido de uma rotação de sentido aos 19,2 metros, e uma nova inversão na última camada. Já no dia 23 o fluxo se mantém constante para Sul em toda a coluna da água. No final do mês é observado um fluxo superficial para Sul, que é invertido para Norte a partir dos 13,2 metros, onde o fluxo apresenta a maior intensidade.

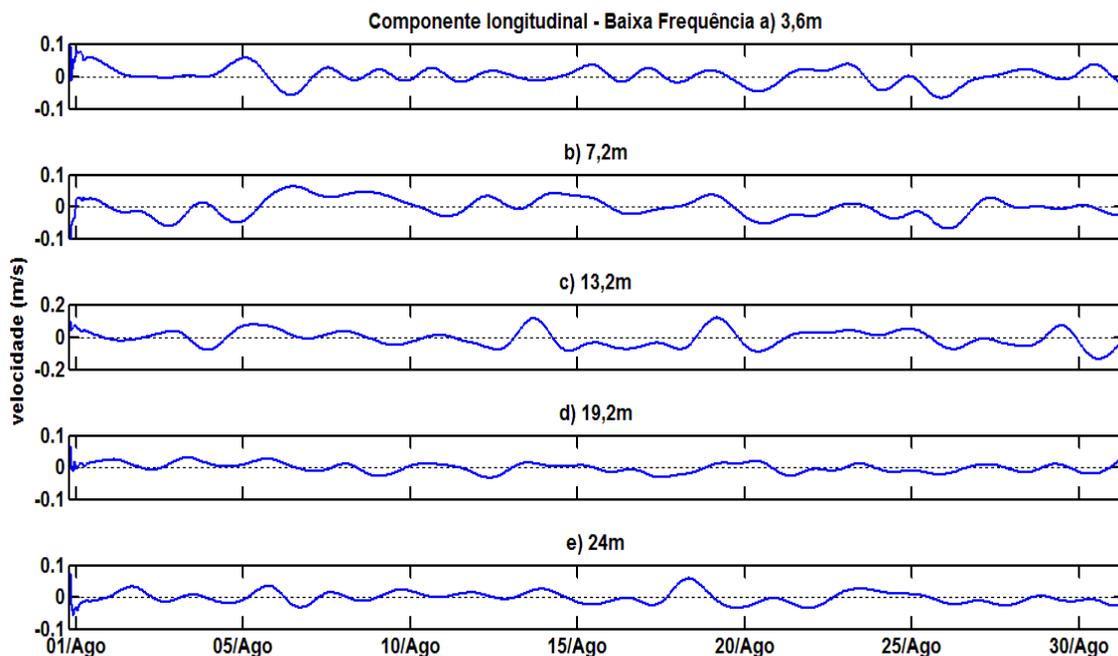


Figura 17. Séries temporais filtradas da componente longitudinal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, para o mês de agosto de 2009. Valores positivos indicam correntes fluindo para Norte.

A correlação cruzada entre as componentes do vento e da corrente superficial (3,6 m) que apresentaram significância estão demonstradas na figura 18. O vento longitudinal apresentou melhor correlação ($r = 0,3$) com a corrente transversal superficial após 21 horas de defasagem, enquanto que o vento transversal com a corrente longitudinal apresentou a maior correlação ($r = 0,17$) após duas horas de defasagem, com declínio da correlação ao longo da passagem das horas. Outra correlação significativa ocorreu entre o vento transversal e a corrente transversal, com 25 horas de atraso de fase, sendo a maior correlação após 40 horas ($r = 0,17$). Para esse período o vento também não apresentou uma correlação significativa com as camadas mais profundas da coluna da água.

Entre 15 e 30 de dezembro de 2009 os ventos mais intensos são de quadrante Norte, e a temperatura decresce cerca de 2°C , chegando 21°C . No início de janeiro os ventos de Sul atuam, e conseqüentemente as temperaturas começam a aumentar (Figura 19). Em 24 horas a temperatura aumentou uniformemente mais de 3°C . No dia 05/01 os ventos de Norte voltam a atuar, acompanhados por um decréscimo de temperatura, que torna a aumentar nos dias seguintes diante da passagem de ventos de Sul, chegando a $24,5^{\circ}\text{C}$. Entre os dias 10 e 15 de janeiro há um decréscimo na temperatura para $21,5^{\circ}\text{C}$, justamente com a ocorrência de ventos do quadrante Norte.

Ao fim da série, com a passagem de ventos de Sul, observa-se em apenas dois dias uma elevação na temperatura para 25°C.

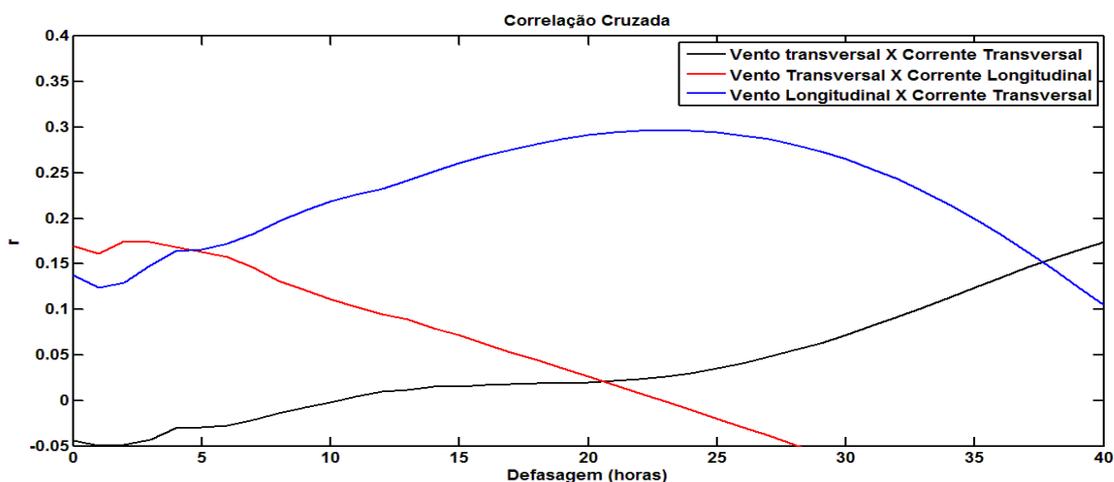


Figura 18. Correlação entre as componentes do vento e da corrente superficial para o mês de agosto de 2009.

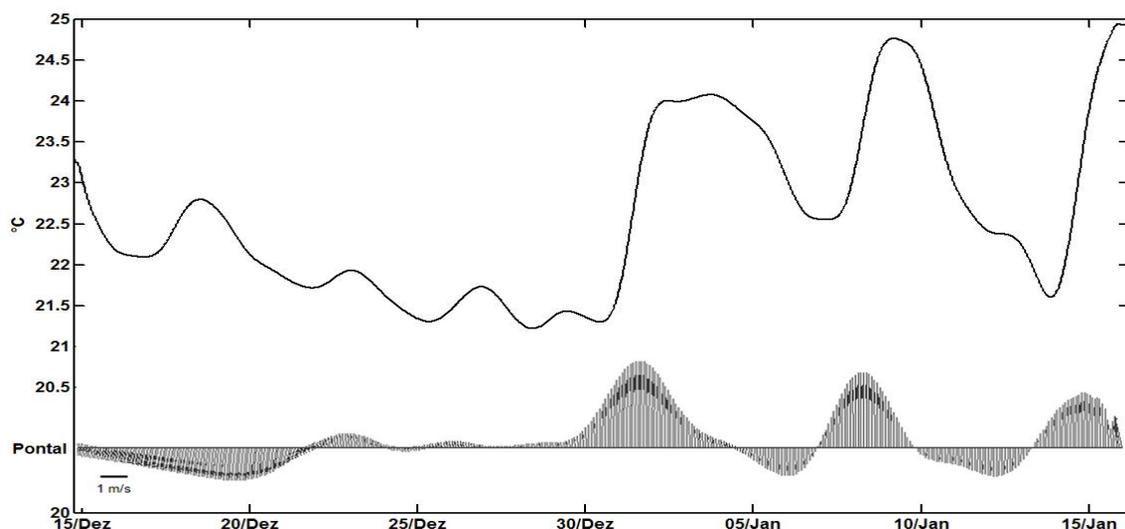


Figura 19. Variabilidade de baixa frequência da temperatura de fundo e da direção e intensidade dos ventos na estação de Pontal do Sul entre 15 de dezembro e 15 de janeiro de 2010. Valores negativos indicam ventos do quadrante N e positivos do quadrante S. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

As correntes desse período indicam preservação da estrutura com relação à profundidade até o final de dezembro, com as correntes fluindo para o quadrante Norte em toda a coluna de água (Figura 20). Pode ser observado uma intensificação de velocidade entre 7 e 18 metros, e uma atenuação nas camadas mais profundas. Próximo ao dia 31 de dezembro há uma quebra na estrutura, com a inversão do sentido das correntes, agora para Sul. Nesse período nota-se uma maior velocidade

nas camadas mais profundas, enquanto que na parte superficial e intermediária há uma grande atenuação de intensidade. Em seguida, próximo ao dia 5 de janeiro, ocorre uma nova inversão, com a corrente fluindo para Norte. Esse fluxo se mantém até o final da série amostrada. O que se destaca ainda é novamente as maiores intensidades estarem localizadas entre 8 e 20 metros.

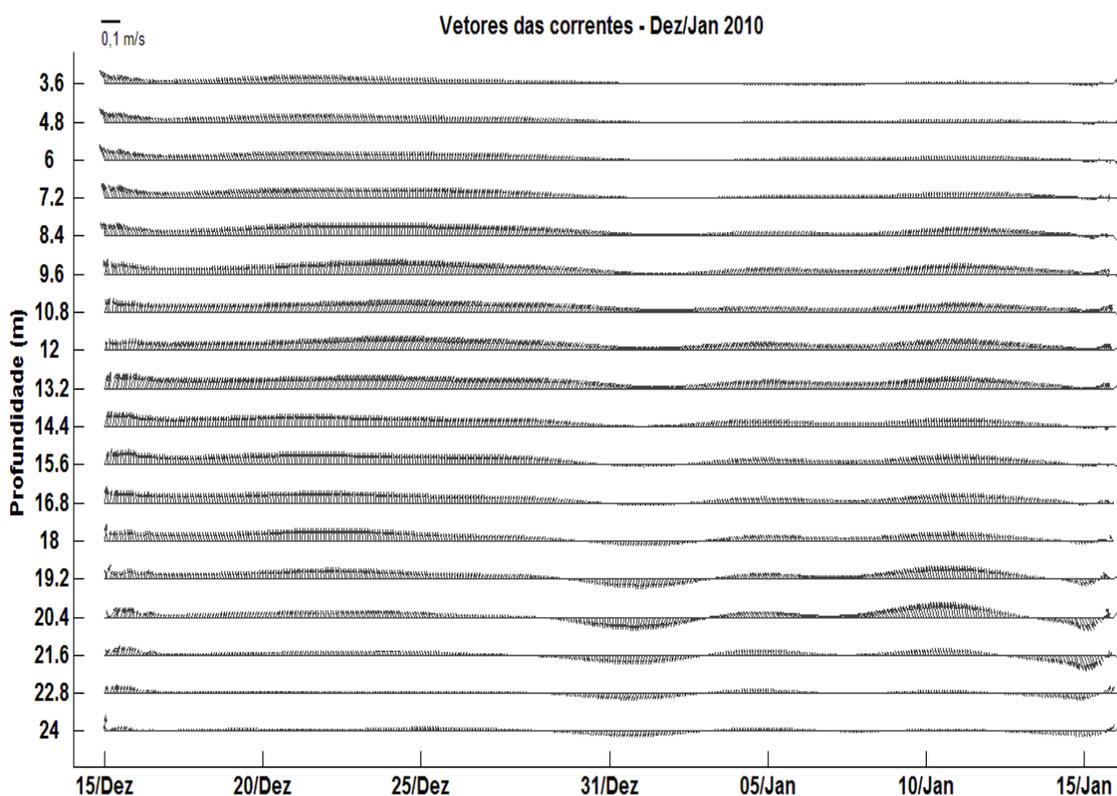


Figura 20. Variabilidade de baixa frequência das correntes nas diferentes profundidades entre 15 de dezembro e 15 de janeiro de 2010. Valores negativos indicam correntes do quadrante S e positivos do quadrante N. Com vista a uma melhor visualização nos gráficos, foram plotados dados obtidos a cada 2 horas.

Os dados filtrados decompostos da corrente transversal apresentam diversas oscilações de sentido ao longo de todo o período analisado. As direções e intensidades variam de acordo com as profundidades (Figura 21). No dia 20 de dezembro o fluxo superficial está voltado para o oceano, no entanto nas próximas três camadas o sentido está invertido, em direção a costa, já na camada mais profunda o fluxo volta a ser para Leste. No dia seguinte todo o fluxo passa a ser em direção ao oceano, com as intensidades diminuindo com o aumento da profundidade. Nos dias 30 de dezembro e 4 de janeiro voltam a ser detectados fluxos de único sentido em toda a coluna da água, em direção ao oceano. Próximo a primeiro de janeiro o fluxo das três

camadas superficiais está em direção à costa, enquanto que nas maiores profundidades o fluxo está invertido, em direção ao oceano. Em 7 de janeiro encontramos um fluxo pouco intenso em direção a costa nas quatro primeiras camadas, havendo a inversão de sentido apenas aos 24 metros de profundidade. No dia 10 de janeiro o fluxo superficial, em direção a costa, destoa do restante do perfil que apresenta o fluxo para o oceano. No último dia dessa série o fluxo de toda a coluna da água está voltado para a costa.

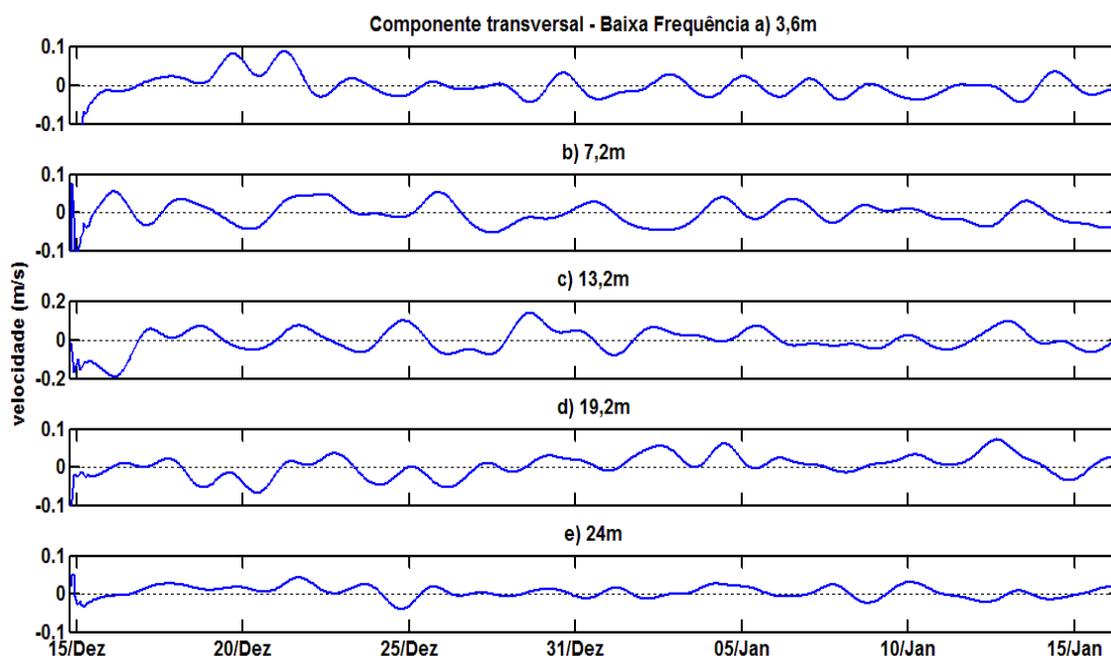


Figura 21. Séries temporais filtradas da componente transversal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, entre 15 de dezembro e 15 de janeiro de 2010. Valores positivos indicam fluxos para Leste.

A corrente longitudinal também apresenta grande variabilidade nas direções de acordo com as profundidades. Próximo aos dias 15 e 17 de dezembro pode ser notada uma preservação dos perfis, com as correntes fluindo para Norte em todas as profundidades (Figura 22). No dia 25 o fluxo das três camadas intermediárias está para Norte, enquanto que da superfície e fundo está para Sul. Próximo ao dia 28 o fluxo de corrente é para o Norte, com inversão de sentido apenas na última camada. Em 31 de dezembro a corrente flui para Sul, com excessão da camada intermediária, que apresenta sentido inverso. No dia 5 de janeiro apenas a camada superficial apresenta um fluxo para Sul, enquanto o restante do perfil flui para Norte. Já no dia 10 apenas a camada mais profunda flui para Sul, enquanto as demais apresentam fluxo

para Norte. No fim da série o fluxo para Norte ocorre na superfície e aos 19,2 metros, nas demais profundidades o fluxo é para Sul.

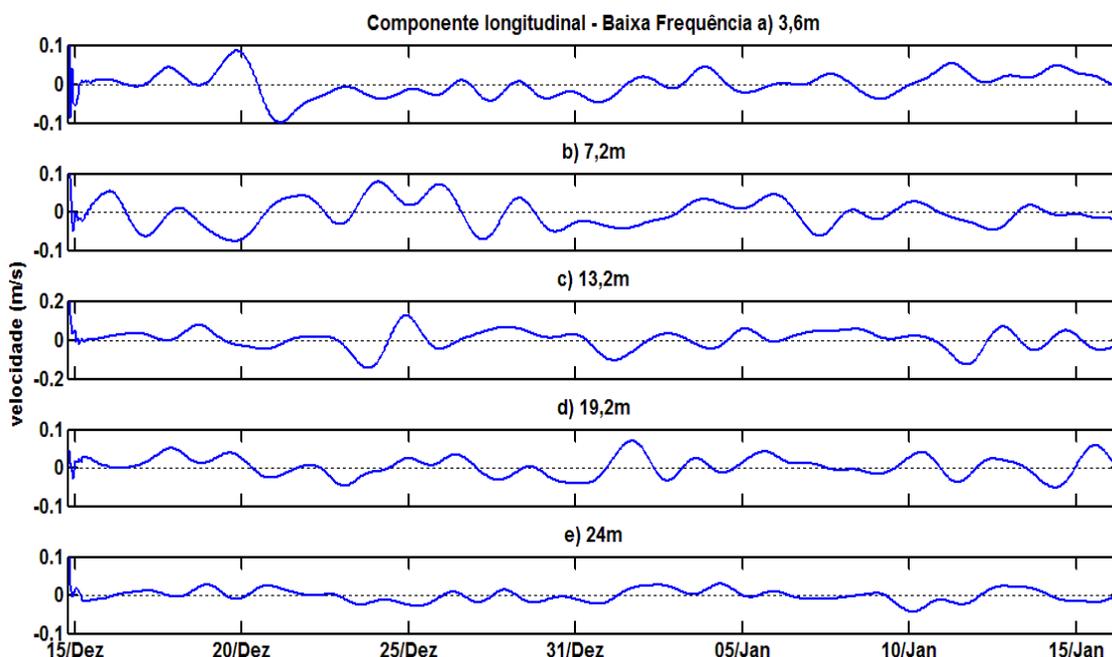


Figura 22. Séries temporais filtradas da componente longitudinal da corrente nas profundidades (a) 3,6m, (b) 7,2m, (c) 13,2m, (d) 19,2m e (e) 24m, entre 15 de dezembro e 15 de janeiro de 2010. Valores positivos indicam fluxo para Norte.

O vento transversal apresenta uma correlação praticamente constante com a corrente transversal ao passar das horas, com valor máximo ($r = 0,13$) logo no início da atuação do vento (Figura 23). Já com a corrente longitudinal a correlação é um pouco maior ($r = 0,2$), também no início da atuação do vento. O vento longitudinal apresenta correlação significativa com a corrente transversal desde o início, mas o valor máximo ($r = 0,19$) ocorre após 9 horas de defasagem. Já com a corrente longitudinal, o vento só passa a ser significativo após 16 horas de atuação, com valor máximo ($r = 0,28$) após 30 horas de defasagem. Novamente não houve correlação significativa com as camadas mais profundas da coluna da água.

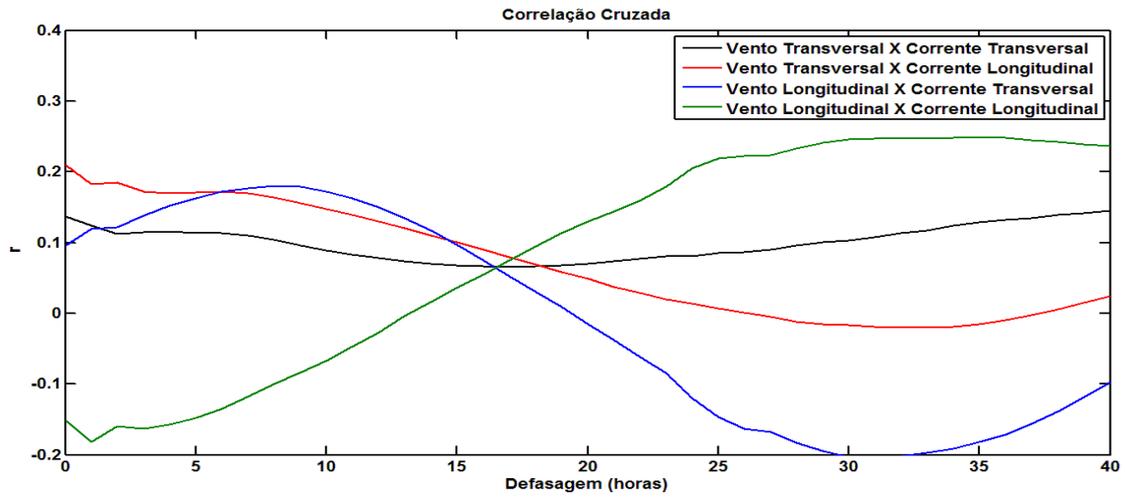


Figura 23. Correlação entre as componentes do vento e da corrente superficial entre 15 de dezembro e 15 de janeiro de 2010.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Uma série de trabalhos anteriores mostraram a estrutura e a variabilidade das águas da plataforma continental sudeste da América do Sul (Castro, 1995; Zavialov, *et. al.*, 2002; Simionato *et. al.*, 2007; Möller *et. al.*, 2008; Dottori & Castro, 2009; Costa & Moller, 2011), com o vento sempre atuando como uma forçante determinante nos principais processos da coluna da água, principalmente na região da plataforma interna e média. Porém, para a região abordada este é o primeiro trabalho sobre o tema com uma série relativamente longa de dados.

Os dados obtidos correspondem a 342 dias de amostragem, compreendendo todas as estações do ano, o que nos fornece uma visão geral das variabilidades de vento e corrente. Fica evidente a variabilidade atmosférica, com predominância de ventos nos sentidos N/NE e S/SO. Os ventos mais intensos de S/SO podem ser associados à passagem de sistemas frontais, pois os períodos de sua ocorrência coincidem com este evento de escala entre 3 a 15 dias. Para a costa do Rio Grande do Sul, Costa & Moller (2011) notaram a predominância de ventos de Nordeste durante a primavera e verão, sendo estes também os de maior intensidade.

A intensidade e direção das correntes também apresentam uma alta variabilidade ao longo do ano, com inversões no sentido do fluxo na escala de dias. A estrutura vertical é relativamente preservada, com poucos períodos de visível cisalhamento interno, onde há rotação e inversão no sentido do fluxo nas camadas mais inferiores. Na desembocadura do Rio da Prata, Simionato *et. al.*, (2007) encontraram padrão semelhante na estrutura da coluna da água. Os autores observaram que a direção das correntes nem sempre permanece preservada ao longo da coluna da água, chegando a ocorrer uma inversão do sentido do fluxo, sendo este um indício da presença de uma componente baroclínica.

A temperatura foi medida apenas na camada inferior da coluna da água, impedindo uma análise de estratificação termal ao longo do ano. No entanto, é possível identificar apenas com os dados de fundo uma pronunciada variabilidade no verão, enquanto que no inverno as temperaturas permanecem mais constantes. Esse padrão foi identificado na plataforma interna e média ao largo de Ubatuba, litoral de São Paulo, por Castro *et. al.*, (1987). Os autores verificaram a estratificação de massa em duas camadas, determinada pelo desenvolvimento da termoclina sazonal no verão, enquanto que no inverno a coluna da água permanece homogênea. Na camada superficial (<20m) a região é ocupada basicamente pela Água Costeira (AC), enquanto que na camada subsuperficial a predominância é da ACAS. Em um estudo numérico sobre a circulação termohalina próximo a São Sebastião, litoral paulista, Silva *et. al.*

(2004) simularam situações sazonais referentes a dados meteorológicos e padrões de temperatura e salinidade, encontrando também a aproximação da ACAS na camada de fundo da plataforma interna nas estações de primavera e verão. Ambos os autores relacionaram este fenômeno a presença de ventos mais constantes de Nordeste no verão, que induzem um transporte da AC em direção ao oceano na camada de Ekman superficial, e em sentido contrário a entrada da ACAS na camada inferior.

Os períodos analisados separadamente evidenciam esse movimento transversal à costa no verão. No início de abril de 2009 e janeiro de 2010 a atuação de ventos do quadrante Sul favoreceu a entrada de águas quentes da plataforma externa nas camadas superficiais e o fluxo inverso, em direção ao oceano, nas camadas mais profundas (Figuras 11 e 21). Esses movimentos ocasionaram elevações na temperatura de fundo em poucos dias. A atuação de ventos de Sul também modifica a estrutura vertical da coluna da água, tornando os fluxos mais homogêneos e uniformes devido à mistura turbulenta. Entretanto, com a diminuição de intensidade dos ventos de Sul e a ação de ventos de Norte a temperatura tende a cair, como evidenciado em alguns períodos do mês de março e dezembro de 2009, e janeiro de 2010. A ação destes ventos favoreceu a saída da água costeira pela superfície, e entrada de águas frias pelas camadas subsuperficiais. Castro *et. al.*, (1987) e posteriormente Silva *et. al.* (2004) identificaram no verão a ACAS nas camadas mais profundas da plataforma interna de São Paulo, no entanto isto não pode ser totalmente corroborado aqui, pois não foram amostrados dados complementares que pudessem identificar as massas de água. A coluna da água também responde de maneira distinta às mudanças de sentido dos ventos, tornando a estrutura mais heterogênea, principalmente nas profundidades intermediárias, entre 8 e 15 metros, onde ocorreram as maiores intensidades (Figuras 10 e 20).

No inverno os movimentos transversais também ocorrem, no entanto as variações de temperaturas são menores. A predominância de ventos de Sul nessa estação favorece o deslocamento para Norte das correntes frias formadas nas regiões polares (Möller *et. al.*, 2008). Essas águas frias penetram na região costeira nas camadas superficiais, tornando as temperaturas da coluna da água mais homogêneas. Além disso, a atuação constante de ventos de Sul mantém a estrutura da coluna da água mais homogênea, com as direções preservadas em todas as profundidades. Entretanto, algumas variações, com fluxos mais intensos são encontradas nas camadas intermediárias, entre 8 e 15 metros (Figura 15).

A variação sazonal dos eixos longitudinal e transversal das correntes demonstrou que os padrões são semelhantes em todas as estações, com pequenos desvios de sentido nos eixos principais e nos vetores médios. A principal diferença

está relacionada à profundidade. A camada superficial apresentou variabilidade predominante no sentido Norte/Sul, enquanto que no meio da coluna da água esse fluxo é rotacionado, acompanhando a batimetria do local (Nordeste/Sudeste), com os vetores médios mais intensos em direção à costa. Na camada mais profunda as variações são menores devido à diminuição de intensidade da corrente, e o sentido dos eixos acompanha a camada intermediária. Embora seja possível verificar essas variabilidades predominantes, o padrão mais “arredondado” das elipses demonstrou que o fluxo perpendicular aos eixos principais também apresenta importância na circulação local. Zavialov *et. al.* (2002) também encontraram dificuldades em determinar um fluxo predominante, no entanto no final de suas análises verificaram fluxos para Norte mesmo na presença de ventos de NE devido à descarga de água doce do Rio da Prata, que gera um gradiente lateral de densidade. Entretanto, Möller *et. al.* (2008) e Costa & Möller (2011) encontraram fluxos para Sul na costa do Rio grande do Sul, atribuindo isto a época do ano em que realizaram os estudos, nos meses de verão, as águas do Rio da Prata ficam aprisionadas em maiores latitudes em virtude da dominância de ventos de NE. No entanto, esses estudos foram realizados com séries de dados mais curtas, com fluxos médios predominantes para dadas épocas do ano.

As maiores variabilidades e fluxos mais intensos encontrados nas camadas intermediárias destoam dos encontrados por Dottori & Castro (2009) na plataforma média e externa de São Paulo (70, 100 e 200 m de profundidade), de Zavialov, *et. al.*, (2002) e Costa & Moller (2011) na plataforma média do Rio Grande do Sul (40 e 15 m de profundidade, respectivamente). Mesmo com uma alta variabilidade temporal esses autores encontraram as maiores intensidades sempre próximo à superfície, com decaimento à medida que se aumenta a profundidade. Os fluxos intermediários mais intensos, como os encontrados neste estudo, podem ser associados há um ajuste das correntes da plataforma externa em zonas mais rasas. Na Baía de Biscay, oeste da França, Boyer *et. al.*, (2013) encontraram fluxos mais intensos e com maior variabilidade na camada intermediária (130 m de profundidade) em um dos pontos estudados na região do talude, atribuindo esse fenômeno ao ajuste barotrópico do fluxo a morfologia local. Os efeitos das variações de profundidade no fluxo costeiro podem gerar acelerações diferenciais na coluna da água, o que afeta diretamente a camada limite costeira (Pettigrew & Murray, 1986), podendo ocorrer a diminuição de sua influência na coluna de água. Ao mesmo tempo a ação atmosférica e baroclínica poderiam causar uma retração de fluxo nas camadas superficiais. Desta forma ocorreria a diminuição de intensidade na superfície, enquanto que as camadas

intermediárias, com menor efeito da camada limite, poderiam apresentar maiores velocidades de fluxo.

A importância nos processos hidrodinâmicos das componentes longitudinal e transversal das correntes ficou evidente também através da densidade espectral. As amplitudes energéticas foram semelhantes entre as camadas da coluna da água para ambas as componentes. Os espectros de energia das componentes do vento e das correntes apresentaram concordância entre os períodos mais energéticos, com a presença de fenômenos ondulatórios centrados principalmente entre 3 e 31 dias.

Os fenômenos atmosféricos entre 3 e 15 dias estão relacionados aos sistemas frontais que afetam a região durante todo o ano (Castro & Lee, 1995). Os picos de energia concordam com Zaviolov *et. al.* (2002), que encontraram na costa do Rio Grande do Sul valores máximos centrados entre 2 e 10 dias, com um leve predomínio da componente transversal à costa na primavera e verão. Entretanto, na mesma região Costa & Moller (2011) observaram que a componente longitudinal é a dominante no outono e inverno. Os fenômenos de escala temporal maior podem ser associados às variabilidades sazonais e intra-sazonais associadas a variações no Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul.

Em toda a coluna da água são encontrados picos de energia entre 3 e 15 dias para todas as profundidades, podendo ser relacionados aos fenômenos atmosféricos de mesma periodicidade. Os eventos de escala maior também ocorrem ao longo de toda a coluna da água, com as maiores energias na camada intermediária da corrente. Para periodicidades superiores há 15 dias, tal como proposto por Castro & Lee (1995), a atmosfera passa a interferir menos na dinâmica local da plataforma externa, e as variabilidades encontradas passam a ser associadas aos fenômenos de mesoescala da CB, e esses eventos podem refletir sobre a região da plataforma continental interna. Na costa do Rio Grande do Sul, Zaviolov *et. al.* (2002) encontraram picos de energia centrados entre 9 e 12 dias; já Costa & Moller (2011), para a mesma região, identificaram as maiores energias entre 3,5 e 10,3 dias, com decréscimo de energia à medida que se aumenta a profundidade.

A correlação entre o vento e as correntes apresentou valores médios de significância. A componente longitudinal do vento e da corrente superficial foi a mais correlata no verão. Porém apresentou tempos de defasagem distintos para cada período, cerca de 15 horas em março e abril de 2009 e 25 horas em dezembro e janeiro de 2010. No inverno a correlação longitudinal do vento foi maior com a corrente transversal à costa, com um atraso de fase de 20 horas. Esta defasagem concorda parcialmente com os valores obtidos por Costa & Moller (2011), quando encontraram uma defasagem de 4 horas do vento com a corrente superficial. Zaviolov *et. al.* (2002)

encontraram no final do verão e início do outono uma alta correlação entre o vento e a corrente longitudinal, com defasagem de 18 horas, no entanto para os dados próximos ao inverno essa correlação apresentou um decaimento, atribuída à influência do aumento da descarga de água doce da Lagoa dos Patos nessa época do ano, que gera uma estratificação salina superficial muito estável, isolando as camadas subsuperficiais e profundas dos efeitos atmosféricos. Já na desembocadura do Rio da Prata, Simionato *et. al.* (2007) encontraram um atraso entre 3 e 9 horas da resposta da estrutura da corrente à ação dos ventos. Além das diferenças que podem ser atribuídas a fatores naturais, como a posição geográfica e a morfologia da costa, a diferença de fase entre o vento e as correntes superficiais aqui encontradas, com os estudos anteriores, pode ser devido à distância entre os locais de amostragem dos dados hidrográficos e meteorológicos. Os baixos valores de correlação também podem estar atribuídos à estação meteorológica utilizada, na região da desembocadura da Baía de Paranaguá, que apresenta feições topográficas que podem alterar os sentidos dos ventos em poucos dias, ocasionando desvios de até 90° entre a Baía de Paranaguá e a região costeira adjacente (Camargo & Dias, 2000).

A influência de distintos processos torna necessária a continuação de estudos sobre a região abordada, para que se tenha um período ainda maior de dados, permitindo assim o entendimento também dos processos de escala sazonal e interanual que afetam a estrutura das correntes costeiras. Além da necessidade de aquisição de dados complementares, como a temperatura em mais pontos da coluna da água, para se verificar a estratificação termal como um todo. Dados de salinidade também são fundamentais para a verificação das massas de água que estão penetrando na plataforma interna, e os processos baroclínicos que ocorrem devido à descarga de água doce dos estuários e rios. Noernberg, (2001) afirmou que a Baía de Paranaguá atua na escala de dias e meses, como responsável pela distribuição de propriedades (sedimentos e nutrientes) para a plataforma rasa adjacente, atuando diretamente na estrutura vertical da coluna da água (Figura 24).

Outros processos que também devem ser levados em consideração estão relacionados à ação das ondas sobre a região, que geram correntes costeiras de deriva, que podem fornecer energia para as regiões mais profundas da plataforma continental (Pettigrew & Murray, 1986). Essa energia pode ter influência de mesma magnitude que a ação dos ventos e a descarga de água doce sobre a estrutura vertical das correntes da plataforma interna.

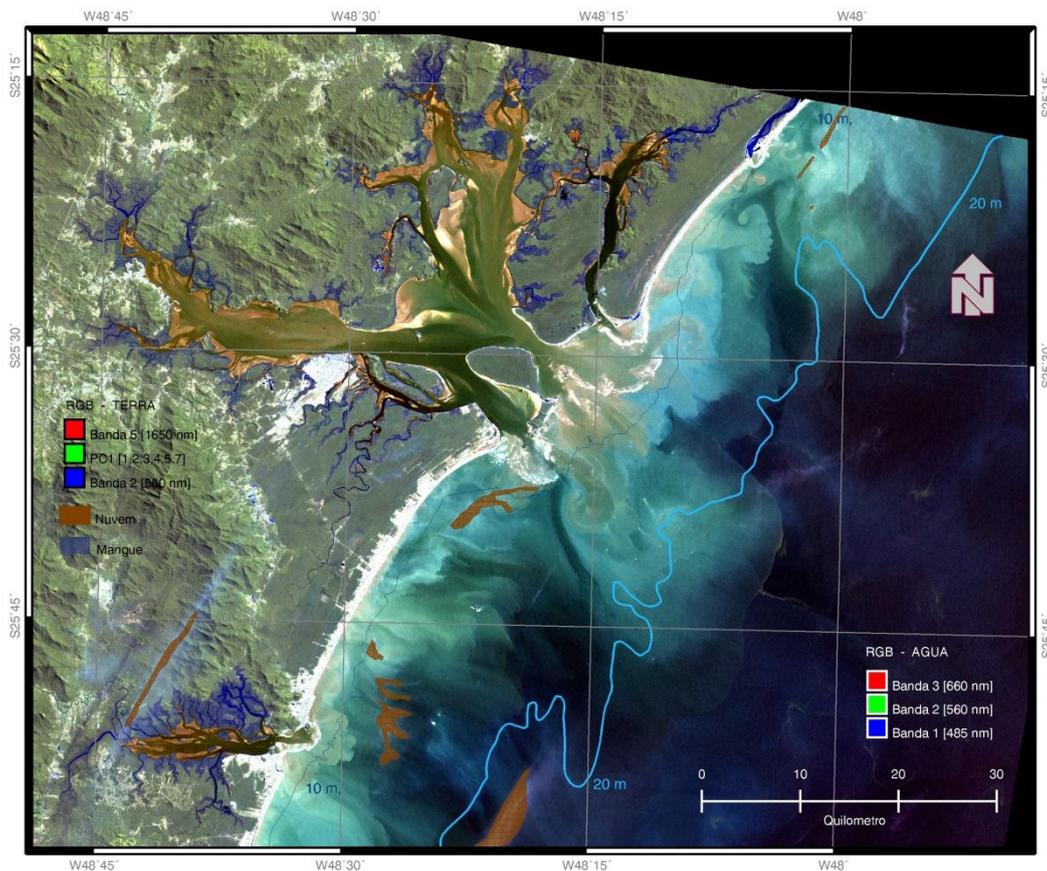


Figura 24. Pluma estuarina sobre a plataforma rasa do Paraná (Adaptado de Noernberg, 2001).

A integração de dados, em distintas escalas espaço-temporal, faz-se necessária para que os processos possam ser compreendidos e devidamente aplicados sobre a gestão costeira.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio ao projeto “Características Hidrográficas da Plataforma Rasa Paranaense (CNPq n.º 480428/2007-7)” ao qual este trabalho está inserido. Também agradeço ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que cedeu alguns dos dados meteorológicos aqui usados, e ao Centro de Estudos do Mar (CEM) por todo o apoio estrutural e logístico.

6. REFERÊNCIAS

- Boyer, A. L., Charria, G., Cann, B. L., Lazure, P., Marié, L., 2013. **Circulation on the shelf and upper slope of the Bay of Biscay**. Continental Shelf Research, Vol.55, 11p.
- Camargo, de R., Dias, P, L, da S., 2000. **The mesoscale adjustment in Paranaguá bay: case study of the period 10 to 25 august 1993**. Revista Brasileira de Meteorologia, Vol.15(1), 1-13.
- Castro, B. M., Miranda, L. B., & Miyao, S., 1987. **Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: Variações sazonais e em média escala**. Boletim de Instrumentação Oceanográfica, Vol. 35(2), 135-151.
- Castro, B. M., Lee T., 1995. **Wind forced sea level variability on the southeast brazilian shelf**. Journal of Geophysical Research, Vol. 100(C8), 16045 – 16056.
- Castro, B. M.; Vanin, A. M. S. P.; Brandini, F.; Miranda, L. B., 2005. **Multidisciplinary oceanographic processes on the Western Atlantic continental shelf Between 4°S and 34°S (4,W)**. New York, In: Robinson, A. R.; Brink, K. H. (Ed.). The sea. New York: John Wiley& Sons, Vol. 14, 259-293.
- Costa, R. L., Moller, O. O., 2011. **Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007**. Revista da Gestão Costeira Integrada, Vol. 11(3), 273-281.
- Dottori, M., Castro, B. M., 2009. **The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds**. Ocean Dynamics, Vol. 59, 603-614.
- Emery, W. J. & Thomson, R. E., 2004. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. Pergamon Press, London, Second and revised edition, 634p.
- Emilsson, I., 1961. **The shelf and coastal waters off southern Brazil**. Boletim de Instrumentação Oceanográfica, São Paulo, Vol.11(2), 101-112.
- Hendrickson, J., Macmahan, J., 2009. **Diurnal sea breeze effects on inner-shelf cross-shore exchange**. Continental Shelf Research, Vol. 29, 2195-2206.
- Kvinge T, 1967. **On the special current and water level variations in the Channel of São Sebastião**. Boletim de Instrumentação Oceanográfica, São Paulo, Vol. 16(1), 23–28.
- Marone, E.; Jamiyanaa, D., 1997. **Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil**. Nerítica, Curitiba, Vol. 11, 95-107.

Miranda, L. B.; Castro, B. M.; Kjerfve, B., 2002. **Redução e análise de dados experimentais: fluxo e transporte de propriedades.** In: Princípios de Oceanografia Física de Estuários, Edusp, São Paulo, Cap. 5, 153-191.

Moller Jr., O. O., Piola, A. R., Freitas., Campos, E. J. D., 2008. **The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America.** Continental Shelf Research, Vol. 28,1607-1624.

Noernberg, M. A., 2001. **Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá - Paraná - Brasil. Um estudo a partir de dados in situ e LandSat TM.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 180 p.

Noernberg, M. A., Marone, E., Angulo, R., 2007. **Coastal currents and sediment transport in Paranaguá estuary Complex navigation channel.** Boletim Paranaense de Geociências, n. 60-61, 45-54.

Pettigrew, N. R., Murray, S. P., 1986. **The coastal boundary layer and inner shelf.** Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 3, 14p.

Preisendorfer, R. W., Mobley, C. D., 1988. **Principal componente analysis in meteorology and oceanography,** Amsterdam: Elsevier, 425 p.

Silva, L. S., Miranda, L. B., Castro, B. M., 2004. **Estudo numérico da circulação e da estrutura termohalina na região adjacente à ilha de São Sebastião (SP).** Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 22(3), 25p.

Simionato, C. G., Meccia, V., Dragani, W., Nuñez, M., 2005. **Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de La Plata Estuary.** Journal of Geophysical Research, Vol. 110(C6), 16p.

Simionato, C. G., Meccia, V., Dragani, W., Guerrero, R., Nuñez, M., 2006. **Río de La Plata estuary response to Wind variability in synotic to intraseasonal scales: Barotropic response.** Journal of Geophysical Research, Vol. 111(C9), 14p.

Simionato, C. G., Meccia, V., Dragani, W., Guerrero, R., Nuñez, M., 2007. **Río de La Plata estuary response to Wind variability in synotic to intraseasonal scales: 2. Current's vertical structure and its implications for the salt wedge structure.** Journal of Geophysical Research, Vol. 112(C7), 15p.

Thompson, R. O. R. Y., 1983. **Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies.** Journal of Physical Oceanography, Vol. 13, 7p.

Welch, P., 1967. **The use of fast transform for the estimation of power spectral: A method based on the averaging over short, modified periodograms.** Audio and Electroacoustic, IEEE Transactions on, 15, 70-70.

Zavialov, P., Moller Jr., O., Campos, E., 2002. **First Direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil.** Continental Shelf Research, Vol. 22, 1975-1986.