

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE OCEANOGRAFIA

FERNANDO RIBEIRO

**CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES DA PLATAFORMA
CONTINENTAL INTERNA DA PRAIA DE PONTA NEGRA**

Florianópolis – SC

2014

Fernando Ribeiro

CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA PRAIA DE PONTA NEGRA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina para obtenção do título de
Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Mendonça
Pimenta.

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Helenice Vital.

Florianópolis – SC

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE OCEANOGRAFIA

CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA PRAIA DE PONTA NEGRA

Fernando Ribeiro

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina para obtenção do título
de Bacharel em Oceanografia

Avaliado em: 28/11/2014

Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta
(Dep. Geociências/UFSC)

Nota

Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho
(Dep. Geociências/UFSC)

Nota

Dr. Rodrigo do Carmo Barletta
(Gerente de projetos – CB&I)

Nota

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais e minha irmã pelo incentivo, principalmente à minha mãe pela dedicação incansável de todos os dias. Sem eles essa graduação não seria possível.

Agradeço à UFSC, pela oportunidade de cursar uma instituição pública e de qualidade, e por participar do desenvolvimento deste novo curso.

Agradeço aos professores dedicados. Aqueles que mesmo com as limitações do curso buscaram repassar da melhor forma possível os conhecimentos e experiências adquiridas ao longo do tempo. Em especial ao Rodrigo Barletta pelo incentivo em cursar Oceanografia, por ser meu primeiro professor da graduação e primeiro chefe. Ao professor Felipe Mendonça Pimenta por aceitar a jornada de orientar esse trabalho em um curto espaço de tempo.

Agradeço à professora Helenice Vital pelos dados e suporte ao desenvolvimento deste trabalho, o qual está incluso no projeto “Heterogeneidade Espaço Temporal da Linha de Costa e do substrato Plataformal Adjacente a Ponta Negra, RN (SOS – Ponta Negra)” aprovado pelo Edital Universal CNPq.

Ao CNPq e à PROPESQ (UFSC) pela bolsa de Iniciação Científica concedida (PIBIC).

Ao professor Antonio Fernando Härter Fetter Filho e pela participação na banca avaliadora e à Julia Biscaia pela revisão deste trabalho

Agradecimento especial à equipe de campo, Canindé e Junior, pelo esforço contínuo de coleta de dados e manutenção dos equipamentos.

A todos os amigos do curso de oceanografia, principalmente ao Jean (Cubozoa), Rodrigo (Lixo), Darlan (Grunido), Patrick (Lepra), Carlos (Negão), Renan (Forrest Gump), João (Peneira), Renato (Kapa) e membros do Futebol Oceanográfico. Sem essa turma as aulas e as festas não seriam iguais.

*“Um dia sonhei, cheguei.
O tempo é justo”.*

RESUMO

O objetivo deste estudo é caracterizar as correntes e sua resposta devido às forçantes de maré e vento da plataforma continental interna (PCI) da costa oriental do estado do Rio Grande do Norte. A região está localizada ao largo da praia de Ponta Negra, na cidade do Natal.

Dados inéditos de correntes e nível analisados neste trabalho correspondem a cinco campanhas de um correntômetro fundeado a uma distância de 3 km da linha de costa na isóbata de 10 metros ($5^{\circ}51'26''$ S e $35^{\circ}8'14''$ W). Estas informações são complementadas com uma série de ventos do produto de reanálise *ERA-Interim (ECMWF)* e dados de nível histórico do Porto de Natal derivados do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO).

As séries foram analisadas no domínio do tempo e da frequência. Correntes foram convertidas em componentes ao longo e através da costa e correlacionadas com vento e nível.

Correntes da PCI de Ponta Negra são predominantemente na direção Norte, revelando baixa variabilidade direcional e forte correlação com a componente do vento paralelo à costa. Correntes através da costa são dominadas pela banda semi-diurna das marés e secundariamente pelos ventos. Variações de nível do mar são dominadas pelas marés que perfazem 98% da energia. A variação subtidal do nível do mar é bem correlacionada ao vento mas de baixa amplitude.

Palavras chave: Corrente, efeito do vento, plataforma continental interna, Ponta Negra, corrente residual, corrente de maré.

ABSTRACT

This work characterizes the inner shelf circulation of the state of Rio Grande do Norte (Brazil) investigating its response to tidal and wind forcing. The study region is located off Ponta Negra beach, city of Natal.

Current meter and sea level data correspond to five campaigns from a mid-depth current meter moored 3 km from the coast along at the 10 m isobath ($5^{\circ} 51'26''\text{S}$ and $35^{\circ} 8'14''\text{W}$). The analysis is further complemented with a wind database derived from the ERA-interim reanalysis project (ECMWF) and historical sea-level from the port of Natal obtained with the National Oceanographic Data Center (BNDO).

Currents, sea level and wind data were analyzed in both time and frequency domains. Currents were further converted into along- and cross-shelf components for their correlation with wind and sea level data. Currents of Ponta Negra's inner shelf are predominantly in the northern direction, revealing low directional variability and strong correlation with the along-shelf wind component. Cross-shelf currents are dominantly controlled by semi-diurnal tides and secondarily by winds. Sea level variability is dominated by tides that make up 98% of their energy spectra. Subtidal sea level variability is well correlated to winds and currents but demonstrate very low amplitudes.

Keywords: Wind-driven currents, tidal currents, Ponta Negra beach, residual currents, inner shelf circulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Representação esquemática do espectro energético dos movimentos nos oceanos. (Modificado de Munk, 1950 e traduzido por Truccolo, 2005). Os processos aqui estudados vão da escala de horas a 1 ano..... 15
- Figura 2:** Painel superior: Praia de Ponta Negra, com destaque para o calçadão destruído e Morro do Careca ao fundo. Painel inferior: Note a estreita faixa de areia e os danos à fundação do calçadão. Fotografias obtidas em: <http://sospontanegra.org>. 17
- Figura 3:** Localização da praia de Ponta Negra. Limitada ao sul pelo Morro do Careca e ao norte pela praia da Via Costeira. O ponto de fundeio (PF) está indicado por um ponto preto. O marégrafo está indicado por um triângulo (M). São apresentados os eixos coordenados em relação ao Norte e também rotacionados em 16° no sentido anti-horário, tal que a componente (y) esteja paralela a costa..... 19
- Figura 4:** Equipamento S4 utilizado nas campanhas de medições em Ponta Negra (Fotografias: InterOcean Systems, Inc; Prof Moab Praxedes, UFRN, foto de um fundeio nos corais de Pirangi)..... 22
- Figura 5:** Esquema do ciclo de amostragem do correntômetro. Ciclo com período de 10 minutos de aquisição (área verde) e 20 em repouso. Médias de um minuto (azul) gravados no tempo (t-1) (vermelho). 22
- Figura 6:** Esquema destacando as rotações realizadas nos eixos de referência. Em A destacando a correção da declinação magnética. Em B destacando a rotação referente a costa. 24
- Figura 7:** Campo médio dos ventos derivados do produto de reanálise do ECMWF. A escala de cores representa a magnitude da tensão de cisalhamento dos ventos ($N\ m^{-2}$) e o campo vetorial a direção. As médias são referentes aos períodos de fundeio selecionados apresentados na Tabela 1. 28
- Figura 8:** Direção e intensidade dos ventos ($m\ s^{-1}$) na região de Natal. Painéis correspondem aos ventos médios de um ponto de grade ao largo de Natal, campanhas apresentadas na Tabela 1. A direção das barras segue a convenção meteorológica e aponta a direção de onde os ventos vem..... 29
- Figura 9:** Distribuição de frequência da velocidade dos ventos para um ponto de grade ao largo de Natal durante as campanha selecionadas da Tabela 1. . 29
- Figura 10:** Densidade espectral de potência da intensidade dos ventos para as campanhas de primavera, verão e outono (Tabela 1). Textos indicam os períodos de variabilidade dos ventos: diurno (D) e 5 dias. 30
- Figura 11:** Série temporal histórica de nível para o Porto do Natal e ventos derivados do modelo ERA-Interim (ECMWF). Em conjunto são apresentadas as séries filtradas. O período refere-se a 01/04/2005 a 30/05/2005 ou transição da primavera para o verão. Horário UTC..... 32
- Figura 12:** Análise espectral do nível do mar para o Porto do Natal. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente às bandas de; baixa

frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna, e águas rasas. São representadas as componentes de águas rasas M4 e M6.....	33
Figura 13: Análise espectral de nível para as estações de primavera, verão e outono no ponto de fundeio. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente a banda de baixa frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna e águas rasas.....	36
Figura 14: Diagrama de direção e intensidade das correntes na região de fundeio para as campanhas de primavera, outono e verão. A direção das barras segue a convenção oceanográfica e aponta na direção que a corrente vai.	38
Figura 15: Distribuição de frequências da velocidade das correntes para as campanhas de primavera, verão e outono. A mediana de cada distribuição é apresentada em cada gráfico.....	39
Figura 16: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidades das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de primavera. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.	41
Figura 17: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidades das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de verão. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.	42
Figura 18: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidade das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de outono. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.	43
Figura 19: Comparação entre as componentes da velocidade ao longo (u_x) e através (v_y) da costa durante as campanhas de primavera, verão e outono. Note que a banda subtidal é dominante na componente ao longo da costa e a maré na componente perpendicular à costa. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente a banda de baixa frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna e águas rasas.	47
Figura 20: Diagrama vetorial progressivo das correntes a uma profundidade média de 8,5 metros. Campanhas de primavera, verão e outono.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Período das séries de dados. *campanhas selecionadas para descrição.....	21
Tabela 2: Partição energética derivada da análise espectral de nível do porto, distribuídas de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov et al, 2002).	33
Tabela 3: Componentes Harmônicas em ordem decrescente de amplitude. Análise realizada com dados do porto de Natal de 01/04/2005 a 30/05/2005. Dados coletados em UTC.	34
Tabela 4: Constituintes harmônicas encontradas para nível no ponto de fundeio em ordem decrescente de amplitude. Análise realizada com as séries apresentadas na Tabela 1. Horário UTC.	35
Tabela 5: Partição energética derivada da análise espectral de nível na região de fundeio. Distribuição de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov et al, 2002). Partição calculada para as campanhas de primavera verão e outono.	36
Tabela 6: Tabelas de correlação entre as séries filtradas das componentes ao longo (τ_{yf} e v_{yf}) e através da costa (τ_{xf} e u_{xf}) e nível (η_f). Campanha de primavera.	44
Tabela 7: igual a tabela 6, mas para a campanha de verão.	44
Tabela 8: igual a tabela 6, mas para a campanha de outono.	44
Tabela 9: Partição energética derivada da análise espectral de nível na região de fundeio. Distribuição de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov et al, 2002). Partição calculada para as campanhas de primavera, verão e outono.	48

SÍMBOLOS

- x – Componente perpendicular à linha de costa (através da costa).
- y – Componente paralela à linha de costa (ao longo da costa).
- u_m – Componente u da velocidade referenciado ao norte magnético. [cm s⁻¹].
- v_m – Componente v da velocidade referenciado ao norte magnético. [cm s⁻¹].
- u_x – Componente u da velocidade das corrente através da costa. [cm s⁻¹].
- v_y – Componente v da velocidade das correntes ao longo da costa. [cm s⁻¹].
- τ_x – Tensão de cisalhamento dos ventos através da costa. [N m⁻²].
- τ_y – Tensão de cisalhamento dos ventos ao longo da costa. [N m⁻²].
- ρ – Densidade da água do mar [1.025 Kg m⁻³].
- ρ_a – Densidade do ar [1,25 Kg m⁻³].
- g – Aceleração da gravidade [9,8 m s⁻²].
- p – Pressão medida pelo correntômetro [N m⁻²].
- h – Nível instantâneo [m].
- \bar{h} – Nível médio [m].
- η – Variação do nível [m].
- W – Velocidade do vento [m s⁻¹].
- w_x – Componente do vento através da costa [m s⁻¹].
- w_y – Componente do vento ao longo da costa [m s⁻¹].
- C_d – Coeficiente adimensional de arrasto.
- t_i – Tempo inicial [s].
- t_f – Tempo final [s].
- * – Os símbolos com o subscrito (f) refere-se ao mesmo, porém filtrado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1. INTRODUÇÃO	14
2. ÁREA DE ESTUDO.....	18
3. OBJETIVOS	20
4. METODOLOGIA.....	20
4.1. Aquisição de dados.....	20
4.1.1. Corrente e nível por pressão	21
4.1.2. Nível por marégrafo	23
4.1.3. Ventos.....	23
4.2. Processamento dos dados.....	23
4.2.1. Processamento das séries de corrente e nível	24
4.2.2. Processamento da série de vento.....	26
5. RESULTADOS	27
5.3. Regime dos ventos	27
5.4. Nível do mar.....	30
5.4.1. Nível histórico	30
5.4.2. Nível na região de fundeio	34
5.5. Correntes	37
5.5.1. Análise direcional.....	37
5.5.2. Análise das séries temporais	39
5.5.3. Análise de correlação	43
5.5.4. Análise espectral.....	45
5.5.5. Diagrama vetorial progressivo	48
6. SUMÁRIO E CONCLUSÃO.....	50
7. REFERÊNCIAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A plataforma continental, como província fisiográfica da margem continental, é a extensão submarina dos continentes (Heezen & Menard, 1966). Ela corresponde à área entre a linha média de baixa-mar e a profundidade em que a inclinação do assoalho marinho passa a ser bem mais acentuada no talude (Costa & Möller, 2011; Mendes, 1992).

Coutinho (1976), considerando os vários aspectos da morfologia e da distribuição das características sedimentológicas na plataforma continental do Nordeste brasileiro, sugeriu dividi-la em três segmentos, denominando-os de plataforma continental interna – PCI (linha de costa até a isóbata de 20 m), média - PCM (de 20 a 40 m) e externa - PCE (de 40 a 60 m).

A PCI corresponde à região de transição entre o domínio continental e marinho, diretamente influenciada por processos físicos, químicos, geológicos, biológicos e climáticos. Tais processos encontram-se em equilíbrio dinâmico e constantemente modificam a morfologia deste ambiente. Ela possui um papel importante na circulação global da plataforma, uma vez que é nessa região que os fluxos se ajustam à presença da linha de costa (Lentz, 1995).

Dentre os processos físicos, as correntes da PCI são forçadas pela tensão dos ventos (locais e remotos), incidência de ondas e pela ação co-oscilante das marés (Mellor, 1996). Processos ligados à variação de fluatibilidade introduzida por descarga de rios também representam uma importante forçante na geração de correntes de densidade (Costa & Möller, 2011). A dominância destas forçantes é dependente da região geográfica de interesse.

A variabilidade destes processos ocorrem em diferentes escalas temporais, que variam de segundos à vários dias (Figura 1). Alguns exemplos são as ondas geradas pelos ventos (segundos), ondas geradas pela maré astronômica (horas), movimentos gerados por influências meteorológicas (dias), meandros e vórtices das correntes oceânicas (meses), variáveis sazonais (ano), e alterações climáticas geradas por processos globais como o El Niño (interanuais) (Miranda et al., 2002).

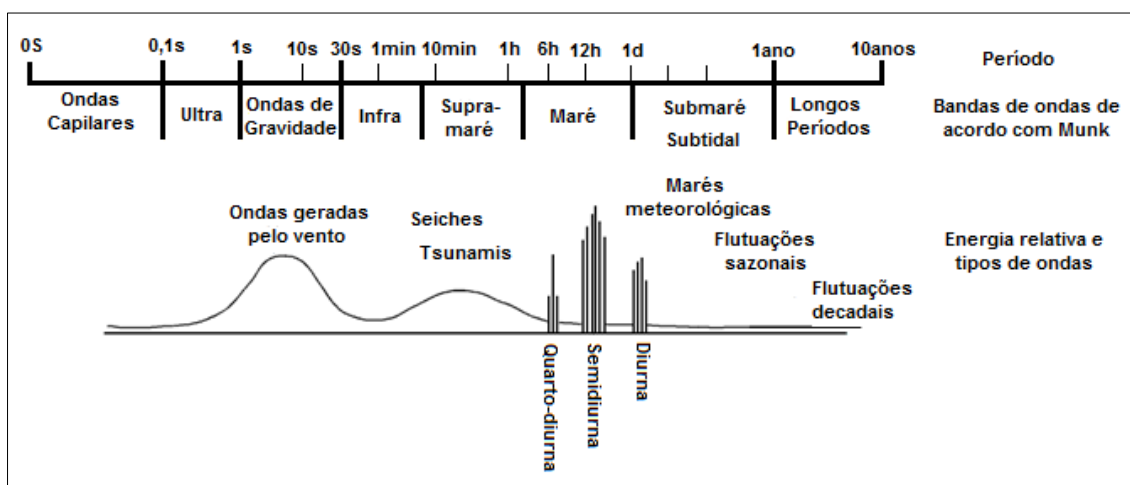


Figura 1: Representação esquemática do espectro energético dos movimentos nos oceanos. (Modificado de Munk, 1950 e traduzido por Truccolo, 2005). Os processos aqui estudados vão da escala de horas a 1 ano.

As oscilações de nível predominantes ocorrentes em plataformas continentais são as marés geradas no oceano profundo, com períodos de ocorrência predominantemente semidiurno (~12 h) ou diurno (~24 h), correspondendo respectivamente às frequências de duas ou uma oscilação por dia. Costuma-se adotar essas frequências como referência e classificá-las como **frequência de maré** ou **alta frequência**. As demais variações de nível são classificadas como **frequência subtidal** ou **baixa frequência** (menor que um ciclo por dia) e **frequência supratidal** (maior que dois ciclos por dia) (Miranda et al., 2002).

As correntes na frequência de maré e subtidal são mecanismos determinantes de transporte em águas rasas, assim como as correntes de deriva litorânea e de retorno geradas na região de arrebentação devido à quebra das ondas próximo à linha de costa (Castro *et al.* 2006). A variabilidade destes processos pode influenciar a morfologia e a estabilidade de ambientes costeiros, bem como os processos de advecção e dispersão. Existe, entretanto, grande carência de dados observacionais de correntes e séries temporais para a costa brasileira (Zavialov *et al.*, 2002).

A praia de Ponta Negra da cidade do Natal, RN, insere-se neste contexto. Esta praia vem apresentando vários problemas devido à erosão e a falta de dados oceanográficos dificulta a identificação das forças dominantes e a gestão dos problemas (Figura 2).

Diante à falta de dados oceanográficos, o Projeto SOS Ponta Negra, financiado pelo Edital Universal CNPq, vem realizando uma série de levantamentos batimétricos, sísmicos e de medição de correntes na região (Vital, 2012).

Neste trabalho utilizamos uma série de dados inédita para estudar as características e a variabilidade das correntes da PCI de Ponta Negra. Tais dados são complementados com a análise de dados de vento do *Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e dados de maré do Porto de Natal derivados do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO).



Figura 2: Painel superior: Praia de Ponta Negra, com destaque para o calçadão destruído e Morro do Careca ao fundo. Painel inferior: Note a estreita faixa de areia e os danos à fundação do calçadão. Fotografias obtidas em: <http://sospontanegra.org>.

2. ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo localiza-se na plataforma continental interna (PCI) da costa oriental do estado do Rio Grande do Norte, adjacente à praia de Ponta Negra em Natal ($5^{\circ} 50' S$ e $35^{\circ} 5' W$). A linha de costa é irregular e predominantemente formada por praias arenosas em forma de zeta ζ , com a localização da Via Costeira ao norte e o Morro do Careca ao sul (Vital, 2006) (Figura 3).

A orientação da linha de costa é aproximadamente Norte – Sul, formando um ângulo de aproximadamente 16° à Oeste do Norte verdadeiro. A plataforma continental ao largo da praia de Ponta Negra é estreita, com aproximadamente 25 quilômetros de largura e relativamente rasa, 20 metros (Figura 3).

O clima predominante é o tropical quente, úmido e subúmido (Nimer, 1989), fortemente influenciado pelas massas de ar provenientes do Oceano Atlântico, com 3 a 5 meses secos no verão e meses chuvosos no outono e inverno. Strang (1972) mostrou que cerca de 50% da precipitação anual na costa leste do Nordeste brasileiro ocorre predominantemente em três meses do ano, de maio a julho. O regime de marés dominante é o semi-diurno com altura média de 2,3 metros durante a sizígia e 1.8 metros na quadratura (DHN, 2013).

A urbanização da região de Ponta Negra ocorreu de forma acelerada e desordenada, resultando em inúmeros problemas socioambientais. Nos anos 90, a cidade do Natal passou por um processo de urbanização intenso acompanhado de investimentos turísticos e imobiliários que ocuparam a região do pós-praia (Maciel, 2010).

Nos últimos anos a praia veio sofrendo uma expressiva redução da sua faixa de areia. Em 2012, o problema se agravou e a praia foi parcialmente

erodida. A região de maior erosão prolonga-se por cerca de 1 km na linha de praia (Figura 3). A Figura 2 apresenta dois dos doze pontos destruídos do calçadão à beira-mar (Pereira, 2013). Um projeto de recuperação da praia está em andamento para a instalação de um quebra-mar de proteção.

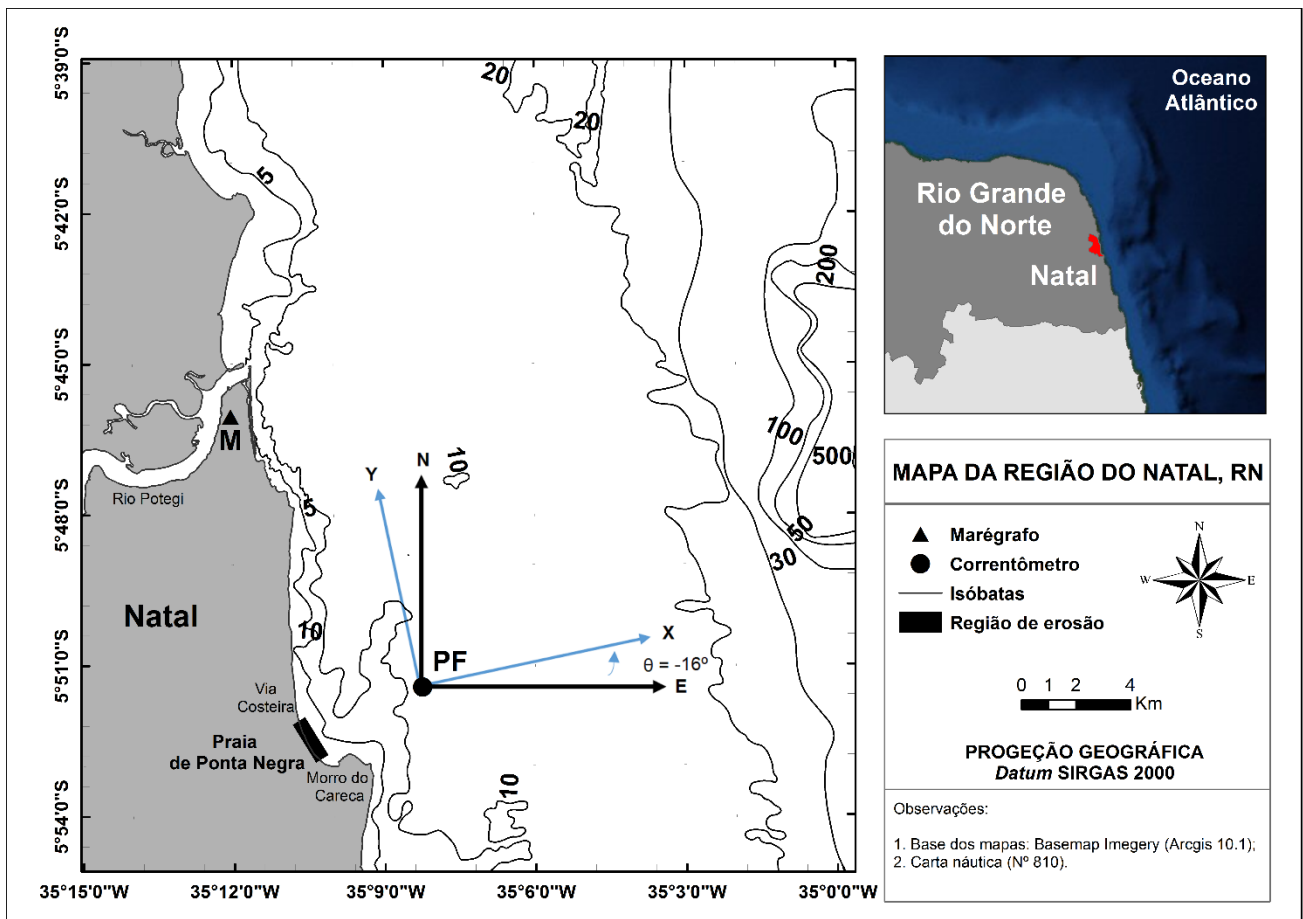


Figura 3: Localização da praia de Ponta Negra. Limitada ao sul pelo Morro do Careca e ao norte pela praia da Via Costeira. O ponto de fundeio (PF) está indicado por um ponto preto. O marégrafo está indicado por um triângulo (M). São apresentados os eixos coordenados em relação ao Norte e também rotacionados em 16° no sentido anti-horário, tal que a componente (y) esteja paralela a costa.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar as correntes, ventos e nível da plataforma continental interna da praia de Ponta Negra, Natal-RN, através da análise dos dados de um correntômetro fundeado de Outubro de 2013 à Abril de 2014. Como objetivos específicos iremos: (i) caracterizar sazonalmente o regime dos ventos; (ii) descrever a variabilidade temporal e direcional das correntes; (iii) descrever a variabilidade de nível e correntes através da análise harmônica e espectral; (iv) investigar a contribuição das forçantes em relação a magnitude das correntes.

4. METODOLOGIA

4.1. Aquisição de dados

Nesta seção são apresentados os dados utilizados no desenvolvimento deste estudo. A Tabela 1 apresenta o período de cobertura das séries de nível do Porto do Natal, assim como as cinco campanhas realizadas no ponto de fundeio apresentado na Figura 3 e dados de vento obtidos do produto de reanálise.

Dados	Estação do ano	Período	Nº Dias
Nível histórico (Porto de Natal)	Outono	01/04/2005 a 30/05/2005	60
Correntes e nível (PF, campanha 1)	Primavera*	09/10/2013 a 07/11/2013	29
Correntes e nível (PF, campanha 2)	Primavera	09/11/2013 a 06/12/2013	27
Correntes e nível (PF, campanha 3)	Verão*	11/01/2014 a 12/02/2014	32
Correntes e nível (PF, campanha 4)	Verão	13/02/2014 a 13/03/2014	32
Correntes e nível (PF, campanha 5)	Outono*	14/03/2014 a 15/04/2014	32
Ventos (Reanálise ECMWF)	--	01/11/2004 a 15/04/2014	1275

Tabela 1: Período das séries de dados. *campanhas selecionadas para descrição.

4.1.1. Corrente e nível por pressão

Os dados de correntes correspondem a cinco campanhas realizadas nas estações de primavera, verão e outono (Tabela 1). Em cada campanha foi realizado o fundeio de um correntômetro em uma distância aproximada de 3 quilômetros da linha costa, na isóbata de 10 metros (5°51'26 "S e 35° 8'14 "W). A profundidade média do equipamento foi cerca de 8,5 metros (Figura 3). A campanha de inverno foi perdida por problemas técnicos com o equipamento.

O equipamento utilizado foi um correntógrafo de meia água do fabricante *InterOcean Systems, inc*, modelo S4 (Figura 4). O equipamento utiliza o princípio de indução magnética para medir as correntes. Conforme varia-se a magnitude das correntes marinhas, varia-se a tensão medida por dois pares de eletrodos

titânicos. O sinal é então registrado e convertido em velocidade (cm s^{-1}) e direção (graus) através de uma bússola interna (InterOcean, 1994). O correntômetro é equipado com um sensor de pressão, do qual é obtido também os dados de nível do mar. O equipamento foi configurado para amostrar dados em intervalos de 30 minutos, fazendo a média dos 10 primeiros minutos a uma taxa de 2 Hz (Figura 5).

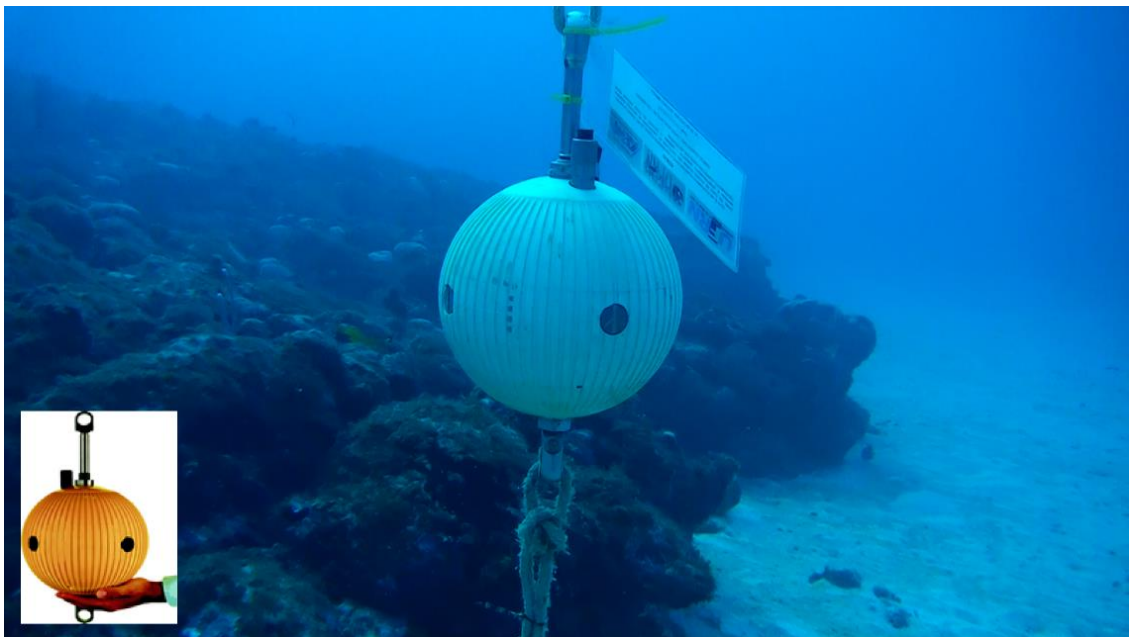


Figura 4: Equipamento S4 utilizado nas campanhas de medições em Ponta Negra (Fotografias: InterOcean Systems, Inc; Prof Moab Praxedes, UFRN, foto de um fundeio nos corais de Pirangi).

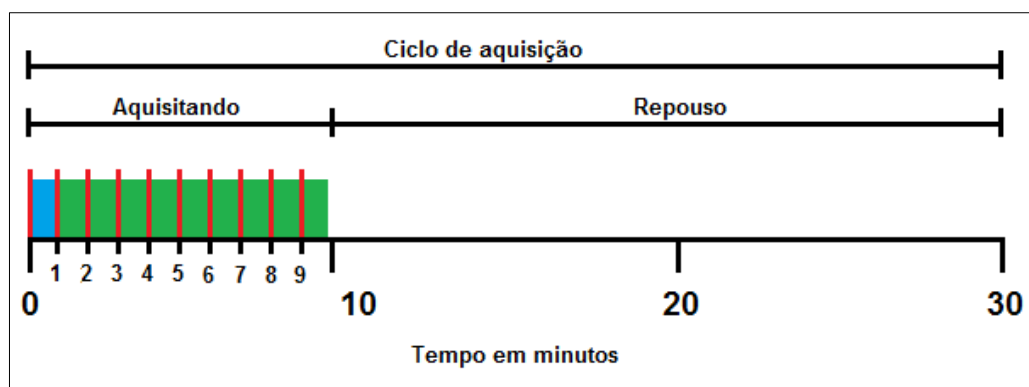


Figura 5: Esquema do ciclo de amostragem do correntômetro. Ciclo com período de 10 minutos de aquisição (área verde) e 20 em repouso. Médias de um minuto (azul) gravados no tempo $(t-1)$ (vermelho).

4.1.2. Nível por marégrafo

Os dados de nível para o Porto de Natal foram obtidos junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). Os dados derivados são horários e foram coletados por um marégrafo de bóia e contrapeso instalado no trapiche da CPRM à cerca de 3,5 km da boca do estuário do Rio Potengi (5° 46' 43.18" S e 35° 12' 26.87" W) (Figura 3). A taxa de amostragem dos dados são horárias e cobrem o período de 01/04/2005 a 30/05/2005.

4.1.3. Ventos

Os dados de ventos utilizados para a região de estudo são procedentes do modelo *ERA-Interim* administrado pelo *Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*¹. O *ERA-Interim* é um modelo de reanálise de dados atmosféricos globais que cobrem o período de 1979 até o presente. O modelo possui uma resolução meridional e zonal de 0,75° x 075° (~80 km) e uma resolução temporal de 6 horas. Os dados foram extraídos para uma região entre 32°W e 42°W e 2°S e 12°S. O período selecionado sobrepõe todas as séries temporais de nível e corrente analisadas neste trabalho.

4.2. Processamento dos dados

Neste tópico serão apresentados os procedimentos básicos aplicados no processamento dos dados de vento, corrente e nível.

¹ <http://www.ecmwf.int>

4.2.1. Processamento das séries de corrente e nível

O pré-processamento dos dados do S4 foi realizado com o software *S4App 5.1.3c* (InterOcean, 2013) afim de convertê-los em um formato para pós-processamento em MatLab. Todas as campanhas foram pós-processadas de maneira a se obter médias horárias, referentes a cada ciclo de aquisição.

Os dados de correntes são obtidos na forma das componentes u_m e v_m , os quais são referenciados em relação ao Norte magnético da Terra (N_m), sendo necessária a calibração para o Norte geográfico (N). Foi utilizado o *World Magnetic Model* (WMM) da National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) para calcular a declinação magnética na área de estudo durante as campanhas². A declinação média obtida foi de $\theta=21,6^\circ W$, ou seja, o eixo de referência foi rotacionado³ em $21,6^\circ$ no sentido horário (Figura 6a).

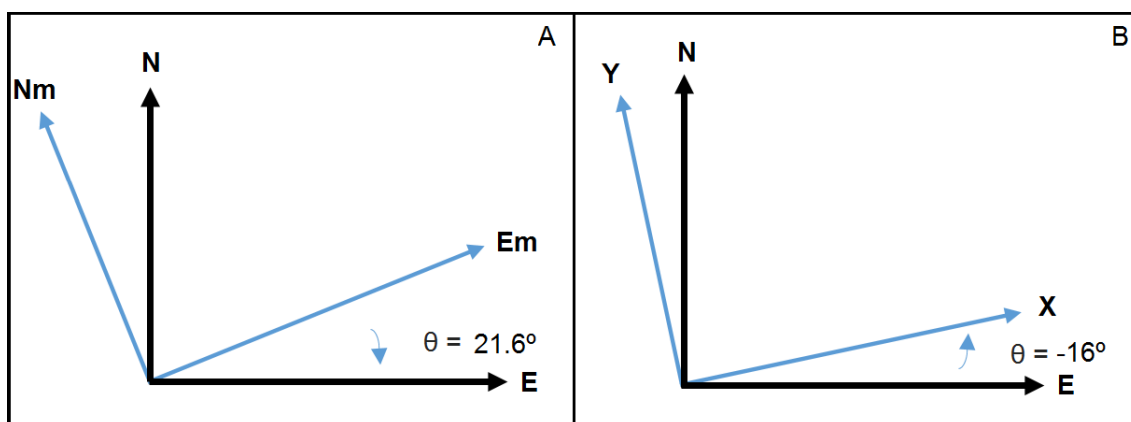


Figura 6: Esquema destacando as rotações realizadas nos eixos de referência. Em A destacando a correção da declinação magnética. Em B destacando a rotação referente a costa.

² World Magnetic Model (WMM/NOAA): <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-Web/#declination>

³ Matriz de rotação: $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_m \\ v_m \end{pmatrix}$, onde θ refere-se ao ângulo em graus de rotação do vetor no sentido horário ou de rotação dos eixos coordenados no sentido anti-horário.

Os dados também foram decompostos em componentes ao longo (v_y) e através da costa (u_x). Para isto considerou-se o ângulo dominante de $\theta = -16^\circ$ da linha de costa e isóbata (ver Figura 6b).

Os dados de pressão foram convertidos em nível médio através da expressão:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (1)$$

Onde h é a altura da coluna d'água (m), P é a pressão (N m^{-2}), ρ é a densidade da água (1025 kg m^{-3}) e g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m s}^{-2}$). Com esse registro a variação do mar médio no ponto de fundeio pôde ser calculada por:

$$\eta = h - \bar{h} \quad (2)$$

Onde \bar{h} representa a média temporal do registro calculado pela equação (1) e η é a variação do nível médio (m). Com os dados padronizados aplicaram-se quatro análises principais: análise direcional; espectral; harmônica e de correlação.

A análise espectral foi baseada no método de Welch (1967), através da função Pwelch do MatLab. A função foi configurada utilizando uma janela tipo Hanning, com 1/3 do comprimento total das séries e sobreposição de 50%, procedimento que resulta em uma estimativa de densidade espectral média, calculada a partir de 5 segmentos. Como resultado da aplicação do "janelamento", perde-se resolução espectral, mas a confiabilidade estatística

relativa às concentrações de energia por banda de frequência é maior (Costa & Möller, 2011; Santos, 2014).

A análise harmônica de marés para os dados de nível foi realizada através do pacote T_Tide desenvolvido por Pawlowicz *et al.* (2002), fornecendo as principais constituintes de maré, fases e amplitudes associadas. Com o objetivo de remover as oscilações de alta frequência como o sinal da brisa e das marés, utilizou-se um filtro passa-baixa tipo Lanczos-Cosseno com uma frequência de corte de 1/43 horas, que remove 95% das oscilações com frequência menores que 1/25 horas (Emery & Thomson, 2001).

4.2.2. Processamento da série de vento

Os dados de vento foram orientados em componentes ao longo da costa e através da costa com o mesmo procedimento descrito anteriormente e foram convertidos em termos das componentes de tensão de cisalhamento $\tau_{x,y}$ calculados por (Csanady, 1982):

$$\tau_{x,y} = \rho_a C_d |W| w_{x,y} \quad (3)$$

Onde $\rho_a = 1,25 \text{ kg m}^{-3}$, W representa o módulo da velocidade do vento, $w_{(x,y)}$ representa as componentes zonal w_x e meridional w_y do vento e C_d é o coeficiente de arrasto calculado seguindo Large & Pond (1981). Para estes dados foram aplicadas a análise espectral e a filtragem das séries temporais.

5. RESULTADOS

5.3. Regime dos ventos

A região de Ponta Negra é dominada pelos Alísios de Sudeste, e modulada pela brisa marinha/terrestre (Barros, 2013; Teixeira, 2008). Os alísios são ventos sinóticos de baixos níveis oriundos da circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul. Sua variabilidade é sazonal e acompanha a variação meridional da Zona de Confluência Intertropical (ZCIT). Brisas marinhas e terrestres são fenômenos de meso-escala e periodicidade diária do campo de ventos, presentes em regiões costeiras (Teixeira, 2008). Para a região do Natal, as brisas não causam a inversão da direção dos ventos, mas podem modular a magnitude dos alísios.

Na Figura 7 são apresentados o campo vetorial e a magnitude dos ventos para as três campanhas. Nota-se que o campo de tensões dos ventos de maneira geral são mais intensos na região oceânica com magnitude superior a $0,07 \text{ N m}^{-2}$. Na costa norte as tensões chegam a $0,1 \text{ N m}^{-2}$. A magnitude das tensões foi maior no verão e menor na primavera, para o período das campanhas. Na região continental as tensões foram inferiores a $0,06 \text{ N m}^{-2}$.

Os diagramas direcionais da Figura 8 ilustram ventos dominantes do quadrante SE, com variabilidade direcional de aproximadamente 45° . Os dados referem-se a um ponto de observação de grade do modelo ao largo de Natal. A média dos ventos foi calculada em aproximadamente 5 m s^{-1} para todas as campanhas. Os ventos mais intensos ocorreram na campanha de primavera, onde foi observado um aumento em torno de mais de 10% dos ventos acima de

6 m s⁻¹ (Figura 9). Nesta estação a variabilidade direcional também é reduzida em relação às outras estações (Figura 8).

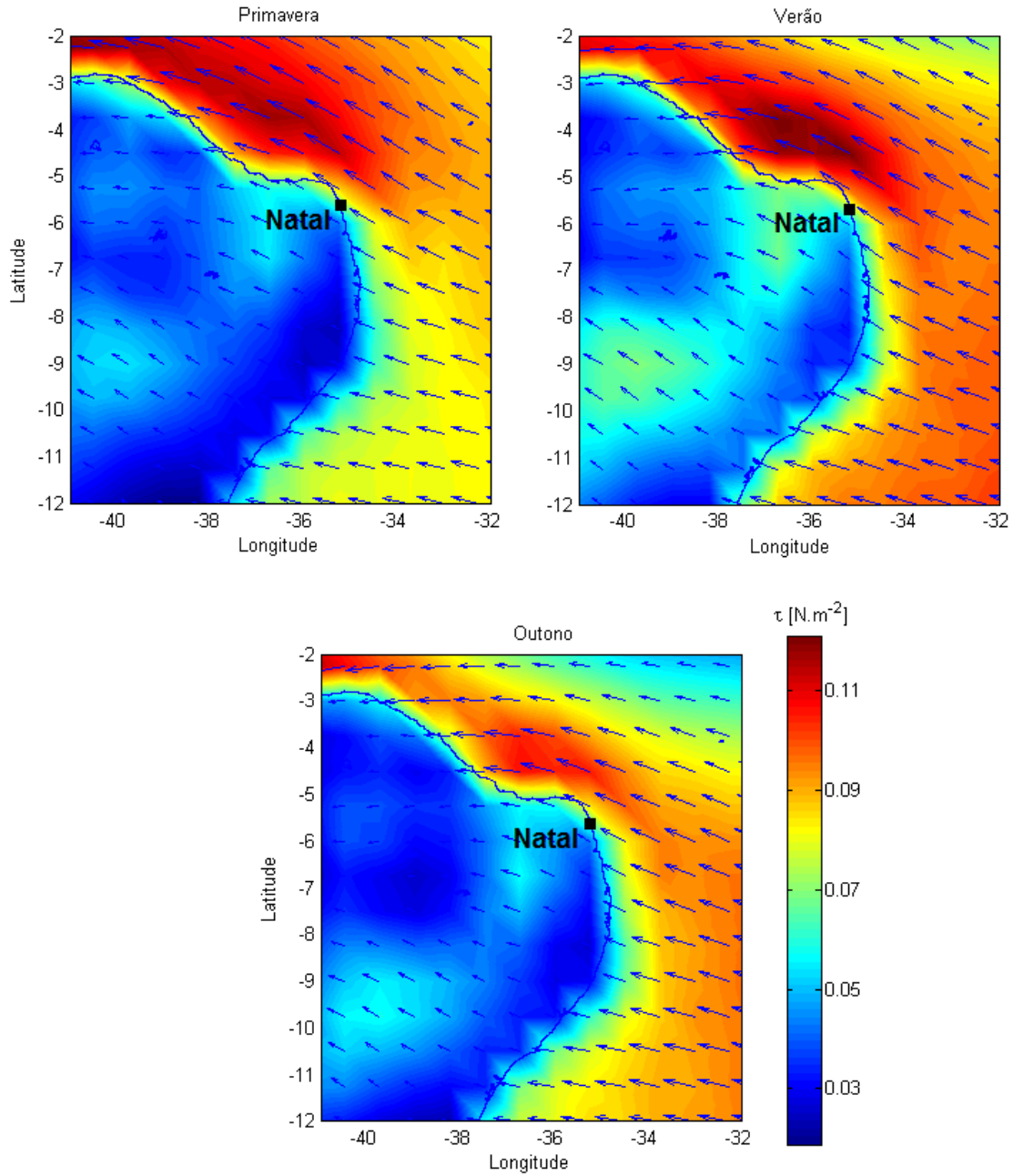


Figura 7: Campo médio dos ventos derivados do produto de reanálise do ECMWF. A escala de cores representa a magnitude da tensão de cisalhamento dos ventos ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$) e o campo vetorial a direção. As médias são referentes aos períodos de fundeio selecionados apresentados na Tabela 1.

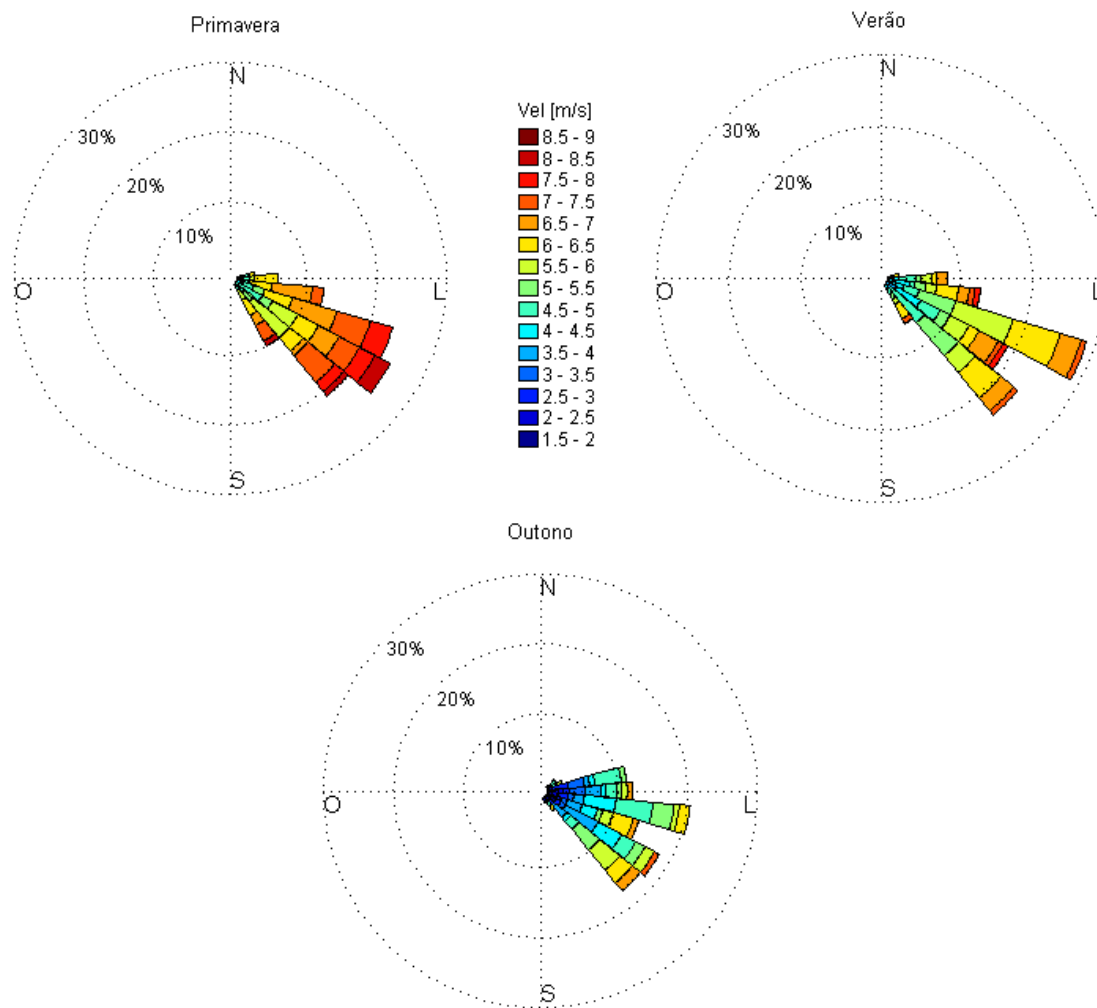


Figura 8: Direção e intensidade dos ventos ($m s^{-1}$) na região de Natal. Painéis correspondem aos ventos médios de um ponto de grade ao largo de Natal, campanhas apresentadas na Tabela 1. A direção das barras segue a convenção meteorológica e aponta a direção de onde os ventos vem.

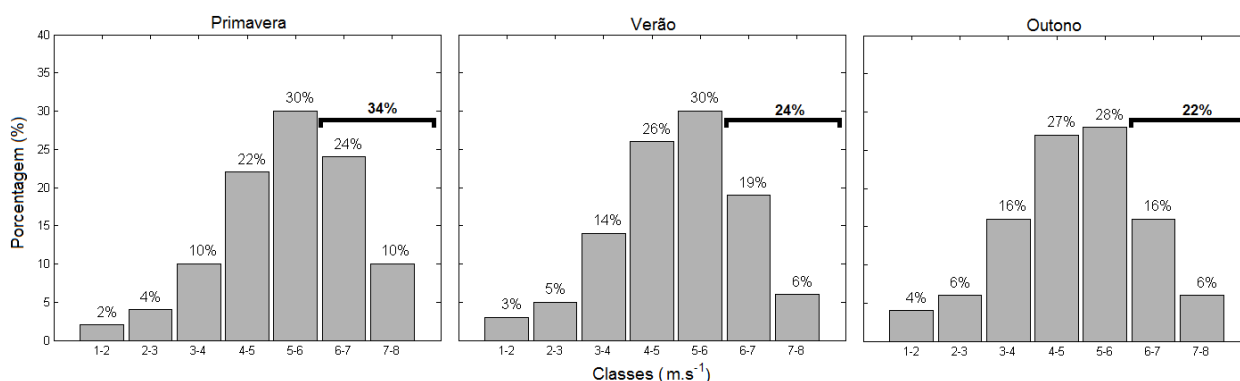


Figura 9: Distribuição de frequência da velocidade dos ventos para um ponto de grade ao largo de Natal durante as campanha selecionadas da Tabela 1.

A análise espectral dos ventos exibe um padrão similar para as 3 campanhas. A análise revela três bandas principais com períodos de: 1 dia (diurno); 3 a 5 dias; e acima de 6 dias (Figura 10). O sinal da brisa marinha fica aparente nas três campanhas, sendo a campanha de outono aquela que apresenta a maior variabilidade diurna. A maior parte da energia dos ventos está concentrada na banda de baixa frequência ou período superior a 7 dias.

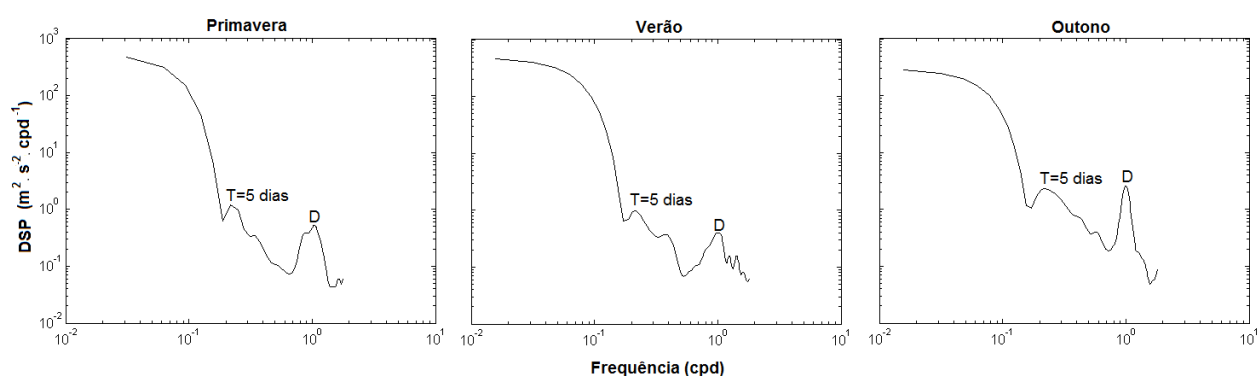


Figura 10: Densidade espectral de potência da intensidade dos ventos para as campanhas de primavera, verão e outono (Tabela 1). Textos indicam os períodos de variabilidade dos ventos: diurno (D) e 5 dias.

5.4. Nível do mar

5.4.1. Nível histórico

O nível para o porto do Natal é representado por uma série histórica de 60 dias que compreende o período de 01/04/2005 a 30/05/2005. A Figura 11 apresenta esta série, assim como as componentes de tensão de cisalhamento do vento para as componentes através (τ_x) e ao longo da costa (τ_y).

Sobreposta à série de nível η apresentamos a série filtrada η_f com uma frequência de corte de 43 horas. Eliminando variações de alta frequência obtém-se a componente *não astronômica* ou *subtidal* do nível do mar Pugh (2004).

Verificou-se que a componente subtidal é muito baixa, sua amplitude possui valor médio quadrático⁴ de 0.06 m.

Similarmente, realizou-se a filtragem dos dados de vento com a mesma frequência de corte de 43 horas, afim de eliminar os sinais de alta frequência como da brisa marinha/terrestre. A série de ventos ilustra ventos dominantes contra a costa ($\tau_x < 0$) e ao longo da costa ($\tau_y > 0$).

$$^4 RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n}}$$

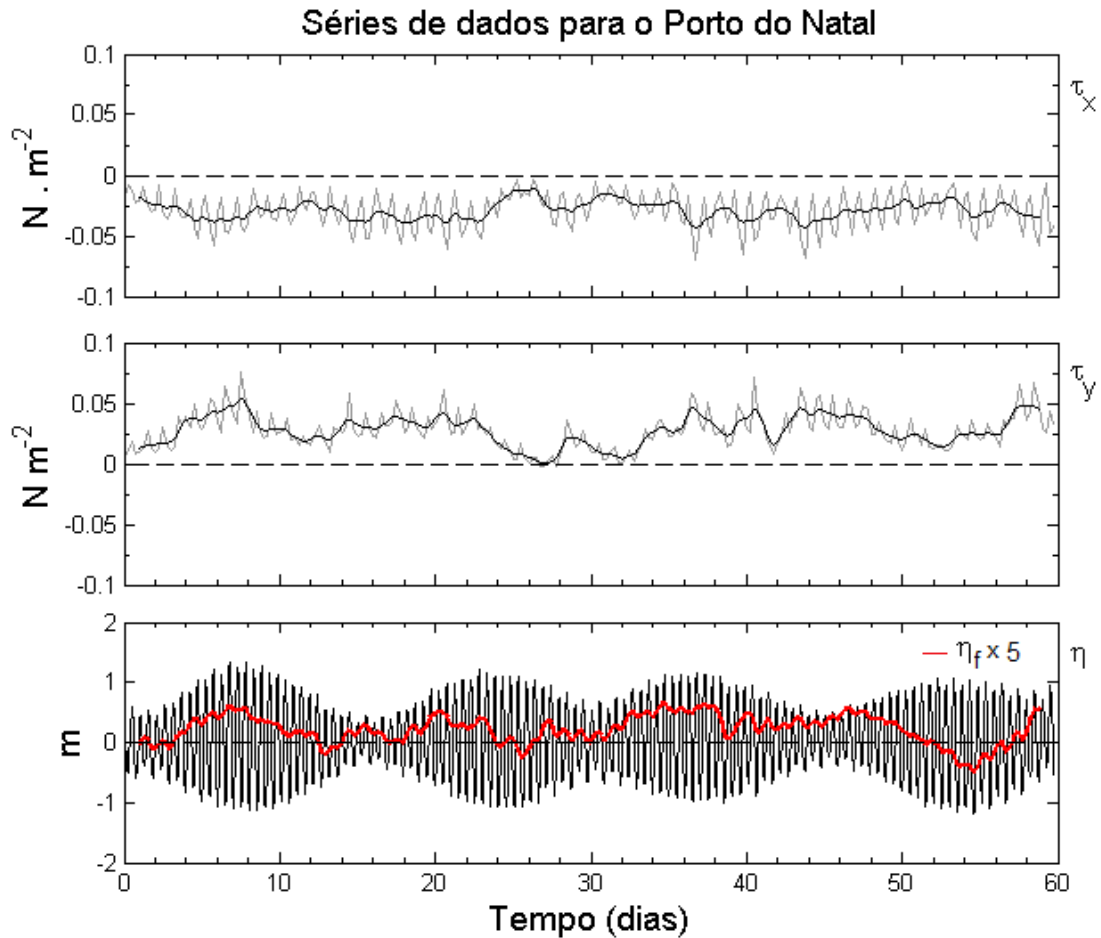


Figura 11: Série temporal histórica de nível para o Porto do Natal e ventos derivados do modelo ERA-Interim (ECMWF). Em conjunto são apresentadas as séries filtradas. O período refere-se a 01/04/2005 a 30/05/2005 ou transição da primavera para o verão. Horário UTC.

Aplicando o coeficiente de correlação de Pearson⁵ entre τ_x e η_f chegou-se ao valor de $r = -0.39$, indicando uma fraca correlação linear negativa. A correlação foi maior, porém moderada em relação τ_y , $r = 0.47$. A análise espectral para os dados de nível do Porto do Natal são apresentadas na Figura 12. Ela revelou a dominância da banda semi-diurna das marés (97,92%), seguida da baixa frequência e banda meteorológica (1%) e diurna (0,72%) (Tabela 2).

⁵ $r = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{var(x).var(y)}}$, aplicado com a função **corrcoef** do software MatLab.

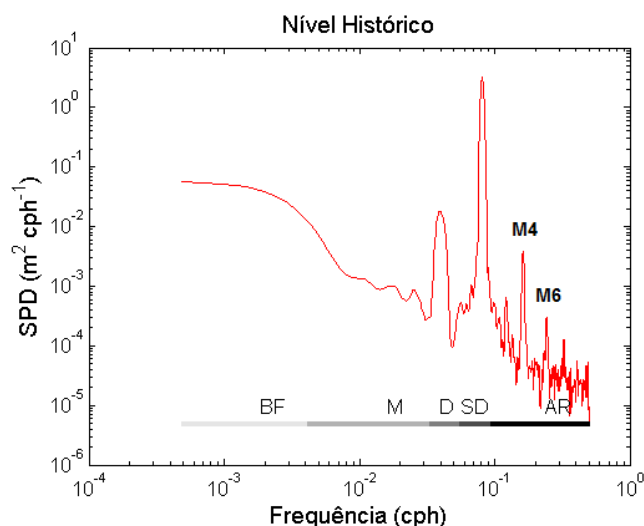


Figura 12: Análise espectral do nível do mar para o Porto do Natal. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente às bandas de; baixa frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna, e águas rasas. São representadas as componentes de águas rasas M4 e M6.

Forçantes	Bandas de frequência (cph)	Períodos (h)	Energia (%)
Baixa frequência	$0,00048 < f \leq 0,00417$	$240 < T$	0,77
Meteorológica	$0,00417 < f \leq 0,03333$	$30 < T \leq 240$	0,23
Diurna	$0,03333 < f \leq 0,05555$	$18 < T \leq 30$	0,72
Semi-diurna	$0,05555 < f \leq 0,09090$	$11 < T \leq 18$	97,92
Águas rasas	$0,09090 < f \leq 0,50000$	$2 < T \leq 11$	0,32

Tabela 2: Partição energética derivada da análise espectral de nível do porto, distribuídas de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov *et al*, 2002).

A análise harmônica revelou 11 constantes estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiança. Foram encontradas 3 constantes diurnas, 4 semi-diurnas e 4 de águas rasas (Tabela 3).

A análise harmônica revelou que as constituintes semi-diurnas são mais energéticas, corroborando a análise espectral. As constituintes M2, S2 e N2, apresentaram respectivamente 0.79 m, 0.29 m e 0.14 m de amplitude. Quanto as componentes diurnas foram 0.049 m para O1 e 0.042 m para K1,

caracterizando a região por número de forma⁶ de 0.07, classificando a região como dominada por um regime de meso-maré com características semi-diurnas.

Constante	Frequência (cph)	Período (h)	Frequência angular (°/h)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	0,08051	12,42	28,98	0,79	210,04
S2	0,08333	12,00	30,00	0,29	216,55
N2	0,07900	12,65	28,44	0,14	199,81
O1	0,03873	25,81	13,94	0,04	203,53
K1	0,04178	23,93	15,04	0,04	263,49
L2	0,08202	12,19	29,52	0,03	204,20
M4	0,16102	6,21	57,96	0,02	161,81
MS4	0,16384	6,10	58,98	0,01	188,41
Q1	0,03722	26,86	13,39	0,01	169,66
MN4	0,15951	6,26	57,42	0,01	149,90
M3	0,12077	8,28	43,47	0,00	265,75

Tabela 3: Componentes Harmônicas em ordem decrescente de amplitude. Análise realizada com dados do porto de Natal de 01/04/2005 a 30/05/2005. Dados coletados em UTC.

O principal harmônico da frequência fundamental M2 corresponde a componente M4. A razão M4/M2 das amplitudes é usada como uma medida de distorção da componente principal semi-diurna e reflete os efeitos dissipativos do sistema, assim como a transferência de energia espectral da componente M2 para M4 (Miyao & Harari, 1989). O valor calculado para a razão M4/M2 foi de 0,02, ou seja a componente M4 representa 2 % da amplitude semi-diurna.

5.4.2. Nível na região de fundeio

A análise harmônica foi realizada para as três campanhas em conjunto, revelando 28 constantes harmônicas estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiança. As constantes estão apresentadas na Tabela 4.

$${}^6 Nf = \frac{AK_1 + AO_1}{AM_2 + AS_2} = \frac{0.04 + 0.04}{0.79 + 0.29} = \frac{0.08}{1.08} = 0.07$$

As componentes mais energéticas foram as semi-diurnas M2 seguidas de S2 e N2. O número de forma⁷ calculado foi de 0.09, classificando a maré como semi-diurna pura.

Constante	Frequência (cph)	Período (h)	Frequência angular (°/h)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	0,080511	12,42	28,98	0,82	202,73
S2	0,083333	12,00	30,00	0,27	227,34
N2	0,078999	12,66	28,44	0,16	186,72
K2	0,083562	11,97	30,08	0,09	220,17
O1	0,038731	25,82	13,94	0,05	170,98
K1	0,041781	23,93	15,04	0,05	293,99
MM	0,001512	661,29	0,54	0,05	356,08
P1	0,041553	24,07	14,96	0,03	257,63
MSF	0,002822	354,37	1,02	0,03	353,37
MU2	0,07769	12,87	27,97	0,03	177,26
Q1	0,037219	26,87	13,40	0,02	111,17
PHI1	0,042009	23,80	15,12	0,01	343,14
L2	0,082024	12,19	29,53	0,01	223,76
M3	0,120767	8,28	43,48	0,01	244,59
2Q1	0,035706	28,01	12,85	0,01	90,69
TAU1	0,038959	25,67	14,03	0,01	191,91
SO3	0,122064	8,19	43,94	0,01	326,26
MO3	0,119242	8,39	42,93	0,00	227,14
M4	0,161023	6,21	57,97	0,00	283,52
MS4	0,163845	6,10	58,98	0,00	205,43
MK3	0,122292	8,18	44,03	0,00	82,30
S4	0,166667	6,00	60,00	0,00	358,20
2MK6	0,244584	4,09	88,05	0,00	323,37
3MK7	0,283315	3,53	101,99	0,00	349,09
MSK6	0,247406	4,04	89,07	0,00	338,26
2MS6	0,244356	4,09	87,97	0,00	149,31
M6	0,241534	4,14	86,95	0,00	90,91
2MN6	0,240022	4,17	86,41	0,00	81,80

Tabela 4: Constituintes harmônicas encontradas para nível no ponto de fundeio em ordem decrescente de amplitude. Análise realizada com as séries apresentadas na Tabela 1. Horário UTC.

$${}^7 Nf = \frac{AK_1 + AO_1}{AM_2 + AS_2} = \frac{0,05 + 0,05}{0,82 + 0,27} = \frac{0,10}{1,09} = 0,09$$

Corroborando à análise harmônica, a análise espectral revelou que a banda semi-diurna é a mais energética na região de fundeio, chegando a ser 2 ordens de grandeza maior que as outras bandas (Figura 13 e Tabela 5). A banda meteorológica possui amplitude similar. As séries de nível η para as três campanhas serão apresentadas no item 5.5.2 onde serão comparadas e correlacionadas aos ventos e correntes ao longo e através da costa. As componentes M4 e M6 são mais desenvolvidas para o estuário.

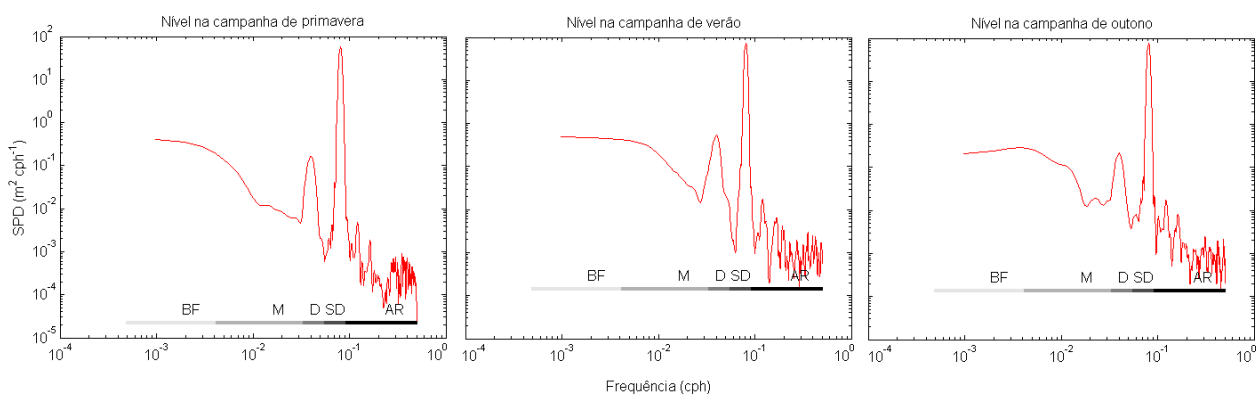


Figura 13: Análise espectral de nível para as estações de primavera, verão e outono no ponto de fundeio. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente a banda de baixa frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna e águas rasas.

Forçantes	Bandas de frequência (cph)	Energia (%)		
		Primavera	Verão	Outono
Baixa frequência	$0,00048 < f \leq 0,00417$	0,23	0,28	0,15
Meteorológica	$0,00417 < f \leq 0,03333$	0,13	0,61	0,33
Diurna	$0,03333 < f \leq 0,05555$	0,32	0,88	0,36
Semi-diurna	$0,05555 < f \leq 0,09090$	99,26	98,07	99,02
Águas rasas	$0,09090 < f \leq 0,50000$	0,05	0,16	0,15

Tabela 5: Partição energética derivada da análise espectral de nível na região de fundeio. Distribuição de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov *et al*, 2002). Partição calculada para as campanhas de primavera verão e outono.

5.5. Correntes

5.5.1. Análise direcional

Analisando os diagramas direcionais apresentados na Figura 14, percebemos que as direções predominantes das correntes são do quadrante Norte com um espalhamento direcional de aproximadamente 90° , sendo a campanha de primavera a que apresentou maior variabilidade direcional. A campanha de verão teve correntes mais intensas e a campanha de outono teve menor variabilidade direcional.

Na Figura 15 são apresentadas as distribuições de frequências das velocidades de corrente por campanha. A campanha de verão apresentou correntes mais intensas, apresentando mediana de $12,8 \text{ cm s}^{-1}$, seguida de primavera com $9,3 \text{ cm s}^{-1}$ e outono $8,0 \text{ cm s}^{-1}$.

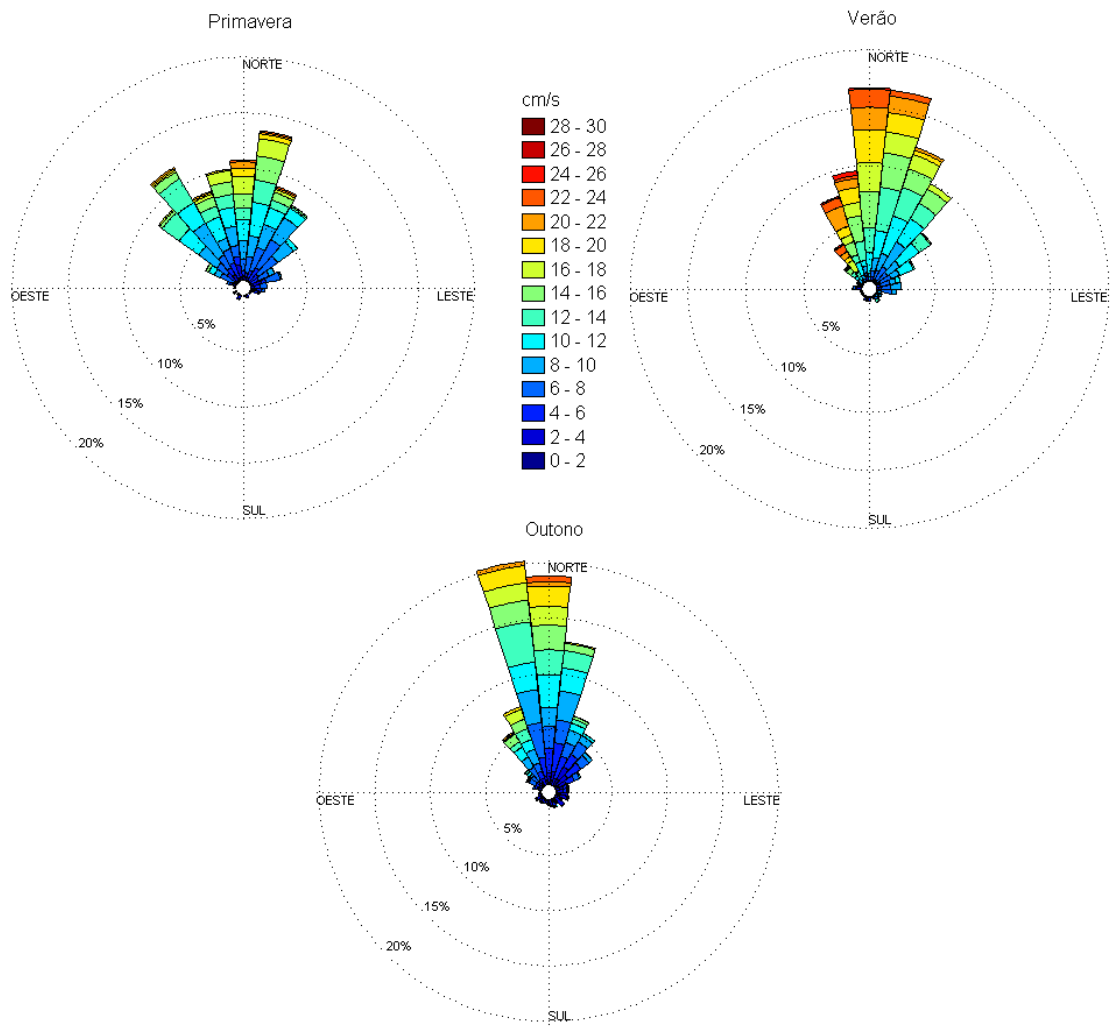


Figura 14: Diagrama de direção e intensidade das correntes na região de fundeio para as campanhas de primavera, outono e verão. A direção das barras segue a convenção oceanográfica e aponta na direção que a corrente vai.

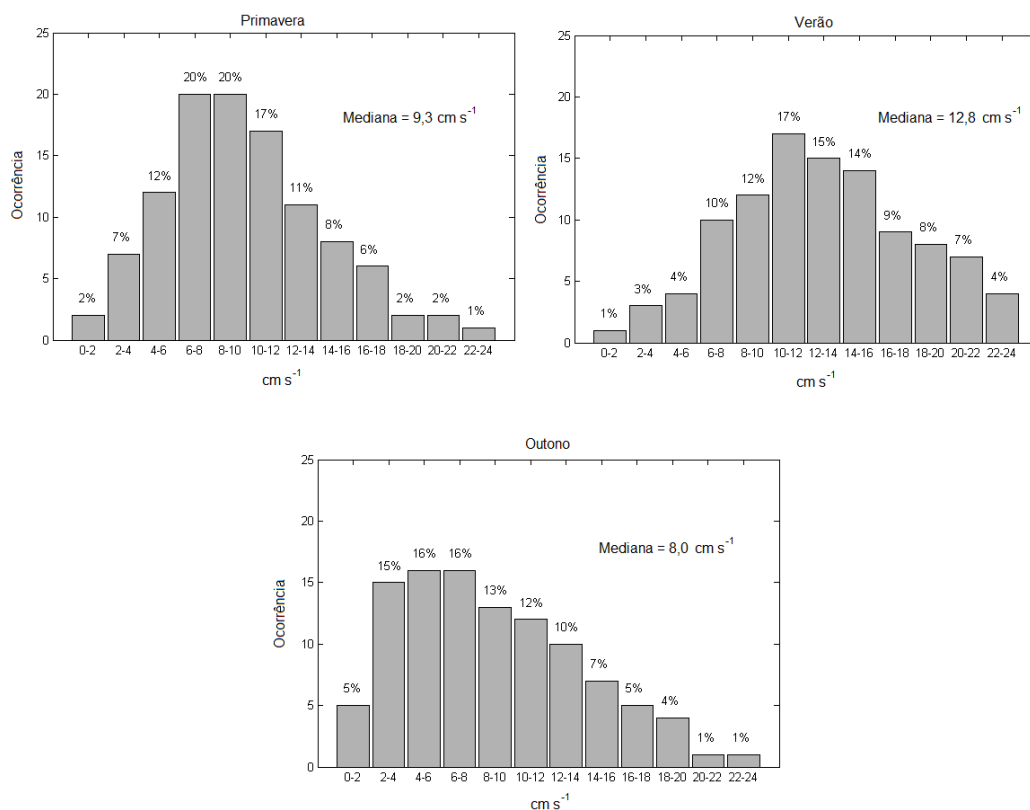


Figura 15: Distribuição de frequências da velocidade das correntes para as campanhas de primavera, verão e outono. A mediana de cada distribuição é apresentada em cada gráfico.

5.5.2. Análise das séries temporais

As Figura 16, 17 e 18 ilustram as séries temporais de vento e corrente decompostas em suas componentes ao longo (v_y e τ_y) e através da costa (u_x e τ_x), assim como a série de nível para as campanhas de primavera, verão e outono. Sobreposta a cada série são apresentadas as séries filtradas.

De maneira geral os ventos são contra e ao longo da costa (no sentido norte), nunca ocorrendo reversão dos ventos no sentido perpendicular à costa. Em alguns poucos períodos os ventos ao longo da costa v_y revertem seu sentido ou relaxam em magnitude, como o que ocorreu no décimo terceiro dia da campanha de outono (Figura 18). Observa-se uma periodicidade da ordem de 5

a 10 dias. Também é visível a variabilidade da brisa diurna em ambas as componentes para todas as campanhas.

O nível do mar claramente ilustra a predominância semi-diurna das marés e a variação de quadratura e sizígia, com alturas que variam de um a dois metros.

As correntes para os três períodos demonstram variabilidade de alta frequência associada às marés, a qual essa variação é presente tanto na componente ao longo da costa quanto através da costa. A componente através da costa foi particularmente maior para a campanha de verão. As correntes ao longo da costa tem maior variabilidade e são coerentes com o vento e o nível, conforme será discutido no item 5.5.3. De maneira geral períodos de ventos intensos ao longo da costa coincidem com as maiores correntes no sentido norte. Um exemplo ocorreu no décimo primeiro dia da primavera, quando os ventos se intensificaram, e houve uma resposta relativamente rápida das correntes. Um outro exemplo ocorreu no verão.

Um caso interessante ocorreu no vigésimo dia da campanha de outono, onde a tensão paralela à costa foi mínima durante 7 dias e a corrente através da costa tendeu a inverter, ficando predominantemente positiva, U_x (positivo).

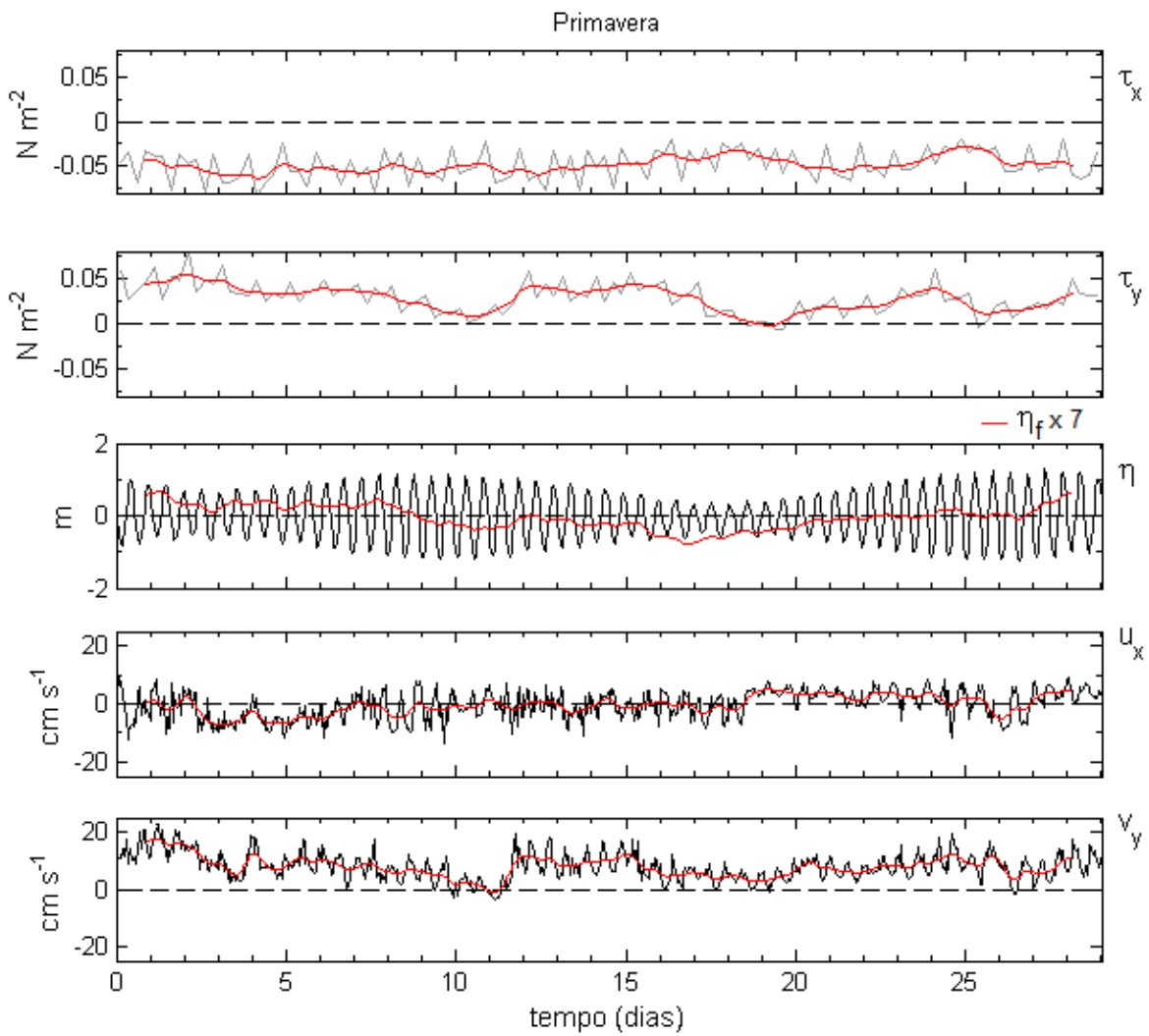


Figura 16: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidades das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de primavera. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.

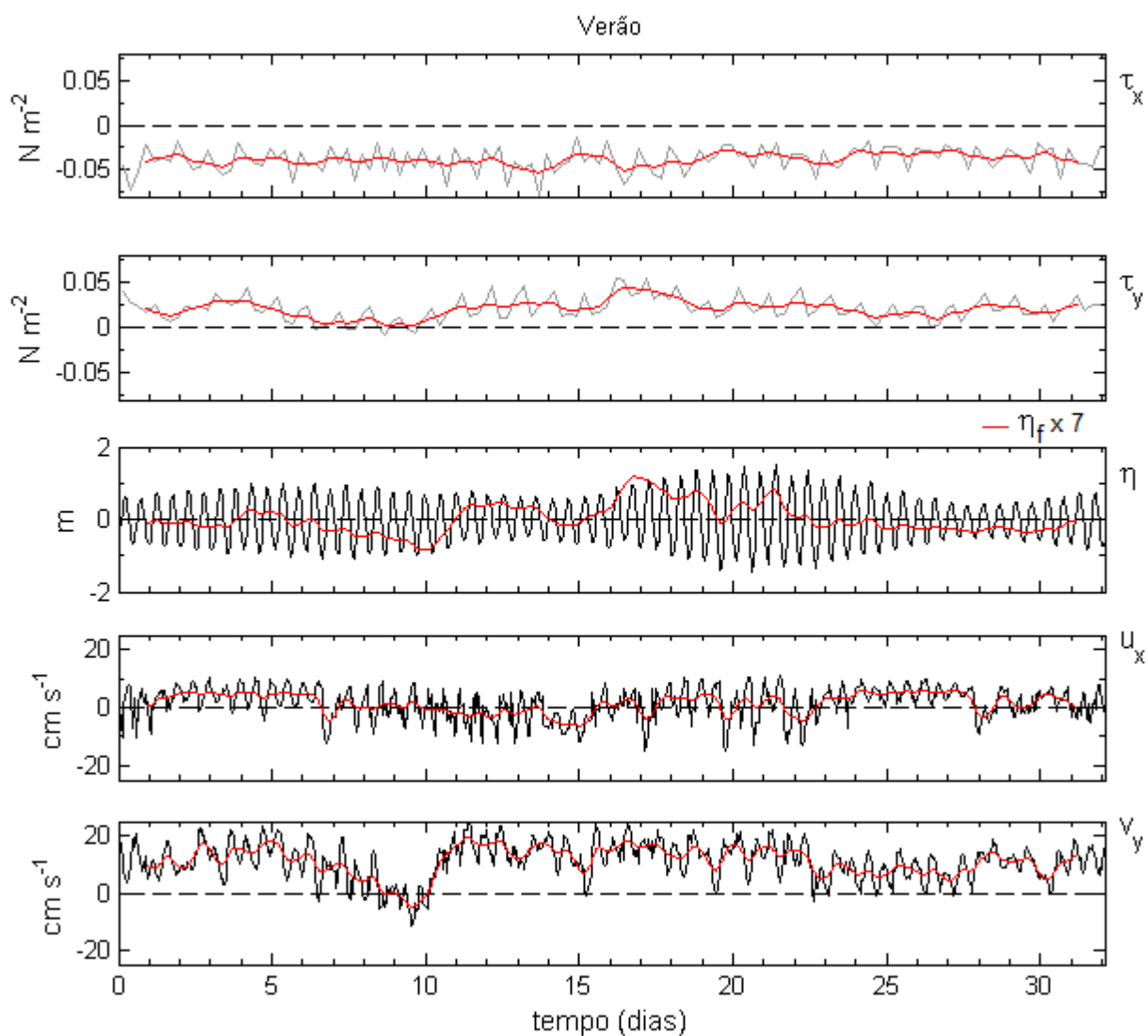


Figura 17: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidades das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de verão. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.

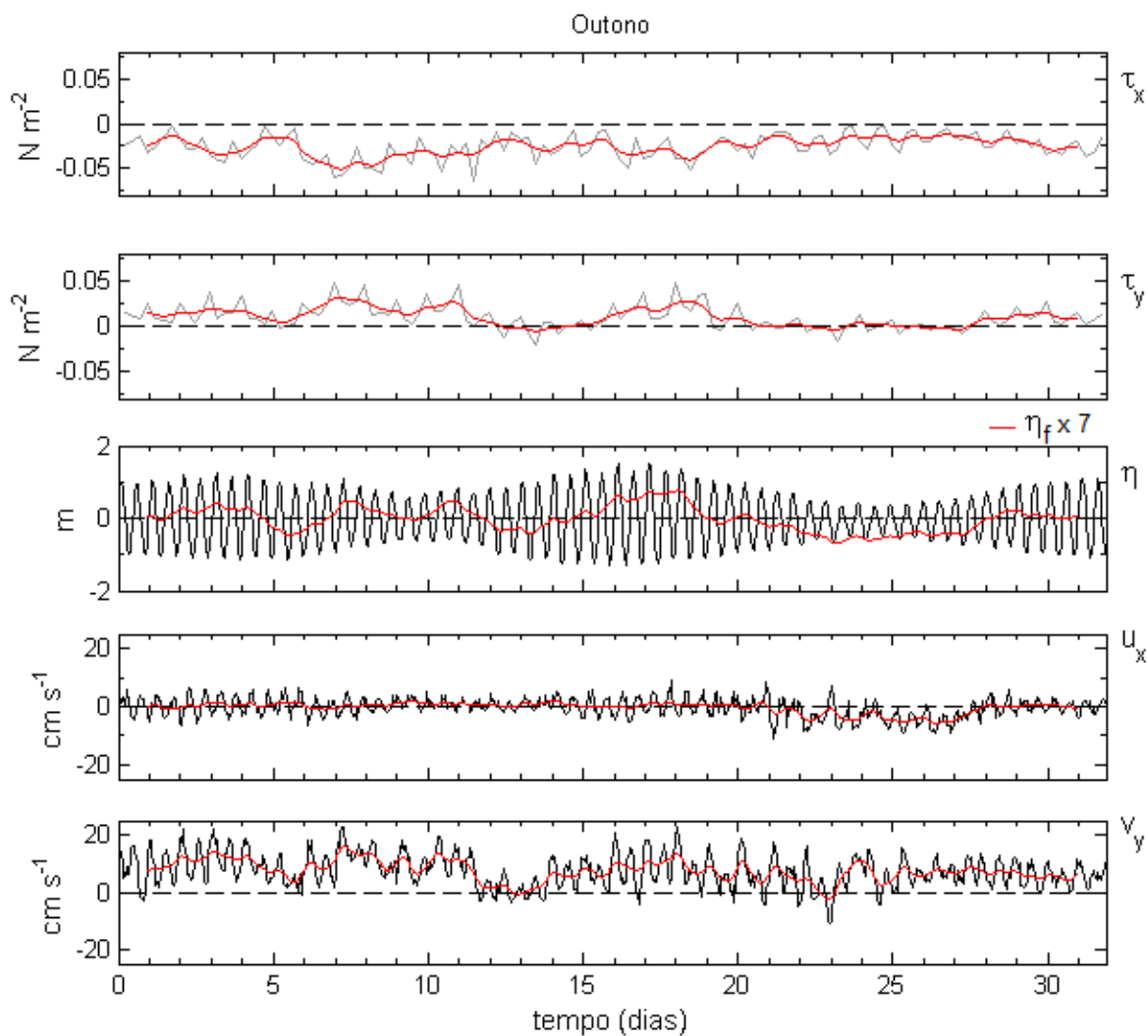


Figura 18: Séries temporais de nível η , tensão de cisalhamento através da costa (τ_x) e ao longo da costa (τ_y), assim como as velocidades das correntes através da costa (u_x) e ao longo da costa (v_y). Campanha de outono. Sobrepostas a todas as séries estão as séries filtradas.

5.5.3. Análise de correlação

Aplicando o coeficiente de correlação de Pearson entre as séries filtradas de nível (η_f), ventos e correntes ao longo (τ_{yf} e v_{yf}) e através da costa (τ_{xf} e u_{xf}), pode-se em uma primeira análise buscar entender o comportamento do nível e das correntes em função da forçante dos ventos em baixa frequência.

As Tabela 6, 7 e 8, apresentam os coeficientes de correlação entre as séries filtradas para as três campanhas.

	η_f	τ_{xf}	τ_{yf}	u_{xf}	v_{yf}
η_f	1	-	-	-	-
τ_{xf}	-0,39	1	-	-	-
τ_{yf}	0,50	-0,37	1	-	-
u_{xf}	-0,27	0,36	-0,36	1	
v_{yf}	0,63	-0,10	0,75	-0,09	1

Tabela 6: Tabelas de correlação entre as séries filtradas das componentes ao longo (τ_{yf} e v_{yf}) e através da costa (τ_{xf} e u_{xf}) e nível (η_f). Campanha de primavera.

	η_f	τ_{xf}	τ_{yf}	u_{xf}	v_{yf}
η_f	1	-	-	-	-
τ_{xf}	-0,28	1	-	-	-
τ_{yf}	0,73	-0,38	1	-	-
u_{xf}	-0,11	0,31	-0,16	1	-
v_{yf}	0,75	-0,32	0,75	-0,21	1

Tabela 7: igual a tabela 6, mas para a campanha de verão.

	η_f	τ_{xf}	τ_{yf}	u_{xf}	v_{yf}
η_f	1	-	-	-	-
τ_{xf}	-0,61	1	-	-	-
τ_{yf}	0,78	-0,80	1	-	-
u_{xf}	0,63	-0,50	0,50	1	-
v_{yf}	0,66	-0,52	0,78	0,24	1

Tabela 8: igual a tabela 6, mas para a campanha de outono.

Verificamos nas Tabela 6, 7 e 8 uma forte correlação entre os ventos e as correntes ao longo da costa (τ_{yf} e v_{yf}), apresentando correlações diretas de ($r > 0,75$), sugerindo que os ventos paralelos à costa controlam as correntes. Resultados semelhantes foram encontrados por Zavialov *et al.* (2002) em um fundeio realizado na isóbata de 50 m, a 20 km da cidade de Rio Grande, RS, onde encontraram uma correlação direta ($r=0,72$). Também ao largo de Rio Grande Costa & Möller (2011) encontraram uma correlação de $r=0,81$ próximo a isóbata de 15 m. Dias *et al.* (2011) ao fundear um ADCP na isóbata de 30 m ao largo Fortaleza, CE, encontrou correlações positivas de ($r=0,58$).

Corroborados pelos estudos de (Costa & Möller, 2011; Zavialov *et al.* (2002), encontrou-se correlações negativas entre τ_y e u_x no ponto de fundeio, sugerindo neste caso que τ_y (positivo) induzem correntes em direção à costa u_x (negativo).

De maneira geral ventos positivos paralelos à costa (τ_y) causam empilhamento de água (η_f) e correntes no sentido norte (v_y). Ventos contra a costa (τ_x) também promovem o *set-up* (empilhamento) de (η_f) e modulam moderadamente a componente das correntes através da costa (u_x).

5.5.4. Análise espectral

Em concordância à análise de correlação, a análise espectral das componentes u_x e v_y identificam uma significativa parcela da energia concentrada na banda subtidal. O espectro da componente v_y revela a banda de baixa frequência como mais energética, assim sugerindo a banda meteorológica como

principal forçante das correntes ao longo da costa. Já o espectro de correntes através da costa u_x indicam que a banda de frequência da maré é mais importante (Figura 19). A Tabela 9 apresenta a partição energética das componentes u_x e v_y resultante da análise espectral, e está de acordo com os dados de correlação. A componente v_y é dominada pela banda de baixa frequência e a componente u_x é dominada pelas marés. Note que na campanha de outono os ventos ao longo da costa tiveram magnitudes relativamente baixas por aproximadamente doze dias, o que fez aumentar a contribuição energética da banda de maré (ver Tabela 9 e Figura 18).

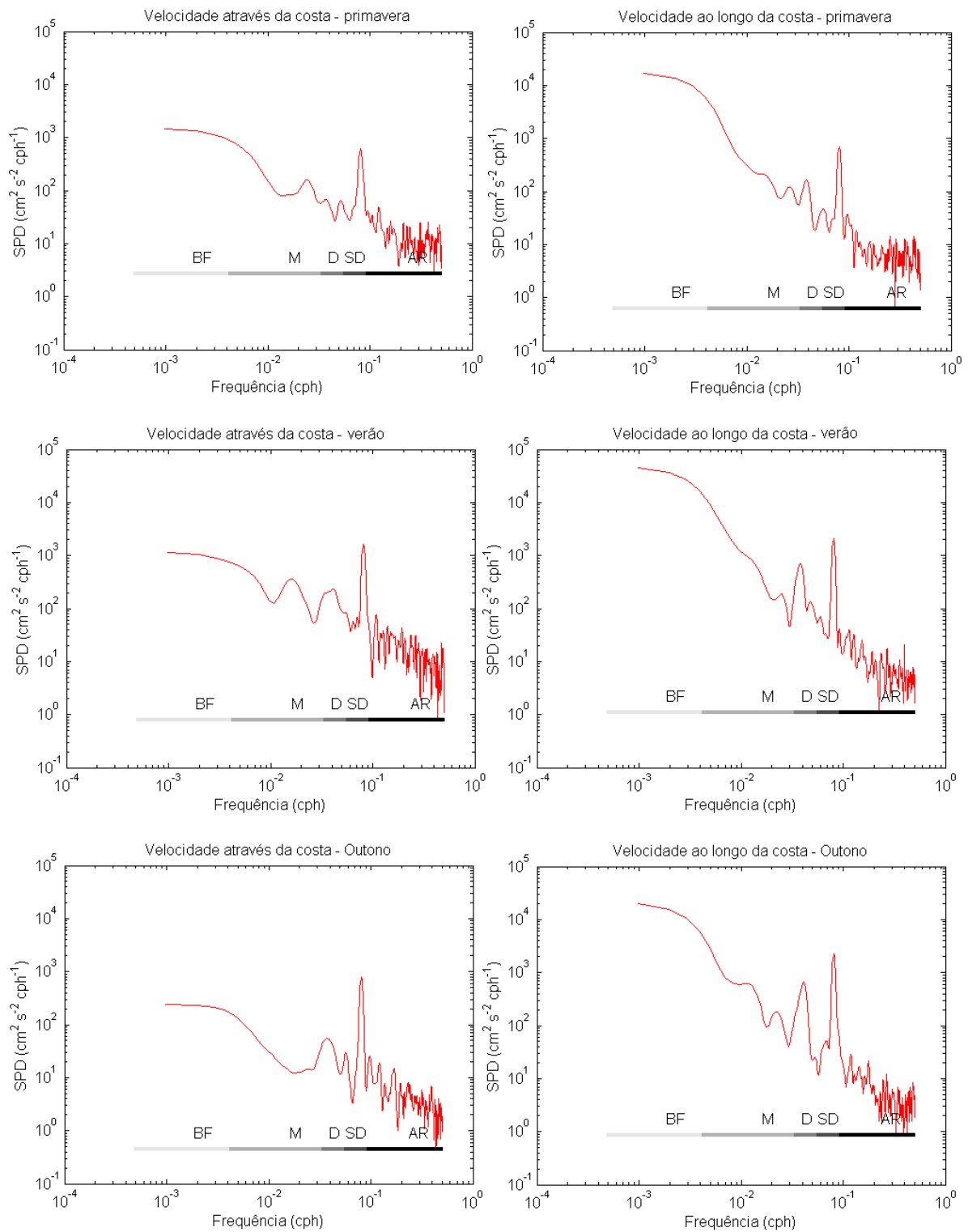


Figura 19: Comparação entre as componentes da velocidade ao longo (u_x) e através (v_y) da costa durante as campanhas de primavera, verão e outono. Note que a banda subtidal é dominante na componente ao longo da costa e a maré na componente perpendicular à costa. Os símbolos BF, M, D, SD, AR referem-se respectivamente a banda de baixa frequência, meteorológica, diurna, semi-diurna e águas rasas.

Forçantes	Bandas de frequência (cph)	Energia (%)					
		Primavera		Verão		Outono	
		U _x	V _y	U _x	V _y	U _x	V _y
Baixa frequência	$0,00048 < f \leq 0,00417$	17,63	65,33	9,12	66,18	6,89	53,09
Meteorológica	$0,00417 < f \leq 0,03333$	21,57	17,70	18,78	17,55	8,22	14,20
Diurna	$0,03333 < f \leq 0,05555$	5,10	2,78	10,63	3,88	7,13	7,31
Semi-diurna	$0,05555 < f \leq 0,09090$	28,87	10,33	40,88	9,85	57,37	21,74
Águas rasas	$0,09090 < f \leq 0,50000$	26,82	5,85	20,60	2,54	20,39	3,66

Tabela 9: Partição energética derivada da análise espectral de nível na região de fundeio. Distribuição de acordo com quatro bandas de frequência (Zavialov *et al*, 2002). Partição calculada para as campanhas de primavera, verão e outono.

5.5.5. Diagrama vetorial progressivo

O diagrama vetorial progressivo (DVP) de correntes representa o pseudo-deslocamento de uma partícula a partir de dados pontuais de corrente.

A trajetória é calculada a partir das seguintes equações:

$$x = x_0 + \int_{t_i}^{t_f} u \, dt$$

$$y = y_0 + \int_{t_i}^{t_f} v \, dt$$

Onde x e y representam as distâncias percorridas (m), x_0 e y_0 os pontos de origem e t_i , t_f os tempos inicial e final dos registros, respectivamente. A análise assume a trajetória de uma partícula flutuante para um campo uniforme de correntes e variável no tempo.

A Figura 20 apresenta o DVP das cinco campanhas disponíveis para pontos de origem arbitrários. O diagrama confirma que o deslocamento predominante das correntes é em direção Norte ou mais especificamente ao longo da costa ($\theta=16^\circ W$). O deslocamento residual para as campanhas de primavera e outono foram de aproximadamente 200 km e no verão chegam a 320 km durante 30 dias.

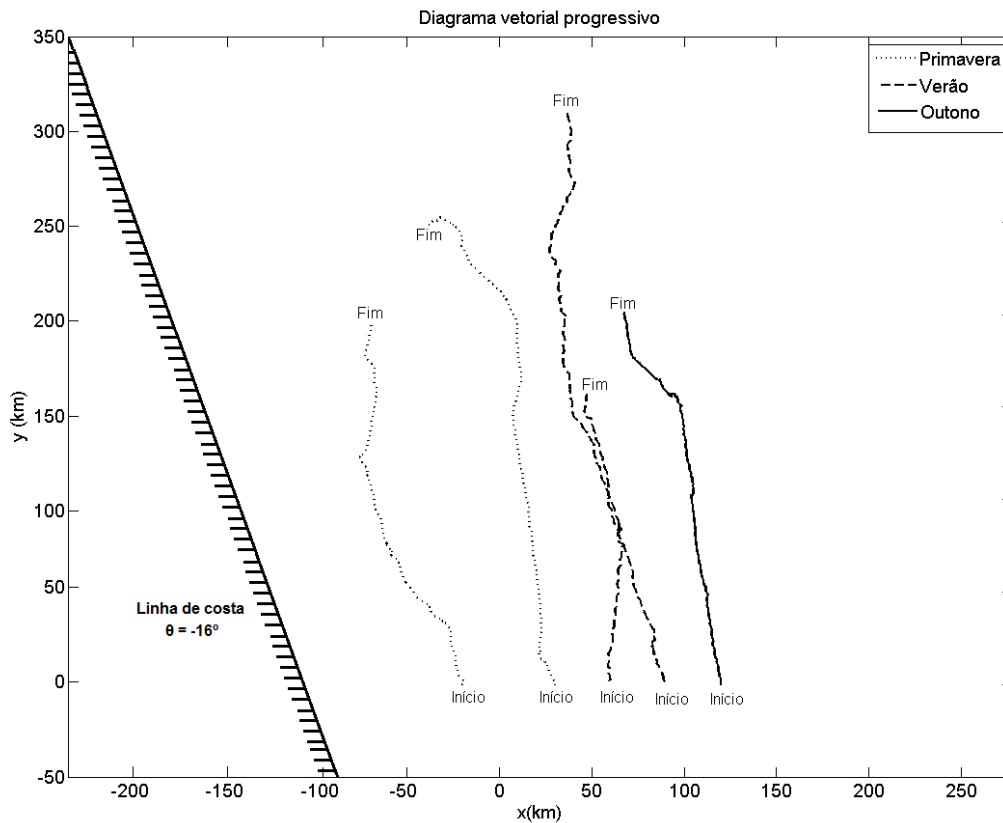


Figura 20: Diagrama vetorial progressivo das correntes a uma profundidade média de 8,5 metros. Campanhas de primavera, verão e outono.

6. SUMÁRIO E CONCLUSÃO

Neste trabalho foram investigadas séries inéditas de medição de correntes para a plataforma continental interna de Natal, RN. Tais informações foram combinadas com dados de maré do porto e ventos derivados de uma base histórica de reanálise.

Os dados de nível histórico e no ponto de fundeio revelaram que ~98% da energia concentra-se na banda semi-diurna, 1,29% na diurna e a banda meteorológica e de baixa frequência refere-se a 0,36%. Embora de baixa amplitude, o sinal subtidal possui forte correlação com os ventos e correntes ao longo da costa.

Correntes da região de Ponta Negra são predominantemente de direção Norte, revelaram maiores intensidades na campanha de verão, apresentando mediana de $12,8 \text{ m s}^{-1}$, seguida da primavera $9,3 \text{ m s}^{-1}$ e outono $8,0 \text{ m s}^{-1}$. A análise espectral indica que a componente ao longo da costa apresenta maior energia nas bandas de baixa frequência e meteorológica, enquanto a componente através da costa na banda semi-diurna das marés. A análise de séries temporais indicam que as correntes ao longo da costa são moduladas pelos ventos, enquanto a componente através da costa é modulada principalmente pela maré e secundariamente pelos ventos. O deslocamento residual das correntes é predominantemente na direção norte e paralelo à linha de costa. A campanha de verão estimou uma trajetória de 320 km durante ~30 dias. Já para primavera e outono o deslocamento residual foi de aproximadamente 200 km em ~30 dias.

O presente trabalho pode ser melhorados através de uma análise mais refinada de correlação defasada entre as séries de dados e através da análise harmônica das correntes de maré.

7. REFERÊNCIAS

- AMARAL, R.F. (1999);** Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte entre Ponta de Búzios e Baía Formosa. 1999. 252 f. Tese Doutorado em Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- BARROS, J. D. (2013);** Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull. Sociedade e Território, Natal, v. 25, nº 2, EDIÇÃO ESPECIAL, p. 78-92.
- CASTRO, B.M.; LORENZZETTI, J.A.; SILVEIRA, I.C.A.; MIRANDA, L.B, ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.; MADUREIRA, L. (2006);** Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: C.L.D.B. Rossi-Wongtschowski & L.S.P. Madureira (eds.), O ambiente oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil, pp.11-120, EDUSP (Editora da Universidade de São Paulo), São Paulo, SP, Brasil. ISBN: 8531409489.
- CAVALCANTI, I.F. de A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. (2009);** Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, p 463.
- COUTINHO, P.N. (1976);** Geologia marinha da plataforma continental Alagoas- Sergipe. Recife. Tese de Livre Docência. Universidade Federal de Pernambuco, 119 p.
- 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.
- DIAS, F. J. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D. (2011);** Circulação na plataforma continental ao largo do estuário do rio Jaguaribe (Ceará - nordeste – Brasil), durante a estação chuvosa de 2009. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia – SBO; Livro de Resumos.
- EMERY, W.J.; THOMSON, R.E. (2001).** Data analysis methods in physical oceanography, Elsevier Science, Amsterdam, Holanda. ISBN: 9780444507563. . 638 p.
- HEEZEN, B.C. & MENARD, H.W. (1966);** Topography of the deep sea floor. In: M.N.Hill (ed), The Sea, Intersec. Publ., 3:233-280.

- INTEROCEAN, (2004)**; S4 Current Meter, User's Manual. Inter Ocean Systems, San Diego – CA.
- INTEROCEAN, (2013)**; S4 Current Meter Applications Software User's Guide. Version 5.1.3c, San Diego –CA.
- LARGE W. G. AND POND S., (1981)**; Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 324–336.
- LENTZ, S. J. (1995)**; Sensitivity of the inner-shelf circulation to the form of the eddy viscosity profile. *Journal of Physical Oceanography*, 25(1):19–28
- MACIEL, A. B. C. (2010)**; Ponta Negra: Uma abordagem da paisagem costeira de 1970 a 2010, NATAL/RN. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFRN.
- MELLOR, G. L., (1996)**; Introduction to Physical Oceanography. AIP Press. V.1, p. 147-173.
- MENDES, J.C. (1992)**; Elementos de estratigrafia. 566p., Editora T.A. Queiroz & EDUSP (Editora da Universidade de São Paulo), SP, Brasil. ISBN: 8585008164.
- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. (2002)**. Princípios de Oceanografia Física de Estuários, Edusp (Editora da Universidade de São Paulo), São Paulo, SP, Brasil, ISBN: 85-314-0675-7. 414 p.
- MIYAO, S.Y & HARARI, J., (1989)**; Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia (25°5 - 48°W). *Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo*, 37(2):107-123,1989.
- NIMER, E., (1989)**; Climatologia do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ; 421 p.
- PEREIRA, T. R. B. (2013)**; Aplicação da batimetria multifeixe para análise da morfologia do fundo marinho adjacente à praia de Ponta Negra – RN. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação Em Geofísica, UFRN, 42 p.
- PALOWICZ, R.; BEARDSLEY. B.; LENTZ, S. (2002)**; Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, V. 28, n.8 p. 929-937, 2002.

- PUGH, D.T. (2004);** Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press, 280pp.
- SANTOS. A. L. F. (2013);** Influência dos transportes de volume, calor e sal pela passagem de Drake e pela retroflexão da corrente das agulhas na célula de revolvimento meridional do Atlântico Sul, Trabalho de Conclusão de Curso, Oceanografia – UFSC, 86 p.
- STRANG, D. M. G. (1972);** Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste do Brasil. São José dos Campos: CTA/IAE.
- TEIXEIRA, R. S. B. (2008);** O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.3, 282-291.
- TRUCCOLO EC. (2005);** Hidrodinâmica de estuários em frequência mareal e submareal. Tese de Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 101 p.
- VITAL, H. (2006);** Rio Grande do Norte. Erosão e progradação do litoral brasileiro / Dieter Muehe, organizador. – Brasília: MMA. p. 155-171.
- VITAL, H. (2012);** Heterogeneidade espaço-temporal da linha de costa e do substrato plataformal adjacente a Ponta Negra, Natal-RN. Projeto submetido ao Edital Universal – CNPq.
- WELCH, P. (1967);** The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectral: a method based on time averaging over short, modified periodograms. Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions (ISSN: 0018-9278).
- 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.