



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAPHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAPHIA

RAMILLA VIEIRA DE ASSUNÇÃO

VARIABILIDADE SAZONAL DA DINÂMICA OCEÂNICA NA REGIÃO DO MAR DE
DENTRO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA, PE

RECIFE

2017

RAMILLA VIEIRA DE ASSUNÇÃO

VARIABILIDADE SAZONAL DA DINÂMICA OCEÂNICA NA REGIÃO DO MAR DE
DENTRO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA, PE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Oceanografia do Departamento de Oceanografia
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Costa da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Manuel de Jesus Flores
Montes

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

A851v Assunção, Ramilla Vieira de.

Variabilidade sazonal da dinâmica oceânica na região do mar de dentro do arquipélago de Fernando de Noronha, PE./ Ramilla Vieira de Assunção, 2017.

101 folhas. Il., Tabs., Abr. e Sigl.

Orientador: Profº. Dr. Alex Costa da Silva.

Coorientador: Profº. Dr. Manuel de Jesus Flores Montes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2017.
Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Propriedades termohalinas e hidrodinâmicas.
3. Estudos dos processos químicos e biológicos ativos. 4. Comportamento termohalino e químico. I. Silva, Alex Costa da. (Orientador). II. Montes, Manuel de Jesus Flores (Coorientador). III. Título.

UFPE
551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2017 - 90

RAMILLA VIEIRA DE ASSUNÇÃO

VARIABILIDADE SAZONAL DA DINÂMICA OCEÂNICA NA REGIÃO DO MAR DE
DENTRO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA, PE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Oceanografia do Departamento de Oceanografia
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Costa da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Manuel de Jesus Flores
Montes

Aprovada em: 13 de fevereiro de 2017.

Dr. Alex Costa da Silva, Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Marcelo Rollnic, Universidade Federal do Pará

Dra. Dóris Regina Aires Veleda, Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Alfabetização, ensino fundamental, ensino médio, universidade, sou oceanógrafa, quanta responsabilidade. E agora eis que sou Mestre em Oceanografia. Chegar até aqui foi somente pela permissão e graça do Pai, pela força, sabedoria e saúde que tem me concedido.

Aos meus Pais, meu pai EDILTON que mesmo querendo que eu volte para casa está lá, sempre orando por mim. Minha mãe, IRENILDA, meu alicerce, sem ela nada seria. E as minhas tão amadas amigas e irmãs, minhas passarinhas PRISCILLA e TÍSCILLA, que não importa a qual distância física eu esteja, estarão sempre comigo e jamais serei sozinha porque sei que tenho vocês. MUITO, MUITO OBRIGADA POR EXISTIREM E ME AJUDAREM A VENCER MAIS ESSA ETAPA, SOU MESTRE POR VOCÊS.

Sair da minha casa, da minha Bahia foi difícil, vir a Recife foi uma experiência nova, achei que viria sozinha, mas as baianas vieram também, e foi muito bom, obrigada pela companhia durante esses dois anos meninas (Cibelle e Thaise).

Luan obrigada por aguentar tão de pertinho os meus dias mais lindos e aqueles tão difíceis, eita que descobriu tão rápido a minha chatice (risos). Mestrado e Recife sem você não seriam tão bons. Estou te esperando no doutorado viu meu geólogo!

Ao pessoal do LOFEC, que sempre me ajudou, me socorreram por muitas vezes. Como Pedro costuma dizer: É o que que Ramilla já está te aperriando aí? Obrigada Yuri, Pedro, Leo, Profa. Dóris, Prof. Marcos e as meninas Belle, Sayo e Barbara, pelas ajudas e companhia.

Meu querido orientador Alex, aquele a quem eu recorri desde o início, e não excitou em falar “Venha Ramilla, venha que aqui você vai aprender”, meu muito obrigada. E não poderia esquecer jamais do peruano mais gente boa do LOFEC, Daniel, chegou no meio do processo e me ajudou tanto e com tanta boa vontade, meu muito obrigada, saiba que terás sempre uma amiga aqui no Brasil.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, que contribuíram com o meu desenvolvimento. Em especial ao meu co-orientador Manuel, que me ajudou sempre que a ele recorri.

Obrigada pessoal e obrigada a meu Deus, e com a tua permissão continuarei a andar por todos cantos, desvendando o mistério azul desse planeta.

As mentes humanas são como um oceano, ondas e ondas de pensamentos chegando incansavelmente. Mas quanto mais fundo mergulhamos no oceano, mais sentimos a quietude e o silêncio e mais descobrimos os tesouros valiosos que lá existem. Da mesma forma, é no fundo na mente que moram as virtudes da alma.

(BK Shankarananda)

RESUMO

As ilhas oceânicas brasileiras são campos de grande interesse ambiental, científico, econômico e estratégico para o país. Uma melhor compreensão das propriedades termohalinas e hidrodinâmicas é fundamental para complementar os estudos dos processos químicos e biológicos ativos no litoral do Arquipélago de Fernando de Noronha, localizado entre as coordenadas 03°52'S e 32°25'W. O objetivo desta dissertação foi estudar o comportamento termohalino e químico do Mar de Dentro da ilha principal do arquipélago, em escala espacial e temporal, bem como a hidrodinâmica local em escala temporal. As coletas de dados utilizados para estes fins consistiram em realizações de quatro campanhas oceanográficas durante os anos de 2013 e 2014, e o fundeio de um perfilador acústico de ondas e correntes a aproximadamente 22 m de profundidade, pelo período de um ano (junho de 2013 a maio de 2014). Os resultados mostraram a presença da massa d'água Água Tropical (AT) na plataforma insular do Mar de Dentro. Durante a estação chuvosa (EC) o índice de salinidade (S) foi menor do que na estação de estiagem (EE). Padrão inverso foi observado com a temperatura (T) da água, ou seja, maiores T foram registradas na EC e menores na EE. Entre os 5 pontos de coleta não foram observadas grandes diferenças nos parâmetros termohalinas. Com características oligotróficas, a região de estudo não apresentou diferença espaciais nos parâmetros químicos da água. A região insular é marcada pelo regime semidiurno de micro marés, com a presença das componentes de águas rasas, *overtides*, dominantes. Os padrões de ventos alísios de sudeste caracterizam a região, com menores intensidades entre os meses de dezembro a março, quando a ITCZ ocupa posições mais próxima ao equador. O arquipélago é marcado pela constante presença das ondas do tipo *wind sea* de NE-E e NW-N e as ondas do tipo *swell*, com direções semelhantes as ondas locais, no entanto concentradas entre outubro de 2013 a janeiro de 2014. As maiores alturas de ondas foram observadas entre janeiro e março, relacionados a chegada dos *swells* de norte, refletindo em aumento do nível da água sobre a plataforma costeira do mar de dentro da ilha de Fernando de Noronha. O padrão de correntes zonais e meridionais dessa região é caracterizado por baixas intensidades, alcançando um máximo de $0,33 \text{ ms}^{-1}$ em julho, e $0,25 \text{ ms}^{-1}$ respectivamente. O padrão de correntes da ilha é reflexo da interação das variáveis forçantes (maré, ondas e vento), cada variável exercendo um grau de correlação com a variável dependente (corrente).

Palavras-chave: Ilha oceânica. Hidrodinâmica. Propriedades Termohalinas.

ABSTRACT

The Brazilian oceanic islands are fields of great environmental, scientific, economic and strategic interest for the country. A better understanding of the thermohaline properties and hydrodynamic is fundamental to complement the studies of chemical and biological processes in the coast of the Fernando de Noronha Archipelago, located between the coordinates 03° 52'S and 32° 25'W. The objective of this study is to analyze the thermohaline and chemical properties behavior of the Sea of Inside of the main island of the archipelago, in spatial and temporal scale. As well as a local hydrodynamics on a temporal scale. The data collections used for these purposes consisted of the realization of four oceanographic campaigns during the years of 2013 and 2014, and the anchoring of an acoustic wave and current profiler, at approximately 22 m depth, for a period of one year (June 2013 to May 2014). The results showed the presence of the Tropical Water (TW) mass in the insular platform of the Sea of Inside. During the rainy season (RS) the salinity (S) index was lower than in the dry season (DS). Inverse pattern was observed with the temperature (T) of the water, that is, larger T were recorded in the RS and smaller in the DS. Among the 5 collection points, no major differences were observed in thermohaline parameters. With oligotrophic characteristics, the region of study did not present spatial differences in the chemical parameters of the water. The insular region is marked by the semidiurnal regime of micro tidal, with the dominant presence of shallow water components, overtides. Southeast trade winds patterns characterize the region, with lower intensities between the months of December and March, when the ITCZ occupies positions closer to the equator. The archipelago is marked by the constant presence of wind sea waves of NE-E and NW-N and swell waves, with directions similar to local waves, however concentrated between October 2013 and January 2014. The highest wave were observed between January and March, related to the arrival of the northern swells, reflecting an increase in water level on the insular shelf of the Sea of Inside of Fernando de Noronha island. The pattern of zonal and meridional currents in this region is characterized by low intensities, reaching a maximum of 0.33 ms^{-1} in July, and 0.25 ms^{-1} respectively. The current pattern of the island is a reflection of the interaction of forcing variables (tide, waves and wind), each variable exerting a degree of correlation with the dependent variable (current).

Keywords: Oceanic island. Hydrodynamics. Properties Thermohalinas.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 - Localização do arquipélago de Fernando de Noronha, sinalizando a localização do fundeio, bem como a localização dos cinco pontos de amostragem.....	21
Figura 2.2 - Modelo Digital do Terreno do Arquipélago de Fernando de Noronha. Adaptado de ASSIS, (Coord.) et al., 2014, CPRM.	24
Figura 2.3 - Esquema do padrão de correntes superficiais do oeste do oceano Atlântico Equatorial, para o período de novembro a abril, apontando além do sistema de correntes, o padrão de vetos alísios, bem como a localização aproximada da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). Na imagem à direita encontra-se a região destacada na figura da esquerda, com ênfase nas proximidades do Arquipélago de Fernando de Noronha. Na imagem a escala da ilha foi aumentada para melhor visualização.....	27
Figura 3.1 - Procedimento do fundeio do equipamento AWAC (A e B). Equipamento após ter sido retirado da água para manutenção (C).	28
Figura 3.2 - Esquema do perfilador AWAC fundeado e as matrizes de medida para medições das velocidades orbitais (amarelo) (A) e AST no meio em vermelho; componentes de velocidade axial, componente u e v (B); (C), (D) e (E) se referem aos esquemas de medições do perfil de corrente em células, altura de onda e elevação da maré, respectivamente. Fonte: Comprehensive Manual NORTEK, 2015).	30
Figura 3.3 - Equipamentos utilizados nas coletas realizadas durante as campanhas oceanográficas no Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha. (A) CTD Sea Bird Electronics (SBE) 911plus; e (B) Coleta de água utilizando a garrafa oceanográfica do tipo Ninskin.	31
Figura 4.1 - Study area Fernando de Noronha archipelago and sampling stations.	37
Figura 4.2 - A) Intra and inter annual special variation of thermohaline parameters in the coastal region of the archipelago Fernando de Noronha. B) T-S diagram referring to the figure data A. The legend on the right side is related to two images.	39
Figura 4.3 - Monthly averages of precipitation during the years 2013–2014 and during the nine previous years (2003-2012).	41
Figura 4.4 - Satellite images showing the average variation of Sea Surface Temperature (SST) obtained during the months related to the four campaigns conducted in this study. A) July 2013; B) December 2013; C) June 2014; D) November 2014. The location of the archipelago (star) is identified in the images.	42
Figura 5.1 - Location of the Fernando de Noronha Island (a), signaling their seas, the sea outside facing the African continent and the sea in facing the northern hemisphere, this is inserted anchored equipment (b), data collection instrument for this study.	48
Figura 5.2 - Range periods of waves (Tp) recorded during the study period: a) time series with the distinction of occurrence of the types of waves based on their periods; b) Histogram referring to the recorded periods.	51
Figura 5.3 - Swell occurrence percentage for each month in relation to the registration number for the entire study period.	51
Figura 5.4 - Wave height variation: (a) wind sea and (b) swell. Figure (c) are arranged the Hs monthly averages for both waves for 12 months.	52

Figura 5.5 - Polar graph referring to the percentage of hours of waves for each direction: a) swell and b) wind sea.	53
Figura 5.6 - Range the direction of waves Wind Sea (red) and swell (blue): a) direction time series of the incident waves in the study area; b) frequency of occurrence Histogram both types of waves for each direction.	54
Figura 5.7 - Time series related to wind data obtained by ASCAT platform. (a) components; (b) resulting velocity; e (c) magnitude and direction.	54
Figura 5.8 - Wind data series within the study periods: (a) components; (b) resulting velocity; e (c) magnitude and direction.	55
Figura 5.9 - Hs variation data from the through in-situ wave data (a) identifying the change in the height of the waves from December 2013. This characteristic is corroborated by the time series of the sea level variation (b) from the AVISO, where it is perceived the well-marked seasonality.	56
Figura 5.10 - Analysis of signals using wavelet transform: (a) wavelet power spectrum for wave data obtained in-situ (b) wavelet power spectrum based on altimetry data; and (c) wavelet power spectrum of the zonal wind stresses. The x-axis represents the wavelet location in time. In the y-axis is the wavelet period in hours for waves and weeks for altimetry and Wind. The lateral scale represents potential exchanges of variance. The graphs to the right refer to the distribution of average power in time, the Power Spectrum Density (PSD).	57
Figura 6.1 - Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha. Identificando o local no qual o perfilador acústico AWAC permaneceu instalado durante os anos de 2013 e 2014, no Mar de Dentro da ilha principal	65
Figura 6.2 - Série temporal anual da intensidade de correntes no Mar de Dentro de Fernando de Noronha, medido a um intervalo amostral de uma hora para cada componente da velocidade: (A) componente zonal (u) e (B) componente meridional (v). Bem como para as três células de profundidades distintas, em ordem estão representadas da mais superficial a mais profunda (4,5m, 10,5m e 18,5m).	69
Figura 6.3 - Direção e intensidade da corrente resultante, com base nas componentes u e v, medidas através do equipamento perfilador acústico de correntes (A); em (B) o período descrito anteriormente apresenta-se em evidencia a fim de perceber o a variação de direção dos vetores.	70
Figura 6.4 - Média mensal da direção e intensidade das correntes durante o período compreendido entre junho de 2013 a maio de 2014. Cada gráfico polar é referente a uma profundidade.	71
Figura 6.5 - Estimativa da densidade espectral das componentes zonais (A) e meridionais (B) para as três profundidades a partir dos dados brutos.	72
Figura 6.6 - Série temporal da intensidade das correntes filtrada passa-baixa a partir da série original horária composta pelas componentes (A) componente zonal (u) e (B) componente meridional (v), para as três células de profundidades, estão representadas em ordem da mais superficial a mais profunda. ...	73
Figura 6.7 - Direção e intensidade do vetor da corrente resultante, com base nas componentes u e v em filtro passa-baixa obtidas dos dados originais medidos através do equipamento AWAC.	74
Figura 6.8 - Densidade espectral das componentes zonais (a) e meridionais (b) para as três profundidades alta frequência.	75

Figura 6.9 - Série temporal da intensidade de correntes com o uso de filtro passa-alta; (A) componente zonal (u) e (B) componente meridional (v), para as três células de profundidades, estão representadas em ordem da mais superficial a mais profunda.	76
Figura 6.10 - Direção média mensal e intensidade dos vetores de velocidade das correntes na banda de alta frequência ao longo do período de junho de 2013 a maio de 2014. Cada gráfico polar é referente a uma profundidade.	77
Figura 6.11 - Densidade espectral das componentes zonais (a) e meridionais (b) para as três profundidades.	78
Figura 6.12 - Série de um ano de registros horários da variação da maré observada na localidade do Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha durante o período de junho de 2013 a maio de 2014 (A). Densidade espectral da maré, referente a todo período de registros (B).	80
Figura 6.13 - Série temporal mostrando a elevação da maré prevista x maré observada na localidade da Ilha de Fernando de Noronha durante o período de junho de 2013 a maio de 2014. Série original (azul), série prevista por análise (verde).	80
Figura 6.14 - Série temporal da elevação da superfície do mar e das variações da intensidade das componentes u e v da corrente no Mar de Dentro da Ilha de Fernando de Noronha para os meses de agosto de 2013 (a) e fevereiro de 2014 (b).	82
Figura 6.15 - Séries temporais dos parâmetros de ondas obtidos em um ano de fundeio do AWAC. (A) Período de pico; (B) Altura das ondas do tipo wind sea; (C) Altura das ondas do tipo swell; e (D) Direção de incidência das ondas.	83
Figura 6.16 - Diferença entre os meses de agosto de 2013 e fevereiro de 2014 das variações horárias das direções de ondas e correntes características do Mar de Dentro de Fernando de Noronha. O eixo esquerdo referente às ondas e o eixo direito referente às correntes.	84
Figura 6.17 - Padrão de vento próximo a ilha de Fernando de Noronha, durante o período de junho de 2013 a maio de 2014. (A) Variação da intensidade das componentes zonal e meridional do vento; (B) Velocidade resultante do vento; e (C) Vetores referentes a variação da magnitude e direção dos ventos, em médias semanais.	85
Figura 6.18 - Diferença entre os meses de agosto de 2013 e fevereiro de 2014 das variações horárias da Hs das ondas e intensidade das componentes u e v das correntes características do Mar de Dentro de Fernando de Noronha. O eixo esquerdo referente às ondas e o eixo direito referente às correntes. (A) para o mês de agosto e (B) para o mês de fevereiro.	86

LISTA DE TABELA

Table 4.1 - Nutrient concentrations determined for each of the five stations. Ammonia (NH₃), nitrite (NO₂), nitrate (NO₃), phosphate (PO₄) and silicates (SiO₂) in $\mu\text{mol.L}^{-1}$. Amounts related the surface (S) and bottom (B). ND refers to values below the detection limit of the apparatus.40

Tabela 6.1 - Comparação entre as variâncias da componente zonal e meridional original e filtrada em frequência de corte de 40 horas.77

Tabela 6.2 - Resultados das razões entre as constantes de maré semidiurna e *overtides* obtidas através da análise harmônica da série temporal de um ano.79

Tabela 6.3 - Principais constituintes harmônicas da maré obtidas com o pacote T_Tide para a série temporal de dos dados de variação da maré no Mar de Dentro da Ilha de Fernando de Noronha.81

Tabela 6.4 - Resultados das correlações entre as componentes da velocidade e a variação da elevação do nível do mar.85

Tabela 6.5 - Resultados das correlações entre as componentes da velocidade e a variação da Hs.86

Tabela 6.6 - Coeficientes de correlação obtidos entre as componentes da velocidade de correntes e a variação do vento resultante, bem como de suas componentes.87

Tabela 6.7 - Coeficientes de regressão tomadas com base nos resultados da regressão múltipla. Os sinais “ * ” representam a significância da variável explanatória para com a variável explicada, onde: * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$, sendo então significantes.88

Tabela 6.8 - Percentuais de explicação de cada forçante sobre o padrão de corrente, bem como da interação entre elas.88

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AAIW	<i>Antarctic Intermediate Water</i>
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AIA	Água Intermediária Antártica
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
ASCAT	<i>Advanced Scatterometer</i>
AST	<i>Acoustic Surface Tracking</i>
AT	Água Tropical
AWAC	<i>Acoustic Wave and Current</i>
CCSE	Contracorrente Sul Equatorial
CNB	Corrente Norte do Brasil
CSE	Corrente Sul Equatorial
CSEc	Corrente Sul Equatorial ramo central
CSEn	Corrente Sul Equatorial ramo norte
CSEs	Corrente sul equatorial ramo sul
CSESS	Corrente Sul Equatorial de Subsuperfície
CTD	<i>Conductivity Temperature Depth</i>
DIR	Direção de onda
DOCEAN	Departamento de Oceanografia
E	Leste
ENU	<i>East, North and Up</i>
HS	Altura significativa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO	Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

ITCZ	<i>Intertropical convergence zone</i>
LOQUIM	Laboratório de Oceanografia Química
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
N	Norte
NADW	<i>North Atlantic Deep Water</i>
NE	Nordeste
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste
REVIZEE	Programa Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva
S	Sul
SACW	<i>Atlantic Central Water</i>
SBE	<i>Sea Bird Electronics</i>
SCNB	Subcorrente Norte Equatorial
SE	Sudeste
SEC	<i>South Equatorial Current</i>
SEUC	<i>South Equatorial Undercurrent</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SSS	<i>Sea Surface Salinity</i>
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
STA.	<i>Station</i>
Sv	<i>Sverdrup</i>
TP	Período de Pico da onda
TSW	<i>Tropical Surface Water</i>
W	Oeste
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	16
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1. ASPECTOS GERAIS	17
1.2. OBJETIVOS	20
1.2.1. Geral:	20
1.2.2. Específicos:.....	20
CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDO	21
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA GERAL	28
3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO.....	28
3.1.1. Equipamento fundeado.....	28
3.1.2. Equipamentos Embarcados.....	30
3.2. TRABALHO LABORATORIAL	32
3.2.1. Análise de dados coletados <i>in situ</i>	32
3.2.2. Levantamento de dados remotos	32
3.2.3. Tratamento e Processamento das Séries Temporais.....	33
CAPÍTULO 4 – ARTIGO I.....	34
SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF THE THERMOHALINE PROPERTIES IN THE COASTAL REGION OF FERNANDO DE NORONHA ARCHIPELAGO, BRAZIL	
CAPÍTULO 5 – ARTIGO II.....	45
IN SITU MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF OCEAN WAVES IN THE ARCHIPELAGO OF FERNANDO DE NORONHA, BRAZIL	
CAPÍTULO 6 – ARTIGO III	62
DINÂMICA DE CORRENTES NO MAR DE DENTRO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA E SUAS FORÇANTES	
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	97

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em formato de artigos científicos, em diferentes discussões considerando as análises dos processos oceanográficos na plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha, baseados em levantamentos de dados coletados *in situ*. A autora deste trabalho foi bolsista de mestrado do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (projeto 830118/1999-3). O projeto de dissertação contou com o apoio dos projetos “Estudo do Equilíbrio do Ciclo do Carbono na região costeira e de seu potencial transporte oceânico com ênfase ao litoral de Pernambuco (Edital FACEPE-FAPESP)”, “Monitoramento do clima de ondas no arquipélago de Fernando de Noronha - MC-ondas/FN (Edital FACEPE)” e “Monitoramento das Condições do Mar na Costa Nordeste do Brasil (MC-MAR/NE) – APQ-1056-1.08/15”.

Nesta dissertação, apresentamos um estudo inédito dos principais processos hidrodinâmicos (correntes e ondas) na região denominada ‘Mar de Dentro’ em torno das ilhas do arquipélago, em uma escala temporal de um ano de medidas contínuas obtidas *in situ*, além de análise da variabilidade espaço e temporal das propriedades termohalinas e da distribuição de principais nutrientes no ambiente marinho. Análises de sinais, como as Transformadas Wavelet Contínua, análises harmônicas, dados de vento e altimetria obtidos por satélite nas proximidades do arquipélago são apresentadas.

Este manuscrito se encontra estruturado em sete capítulos: o Capítulo 1 de carácter introdutório com informações gerais sobre a oceanografia insular e objetivos. Capítulo 2 apresenta informações a respeito da área de estudo. No Capítulo 3 são descritas as metodologias de amostragem utilizadas no ambiente marinho da plataforma insular do Arquipélago. Os Capítulos 4, 5 e 6 são referentes aos artigos, um para cada artigo produzido. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e considerações finais da dissertação, considerando os resultados obtidos nos três artigos científicos.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

Uma ilha é uma área relativamente pequena de terra cercada por água doce ou salgada, por todos os lados. Podem ser classificadas como continentais, as quais apresentam ligação com a plataforma submersa dos continentes, apresentando aspectos geológicos e estruturais destes. Já aquelas formações de terra cuja sustentação se encontra em assoalho oceânico, ou seja, fora dos limites das plataformas continentais, tendo como morfogênese processos vulcânicos, tectônicos ou crescimento orgânico sobre fundações originadas pelos dois primeiros processos, são chamadas ilhas oceânicas (PAULAY, 1994; ALMEIDA, 2006; OLIVEIRA, 2008).

Representando somente 5% da cobertura terrestre do planeta, as ilhas oceânicas não são dispersas ao acaso sobre as águas profundas do oceano. Elas surgem da atividade vulcânica no fundo do oceano. A maioria das ilhas oceânicas é formada quando as placas tectônicas se movem sobre pontos quentes fixos (plumas de magma ou lava que brotam da crosta). Algumas ilhas situam-se acima das fronteiras onde as placas oceânicas convergem ou se juntam, enquanto outras surgem onde as placas divergem ou se separam (um processo chamado espalhamento do fundo do mar) (FONSECA et al., 2006).

Às ilhas são atribuídos conceitos como ambientes *sui generis* no planeta, a priori foram alvos de expedições estritamente exploratórias, tendo como objetivo central reconhecer e conquistar novas áreas, elas agora representam verdadeiros territórios de estudos, despertado, cada vez mais, o interesse da comunidade científica. Centros marinhos de endemismo predominam em locais isolados por geografia ou oceanografia, como por exemplo, as ilhas oceânicas, possuindo aproximadamente um terço de todas as espécies de mamíferos, aves e anfíbios ameaçadas, bem como mantêm uma infinidade de ecossistemas (FONSECA et al., 2006; SERAFINI et al., 2010). Além disso, representam áreas estratégicas na organização política e gestão das atividades marítimas de diversos países, muitas vezes sendo ocupadas por bases militares ou mesmo por postos avançados de monitoramento e vigilância.

As ilhas oceânicas brasileiras são áreas de grande interesse ambiental, científico, econômico e estratégico, sendo fundamentais para a delimitação da zona econômica exclusiva (ZEE). Um total de cinco conjuntos insulares, Arquipélago São Pedro e São Paulo, Atol das Rocas, ilha da Trindade, Arquipélago Martin Vaz e Arquipélago de Fernando de Noronha,

caracterizam o território brasileiro, variando de tamanho e distância do continente (SERAFINI et al., 2010). O Arquipélago de Fernando de Noronha, área de estudo nesta dissertação, é a única ilha oceânica brasileira a possuir uma infraestrutura básica desenvolvida para moradores e atividades de turismo.

Os processos físicos oceanográficos dessas regiões insulares, onde correntes, subcorrentes e contracorrentes fluem continuamente sobre estas massas de terra, proporcionam-lhes um cenário único. Processos físicos como a ocorrência de redemoinhos e turbulência tendem a ocorrer como resposta do “efeito ilha”, ou seja, como resultante da convergência do fluxo de água com os montes submarinos e ilhas (GENIN; BOEHLERT, 1985). Esses processos transportam água inferiores enriquecidas em nutrientes para as camadas mais superficiais, aumentando a produção primária e consequentemente aumentando os fluxos de massa e energia ao longo da cadeia trófica (OXENFORD et al., 1993; JONES, 1962; HARGRAVES et al., 1970; MOORE; SANDER, 1979; SANDER, 1981; DOTY; OGURI, 1956).

Produtividade Primária trata-se da capacidade de um ecossistema sintetizar compostos orgânicos de alto potencial energético a partir de energia radiante ou química, podendo então estimar a disponibilidade de alimento para organismos herbívoros e seus consumidores e, consequentemente identificar locais de potencial pesqueiro (REVIZEE, 2006). O método mais comum de medir a biomassa fitoplancônica baseia-se na medição de algum componente comum a todos os organismos planctônicos fotossintetizantes, fundamentalmente no conteúdo de clorofila a uma vez que todos os vegetais possuem este pigmento e utilizam-no para realizar a fotossíntese. O total de clorofila de um dado volume de água do mar deve fornecer uma medida total de vegetais presentes (PEREIRA; SOARES GOMES, 2002).

O alto grau de endemismo terrestre associado ao aumento da produtividade primária nas proximidades das ilhas e montes submarinos na cadeia Fernando de Noronha, atribuem-lhe o cognome de oásis de vida no deserto chamado oceano, atributo que é dado a porção oeste do Atlântico Tropical, por exemplo. Região qualificada como oligotrófica, com altos teores de oxigênio dissolvido, próximos a saturação, estendendo-se da superfície até início da termoclina (HAZIN, 1993; BECKER, 2001; REVIZEE, 2006).

Os nutrientes, variáveis essenciais para a produção primária no oceano, têm sua disponibilidade e distribuição como função da difusão turbulenta, processos advectivos, a sedimentação do próprio fitoplâncton e também de complexos processos químicos de mineralização (COSTA, 1996). Nas proximidades da ilha essa propriedade exibe uma relação

linear inversa com a temperatura, resposta observada por Souza et al. (2013) através de medidas *in situ* das propriedades termohalinas com a interação da topografia com o fluxo. Pequenas ressurgências nessa região foram datadas por Macedo et al. (1998), no entanto um ano antes Travassos et al. (1997) indicou a possível ocorrência destes fenômenos físicos, sendo estes por sua vez fracos e transitórios.

A dinâmica superficial dos oceanos tropicais, na escala sazonal, é regida, principalmente, pela variação do cisalhamento dos ventos alísios. Tendo como característica única o fato que o parâmetro de Coriolis ($2\Omega \sin\theta$, onde Ω é a velocidade angular de rotação da terra e θ é a latitude) é nulo no equador, resultando em uma resposta rápida e intensa do oceano às variações de intensidade e direção dos ventos (VINOGRADOV, 1981; BROWN et al., 1989; PHILANDER, 1990). Logo, as propriedades físicas, químicas e biológicas na camada fótica, estão fortemente sujeitas às influências meteorológicas, ao contrário das águas mais profundas que não sofrem os efeitos dos ventos, lhe permitindo uma maior estabilidade (FLORES MONTES, 2003).

O arquipélago de Fernando de Noronha está disposto no oceano Atlântico Tropical de forma que seus lados apresentam energias hidrodinâmicas diferentes. Tais lados são classificados como “Mar de Dentro” e “Mar de Fora”. Àquele voltado para o continente Africano com apenas quatro praias (praias do Leão, da Baía de Sueste, da Atalaia e das Caieiras) é designado como o Mar de Fora, marcado por uma hidrodinâmica mais intensa. Já o Mar de Dentro é caracterizado por possuir a maior parte das praias, um total de 10 (praias do Porto, do Cachorro, do Meio, da Conceição, do Americano, do Bode, do Boldró, da Cacimba do Padre, da Baía dos Porcos e do Sancho), e ser um local mais protegido, pois o posicionamento geográfico da ilha inibe a ação dos ventos alísios e das correntes predominantes de sudeste (SERAFINI et al., 2010; WILDNER; FERREIRA, 2011).

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo geral investigar a hidrodinâmica do Mar de Dentro da ilha principal que compõe o arquipélago de Fernando de Noronha, apontando desde as propriedades termohalinas e nutrientes, estes em uma escala espacial e sazonal, bem como descrever e analisar a dinâmica de correntes sobre a plataforma insular. Buscou-se entender sobre as principais forçantes, maré, ondas e vento, a interferir no padrão de correntes na região mais costeira da ilha. A princípio, os dados que se têm a respeito da oceanografia para a região do arquipélago englobam escalas maiores em ambientes marinhos mais distantes da região costeira.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Geral:

Análise da variabilidade sazonal da dinâmica oceânica (correntes e ondas) na região do Mar de Dentro do Arquipélago de Fernando de Noronha, associando-a com parâmetros abióticos (distribuição de nutrientes e parâmetros termohalinos).

1.2.2. Específicos:

- i. Identificar os padrões de distribuição espacial (vertical e horizontal) dos parâmetros termohalinos, bem como do teor de elementos nutrientes dissolvidos e das massas d'água;
- ii. Caracterização e análise da climatologia de ondas no Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha;
- iii. Analisar a circulação oceânica/costeira sazonal sobre a plataforma insular, através de fundeio de perfilador acústico de ondas e correntes.

CAPÍTULO 2 – ÁREA DE ESTUDO

O Arquipélago de Fernando de Noronha, que é distrito de Pernambuco, está localizado no oceano Atlântico Sul Equatorial, entre a latitude $03^{\circ}52'S$ e longitude $32^{\circ}25'W$, distando cerca de 360 km da cidade de Natal (RN), 545 km do Recife (PE), e aproximadamente 2.700 km do litoral africano (TEIXEIRA et al., 2003; MOHR et al., 2009) (Figura 1).

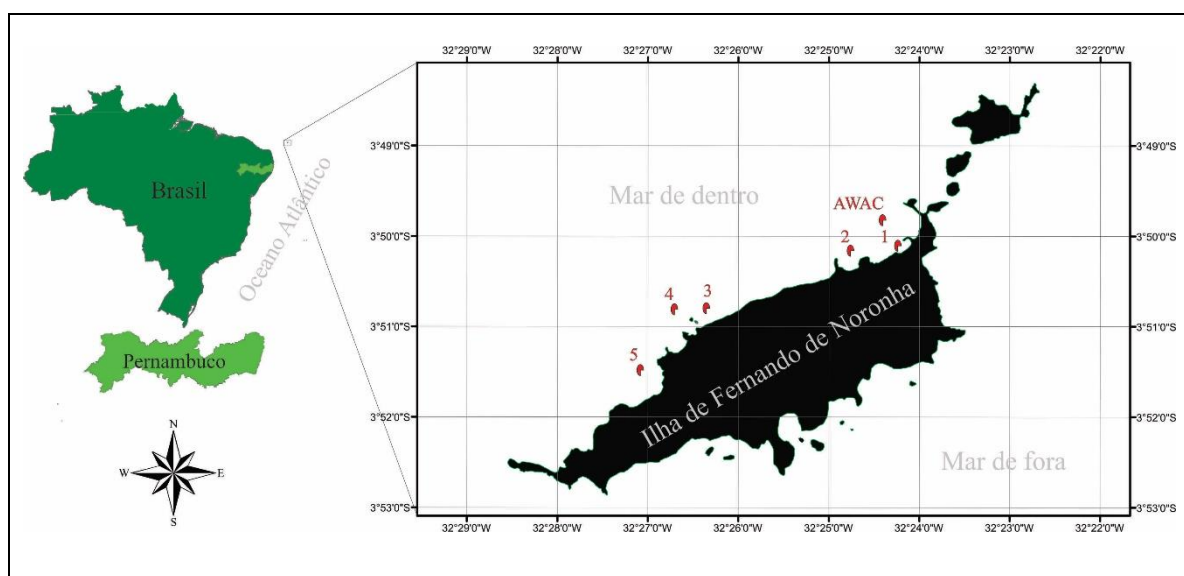


Figura 1 – Localização do arquipélago de Fernando de Noronha, sinalizando a localização do fundeio, bem como a localização dos cinco pontos de amostragem.

O arquipélago compreende 21 ilhotas, ilhas e rochedos que cobrem cerca de 26 km². A ilha principal que lhe dá o nome, com seus 16,4 km² representa 91% da área do arquipélago, possuindo 10 quilômetros de comprimento, 3,5 quilômetros de largura, 60 quilômetros de perímetro e 17 km² de área exposta acima do nível do mar. (ALMEIDA, 2006; CARDOZO MOREIRA, et al., 2011; WILDNER; FERREIRA, 2011).

A ilha é a única ilha oceânica brasileira habitada, com população estimada em 2.974 habitantes (IBGE, 2016), ocupam apenas parte dela, que faz parte da Área de Proteção Ambiental (APA) de Fernando de Noronha- Rocas - São Pedro e São Paulo. As porções de SW e parte da frente voltada para o Mar de Fora e o restante das ilhas e ilhotas do arquipélago estão inseridas na área do Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha. O Parque Nacional e

a APA são administrados pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade-ICMBio (ICMBio, 2017).

A classificação em “Mar de Dentro” e “Mar de Fora” na ilha principal, se refere aos lados da ilha, àquele voltado para o continente Africano com apenas quatro praias (praias do Leão, da Baía de Sueste, da Atalaia e das Caieiras) é designado como o Mar de Fora. Já o Mar de Dentro é caracterizado possuir a maior parte das praias, um total de 10 (praias do Porto, do Cachorro, do Meio, da Conceição, do Americano, do Bode, do Boldró, da Cacimba do Padre, da Baía dos Porcos e do Sancho), e ser um local mais protegido, pois o posicionamento geográfico da ilha inibe a ação dos ventos alísios e das correntes predominantes de sudeste (SERAFINI et al., 2010; WILDNER; FERREIRA, 2011).

A formação do arquipélago é atribuída aos processos de teoria da deriva continental, onde o movimento de afastamento das placas tectônicas Sul-Americana e Africana, que originaram o oceano Atlântico, passou por hot spot possibilitando o extravasamento do magma ao longo do tempo geológico. A montanha que deu origem ao arquipélago está alinhada aos montes vulcânicos submarinos que compõem a Cadeia de Fernando de Noronha, assim denominada por Gorini e Bryan em 1974, orientada no sentido Leste-Oeste. A cadeia se constitui por feições tectônicas e produtos de vulcanismo alcalino, constituído por um substrato de rochas piroclásticas e cortado por rochas ígneas alcalinas e basálticas (ALMEIDA, 1958; WILDNER; FERREIRA, 2011).

As rochas vulcânicas foram agrupadas em três formações: 1) Formação Remédios, rochas eruptivas intrusivas em produtos piroclásticos, constituindo as maiores elevações da área central da ilha e o planalto do qual se erguem; 2) Formação Quixaba, essencialmente formada por derrames de rochas ankaratríticas com vários metros de espessura, alternados com leitos de rochas piroclásticas; 3) Formação São José, constituída por neflina basanitos (ALMEIDA, 1955).

Cessado o vulcanismo no final do Plioceno, durante sua formação seguiu-se um ciclo erosivo que destruiu os aparelhos vulcânicos externos e entalhou a plataforma insular, que trunca a montanha vulcânica a até cerca de 100 m de profundidade (Figura 2). Com as oscilações pleistocênicas do nível do mar, a plataforma foi coberta por depósitos de areias e cascalhos de praia, recifes de algas calcárias e areias marinhas (ALMEIDA, 2006).

Os ambientes geológicos das ilhas oceânicas de Fernando de Noronha são constituídos por rochas alcalinas ultrabásicas a intermediárias e depósitos sedimentares pleistocênicos-holocênicos identificados por paleodunas (eolianitos), dunas, praias de larguras variáveis, aluviões, recifes algálicos e recifes de corais. A morfologia é caracterizada por um monte cônico que repousa sobre o assoalho oceânico a quase 4.000 metros de profundidade. (MORH et al., 2009).

O relevo apresenta planícies, planaltos e altos topográficos íngremes, como o Morro do Pico, com 323 m. Há evidências de agentes intempéricos associados à erosão, que se acentuaram após a remoção da cobertura vegetal, diferenciando bastante dos maciços vulcânicos originais. Variações no nível relativo do mar e do clima de ondas constituem outros processos geológico-oceanográficos que preocupam quanto à erosão costeira nestes ambientes insulares. Além dos problemas ambientais relacionados ao uso e ocupação do solo, implantação de obras marítimas, desmatamentos e disposição de resíduos sólidos (GASPARINI; MACIEIRA, 2005; CASTRO, 2010).

Uma diminuta mancha de vegetação de Mangue *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn (mangue-branco), localizada nas imediações da baía de Sueste, forma a menor extensão de ecossistema manguezal do Brasil. Assentada sobre sedimentos arenosos formando uma pequena planície local de deságue do riacho Maceió, que em conjunção com a água proveniente das marés altas, alimenta esse ecossistema único em ambientes insulares do Atlântico Sul (WILDNER et al., 2011; LIMA, 2012).

O isolamento geográfico favorecido pela imensa massa de água que separa o arquipélago do continente, proporciona o aparecimento, no tempo geológico, de um grande número de espécies endêmicas. O Arquipélago apresenta grande número em espécies de peixes (169 spp., com 10 endêmicas), moluscos (218 spp., com 3 endêmicas), corais (11 spp.), cnidários (33 spp.), esponjas (77 spp.) e algas (171sp). Além de duas espécies de tartaruga marinha, a tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*) e a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*). O arquipélago possui ainda grande importância para a avifauna, pois é área de reprodução, nidificação e alimentação, além de integrar uma rota de descanso para aves e tartarugas migratórias (GASPARINI; MACIEIRA, 2005; SERAFINI et al., 2010). A ilha é marcada também pela presença dos golfinhos rotadores (*Stenella longirostris*).

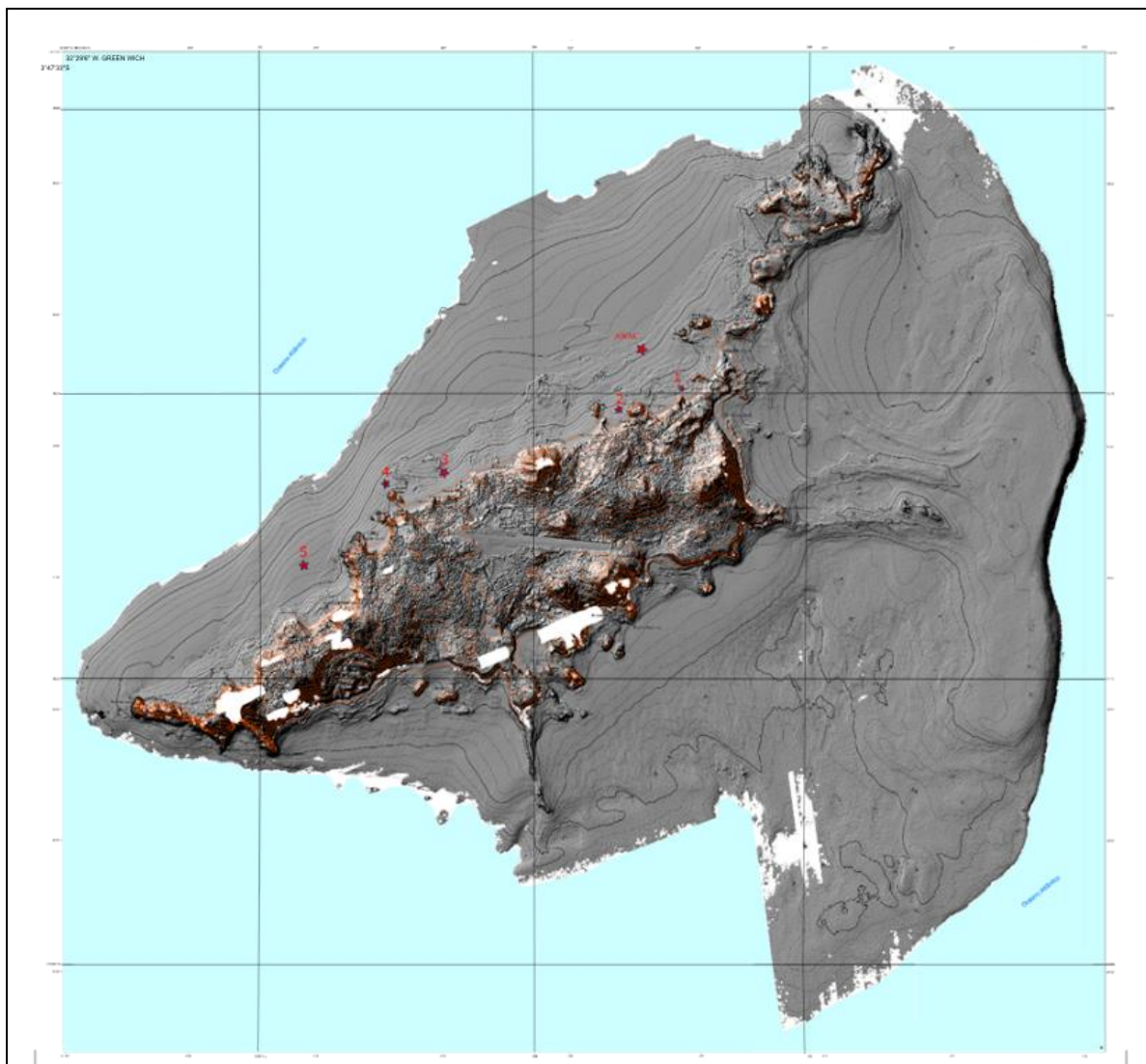


Figura 2 - Modelo Digital do Terreno do Arquipélago de Fernando de Noronha. Adaptado de ASSIS, (Coord.) et al., 2014, CPRM.

As características acima citadas dão a ilha uma importante classificação como sítio para manutenção das comunidades marinhas, compondo um expressivo patrimônio genético que desempenham funções ecológicas essenciais para o equilíbrio dos ecossistemas envolvidos (SERAFINI et al., 2010; FONSECA-NETO, 2004).

O clima do arquipélago de Fernando de Noronha é definido como tropical quente do tipo Awi (Sistema Köppen de classificação), marcado pelo domínio oceânico, com umidade relativa do ar apresentando média anual de 78%. São definidas duas estações, a estiagem, de agosto a janeiro e a chuvosa de fevereiro a julho. A temperatura varia pouco durante o ano, mantendo uma média de 28 °C, com amplitude térmica de 4 °C (ALMEIDA, 2006; MOHR

et al., 2009; WILDNER et al., 2011). No período chuvoso há vários córregos intermitentes, que desaparecem após o período de chuvas, a ilha conta ainda com a lagoa da Viração, que é permanente. Os menores níveis de precipitação geralmente ocorrem no mês de outubro (GASPARINI; MACIEIRA, 2014).

O oceano Atlântico Sul é caracterizado, no geral, por possuir uma estratificação térmica na coluna d'água, em larga escala, marcada pelas camadas de mistura, termoclina e profunda (MEDEIROS et al., 2009). Esta termoclina permanente impede que hajam grandes fluxos verticais nessa região, resultando em déficit de nutrientes na camada eufótica, que se configura um dos fatores limitante para produtividade primária (BECKER, 2001; REVIZEE, 2006).

A estrutura da coluna d'água circundante ao Arquipélago normalmente apresenta um perfil característico das águas do Atlântico Sul, com a presença de quatro principais massas d'água: a Água Tropical (AT) na superfície, caracterizada por possuir temperaturas acima de 18 °C, e salinidade acima de 36. Logo abaixo da AT a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), a qual pode apresentar temperatura entre 5,95 °C e 18,35 °C, e salinidade de 34 a 36. A profundidades maiores é esperado a presença da Água Intermediária Antártica (AIA) e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (STRAMMA; SCHOTT, 1999; BECKER, 2001; SILVA et al., 2005; ASSUNÇÃO et al., 2016; TCHAMABI et al., 2017).

A região na qual o arquipélago se encontra está sob forte influência da ação dos ventos alísios, predominantes de sudeste, e sopram a maior parte do ano, principalmente entre os meses de junho a agosto. Sofrendo algumas variações de direção e intensidade sazonalmente, os ventos em torno da ilha apresentam uma intensidade média de $4,8 \text{ ms}^{-1}$, desde a superfície até o nível de 750 MB (BECKER, 2001). A ação dos alísios está ligada a migração latitudinal da Zona de Convergência Intertropical – ITCZ (*Intertropical Convergence Zone*) conduzida pelo equador térmico. A ITCZ se caracteriza por ser uma zona de baixa pressão permanente, marcada por convecção profunda, grande cobertura de nuvens e precipitação (PHILANDER; PACANOWSKI, 1986; STRAMMA; SCHOTT, 1999; WHEELER; NGUYEN, 2015).

O sistema de correntes oceânicas está diretamente associado aos ventos. O arquipélago é banhado pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEc), que flui no sentido Leste-Oeste, se estendendo até os 150 m de profundidade. Pobre em nutrientes, com baixa

concentração de material particulado em suspensão, tornando as águas claras com profundidade de extinção da luz estimada em 87 m (ESTON et al., 1986; STRAMMA; ENGLAND, 1999).

A CSE, primeiramente descrita por Molinari (1982) como composta por ramos distintos: CSE ramo Norte (CSEn), a CSE ramo Central (CSEc), e o ramo sul, a CSE ramo Sul (CSEs). Os respectivos ramos são separados, pela Corrente Sul Equatorial Subsuperficial (CSESS) que flui entre 3 °S e 5 °S e pela Contracorrente Sul Equatorial (CCSE) que flui para leste entre 7 °S e 9 °S Silveira et al (1994) e Stramma (1991) observaram que a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) é formada ao sul de 10 °S, sendo alimentada pela bifurcação da CSEs ao se aproximar da costa brasileira. A bifurcação da CSEs foi descrita por Stramma & England (1999) como um fenômeno complexo e estratificado, ocorrendo em diferentes profundidades, para diferentes latitudes. Silveira et al. (1994) o ramo CSEc resulta que segue superficialmente para oeste, juntando-se ao escoamento de subsuperfície da SCNB para formar a Corrente Norte do Brasil (CNB) ou sistema SCNB/CNB (Figura 3).

A cadeia de Fernando de Noronha está sob influência do ramo central da CSE nas águas superiores. Esta corrente zonal flui para oeste, com transporte marcado por ser entre 7 e 26 Sv (MOLINARI, 1982). A topografia da cadeia é vista como um obstáculo ao fluxo dessa corrente, medições da CSEc a 3-7 ° S e 10-30 ° W mostram uma variabilidade sazonal expressa por uma diminuição bimodal da CSEc até início de abril e novembro e fortalecimento em meados de julho (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A presença da ilha, atribui uma vorticidade positiva à corrente, induzindo a formação de vórtices na porção leste da ilha. A perturbação resultante induz a mistura por um arrefecimento de ~ 0,05°C/dias em cerca de 20 km a jusante desta ilha (TCHAMABI et al., 2017).

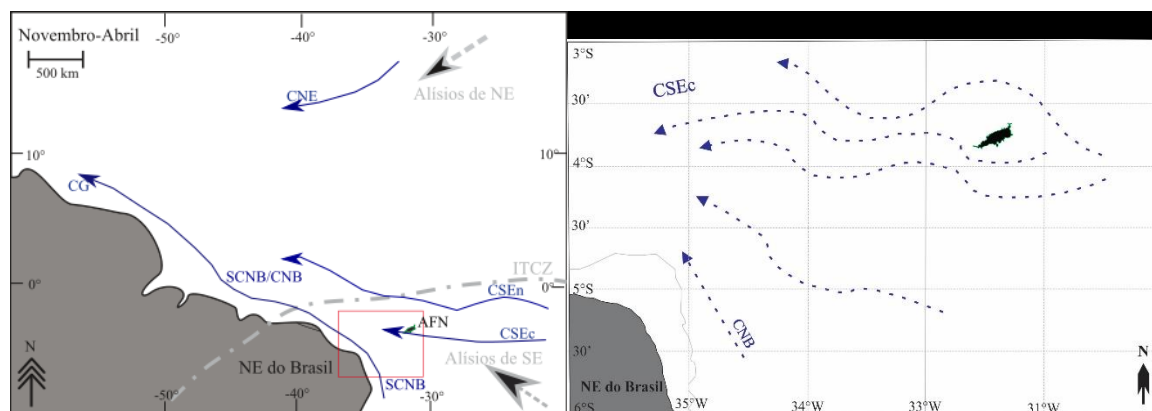


Figura 3 – Esquema do padrão de correntes superficiais do oeste do oceano Atlântico Equatorial, para o período de novembro a abril, apontando além do sistema de correntes, o padrão de vetos alísios, bem como a localização aproximada da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). Na imagem à direita encontra-se a região destacada na figura da esquerda, com ênfase nas proximidades do Arquipélago de Fernando de Noronha. Na imagem a escala da ilha foi aumentada para melhor visualização.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA GERAL

Neste capítulo serão abordados os procedimentos de coleta dos dados utilizados para confecção desta dissertação e o pré-tratamento dos dados. Procedimentos de análises estatísticas, por exemplo, serão abordados nas respectivas metodologias dos artigos a que se destinam responder aos objetivos particulares. Os artigos estão dispostos nos capítulos 4, 5 e 6.

3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO

3.1.1. Equipamento fundeado

Para o levantamento dos dados de ondas e de correntes (intensidade e direção) na área de desenvolvimento da dissertação esteve em operação o equipamento denominado AWAC (*Acoustic Wave and Current*) com sensor acústico de frequência 600 kHz (Figura 4), produzido pela NORTEK. O equipamento foi fundeado sobre o solo marinho da plataforma do Mar de Dentro da principal ilha do Arquipélago de Fernando de Noronha, na isóbata de 20, posição correspondente as coordenadas 3°49'47.28"S e 32°24'30.24"W (Figura 1).



Figura 4 – Procedimento do fundeio do equipamento AWAC (A e B). Equipamento após ter sido retirado da água para manutenção (C).

Através deste aparelho foram feitas medições pontuais das ondas direcionais e perfis contínuos de correntes marinhas ao longo da coluna de água, através do efeito Doppler obtidos através de 3 feixes acústicos laterais, posicionados simetricamente e inclinados em 25° em relação ao feixe central (*Acoustic Surface Tracking - AST*). Esta matriz de aquisição de dados permite que o AWAC calcule a direção de ondas com precisão. A técnica utilizada para medições dos parâmetros de ondas é realizada através da emissão de pulso acústico curto que é

transmitido verticalmente em direção à superfície da água, e a defasagem de tempo entre a transmissão e a recepção da reflexão de superfície é usada para gerar uma série temporal de elevação da superfície.

A validação dos dados adquiridos é realizada através do sensor de pressão localizado no equipamento. Estes sensores são direcionados para cima com um ângulo em torno de 25 graus em relação ao feixe central (AST), ou seja, apontado do fundo marinho para a superfície da coluna d'água. Os dados brutos são armazenados na memória interna no qual foram transferidos para um PC após o equipamento ser retirado da água (*Application Note* NORTEK, 2007).

Distando cerca de 800 m do porto de Santo Antônio, o sensor permaneceu em funcionamento em modo *stand-alone*, instalado com um compartimento externo de bateria, para suprimento de energia. 365 dias foi o período da pesquisa, compreendido entre junho de 2013 e maio de 2014, nesse período o sensor foi retirado da água duas vezes (julho e dezembro), e permaneceram fora por quatro dias, onde foram realizadas as trocas de bateria, bem como download dos dados brutos.

Os valores resultantes das direções e das intensidades das correntes apresentados nesta dissertação são calculados pela média dos três valores obtidos ao longo dos três eixos. O equipamento foi configurado para operar em profundidade de até 22 m de profundidade, realizando medidas da intensidade e direção das correntes em várias camadas (células) ao longo da coluna d'água. O blanking do AWAC foi 0,5 m de distância do mesmo, logo, a primeira célula de medida foi a 18,5 m de profundidade, e as células seguintes foram definidas com 2 m de distância uma da outra até a superfície, sendo a mais superficial aos 2,5 m de profundidade.

O equipamento realiza medições contínuas de correntes e ondas para o período de tempo previamente determinado – *Current profiling and wave bursts* (1 hora para correntes e 2 horas para ondas), em seguida o sistema calcula a média sobre o intervalo de pré-current profiling and wave burst terminado. Enquanto em funcionamento o equipamento também manteve-se registrando dados de altura da maré através do sensor de pressão, com uma precisão absoluta de 0,1% (Figura 5C).

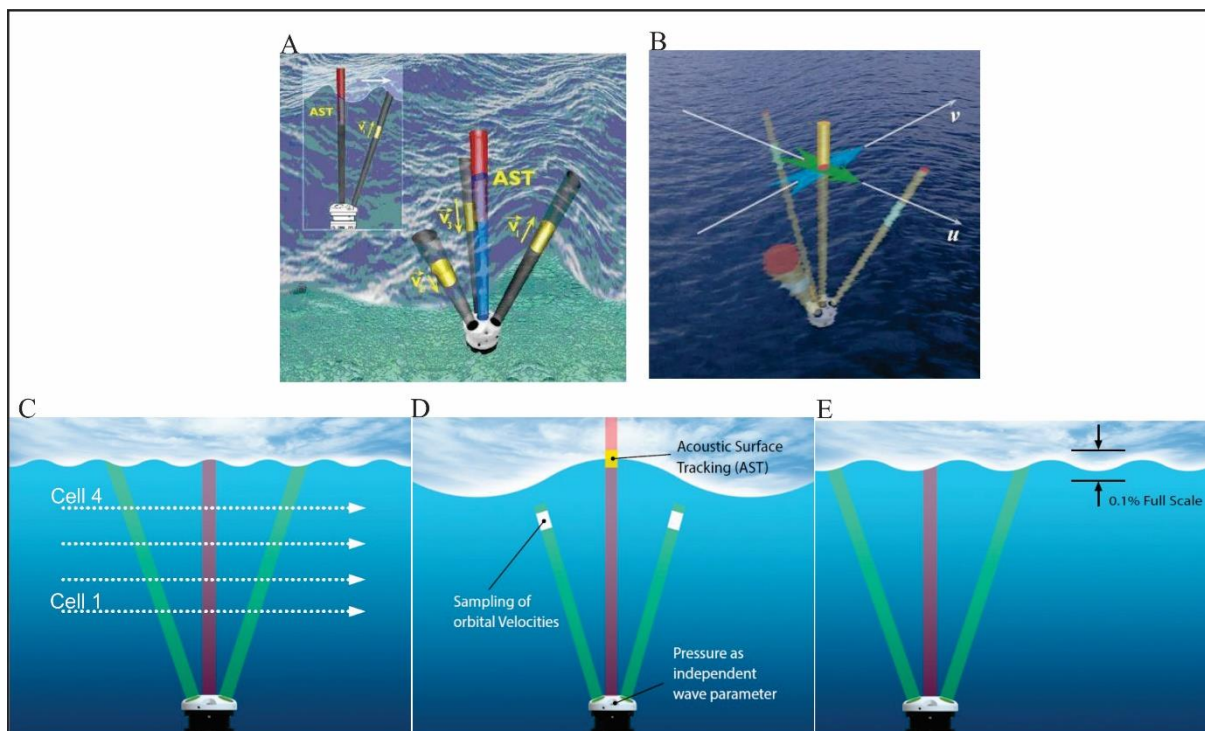


Figura 5 – Esquema do perfilador AWAC fundeado e as matrizes de medida para medições das velocidades orbitais (amarelo) (A) e AST no meio em vermelho; componentes de velocidade axial, componente u e v (B); (C), (D) e (E) se referem aos esquemas de medições do perfil de corrente em células, altura de onda e elevação da maré, respectivamente. Fonte: Comprehensive Manual NORTEK, 2015).

3.1.2. Equipamentos Embarcados

Além dos dados do fundeio, a dissertação contou com a realização de quatro campanhas oceanográficas na região do Mar de Dentro da ilha principal que compõe o Arquipélago de Fernando de Noronha, nos anos de 2013 e 2014, sendo duas em cada ano. Os períodos das campanhas foram com base nas estações climáticas que caracterizam a ilha. Representando as estações chuvosas foram feitas coletas no dia 26 de julho de 2013 e no dia 04 de junho de 2014, e para as estações de estiagem foram os dias 05 de dezembro de 2013 e 19 de novembro de 2014. Os meses não foram iguais para os dois anos devido a logística.

Nas campanhas foram realizadas perfilagens dos parâmetros físicos, temperatura, salinidade e densidade, ao longo da coluna d'água, com a utilização do equipamento CTD *Sea Bird Electronics* (SBE) 911plus. O CTD é um equipamento com bomba centrífuga e sensores de alta resolução para medições de condutividade (resolução = $0,00004 \text{ S m}^{-1}$), temperatura (resolução = $0,0003^\circ\text{C}$) e pressão (resolução = $0,068 \text{ db}$) (Figura 6A).

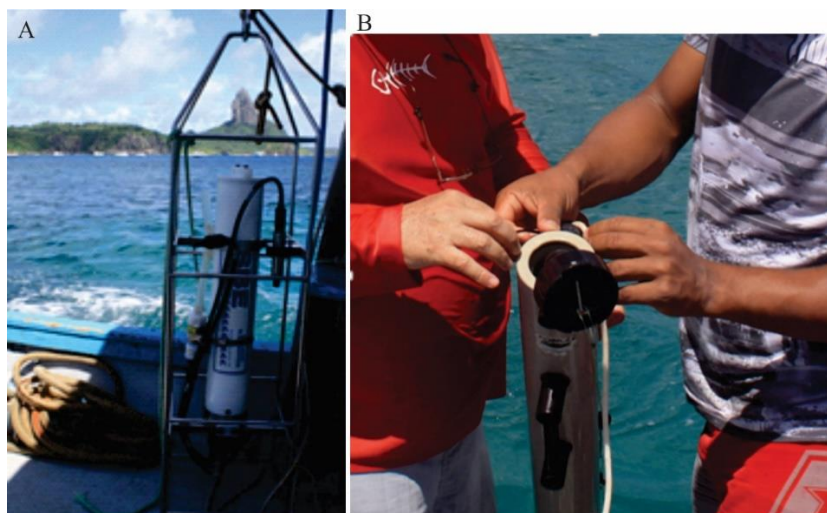


Figura 6 – Equipamentos utilizados nas coletas realizadas durante as campanhas oceanográficas no Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha. (A) CTD *Sea Bird Electronics* (SBE) 911plus; e (B) Coleta de água utilizando a garrafa oceanográfica do tipo Niskin.

Além da perfilagem CTD, nos mesmo pontos foram realizadas amostragem de água com as garrafas de Niskin (Figura 5B), para posterior determinação do teor de nutrientes (amônia, nitrito e nitrato), fosfato, e silicato, seguindo a metodologia de Grashoff et al. (1983) e Strickland & Parsons (1972). Foram coletadas amostras de água em duas profundidades, superfície e fundo, com base na profundidade local, em seguida as amostras foram transferidas para garrafas de plástico e mantidas refrigeradas até a chegada ao Laboratório de Oceanografia Química (LOQUIM) do DOCEAN/UFPE, onde foram analisadas.

Os cinco pontos ou estações amostradas durante as campanhas, estão situadas no Mar de Dentro da ilha em frente as respectivas praias (Figura 1). São: (1) Praia do Porto de Santo Antônio (≈ 4 m de profundidade); (2) Praia do Cachorro (≈ 4 m de profundidade); (3) Praia do Boldró (≈ 10 m de profundidade); (4) Praia Cacimba do Padre (≈ 13 m de profundidade); e (5) Enseada dos golfinhos (≈ 20 m de profundidade). Foram realizados outros pontos de amostragem, no entanto foram selecionadas somente estas cinco praias levando em consideração a quantidade de dados obtidos para todas as campanhas.

3.2. TRABALHO LABORATORIAL

3.2.1. Análise dos dados coletados *in situ*

Esta atividade é relacionada ao processamento dos dados obtidos em campo, o qual permitirá filtrar, reduzir e editar os dados coletados pelo equipamento oceanográfico (AWAC e CTD) em campo. A análise das séries de campo de correntes e ondas ajuda no entendimento da dinâmica de correntes em torno do Arquipélago. Além de suprir a carência de informações de ondas ao longo do litoral brasileiro e região oceânica.

Obtidos os registros do perfilador acústico AWAC, os dados foram submetidos a verificação dos resultados inconsistentes através do software Storm da Nortek que oferece um insight rápido dos mesmos. O processamento inclui rejeição de limite de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), intervalos de médias selecionáveis (por hora para correntes e maré e a cada duas horas para ondas, nesse caso) e conversão de coordenada que permite que você se movimente para a frente e para trás entre as coordenadas do feixe, ENU e XYZ (NORTEK). Além da correção da declinação magnética local.

3.2.2. Levantamento de dados remotos

Dados de vento e altimetria do nível do mar foram utilizados nesta dissertação para obtenção dos objetivos. Para tal, obteve-se dados de vento da região do arquipélago através da plataforma *Advanced Scatterometer* (ASCAT) (diretório *ascat_bmap_support*), abastecida pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), na qual os dados de vento são processados pela NOAA/NESDIS utilizando medições do instrumento *scatterometer* a bordo dos satélites EUMETSAT MetOp. O instrumento utiliza o radar para medir a retro difusão para determinar a velocidade e a direção dos ventos sobre a superfície dos oceanos a uma resolução 0,25 graus.

Os dados de altimetria também foram obtidos pela base de dados do AVISO *Satellite Altimetry Data* disponível pela página <http://aviso.altimetry.fr/global>. Os dados possuem uma resolução de 0,25 graus, para esta dissertação optou-se por pegar o ponto mais próximo da ilha para as análises, tanto da altimetria quanto dos dados de vento. Utilizou-se uma série de oito anos para ambas as variáveis.

Uma série temporal de dez anos de dados de precipitação da ilha foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

3.2.3. Tratamento e Processamento das Séries Temporais

As séries temporais de correntes, componentes zonais (u) e meridionais (v) para cada profundidade - superfície (4,5 m), meio (10,5 m) e fundo (18,5 m), foram submetidas a filtragem em duas bandas, a passa baixa e a passa alta, com o filtro Lanczos-Cosseno (THOMSON; CHOW, 1980; EMERY; THOMSON, 2004) com o objetivo de eliminar os efeitos das forçantes, por exemplo a filtragem passa baixa com frequência de corte de 40 horas, aqui utilizada, elimina os efeitos das correntes de maré. A estas séries foram aplicadas as análises harmônicas com o pacote T_Tide (PAWLOWICZ, et al., 2002), bem como às séries temporais da elevação da maré. Além disso, as séries passaram por análise de densidade espectral, com o objetivo de verificar a banda de maior energia para cada série temporal.

Aos dados de ondas, ventos e anomalia altimétrica foram aplicadas técnicas Wavelet para as séries temporais de um ano, bem como de 8 anos para ventos e altimetria. O espectro de wavelet foram computados considerando a Transformada Wavelet Morlet (TORRENCE; COMPO, 1998; VELEDA et al 2012).

CAPÍTULO 4 – ARTIGO I

SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF THE THERMOHALINE PROPERTIES IN THE COASTAL REGION OF FERNANDO DE NORONHA ARCHIPELAGO, BRAZIL

O primeiro artigo científico desta dissertação foi publicado pelo *Journal of Coastal and Research*, volume 75, páginas 512-516, 2016 (DOI: 10.2112/SI75-103.1). O manuscrito apresenta análises referente as propriedades termohalinas do Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha com base em campanhas realizadas nos anos de 2013 e 2014. Os autores desse artigo são:

Ramilla V. Assunção¹, Alex C. Silva¹, José Martins², and Manuel Flores Montes³

¹*Laboratório de Oceanografia Física Estuarina e Costeira - Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco Recife, Brazil. ramillavieira@hotmail.com*

²*Spinner Dolphin Fernando de Noronha Island, Brazil*

³*Laboratório de Oceanografia Química - Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco Recife, Brazil.*

ABSTRACT

Brazilian oceanic islands are fields of great environmental, scientific, economic and strategic interest for the country. A better understanding of the thermohaline and hydrodynamic properties is fundamental to complement the studies of the chemical and biological processes active on the coast of the Fernando de Noronha archipelago, located between the coordinates 03° 52'S and 32° 25'W. The aim of this work was to verify the coastal thermohaline behavior of the most inhabited part of the island, in seasonal and spatial scale for subsequent association

with the nutrient distribution data. Four campaigns were conducted in 2013 and 2014, two during the wet season and two during the dry season. For each period studied, data were collected at five stations. The results show that during the rainy season temperature increases and salinity decreases in the surface layer. Spatially no large differences are observed. Regarding to nutrient concentration, seasonal concentrations are quite homogeneous in the waters of the archipelago region. The coastal region was characterized by tropical mass water.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Island, nutrient, thermohaline properties.

RESUMO

As ilhas oceânicas brasileiras são campos de grande interesse ambiental, científico, econômico e estratégico para o país. Uma melhor compreensão das propriedades termohalinas e hidrodinâmicas é fundamental para complementar os estudos dos processos químicos e biológicos ativos no litoral do arquipélago de Fernando de Noronha, localizado entre as coordenadas 03°52'S e 32°25'W. O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento termohalino costeiro da parte mais habitada da ilha, em escala sazonal e espacial para posterior associação com os dados de distribuição de nutrientes. Quatro campanhas foram realizadas em 2013 e 2014, duas durante a estação chuvosa e duas durante a estação seca. Para cada período estudado, os dados foram coletados em cinco estações. Os resultados mostram que durante a estação chuvosa os aumentos de temperatura e salinidade diminuem na camada superficial. Espacialmente não são observadas grandes diferenças. Com relação à concentração de nutrientes, as concentrações sazonais são bastante homogêneas nas águas da região do arquipélago. A região costeira foi caracterizada por água em massa tropical.

Palavras-chave: Ilha, nutriente, propriedades termohalinas.

INTRODUCTION

Time series oceanographic observations are important not only for identifying processes in ecosystems, but also the effect of climate variability, water circulation, anthropogenic

perturbations and the prognostic models used in future climate projections. Some climate change impacts, such as increases in precipitation, frequency and intensity of storms, and warmer ocean temperature, will occur quickly in response to increasing global temperatures (IPCC, 2013). Over the long term, increases in sea surface temperature (SST) could also reduce circulation patterns that bring nutrients from the deep sea to surface waters. Increases in SST due to global warming are projected to intensify the stratification of the water column and strengthen the barrier to the transfer of nutrients created by thermocline (GIERACH, 2013). In the warm pool, projected increases in rainfall will reduce salinity and increase stratification further (GANACHAUD et al., 2011).

The coastal and insular area around Fernando de Noronha Archipelago is a strategic area for monitoring climate change effects in Northeast Brazil. It also plays a key role in the process of reproduction, dispersal and colonization of marine organisms in the entire Tropical South Atlantic (REVIZEE, 2006).

Considering the importance of understanding the dynamic around the archipelago, this study aims to investigate for the first time changes in the spatiotemporal thermohaline pattern and the nutrient distributions in the coastal area of the Fernando de Noronha Archipelago.

Study Area

The Fernando de Noronha archipelago is formed by 21 islands and islets, located in the South Equatorial Atlantic Ocean, between 03°52'S and 32°25'W. Its main island, which has the same name of the archipelago, comprises 91% of the total area of the archipelago (Figure 1).

Due to the morphological layout of the island, that is composed by two sides which are more or less exposed to the action of winds and ocean currents, two types of sea can be highlighted around the island, the inside sea, which is more protected and the outside sea, more exposed.

The climate of the archipelago is tropical (Awi of Koppen classification system) and influenced by the Atlantic Ocean. There are two well-marked seasons, the rainy from March to July and the dry from August to January (ALMEIDA, 2006; MOHR et al., 2009).

The archipelago is washed by the waters brought by the central branch of the South Equatorial Current (cSEC), flowing from east to west, which extends from the surface up to a

nominal depth of 100 m, and by the South Equatorial Undercurrent (SEUC), which moves in direction from west to east. The cSEC is located between the SEUC (3°S - 5°S), and the South Equatorial Counter Current (6°S - 9°S) (PETERSOND STRAMMA, 1991).

The structure of the water column that surrounds Noronha usually presents a characteristic profile of the South Atlantic waters, with the presence of the following water masses: Tropical Surface Water (TSW), South Atlantic Central Water (SACW), Antarctic Intermediate Water (AAIW) and the North Atlantic Deep Water (NADW) (STRAMMA; ENGLAND, 1999; SILVA et al., 2005).

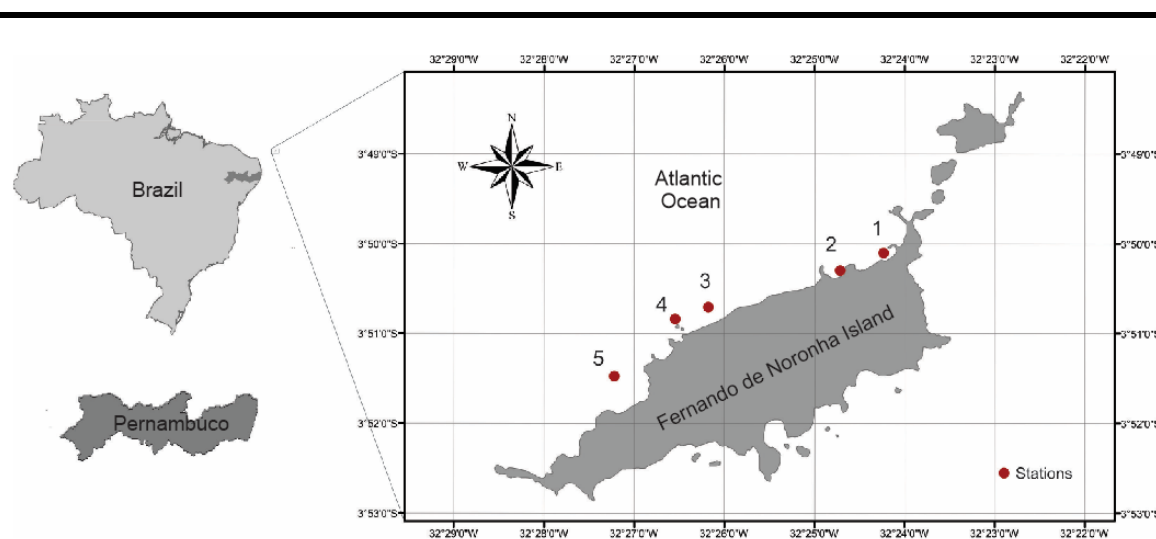


Figure 1. Study area Fernando de Noronha archipelago and sampling stations.

Fernando de Noronha is a marine national park protected legally by the Institute of Environmental Preservation of the Brazilian government - Chico Mendes Institute for the Conservation of the Biodiversity - ICMBio. The island is considered of utmost importance not just for maintenance of local biodiversity, but also as a feeding and rest area for large pelagic fishes that perform transoceanic migrations, such as tuna and billfish.

METHODS

The data were collected during four oceanographic campaigns in the portion of the inside sea in Fernando de Noronha Island. Two campaigns were in 2013 (July and December) and two in 2014 (June and November). For each year samples were collected during both rainy and dry seasons.

The physical parameters (temperature, salinity and density) along the water column were obtained from CTD equipment - Sea Bird Electronics (SBE) 911plus. The CTD is equipped with a centrifugal pump and high resolution sensors for conductivity measurements (resolution = 0.00004sm^{-1}), temperature (resolution = 0.0003°C) and pressure (resolution = $0,068\text{db}$). Moreover, the raw data were processed, added to a database and then discussed.

In addition, water samples were collected to analyze the vertical distribution profiles and concentration of chemical parameters. Niskin bottles were used to collect samples in the depths of the mixed layer. The samples were then stored in plastic bottles (previously decontaminated) kept frozen until the analysis. The dissolved inorganic nutrients (ammonia - NH_3 , nitrite - NO_2 and nitrate - NO_3), the phosphorous - PO_4 and silicate - SiO_2 were analyzed through the method described by Grashoff et al. (1983) and Strickland and Parsons (1972).

RESULTS

Based on in situ observations obtained during four campaigns realized in July and December 2013 and in June and November 2014, temperature and salinity profiles were represented for the five stations distributed in the coastal region of the island. (Figure 2A).

Temperature values obtained with CTD for the five stations distributed on the coast of Fernando de Noronha show that, in general, there were no large spatial variations of the vertical profiles within the same period. The minimum and maximum values during the rainy season of the year 2013 were respectively 27.42°C (Sta.2) and 27.70°C (Sta.3). For the same period of the year 2014 (June 2014), the minimum and maximum values obtained were 27.81°C (Sta.5) and 29.23°C (Sta.1), respectively.

The analysis of the profiles shows that, during the rainy season (Figure 2), sea surface temperature (SST) increased about 1°C, which was not observed during the dry season, neither spatially in a same period. As for salinity, temperatures collected during the rainy season of 2014 showed values slightly higher when compared to the previous year.

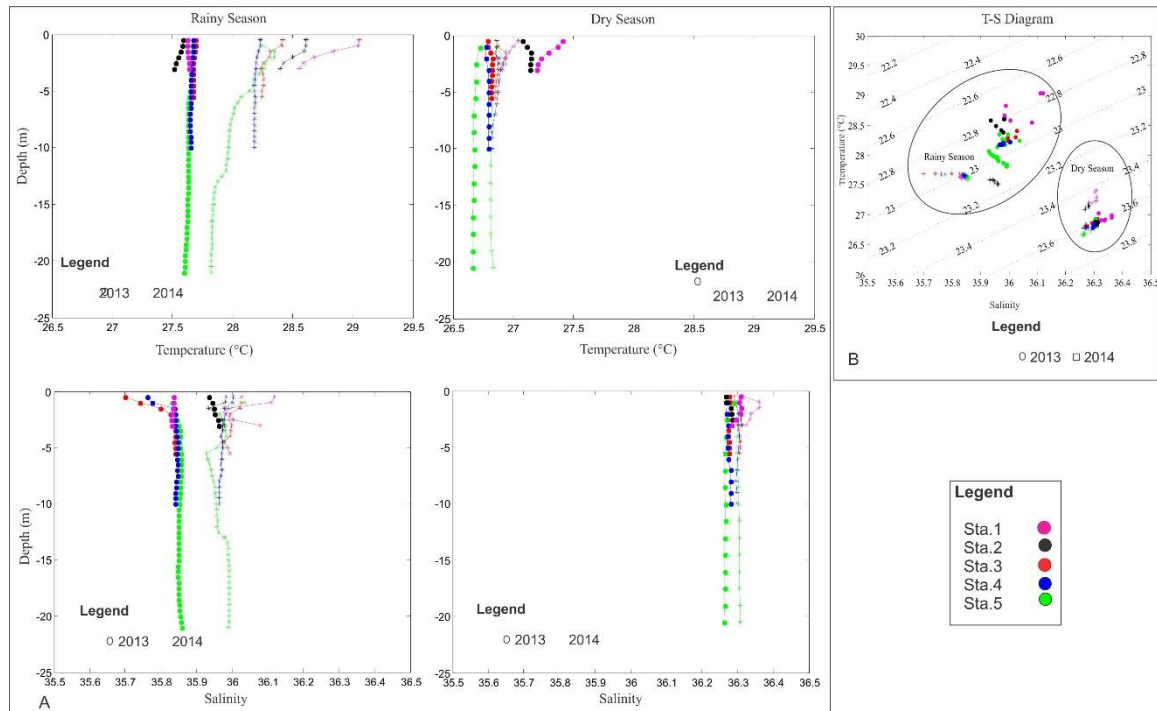


Figure 2. A) Intra and inter annual special variation of thermohaline parameters in the coastal region of the archipelago Fernando de Noronha. B) T-S diagram referring to the figure data A. The legend on the right side is related to two images.

By analyzing the temperature values obtained during the dry season in 2013 and 2014, no significant difference was observed from one year to the next. Temperature recorded during 2013 reached maximum and minimum values of 27.53°C (Sta. 1) and 26.66°C (Sta. 5), respectively. It could also be highlighted that higher temperature values were obtained at stations 1 and 2. However, their profiles presented opposite patterns, as in Sta.1 temperature decreases with depth, contrary to what happens in Sta.2. Temperature recorded during 2014 reached maximum and minimum values of 27.10°C (Sta. 1) and 26.53°C (Sta. 4), respectively.

Likewise by analyzing the vertical distribution of sea surface salinity (SSS) in all stations during a same period, no significant difference was observed. For both years salinity values were higher during the dry season than during the rainy season.

By representing the thermohaline peers, adding sigma-t contours, a characteristic T-S diagram of sea state was obtained (Figure 2B). This diagram allows analyzing and identifying water masses, coastal region features the island as well as the degree of mixing between them. According to the data, the water mass surrounding to shallower coastal region of the island is the Tropical Surface Water (TSW). The T-S diagram shows different characteristics of TSW, water mass with higher salinity and lower temperature during the dry season and lower salinity and higher temperature during the rainy season.

The table 1 presents the concentration values obtained for the essential nutrients used in the primary productivity: ammonia (NH₃), nitrite (NO₂), nitrate (NO₃), phosphate (PO₄) and silicate (SiO₂). The results show that no significant differences were observed for nutrient concentrations, both spatially and temporally.

Table 1. Nutrient concentrations determined for each of the five stations. Ammonia (NH₃), nitrite (NO₂), nitrate (NO₃), phosphate (PO₄) and silicates (SiO₂) in $\mu\text{mol.L}^{-1}$. Amounts related the surface (S) and bottom (B). ND refers to values below the detection limit of the apparatus.

STATION	YEAR		RAINY SEASON					DRY SEASON				
			NH ₃	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SiO ₂	NH ₃	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SiO ₂
1	2013	S	0.02	0.07	0.05	0.24	0.80	0.02	0.07	0.05	0.24	0.80
		B	—	0.08	ND	0.06	2.68	0.00	0.05	0.13	0.32	1.77
2	2013	S	0.01	0.02	0.10	0.23	1.16	0.01	0	0.03	0.23	1.16
		B	—	0.03	0.05	0.10	1.55	—	—	—	—	—
3	2013	S	0.01	0.12	0.10	0.12	1.44	ND	0.12	ND	0.12	1.44
		B	—	0.17	0.22	0.12	1.55	0.01	0.04	ND	0.18	0.76
4	2013	S	0.02	0.03	0.03	0.14	2.65	0.02	0.03	0.03	0.14	2.65
		B	—	0.01	ND	0.09	1.49	0.01	0.01	ND	0.18	1.09
5	2013	S	0.01	0.02	0.1	0.23	1.16	0.01	0.01	ND	0.17	1.03
		B	—	0.03	ND	0.08	2.50	0.01	0.00	0.21	0.13	0.96
1	2014	S	0.10	0.13	0.41	0.15	3.98	0.11	0.02	0.28	0.41	2.54
		B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	2014	S	0.06	0.05	0.01	0.23	2.02	0.02	0.02	0.11	0.12	5.48
		B	—	—	—	—	—	0.08	0.02	ND	0.14	1.62
3	2014	S	0.03	0.17	0.22	0.12	1.55	0.02	0.02	0.11	0.12	2.05
		B	0.05	0.05	ND	0.13	1.96	0.04	0.02	ND	0.14	ND
4	2014	S	0.02	0.01	ND	0.09	1.49	0.02	0.02	0.01	0.11	1.91
		B	0.03	0.02	ND	0.09	0.95	0.02	0.02	0.07	0.13	1.25
5	2014	S	0.04	0.03	ND	0.08	2.50	0.02	0.02	ND	0.07	0.92
		B	0.02	0.03	ND	0.08	2.28	0.02	0.02	0.59	0.12	8.71

DISCUSSION

Data of precipitation (obtained by the Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, a state agency on water and climate) are presented in Figure 3. By comparing the seasonal variation of monthly precipitation between 2013 and 2014, we could observe that for both years, higher levels of average precipitation for the rainy season were observed during the

same period corresponding to higher SST and lower salinity values. In 2013 it presented a delay in the rainfall period compared to the year 2014 and the historical series (years 2003-2012).

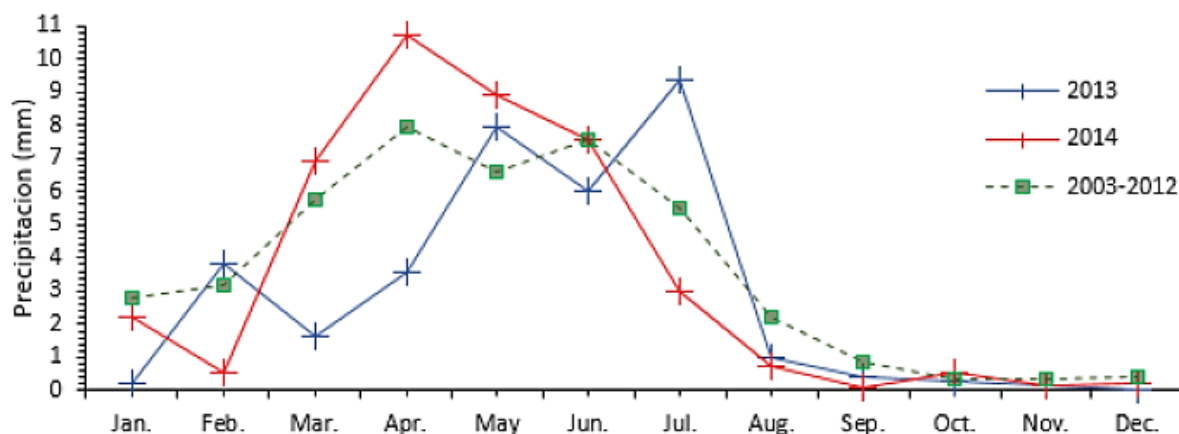


Figure 3. Monthly averages of precipitation during the years 2013–2014 and during the nine previous years (2003-2012).

Analysis of the SST monthly averages obtained by the MODIS-Aqua Satellite images with 4km resolution provided by NASA (Figure 4), corroborates the values found in this study, by identifying a warming of surface water during the rainy season (June and July) compared to the dry season.

Near Fernando de Noronha Archipelago, the SST obtained during the rainy season, for the month of June 2014, showed higher average value (27.8°C), compared to average monthly SST obtained for the month of July 2013 (27.5°C). In June 2013 (not demonstrated in the figure) the SST near Fernando de Noronha Archipelago is 27.9°C.

During the rainy season low SSS is associated with warmer sea temperatures in the Atlantic Tropical. The salinity in the tropical ocean is projected to decrease due to the intensified hydrological cycle (DURACK et al., 2012).

The nutrient contents analyzed in the mixed layer exhibited concentrations specific to oligotrophic areas. The values obtained are near to the minimum detection level, and in many cases below this value, especially in relation to ammonia concentrations. This is one of the first products of organic matter mineralization, which is quickly oxidized to the more stable form, nitrate, also found in low concentrations, however higher than ammonia.

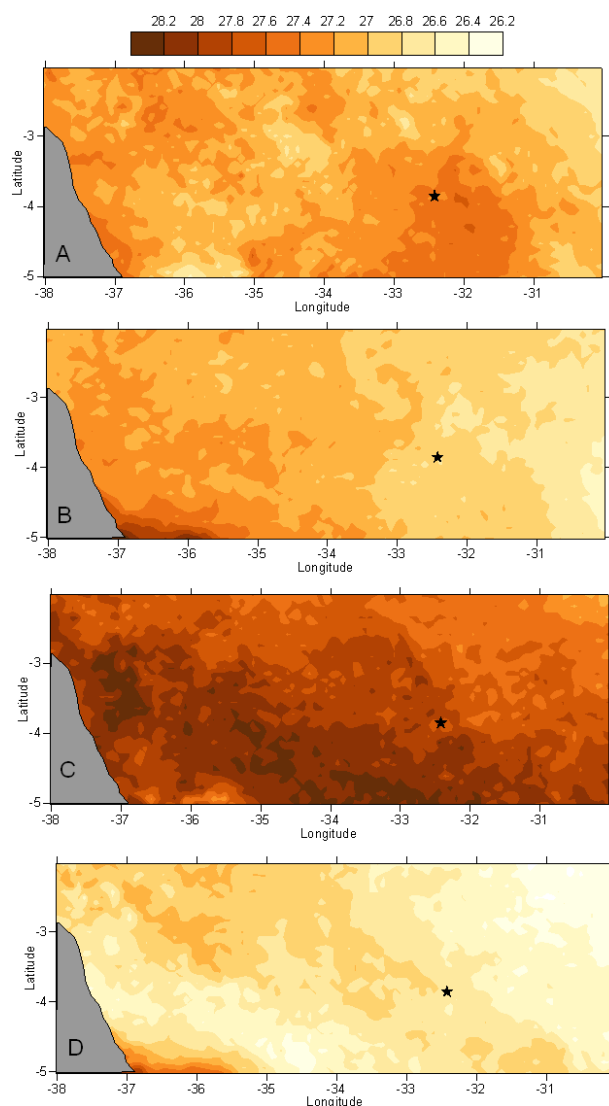


Figure 4. Satellite images showing the average variation of Sea Surface Temperature (SST) obtained during the months related to the four campaigns conducted in this study. A) July 2013; B) December 2013; C) June 2014; D) November 2014. The location of the archipelago (star) is identified in the images.

By comparing the median concentrations of nutrients, a subtle rise could be observed during the rainy season for both years, except for phosphate. Silicate was the nutrient that showed the highest variation between seasons, as well as greatest concentrations.

Silicate is an essential component, however, it does not enter into the cycle of organic matter but is an important component in the composition of the diatomaceous shells and exoskeletons of other organisms. Silicate does not fit between the most utilized components from a biological point of view, further, this element degrades slower, depending on alternating periods of greater or lesser use, according to population growth (FLORES MONTES, 2003).

In terms of interannual seasonality, higher nutrient concentrations were detected in 2014, excepted for phosphate. Phosphate was the second nutrient with larger proportions. According to Aidar et al. (1993), phosphate ion regeneration is very fast in the water column, and can act as the limiting nutrient.

The variation of nutrient concentrations in the water column was quite low, however, there was, in general a small positive gradient from the bottom to the surface of the stations.

CONCLUSIONS

Variations of temperature and salinity in the surface layer were collected and analyzed during dry and rainy seasons. Results show that lower temperatures and higher salinity values were observed during the dry period for both years of 2013 and 2014. During rainy season low salinity was observed, which could be associated with warmer sea temperatures in the Atlantic Tropical near Fernando de Noronha Archipelago.

The nutrient data showed a nutritional deficit. Changes in nutrient concentration were very small from one period to another, between the stations and in the water column. Therefore it is not possible to identify correlations with changes of the thermohaline properties.

The coastal region of Fernando de Noronha, in the inside sea region is characterized by the presence of Surface Tropical Water.

ACKNOWLEDGMENTS

This study had the support of the projects: 1) Study of Carbon Cycle Balance in the coastal region and its ocean transportation potential, with emphasis on the coast of Pernambuco (Edital FACEPE-FAPESP); 2) Total Organic Carbon transport and its interaction with the marine acidification processes, in ocean and estuarine-coastal environments northern and northeastern Brazil; and (3) Monitoring of Sea conditions off the coast of NE Brazil MC-MAR/NE (Edital FACEPE).

LITERATURE CITED

- AIDAR, E.; GAETA, S.A.; GIANESELLA-GALVÃO, S.M.F.; KUTNER, M.B.B., AND TEIXEIRA, C., 1993. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. Publicação especial do Instituto Oceanográfico de São Paulo, Brazil, 10, 9-43.
- ALMEIDA, F.F.M., 2006. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. *Terra Didática*, 2, 3-18.
- FLORES MONTES, M. J., 2003. Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos: a importância do fluxo de difusão dos nutrientes para a biomassa do fitoplâncton na região oceânica do nordeste brasileiro. Universidade Federal de Pernambuco, Tese de Doutorado (Recife, Brasil), 179p.
- GANACHAUD, A.; GUPTA, A.S.; ORR, J.C.; WIJFFELS, S.E.; RIDGWAY, K.R.; HEMER, M.A.; MAESC.; STEINBERG, C.R.; TRIBOLLET, A.D.; QIUB., AND KRUGER J.C., 2011. Observed and Expected Changes to the Tropical Pacific Ocean, in: Bell, J.D.; Johnson J.E., and Hobday A.J. (Eds.), *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change*, Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia, 101-187.
- GIERACH, M. M.; MESSIÉ, M.; LEE, T.; KARNAUSKAS, K.B.; AND RADENAC, M.-H., 2013. Biophysical responses near equatorial islands in the Western Pacific Ocean during El Niño/La Niña transitions. *Geophys. Res. Lett.*, 40(20), 5473-5479.
- GRASHOFF, K.; EHRHARDT, K.M.; AND KREMLING, K., 1983. *Methods of Seawater Analysis*. 2 nd edn. Verlag Chemie, Weinheim, Germany, 317p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.
- MOHR, L.V.; CASTRO, J.W.A.; COSTA, P.M.S., AND ALVES, R.J.V., 2009. Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Vol. II, MMA Secretaria de Biodiversidade e Floresta, Brasília, Brasil, 496p. (In Portuguese) Peterson R.G., and Stramma, L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 26(1), 1-73.
- REVIZEE. 2006. Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na zona Econômica Exclusiva. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 303p. (In Portuguese).
- SILVA, A.C.; ARAÚJO, M., AND BOURLÈS, B., 2005. Variação sazonal da estrutura de massas d'água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2), 145-157. (In Portuguese)
- STRAMMA, L., AND ENGLAND, M., 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104(C9), 20863-20883.
- STRICKLAND J. D. H; PARSONS T. R., 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. 2nd edn, Fish Res. Bd. Can. Bull., Ottawa, Bulletin, 167, 1-311.

CAPÍTULO 5 – ARTIGO II

IN SITU MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF OCEAN WAVES IN THE ARCHIPELAGO OF FERNANDO DE NORONHA, BRAZIL

O segundo artigo científico desta dissertação foi submetido à revista *Brazilian Journal of Oceanography*. O manuscrito apresenta análises do regime de ondas incidentes no Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha, através de dados obtidos por um fundeio com perfilador acústico por efeito doppler para medições de ondas e correntes inserido sobre o solo oceânico, durante os meses de junho de 2013 a maio de 2014. Os autores desse artigo são:

Ramilla Vieira de Assunção; Alex Costa da Silva

Laboratório de Oceanografia Física Estuarina e Costeira, Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco – LOFEC/DOCEAN/UFPE, Recife, PE, Brazil.
ramillavieira@hotmail.com; alexsilvaufpe@gmail.com

ABSTRACT

Nearshore wave information is important to limit risks of ships operations, offshore structures, coastal infrastructure and ecosystems in the littorals. This paper analyses one year (June 2013 – May 2014) in-situ measurements of the physical properties of the ocean waves (significant wave height - H_s , maximum wave height - H_{max} , peak periods - T_p and direction - θ) collected in the coastal region of the Archipelago of Fernando de Noronha, Brazil. Most of the wind seas energy comes from the northeast quadrant, with peak periods mostly up to 10 s. The swell energy was divided mostly between the northeast and northwest quadrants. The swell waves were characterized with peak periods between 10s and 16s. The greater wave heights were observed during the months of January, February and March, whereas the lowest values were measured in June, August and September. Throughout the measurement period, H_s values

varied from 0.63 to 4.89 m, with an average value of 1.77 m. Higher occurrence of swell waves was observed between October 2013 and January 2014. The biggest H_s values for both types of waves are related to waves coming from the north. The sea level anomalies time series (2008-2015), they showed very significant occurrence high wave during the months of December, January, October and February.

Keywords: wave climate; island; Tropical Atlantic; swell

RESUMO

Informações sobre ondas costeiras são muito importantes para minimizar os riscos operacionais com embarcações, instalação de estruturas offshore, infraestrutura costeira e ecossistemas litorâneos. Este artigo apresenta um ano de dados (junho de 2013 a maio de 2014) das propriedades de ondas (Altura Significativa de onda – H_s , altura máxima – H_{max} , período de pico – T_p e direção - θ) medidos in situ na região costeira do Arquipélago de Fernando de Noronha, Brasil. A maioria das ondas locais (*wind seas*) incidente nesta região é oriunda do quadrante nordeste, com períodos de pico próximo a 10 s. As energias de ondas do tipo *swell* foram divididas preferencialmente entre os quadrantes nordeste e noroeste. As ondas *swell* foram caracterizadas com picos entre 10 e 16s. As maiores alturas de ondas foram observadas durante os meses de janeiro, fevereiro e março, enquanto os menores valores foram em junho, agosto e setembro. Ao longo do período de medição os valores de H_s variaram de 0,63 a 4,89 m, com um valor médio de 1,77 m. A maior ocorrência de ondas *swell* foram entre outubro de 2013 e janeiro de 2014. Os maiores valores de H_s para ambos os tipos de ondas estão relacionados às ondas vindas de norte. A série temporal (2008-2015) de dados de anomalia da superfície do mar, tem demonstrado ocorrência significativa de máxima altura de ondas nos meses de dezembro, janeiro, outubro e fevereiro.

Descritores: clima de ondas; ilha Oceânica; Atlântico Tropical; swell

INTRODUCTION

Dynamic oceanography aims to describe and quantify of ocean responses to external forcing. Many of these forcing being directly responsible of the layer ocean-atmosphere boundary features. The ocean's waves are the most immediate and prominent responses in this layer. Surface waves derive their energy from wind, and a significant amount of this energy is dissipated in the nearshore region.

The Atlantic Tropical/Equatorial is marked by the presence of the meteorological equator where the Trade Winds converge creating a low-pressure zone permanent, forming a surface area of greater convection, cloud cover and precipitation, called the ITCZ or Intertropical Convergence Zone (WHEELER; NGUYEN, 2015).

ITCZ performs a southern migration during the year, further north during the months of August and September and comes nearest to the equator during March-April, exercising significant control in rainfall regimes, wind and waves (MCGREGOR; NIEUWOLT, 1998, PIANCA et al., 2010; SILVA et al., 2011).

The standard that the wind rubs on the layer ocean-atmosphere boundary promotes the transfer of momentum or kinetic energy to the ocean surface, inducing the formation of surface gravity waves (MARONE, 1991). This type of wave is of great importance in the energy transport in the sea playing an important role in determining the coastal features.

The main classes of emerging gravitational waves in the ocean are called by Munk (1963) as wind sea and swell, remaining the nomenclature to the present day. These two wave's classes are distinguished based on their frequencies.

The sea wind or local waves are characterized by periods between 1 and 10 s, and above that period (> 10 s) are the swells that are ripples generally formed in distant regions by storms, and because of their physical characteristics, such as long length and low coefficient dispersion can propagate in ocean basin scales (DRENNAN et al., 2003).

Information regarding the wave regime in Brazil are scarce and based on occasional observations of short period, and this an unprecedented analysis on the scale spatiotemporal displayed, although the lack of sea data represents always a handicap for evaluating models validity and performance. Being extremely important since the wave climate, and the variation

in sea level it is geological and oceanographic processes that concern as coastal erosion in the insular environment that is Fernando de Noronha Island (CASTRO, 2010).

The study aims to determine and characterize the first *in-situ* measurement the temporal variability of the types of waves (sea and swell) that affect the Inside Sea of Fernando de Noronha Island, which is an area less exposed to the action of S-SE winds. The correct determination of the wave parameters in the region is fundamental to plan coastal erosion process, the prevention of risk factors to ships, offshore structures, coastal infrastructure and coastal ecosystems.

Study Area

The Fernando de Noronha archipelago is formed by 21 islands and islets, located in the South Equatorial Atlantic Ocean, between $03^{\circ}52'S$ and $32^{\circ}25'W$, at 545 km from the coast. Its main island, which has the same name of the archipelago, comprises 91% of the total area of the archipelago (Figure 1).

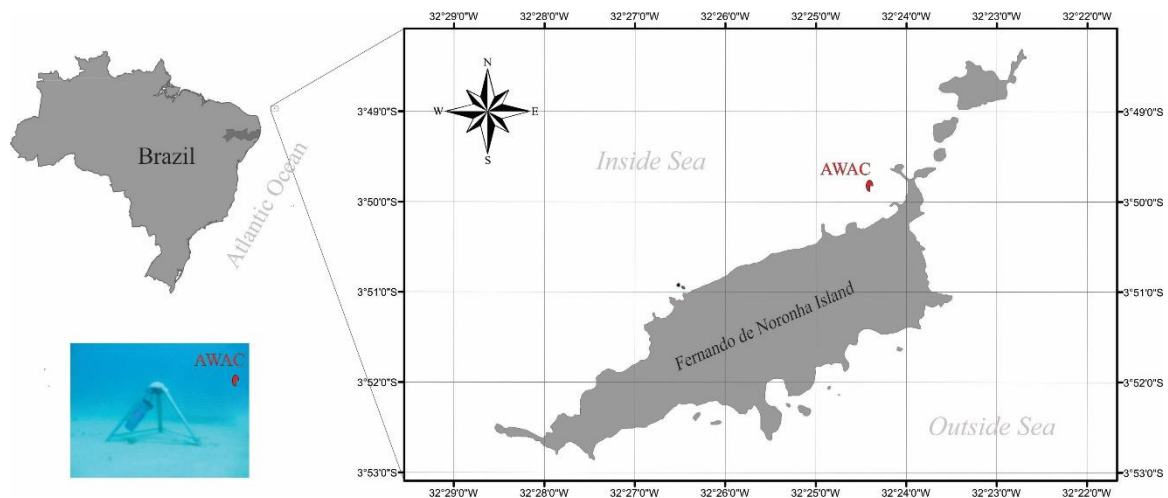


Figure 1. Location of the Fernando de Noronha Island (a), signaling their seas, the sea outside facing the African continent and the sea in facing the northern hemisphere, this is inserted anchored equipment (b), data collection instrument for this study.

Due to the morphological layout of the island, that is composed by two sides which are more or less exposed to the action of winds and ocean currents, two types of sea can be

highlighted around the island, the inside sea, which is more protected and the outside sea, more exposed. The coastal and insular area around Fernando de Noronha Archipelago is a strategic area for monitoring climate change effects in Northeast Brazil (ASSUNÇÃO et al., 2016).

MATERIAL AND METHODS

Obtaining the sea level height data was through the stationary or euleriano method using the anchoring of an acoustic wave and current meter system (AWAC) with transmit frequency of the 600 kHz, installed on the seabed approximately a 20 meters deep under the coordinates 3°49'47.28"S e 32°24'30.24"W (Figure 1b).

The equipment remained at anchor with upward-looking configuration and autonomous functionality. If the sensor is mounted in a non-moving structure. The equipment used, performs the records waves through the Surface Acoustic Tracking (AST) technology, which allows the detection of free surface by using an additional acoustic beam positioned directly vertically.

The wave height and direction measurements are a result of the extensively validated and optimized with AST (NORTEK, 2016).

The wave records were stored every 2 hours, 365 days (June 01, 2013 to March 31, 2014) uninterruptedly, resulting in 4.380 records, except for days of maintenance and backup of data responsible for the gap of four days. The data were processed from software used to program as the recovery of the data recorded by the AWAC, separated waves parameters (significant wave height - H_s , Peak Period - T_p , and direction - θ and maximum height - H_{max}). All graphics were designed by routines for numerical data.

The wind data were obtained by ASCAT platform - [data.remss.com - /ascat/metopa/bmaps_v02.1/weeks/](http://data.remss.com/ascat/metopa/bmaps_v02.1/weeks/) - This directory contains access to Remote Sensing Systems' ASCAT Orbit Wind Vector Data (swath data) and Ocean Wind Byte maps (0.25 degree gridded data) for the ASCAT instrument on Metop-A, to the nearest point on the island. The files were read from the file reading subroutines available in the `ascat_bmap_support` directory. Anomaly data of the variation of the sea surface were obtained AVISO - <http://aviso.altimetry.fr/global> - whose resolution is 0.25 degrees in the point nearest of the island for analysis. An eight-year time series was used for altimetry and wind.

In order to extract and characterize the significant variabilities of the physical processes across temporal series, we performed a wavelet-based analysis of physical data, wind (ASCAT), altimetry (AVISO) and *in-situ* waves data. The wavelet spectrum of signal x is computed as the magnitude of the complex Morlet wavelet transform of x (TORRENCE, COMPO, 1998).

RESULTS

Data collection comprised periods of autumn, winter, spring, summer and fall. Following each parameter (T_p , H_s , H_{max} and direction of the waves) will be discussed.

Wave Period (T_p)

During the data collection were recorded the arrival of waves with periods ranging from 9 to 20 s, indicating the presence of both types of gravitational waves: wind sea, with periods less than 10 s, and the swells. whose are ripples with periods above 10 s.

In Figure 2, the occurrences of both types of waves are observed based on their respective ranges periods, prevailing wind sea waves. The largest amounts were registered swell between October 2013 and January 2014 (Figure 2 and 3). October, November and December had the highest occurrence of north swell with 17%, 16% and 13% of occurrence, respectively (Figure 3).

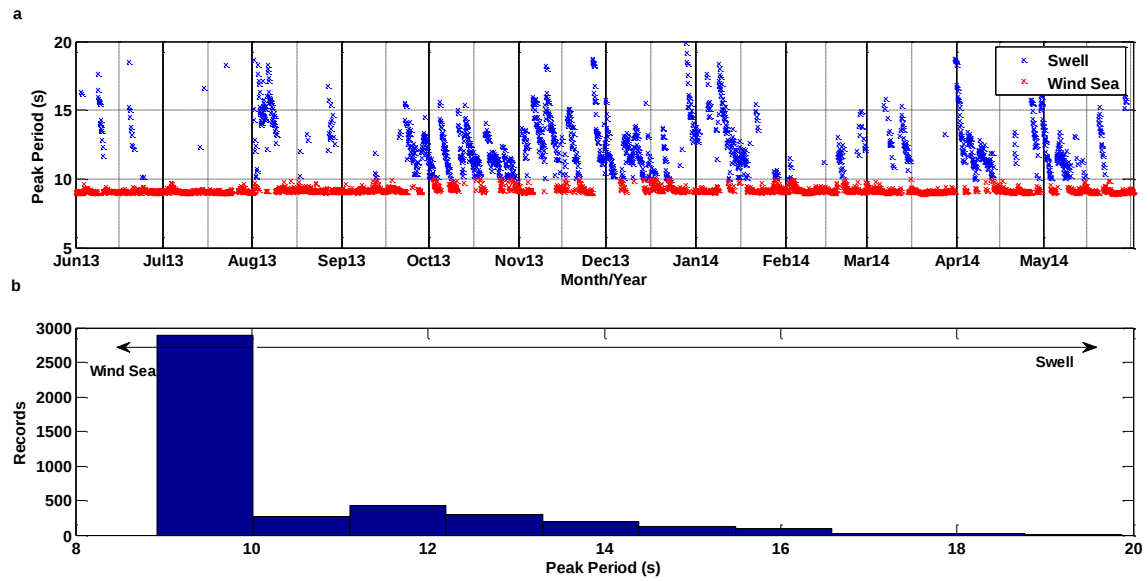


Figure 2 Range periods of waves (T_p) recorded during the study period: a) time series with the distinction of occurrence of the types of waves based on their periods; b) Histogram referring to the recorded periods.

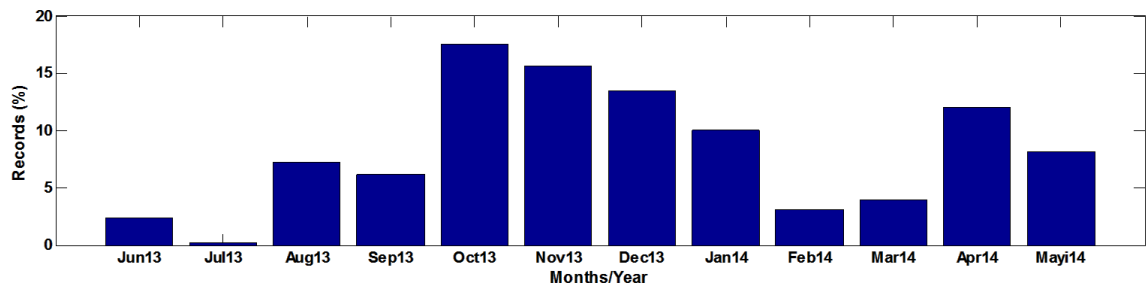


Figure 3. Swell occurrence percentage for each month in relation to the registration number for the entire study period.

Wave Height (H_s and H_{max})

Significant waves height study showed higher occurrence of waves with H_s between 0.63 to 8.44 m and H_{max} between 1.06 to 14.09 m. On average, the largest H_s and H_{max} started to occur from December, reaching peak in February returning to decrease (Figure 4). It can be highlighted that during February, the highest incidence of waves with high H_s values was registered, matching the period of greatest intensity of NE trade winds. The lowest H_s value recorded (0.63m) was observed from September. The highest H_s swell was 8.42 m observed in February, and the lowest H_s swell was 0.86 m occurring in most months studied (Figure 4b).

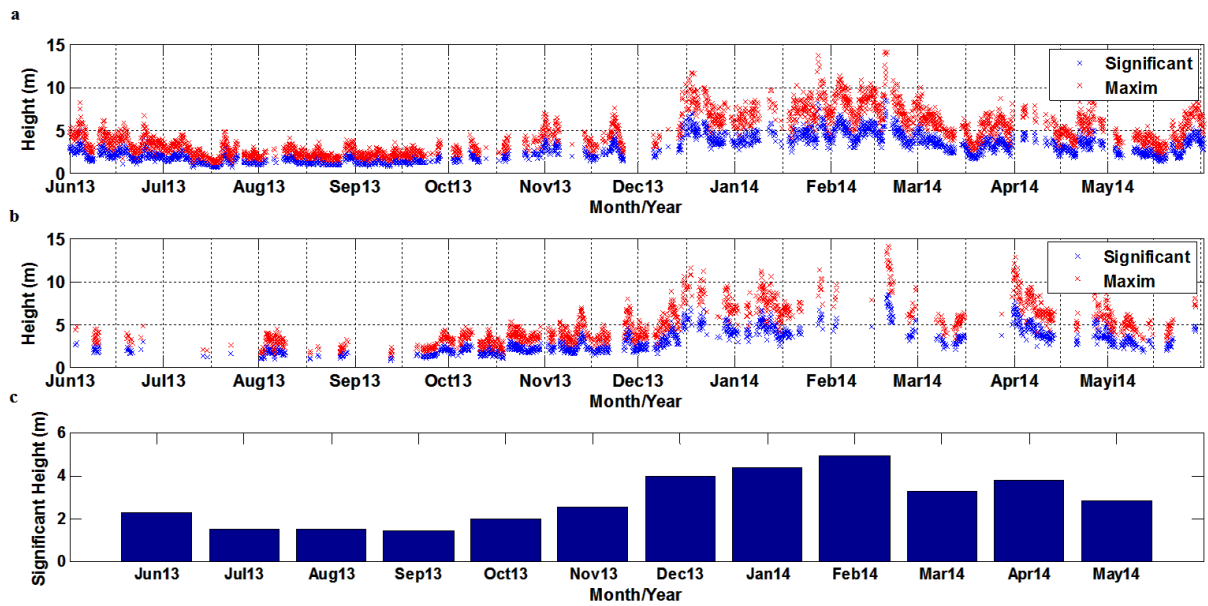


Figure 4. Wave height variation: (a) wind sea and (b) swell. Figure (c) are arranged the H_s monthly averages for both waves for 12 months.

Wave Direction (Dir)

The biggest H_s values for both types of waves are related to waves coming from the north, as it can be observed in figure 5, polar graph where the direction bands are represented as well as the percentage of occurrences of the faults of H_s values for each band.

The directions of the waves were disposed between the 1st, 2nd and 4th quadrants, that is, north of waves were recorded (N), northeast (NE), east (E) southeast (SE) and also west of waves (W) (Figure 5).

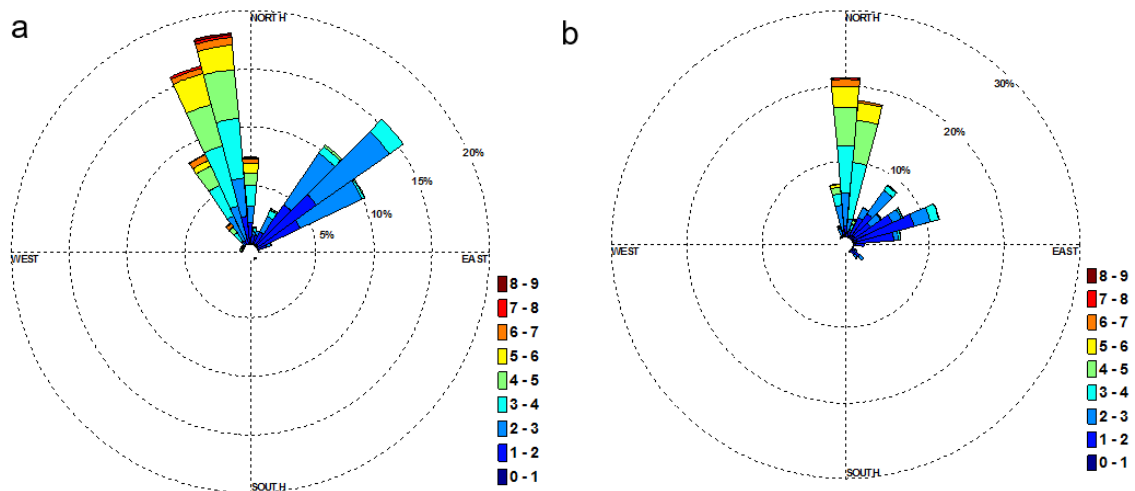


Figure 5. Polar graph referring to the percentage of hours of waves for each direction: a) swell and b) wind sea.

Storm waves kept a resemblance to the local waves, with some particularities. The swell waves directions were divided by sectors: in June and August 2013 were recorded swells arriving from SE (114 and 120°) in July, September and November were predominant NE (78.80 and 60°). In December occurred the first swell records from Northwest and North, which remained dominant until the month of March 2014. In April and May 2014, the equipment recorded incidence of storm waves NW-N and W-NW, respectively (Figure 6).

The swell and wind waves sea from the north and - northwest were the ones that presented higher values, predominantly between December and May (534 records de swell do total de 1812 records) (Figure 6b).

Wind Pattern

Fernando de Noronha it comes to an oceanic island in the Equatorial Atlantic has its waves regime mainly influenced by the trade winds from the southeast and northeast, which possess their intensities governed in large scale by the southern migration of the ITCZ. Figure 7 represents a temporal series of 8 years (2008-2015). Figure 8 applies only to the data collection period with in-situ wave data. Both time series graphs reflecting the pattern of winds behavior for the region, with winds predominantly from the southeast with greater intensity in the second half of the year (ITCZ further north) and decreasing during the first half (lower period location of the ITCZ).

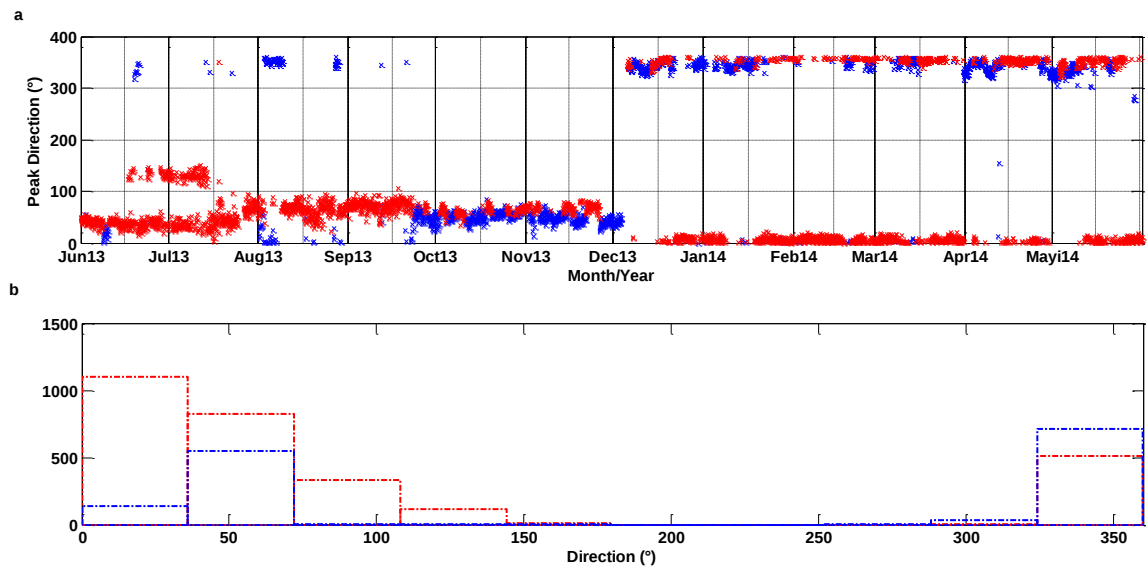


Figure 6. Range the direction of waves Wind Sea (red) and swell (blue): a) direction time series of the incident waves in the study area; b) frequency of occurrence Histogram both types of waves for each direction.

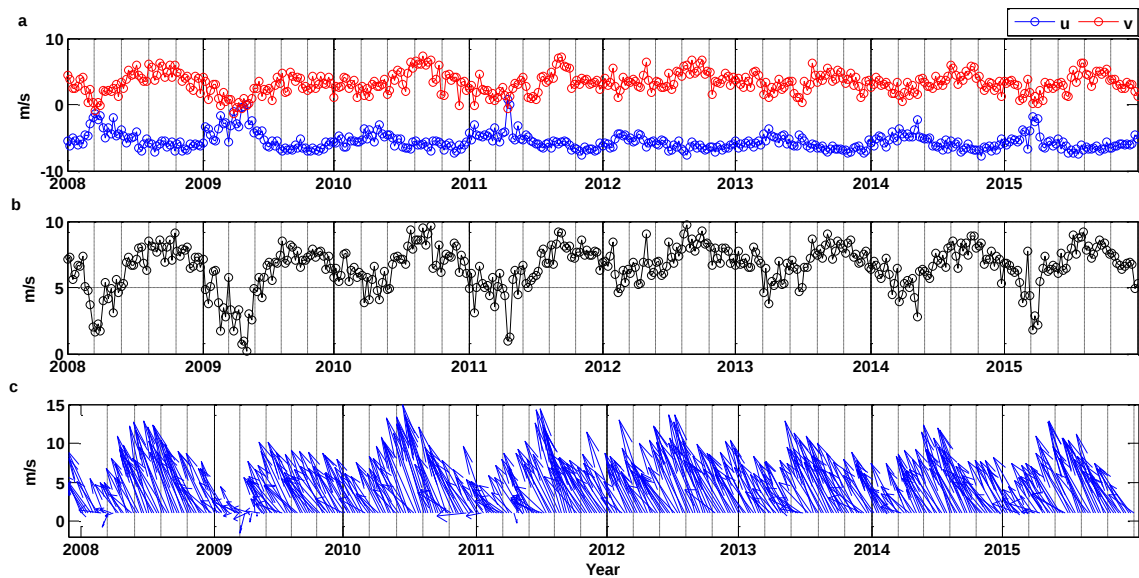


Figure 7. Time series related to wind data obtained by ASCAT platform: (a) components; (b) resulting velocity; e (c) magnitude and direction

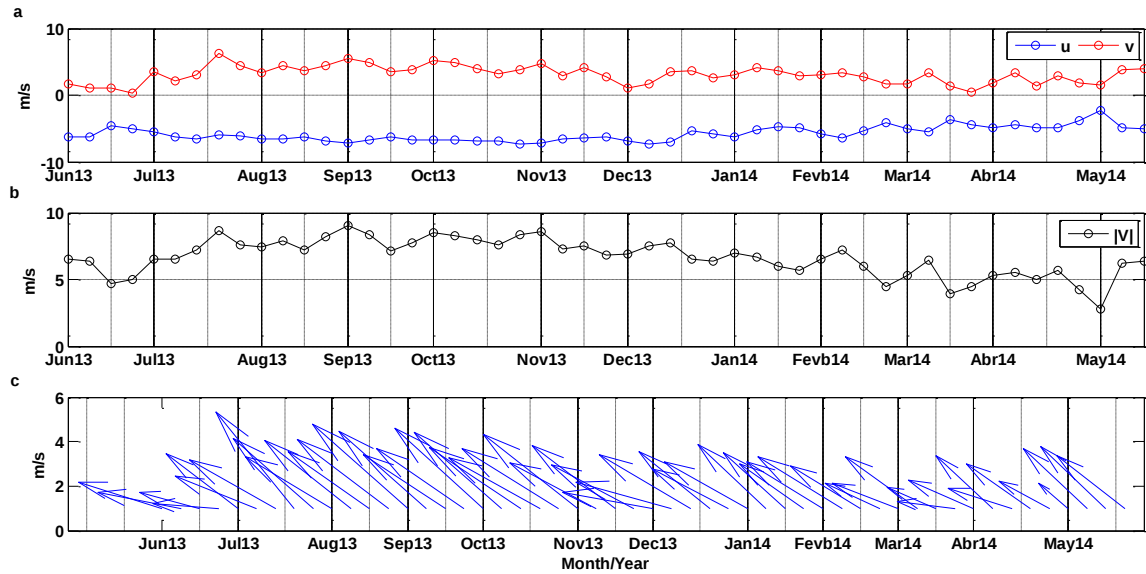


Figure 8. Wind data series within the study periods: (a) components; (b) resulting velocity; e (c) magnitude and direction.

Altimetry

Anomaly data of the variation of the sea level anomalies were obtained AVISO whose resolution is 0.25 degrees in the point nearest of the island for analysis (Figure 9b) of a time series of 8 years (2008-2015), in order to verify the standard elevation height of the waves from December was chosen. Regarding to altimetry data, they showed very significant occurrence high wave during the months of December, January, October and February in 2008-2015 (Figure 9).

Signal Analysis

With the purpose of analyzing the frequency distribution in time, i.e. they were the wave energy variations over time was performed wavelet transform (WT) using the wavelet Morlet mother to the altimetry data (AVISO), as well as the wind speed data (ASCAT). We defined the energy level in the wavelet spectrum above which a local space-scale is regarded as significant, as the 90th percentile of the wavelet power spectrum of the red noise. The wavelet power spectra are based on a Morlet transform and areas above the 95% significance level are encircled by black contours, with the bowl- shaped black lines indicating the cone of influence (Figure 10) (TORRENCE; COMPO, 1998).

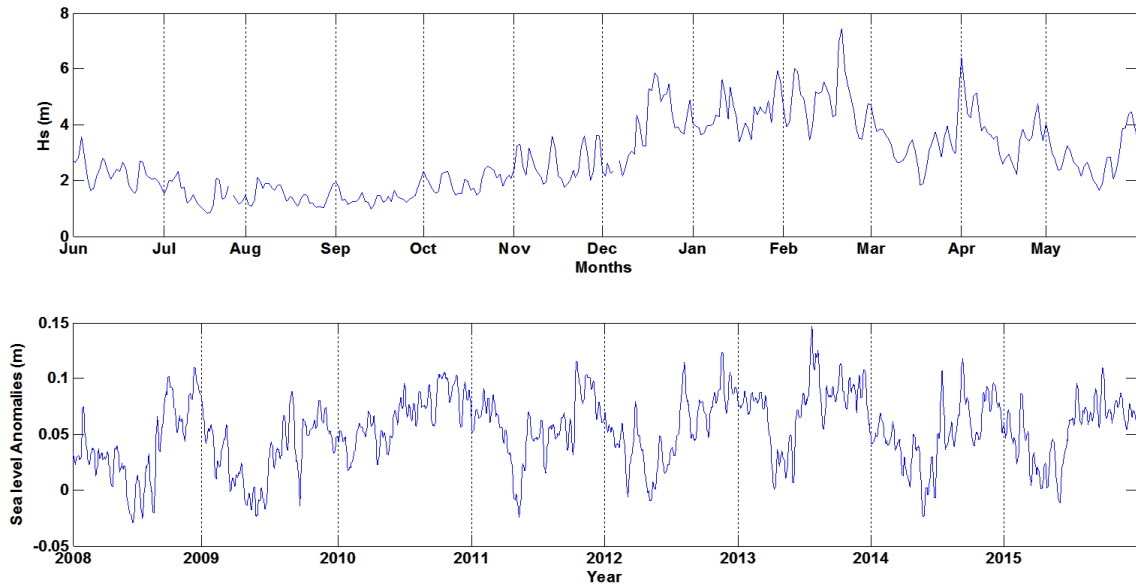


Figure 9. Hs variation data from the through in-situ wave data (a) identifying the change in the height of the waves from December 2013. This characteristic is corroborated by the time series of the sea level variation (b) from the AVISO, where it is perceived the well-marked seasonality.

Wavelet power spectral density function shows the strength of the variations (energy) as a function of period. In other words, it shows which frequencies variations are strong and at which period variations are weak. In figure 10 the wavelet transform analysis of the wind and sea altimetry time series confirms that the strongest signal is in the annual period bandit, is observed that the most prominent range is between 32 and 64 week. The peak of the wind happens just before the altimetry.

In figure 10a wavelet analysis indicates some changes between December 2013 and May 2014, with some amount of energy distributed among the period of 4 - 8 hours. The red color indicated in the figure 10 demonstrates a greater variance of the Hs. The energy change observed between the beginning and end of the sampling period characterizes the study region, (b) and (c) in figure 10, discussed above.

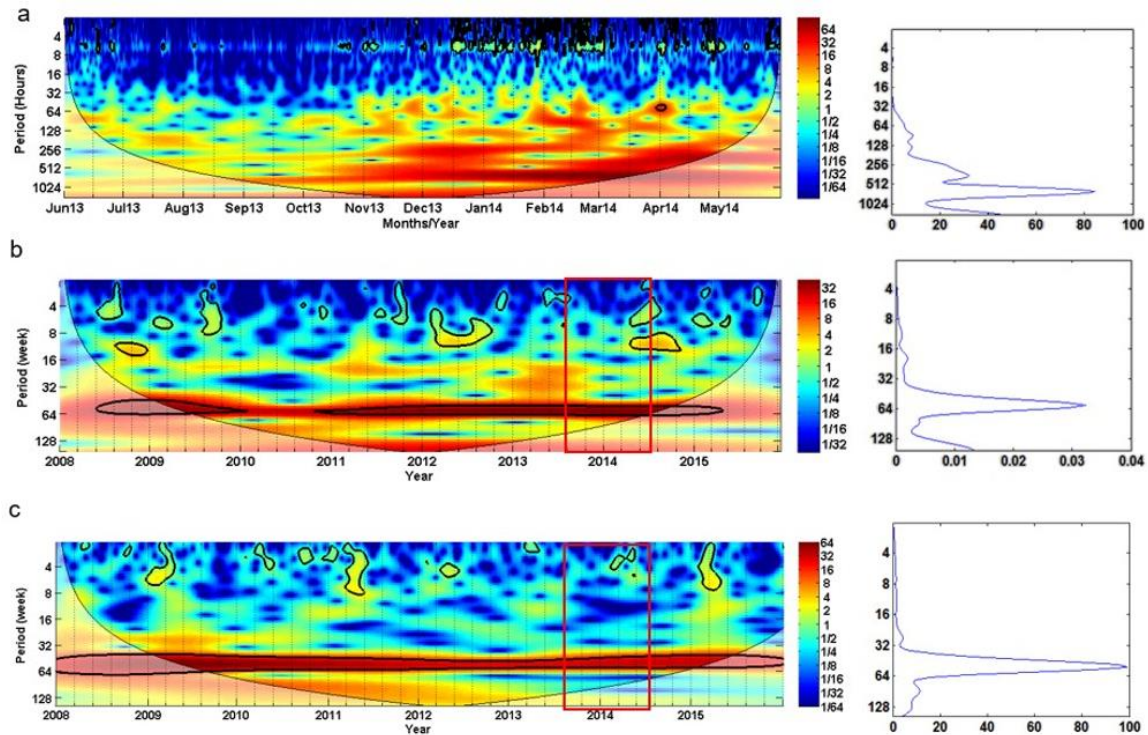


Figure 10. Analysis of signals using wavelet transform: (a) wavelet power spectrum for wave data obtained in-situ (b) wavelet power spectrum based on altimetry data; and (c) wavelet power spectrum of the zonal wind stresses. The x-axis represents the wavelet location in time. In the y-axis is the wavelet period in hours for waves and weeks for altimetry and Wind. The lateral scale represents potential exchanges of variance. The graphs to the right refer to the distribution of average power in time, the Power Spectrum Density (PSD).

DISCUSSION

For the period of one year was analyzed alternation observed in the predominate direction of the wind sea waves (Figure 6). This change of direction began to be observed from the month of December, during which the ITCZ is moving nearer directions at the equator.

During the first 6 months of data collection (for the second half of the year 2013) the waves of wind sea type showed preferential direction of NE-E, as expected due to wind patterns, predominantly from the southeast, with little or no registration northeast winds. In June and July, when the intensity of the winds are even smaller, there is a greater prevalence of NE waves, in addition to SE waves.

During this first period, H_s of the incident waves in the anchoring region was 4.18 m for Wind Sea and 4.08 for swell. It is noteworthy that the results here are treated for the point

at which the Directional Wave Measurements was at anchor, which itself is located in the sea in the island side facing the equator. Moreover, because it is a shallow region and the presence of small islands reflected in a possible refraction of waves caused by south winds, sea inside.

Since December, the ITCZ occupies the closest position to the equator causing the weakening of the southeast winds (Figure 8), carrying the shift about 45° to the direction of the waves. Therefore, this start to originate waves with predominantly north direction (Figure 6), which directly affects the inside sea inducing a stacking of water on the platform. An increase in wave height was recorded from December into the first half of 2014, with H_s of 7.26 m for Wind Sea and 7.28 for swell.

Through the time series of sea level anomalies (altimetry) at a point near the Fernando de Noronha island can characterize such behavior as a strong stationary signal. However, when observing the variant of the altimetry (Figure 9) it is perceived a time deflection with respect to the data acquired in situ (Directional Wave Measurements), which can be explained based on the spatial scales of the datas, H_s local scale and altimetry large scale. This, in turn, does not fail to identify the change in the H_s rate.

Raising the height of waves from December, extending the first half of 2014 suggest two reasons:

- i. The weakening of the southeast winds allows greater influence of the northeast trade winds on the island, coupled with the provision of this in the ocean, it leads to direct water on the stacking platform; and
- ii. This period is marked by the arrival of the swell of N-NW.

During the entire year the equipment recorded waves with periods longer than 10 s. However, these occurrences made themselves with distinguishing features in two predominant directions swell SE-NE between the months of June to November, the swell of NW-N December to March, plus the occasional occurrences of waves coming from the W-NW in the months of April and May.

As mentioned above, the swell waves are formed in other regions which can travel from small spatial scales till the basin scale. The region in which the Fernando de Noronha archipelago is inserted into a feature region swells of arrival, with several origin (YONG, 1999; CARVALHO, 2010; PARISE, 2010; SILVA et al., 2011; NEMES; MARONE 2013).

Regarding that, the main contributions are allocated to extratropical cyclone of the Atlantic in both hemispheres, and from the Pacific, Indian, even for a short time in the year (PARISE, 2010). Highlighting the Northwest Atlantic as having areas of generating intense waves during breaks from January to March and October to December the African atmospheric waves from east (MELO et al., 1995; YONG, 1999; FARIAS; SOUZA, 2012).

According to the literature, strong winds associated with low pressure systems at middle latitudes usually result in wave propagation to south arising during winter in the northern hemisphere (HANLEY et al., 2010). Therefore, likely the swell incident fields in the archipelago are mainly from these regions during the first quarter (DONELAN et al., 1997).

The spectral power analysis based on the wavelet (Figure 10) of the time series of altimetry and wind intensity in the region of the Fernando de Noronha archipelago show that the highest energy peak is in the same time range, showing the correlation of the stationary signal between these variables. As discussed previously, the decrease in the intentionality of the Southeast trade leads to sea level rise in the region of interest in this study.

CONCLUSION

The archipelago Fernando de Noronha is under strong influence of the southeast trade winds that govern the system of local waves (Wind Sea). As well as the variation of winds intensity are regulated by the meridional variation of the Intertropical Convergence Zone, acting as influence of the incidence direction of the waves.

Beyond the wind sea, the archipelago is highly vulnerable to the arrival swells throughout the year. However, it is during the first half of the year that the long period storm waves originated in the northern hemisphere are recorded, bringing the greatest wave heights in the inner shelf of the island.

The largest waves recorded in the first months of 2014 and the change of direction indicate that are reflective of three main factors:

i.morphological arrangement of the island in the ocean, where the sea is entirely in facing the northern hemisphere and the Americas;

- ii. decrease in the intensity of the southeast trade winds; providing the greatest influence of the northeast-east trade winds; and
- iii. the arrival of the north swells.

For a description of representative waves regime for the archipelago it is necessary to study similar in the sea outside.

ACKNOWLEDGMENTS

Projeto Bolsa de Mestrado CNPq (Proc.: 131605/2015-1), Projeto FACEPE (Proc.: APQ 1056-1.08/15) e MC-MAR/NE (edital 20/2014 - Proc.: APQ 1056-1.08/15).

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, A.C.B.; BLITZKOW, D. Ondas: Histórico e Aplicação. 2008.
- CARVALHO, J.T. Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro. Ministério da ciência e tecnologia; INPE, <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38B693L> 2010.
- CASTRO, J.W.A. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. Revista de Gestão Costeira Integrada -- 10(3):303-319. 2009
- DRENNAN, W.M.; GRABER H.C.; HAUSER D.; QUENTIN C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. J. Geoph. Res., v.108, 2003.
- DONELAN, M.A.; DRENNAN, W.M.; KATSAROS, K.B. The Air–Sea Momentum Flux in Conditions of Wind Sea and Swell. Journal of Physical Oceanography. 1997.
- FARIAS, E.G.G. de; SOUZA, J. M. A. de. Chegada dispersiva de campos de ondas swell na costa oeste do Estado Ceará – Brasil. Arquivos de Ciências do Mar. Fortaleza, v. 45, n. 1, p. 69-74, 2012.
- HANLEY, E.K.; BELCHER E.S.; SULLIVAN, P.P. A global climatology of wind–wave interaction. J. Phys. Oceanogr. v.40, p.1263–1282, 2010.
- MARONE, E. Processamento e análise de dados de maré: Discurso dos métodos. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 264p. 1991.
- MCGREGOR, G. R. NIEUWOLT, S. Tropical climatology – an introduction to the climates of the low latitudes. 2. ed. Chichester/England: John Wiley and Sons, 1998.
- MELO, E.; ALVES, J.H.G.M.; JORDEN, V.; ZAGO, F.; DIAS, W.S.S. Instrumental Confirmation Of The Arrival Of North Atlantic Swell To The Ceará Coast. International Conference on Port and Coastal Engineering In Developing Countries. p.1984-1996, 1995.
- MUNK, W.H.; MILLER, G.R.; SNODGRASS, F.E.; BARBER, N.F. Directional recording of swell from distant storms. Phil. Trans. Royal Soc., London, v.255, p.505-584, 1963.

- Nemes, D.D.; Marone, E. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do Estado do Paraná, Brasil. Boletim Paranaense de Geociências; Issue 68-69; p. 12-25, 2013. NORETEK, 2016.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P.L.F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. Brazilian Journal of Oceanography. V. 58; Issue 1; p. 53-70, 2010.
- ASSUNÇÃO, R.V.; SILVA, A.C.; MARTINS J.; FLORES MONTES, M. Spatial-temporal variability of the thermohaline properties in the coastal region of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil. Journal of Coastal Research, 75(SI): 512-516., 2016.
- SILVA, A. C.; FAÇANHA, P.; BEZERRA, C.; ARAUJO, A.; PITOMBEIRAS, E. Características das ondas sea e swell observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e interanual. Tropical Oceanography Online, 17-26. 2011.
- TORRENCE, C; COMPO, G P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS) V. 79, p. 61-78, 1998.
- WHEELER, M.C.; NGUYEN, H. Tropical meteorology and climate -| Equatorial Waves. Encyclopedia of Atmospheric Sciences; V. 6, p.102-112, 2015
- YOUNG, I.R. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. 1999.

CAPÍTULO 6 – ARTIGO III

DINÂMICA DE CORRENTES NO MAR DE DENTRO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA E SUAS FORÇANTES

Este capítulo trata-se do terceiro artigo científico desta dissertação, ainda não submetido. Este vem apresentando análises a respeito da hidrodinâmica de correntes características do Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha, bem como sobre as forçantes mais influentes nessa dinâmica de correntes. Os dados utilizados foram referentes aos dados obtidos do fundeio do perfilador acústico por efeito doppler instalado sobre o solo oceânico durante os meses de junho de 2013 a maio de 2014.

ABSTRACT

The hydrodynamics under the insular shelf of the main island of the Fernando de Noronha Archipelago was observed during 365 days, from June 2013 to May 2014, in a location of approximately 22 m depth, through an Acoustic Wave and Currents profiler. The zonal currents in this region reached the maximum of 0.33 ms^{-1} , in the month of June, in the next month the maximum of the meridional currents was observed, reaching 0.25 ms^{-1} . In the subsequent months to hydrodynamics, the zonal water flow maintained between $\pm 0.20 \text{ ms}^{-1}$, and the meridional flow already oscillated between $\pm 0.10 \text{ ms}^{-1}$. The signal, referring to the direction of this flow, is characterized by positive signals eastward in the zonal currents and northwards in the meridional currents. The tidal currents are attributed the greatest interference in the pattern of the marine water flow in the Archipelago, the micro tidal with semidiurnal character and overtides attribute to the whole water column a change of direction in the period of 6 hours. The wave pattern in the study region also showed large interferences in the insular hydrodynamics, more intense currents were observed in moments of waves with smaller H_s , as well as in ebb tide flow. The friction of the wind on the marine surface is also related to the currents of the Sea of Inside of the Archipelago, although it is under less influence of the dominant trades in the region. The notorious intensity intensity of the currents with increasing depth was attributed as a reflection of the Botton Ekman layer.

Keywords: currents; insular shelf; overtides

RESUMO

A hidrodinâmica na plataforma insular da ilha principal do Arquipélago Fernando de Noronha foi observada durante 365 dias, período compreendido entre junho de 2013 a maio de 2014, em um local de aproximadamente 22 m de profundidade, através de um perfilador acústico de ondas e correntes. As correntes zonais nessa região alcançaram o máximo de $0,33 \text{ ms}^{-1}$, no mês de junho, no mês seguinte foi observado o máximo das correntes meridionais, alcançando $0,25 \text{ ms}^{-1}$. Nos meses subsequentes a hidrodinâmica o fluxo de água zonal manteve variando entre $\pm 0,20 \text{ ms}^{-1}$, já o fluxo meridional oscilou entre $\pm 0,10 \text{ ms}^{-1}$. O sinal, referente a direção desse fluxo, é caracterizado por: sinais positivos fluxo para leste nas correntes zonais e para norte nas correntes meridionais. Às correntes de maré são atribuídas as maiores interferências no padrão do fluxo de água marinha no Arquipélago, a micro marés com caráter semidiurno e *overtides* atribuem a toda coluna d'água uma mudança de direção no período de 6 horas. O padrão de ondas na região de estudo também apresentou grandes interferências na hidrodinâmica insular, corrente mais intensas foram observadas em momentos de ondas com H_s menores, bem como em fluxo de maré vazante. A fricção do vento sobre a superfície marinha também apresenta relação com as correntes do Mar de Dentro do Arquipélago, apesar de este estar sob menor influência dos alísios dominantes na região. O notório decréscimo de intensidade das correntes com o aumento da profundidade foi atribuído como sendo reflexo da camada de Ekman de fundo.

Descritores: correntes; plataforma insular; *overtides*

INTRODUÇÃO

O arquipélago de Fernando de Noronha faz parte do grupo de ilhas mundiais que estão isoladas do continente. Situa-se no sudeste do equador, nas coordenadas $03^{\circ}51'S$ e $32^{\circ}25'W$, distando cerca de 345 km da costa brasileira. O arquipélago compreende um total de 21 ilhas e ilhotas, sendo as principais Fernando de Noronha, Rata, do Meio e Rasa. A ilha de Fernando de Noronha oferece condições de ocupação permanente, possui um intenso turismo, é Distrito

Estadual de Pernambuco, compreende o Parque Nacional Marinho – PARNAMAR e Área de Proteção Ambiental Estadual, encontra-se situado em rotas de grandes navegações.

No Arquipélago o clima, é tropical, com duas estações bem definidas, a estiagem (entre agosto e fevereiro) e a chuvosa (entre março e julho), com temperatura média de 25°C. A dinâmica superficial dos oceanos tropicais, na escala sazonal, é regida, principalmente, pela variação do cisalhamento dos ventos alísios (VINOGRADOV, 1981; BROWN et al., 1989; PHILANDER, 1990).

O sistema de correntes oceânicas superficial na região do Atlântico tropical está diretamente associado a dinâmica dos ventos alísios. O arquipélago é banhado pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEc), que flui no sentido Leste-Oeste, se estendendo até os 150 m de profundidade. Pobre em nutrientes, com baixa concentração de material particulado em suspensão (STRAMMA; ENGLAND, 1999; ESTON et al., 1986).

As informações fornecidas a respeito da dinâmica de circulação em torno das ilhas oceânica geralmente são baseadas em modelagem numérica. Entretanto ao analisar a dinâmica costeira de correntes insulares é preciso levar em consideração as forçantes não lineares, a dissipação de energia ao longo dos lados da ilha, movimentos baroclínicos, além do gradiente topográfico (SPALL, 2003).

Este estudo tem por objetivo identificar a dinâmica de correntes nas proximidades da ilha principal do Arquipélago de Fernando de Noronha, com base em análises das séries temporais dos dados obtidos *in situ*, com a aplicação de técnicas de análise para remoção de ruídos no conjunto de dados, remoção do sinal das correntes de marés, com utilização de filtros passa baixa e passa alta.

METODOLOGIA

- **Obtenção dos dados utilizados**

Um equipamento do tipo perfilador acústico denominado AWAC (*Acoustic Wave and Current*) com sensor de frequência 600 kHz, foi instalado sobre o solo marinho nas coordenadas 3°49'47.28"S e 32°24'30.24"W, a aproximadamente 20 m de profundidade, distando cerca de

800 m do porto de Santo Antônio situado na ilha de Fernando de Noronha, a maior ilha do arquipélago de mesmo nome (Figura 1). O equipamento permaneceu em funcionamento, modo *stand-alone*, durante o período de 365 dias, compreendido entre junho de 2013 e maio de 2014.

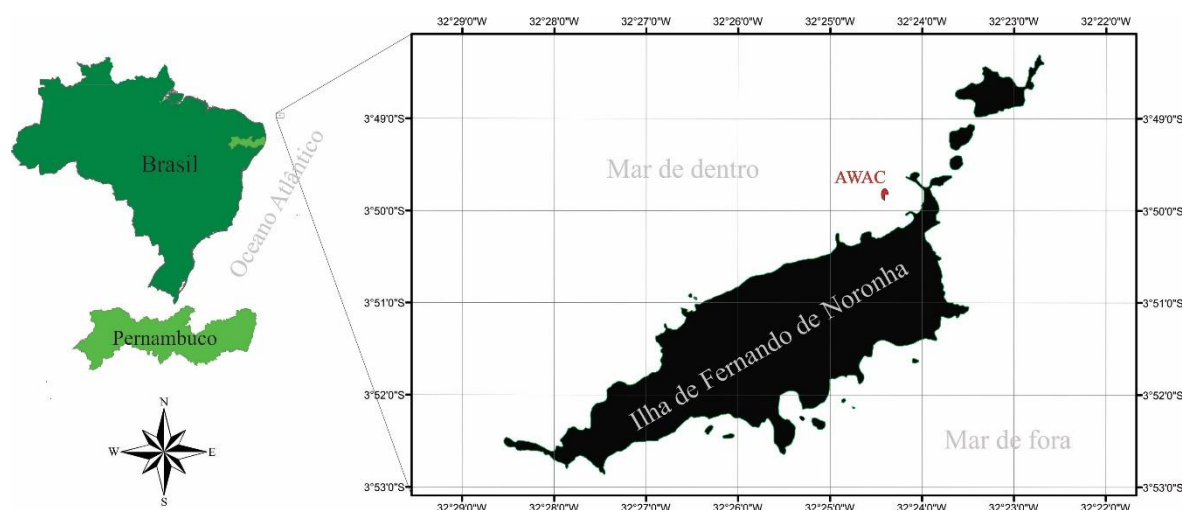


Figura 1 – Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha. Identificando o local no qual o perfilador acústico AWAC permaneceu instalado durante os anos de 2013 e 2014, no Mar de Dentro da ilha principal.

Durante o período acima citado, o equipamento manteve o registro de dados de corrente e pressão da água acima, este utilizado para a variação da maré, com registros a cada uma hora. Além dessas duas forçantes físicas, o perfilador acústico realizou medidas de ondas incidentes no Mar de Dentro do arquipélago, com o *burst* de duas horas. Os dados brutos foram armazenados na memória interna do equipamento, com exceção de 4 dias, 2 em julho de 2013 e 2 dias em dezembro do mesmo ano, nos quais o equipamento foi retirado da água para manutenção e backup dos dados.

Além dos dados adquiridos com o auxílio do perfilador acústico, neste estudo também foram utilizados dados de ventos obtidos através da plataforma *Advanced Scatterometer* (ASCAT), onde os dados de vento são processados pela NOAA/NESDIS (*National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Environmental Satellite Data and Information Service*) utilizando medições do instrumento *scatterometer* a bordo dos satélites EUMETSAT MetOp. O instrumento utiliza o radar para medir a retrodifusão para determinar a velocidade e

a direção dos ventos sobre a superfície dos oceanos a uma resolução 0,25 graus. Foi escolhido o ponto mais próximo da ilha para analisar.

- **Pré-Processamento dos dados**

A primeira etapa do processamento dos dados obtidos com o perfilador acústico consistiu na verificação de dados inconsistentes, que foram corrigidos ou descartados através do software do próprio fabricante que oferece um *insight* rápido dos mesmos. O processamento inclui rejeição de limite de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) e conversão de coordenada que permite que você se movimente para a frente e para trás entre as coordenadas do feixe, ENU e XYZ (NORTEK). Além da correção da declinação magnética local.

- i. Correntes

Para as correntes, foram extraídos os arquivos em formato ascii, as componentes: zonal (u) e componente meridional (v). Neste trabalho, para as componentes meridionais, os valores positivos das correntes são para N (NE e SE) e valores negativos são para S (SE e SW). Já para as componentes zonais (paralelo a ilha), os valores positivos são para L e negativos para O.

Para eliminar o sinal da maré foi utilizado um filtro de passa baixa do tipo Lanczos-Cosseno (THOMSON; CHOW, 1980; EMERY; THOMSON, 2004), eliminando as oscilações de alta frequência. A frequência de corte utilizada foi de 40 horas e peso 50, que remove 95% das oscilações com frequências menores que 25 horas (HIRATA, 2008; COSTA, 2009; ALBERTI, 2010). Foi utilizado também um filtro de passa-alta, aplicado através da subtração da série original pela própria série filtrada com o filtro de passa-baixa descrito acima, atuando como um filtro de passa alta de mesma frequência de corte (HIRATA, 2008; COSTA, 2009). Os dados filtrados foram interpolados através do método de interpolação linear para preencher os 4 dias de manutenção do equipamento.

Os dados foram submetidos a análises espectrais e análise de maré pelo método harmônico utilizando pacote T_tide em código Matlab (PAWLOWICZ, et al., 2002) nas séries temporais das componentes de corrente para os dados brutos, bem como para ambas as frequências altas e baixas, separadas através do processo acima citado.

ii. Maré

Dos dados de pressão foram obtidos os dados de flutuação do nível do mar, para todo o período de registro. A esta série também foi aplicado a análise de densidade espectral e análise harmônica através do método proposto por Pawlowicz, et al. (2002).

iii. Análise de correlação entre as correntes e as forçantes

Um dos objetivos aqui apresentados é verificar estatisticamente o grau de relacionamento entre as correntes costeiras, em componente zonal e meridional, e as forçantes externas como as marés, as ondas (altura significativa – Hs) e vento (componentes zonal e meridional). Para isso as respectivas séries temporais foram submetidas a análise dos coeficientes de correlação (função corrcoef – MATLAB R2014a) indicando como duas variáveis x (uma forçante) e y (corrente) variam conjuntamente.

iv. Regressão múltipla entre as correntes e as forçantes

Com a intenção de avaliar através de equação matemática a importância relativa das diferentes forçantes (maré, Hs e vento) sobre o padrão de correntes na plataforma insular do Arquipélago, as séries temporais foram submetidas a uma análise com base em função linear de coeficientes de ponderação β , atribuído a cada forçante com base em uma regressão linear descrita através da equação 1.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon \quad (1)$$

Onde cada β é o coeficiente de ponderação obtido resultante para cada série temporal x . Em seguida foram obtidas porcentagens de contribuição de cada variável explicativa (forçantes) à variável explicada (correntes) fazendo uso da equação 2.

$$\%x = \frac{\sigma(\beta.x)}{\sigma(y)} \cdot 100 \quad (2)$$

RESULTADOS

1. Corrente - Valores brutos

Neste trabalho são apresentados resultados da hidrodinâmica na região de estudo em 3 profundidades distintas (4,5 m – superfície, 10,5 m – meio e 18,5 m – fundo). Os dados das componentes zonais e meridionais das correntes são apresentados nas Figuras 2 a 5.

As máximas intensidades das componentes foram observadas em meses distintos, junho e julho de 2013, sendo que a máxima intensidade zonal (u) foi da ordem de $0,33 \text{ ms}^{-1}$ no mês de junho, a segunda maior intensidade registrada foi $0,25 \text{ ms}^{-1}$ em abril. Nos outros meses a velocidade zonal das correntes oscilou entre $\pm 0,20 \text{ ms}^{-1}$, com a tendência de redução da intensidade com o aumento da profundidade. Durante todos os meses de observação, as correntes zonais possuem uma grande variação em suas direções passando de negativas a positivas em período de horas (Figura 2A).

A intensidade da componente meridional das correntes (v) foram relativamente menores do que u em alguns meses, no geral houve uma predominância em valores positivos (para norte) principalmente no período entre agosto e novembro, o máximo observado foi de $0,25 \text{ ms}^{-1}$ em julho. No mês de junho foram observados os menores valores de velocidade meridional nas profundidades de 4,5 e 10,5 m, diferentemente de u (Figura 2B).

Na figura 3A está uma representação 1D (função *quiver* - THOMPSON, 1984) da magnitude e direção dos vetores de velocidade (componentes: zonal - u e meridional - v) das séries temporais acima citadas, para a região de estudo, 3 profundidades distintas (superfície, meio e fundo). Na figura 3B é apresentada somente um período de 4 dias de julho de 2013, período de maiores velocidades. Uma tendência pode ser observada, as variações das direções dos vetores mantêm um ciclo aproximadamente de 6 horas, além da sazonalidade na magnitude.

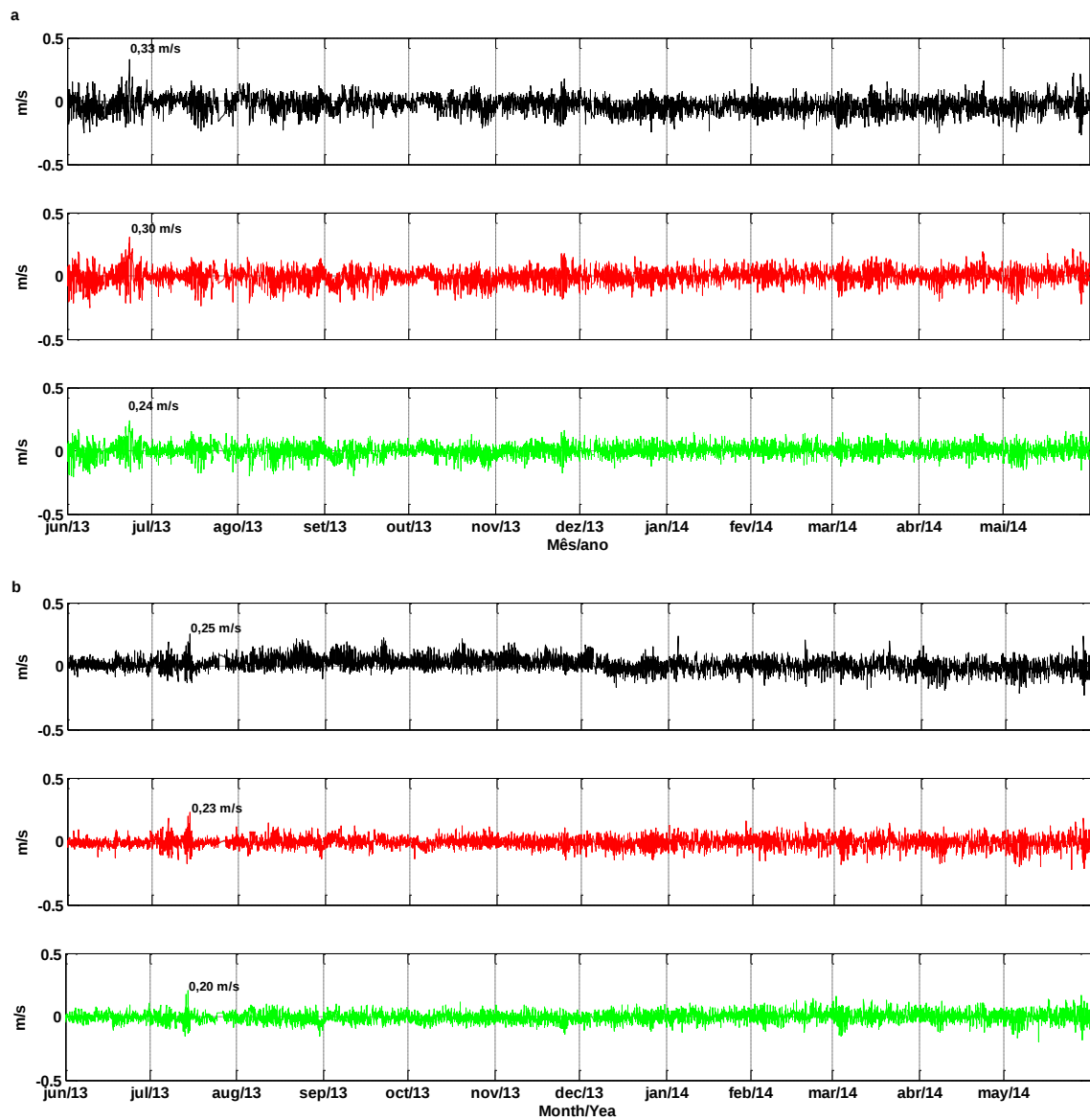


Figura 2 - Série temporal anual da intensidade de correntes no Mar de Dentro de Fernando de Noronha, medido a um intervalo amostral de uma hora para cada componente da velocidade: (a) componente zonal (u) e (b) componente meridional (v). Bem como para as três células de profundidades distintas, em ordem estão representadas da mais superficial a mais profunda (4,5m, 10,5m e 18,5m).

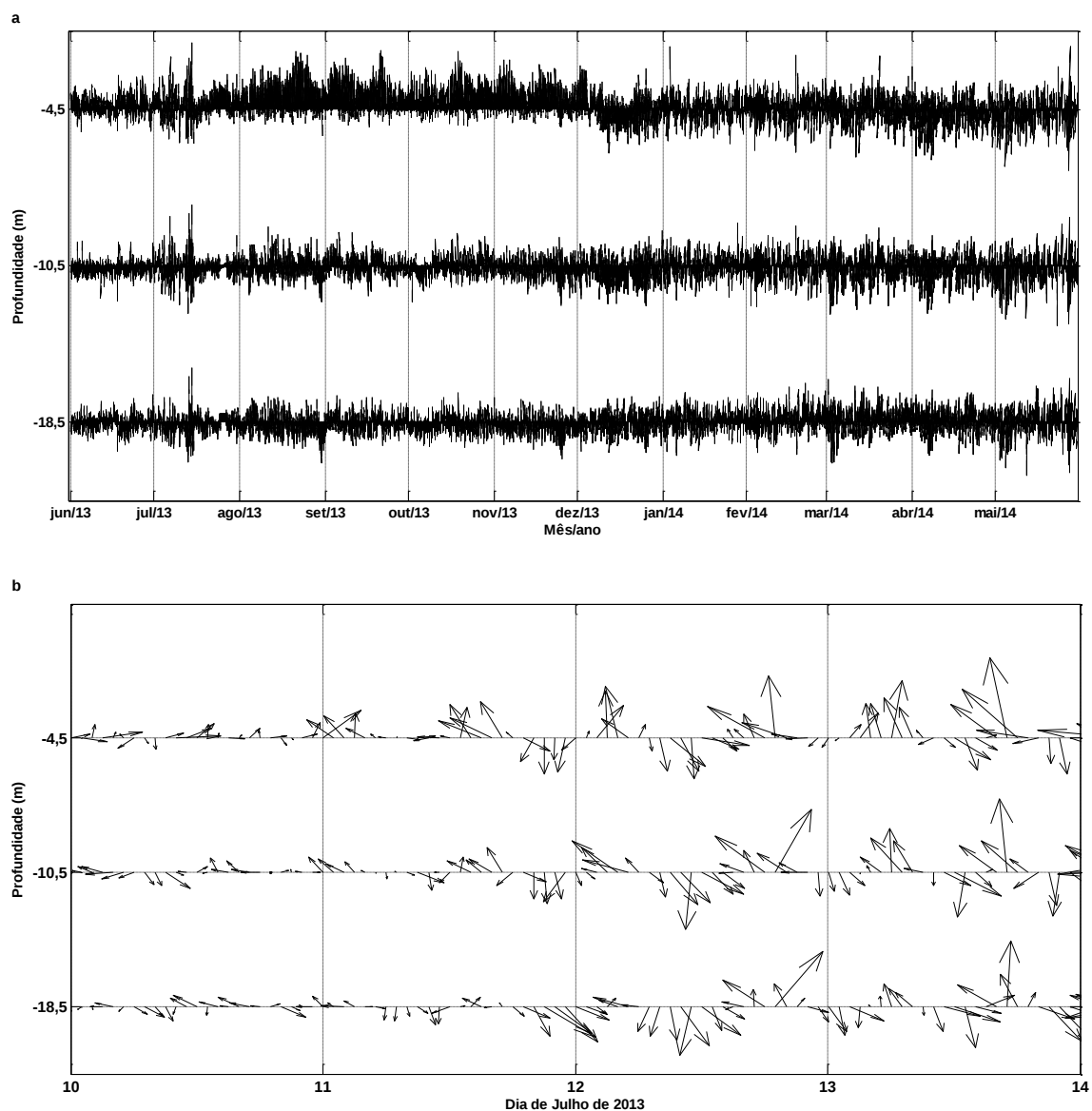


Figura 3 – Direção e intensidade da corrente resultante, com base nas componentes u e v , medidas através do equipamento perfilador acústico de correntes (a); em (b) o período descrito anteriormente apresenta-se em evidência a fim de perceber o a variação de direção dos vetores.

Para melhor visualização do comportamento com relação a profundidade foram plotados os vetores de magnitude e direção média para cada mês, representados na figura 4. As intensidades estão menores do que as observadas nas figuras anteriores pois se trata da média mensal de cada mês.

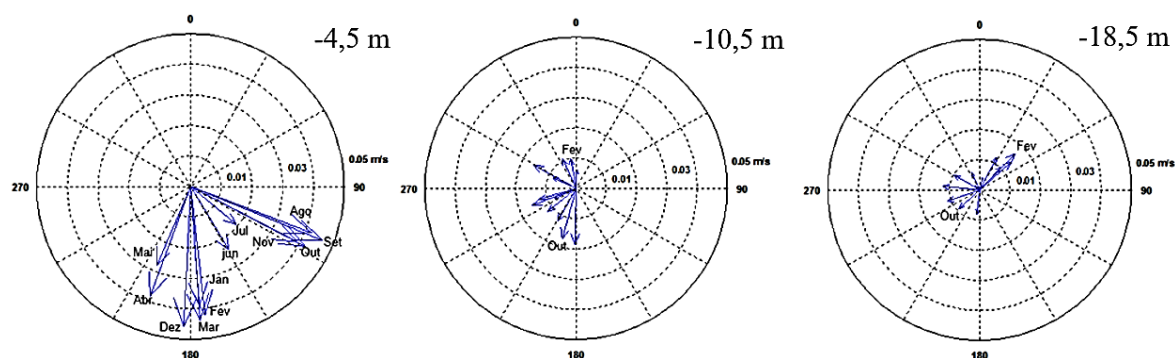


Figura 4 – Média mensal da direção e intensidade das correntes durante o período compreendido entre junho de 2013 a maio de 2014. Cada gráfico polar é referente a uma profundidade.

Pode-se observar duas principais tendências:

i. A primeira se refere a mudança da direção preferencial entre o período que compreende os meses de junho a novembro de 2013, onde a direção predominante 120° , sudeste do equipamento de amostragem. A partir de dezembro a maio de 2014 os vetores direcionais se concentram sobre as proximidades de 180° , ou seja, para sul;

ii. A segunda tendência observada é a respeito do deslocamento para a direita dos vetores direcionais de correntes dos 4,5 m de profundidade para os 18,5 m, como pode ser observada acompanhando os dois meses (outubro de 2013 e fevereiro de 2014) apontados nos gráficos, como demonstração. Considerando a região de estudo sendo águas rasas, tal comportamento se assemelha a Camada de Ekman de fundo. Analogamente à camada Ekman pelo vento. Em uma camada de Ekman de fundo, o transporte de Ekman (a integral vertical da velocidade da camada de Ekman) é dirigido também à direita da tensão inferior. No entanto, como o estresse no fundo do mar está na direção oposta à corrente geostrófica, o transporte é 90° à esquerda da corrente geostrófica e a espiral de Ekman gira no sentido horário no Hemisfério Sul (POND; PICKARD, 1983; GARRETT ET AL. 1993; THORPE 2005; THAYLOR; SARKAR, 2008).

As estimativas de densidade espectral calculadas para as componentes zonais e meridionais das correntes (Figura 2) apontam as bandas de alta frequência como as mais energéticas, tanto em u como em v, nota-se que o pico de maior amplitude está em torno de 6 horas para a ambas as componentes, seguindo pela banda de 12 horas. Percebe-se também que a energia para a componente u é notavelmente maior. Esses picos estão associados aos ciclos

de maré. Na camada mais superficial nota-se também um pequeno pico nos períodos de 3 horas (Figura 5).

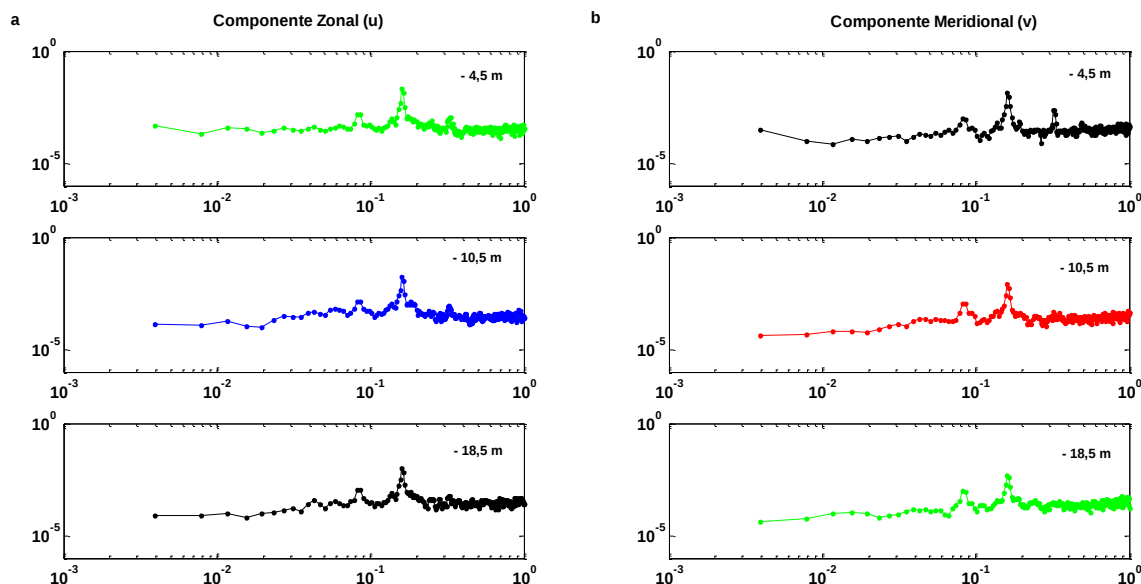


Figura 5 – Estimativa da densidade espectral das componentes zonais (a) e meridionais (b) para as três profundidades a partir dos dados brutos.

• Correntes - Baixa frequência

As mesmas séries temporais de correntes apresentadas anteriormente para a componente zonal e meridional são apresentadas nas figuras 6, 7 e 8 com aplicação do filtro de passa-baixa. Com isto, retirou-se das componentes os sinais de alta frequência, como o sinal de maré. Valores positivos indicam correntes para o leste, no caso das componentes longitudinais à costa (u); para a componente transversal à costa (v) valores positivos indicam correntes para norte.

Nota-se uma diminuição da intensidade das correntes com o filtro passa-baixa, os valores de ambas as componentes oscilaram em torno de $\pm 0,1 \text{ ms}^{-1}$, alcançando $0,11 \text{ ms}^{-1}$ somente em um período de junho na profundidade de 10,5 m para a componente zonal (u). A intensidade máxima registrada na superfície foi de $-0,10 \text{ ms}^{-1}$ em outubro, e no fundo foi de $0,10 \text{ ms}^{-1}$ em junho. Para todo o período de registros observa-se uma tendência à positividade da componente u da velocidade na camada mais superficial, ou seja, para leste, principalmente a partir de dezembro de 2013. Quanto a diminuição da intensidade da superfície para o fundo não

foi observada um padrão, no entanto há uma tendência a mudança de direção das duas camadas mais profundas com relação aos registros nos 4,5 m de profundidade (Figura 6A).

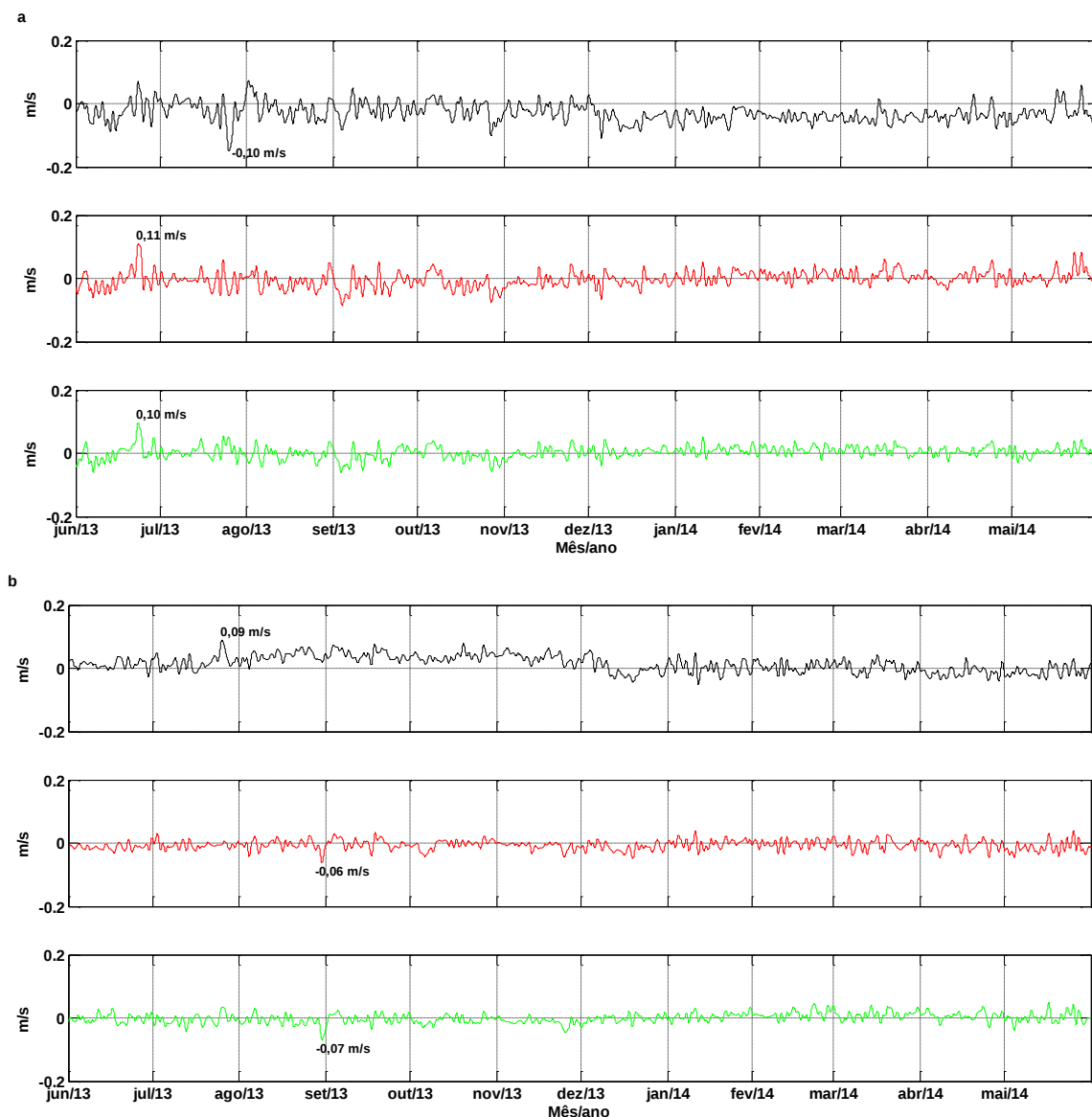


Figura 6 - Série temporal da intensidade das correntes filtrada passa-baixa a partir da série original horária composta pelas componentes (a) componente zonal (u) e (b) componente meridional (v), para as três células de profundidades, estão representadas em ordem da mais superficial a mais profunda.

A componente meridional das correntes apresentou uma intensidade relativamente menor do que a componente u, principalmente nos 10,5 e 18,5 m de profundidades. Em alguns períodos as correntes de fundo são mais intensas do que no meio da coluna d'água. Durante o período compreendido entre a segunda metade de julho e início de dezembro nota-se um padrão nas direções desta componente, os registros são de intensidades positivas, ou seja, correntes

para norte na camada superficial. Em 18,5 m o máximo observado foi de $0,08 \text{ ms}^{-1}$ em outubro e setembro. No meio da coluna d'água (a 10,5 m de profundidade) o máximo foi de $-0,06 \text{ ms}^{-1}$ em agosto, neste mesmo mês foi registrado o máximo na camada mais profunda (a 18 m de profundidade) sendo de $-0,07 \text{ ms}^{-1}$. Nos 18,5 m de profundidade também se observa um certo padrão, do início dos registros até metade de dezembro há uma tendência a valores negativos (correntes para sul), seguindo por uma tendência a predominância de valores positivos até o final dos registros.

Os vetores direcionais das correntes de baixa frequência são semelhantes aos dados brutos, por isso não estão aqui mostrados. A representação 1D *plot quiver* da magnitude e direção dos vetores velocidade (componentes: zonal - u e meridional - v) das séries temporais acima citadas com o filtro passa baixa, está na figura 7. O aspecto mais notável é o padrão de direção das correntes a 4,5 m de profundidade durante os meses de julho a dezembro.

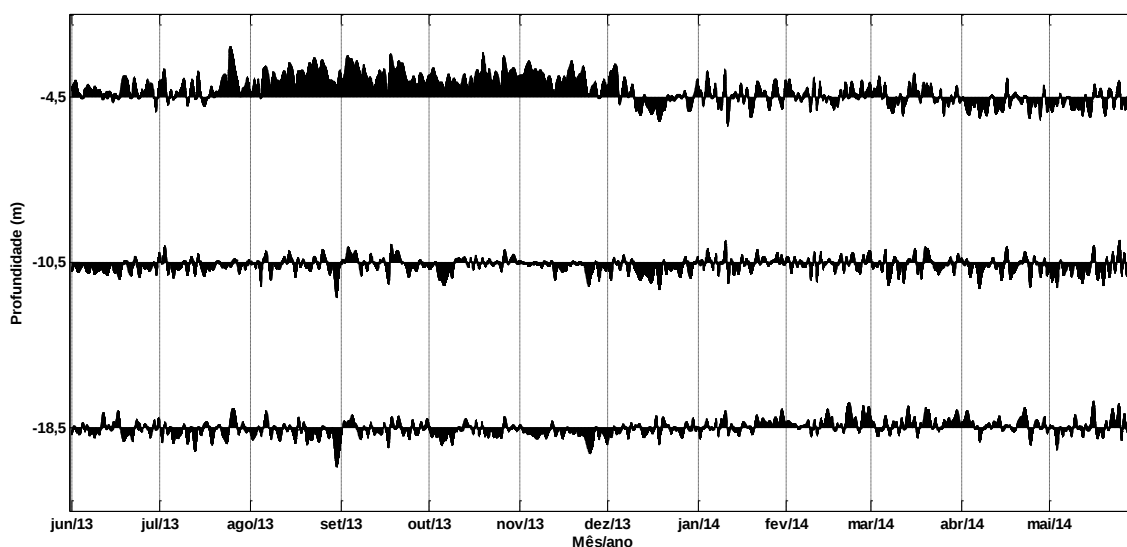


Figura 7 – Direção e intensidade do vetor da corrente resultante, com base nas componentes u e v em filtro passa-baixa obtidas dos dados originais medidos através do equipamento AWAC.

Observando as estimativas de densidade espectral calculadas para as componentes zonais e meridionais das correntes filtradas (Figura 8) os maiores picos são referentes aos períodos de 25 horas ($0.039 f$), aproximadamente.

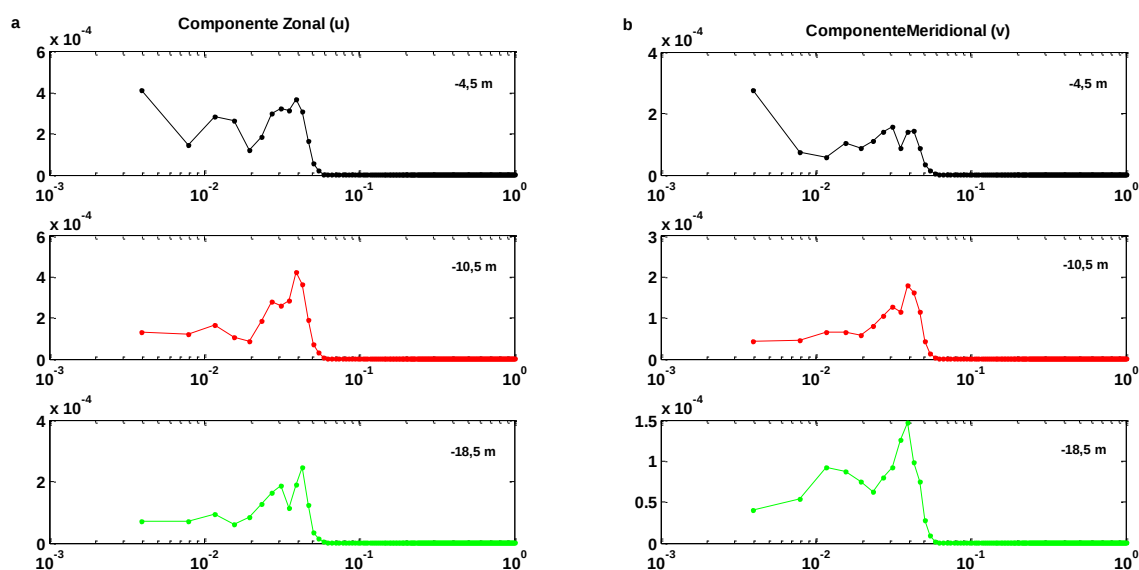


Figura 8 – Estimativa da densidade espectral das componentes zonais (a) e meridionais (b) para as três profundidades alta frequência.

- **Corrente - Alta frequência**

Com o intuito de melhorar a resolução das variabilidades de alta frequência, foi gerada uma nova série extraída da série completa através de um filtro de passa-alta com frequência de corte de 40 horas. A série resultante da aplicação desse filtro pode ser observada nas Figuras 9, 10 e 11.

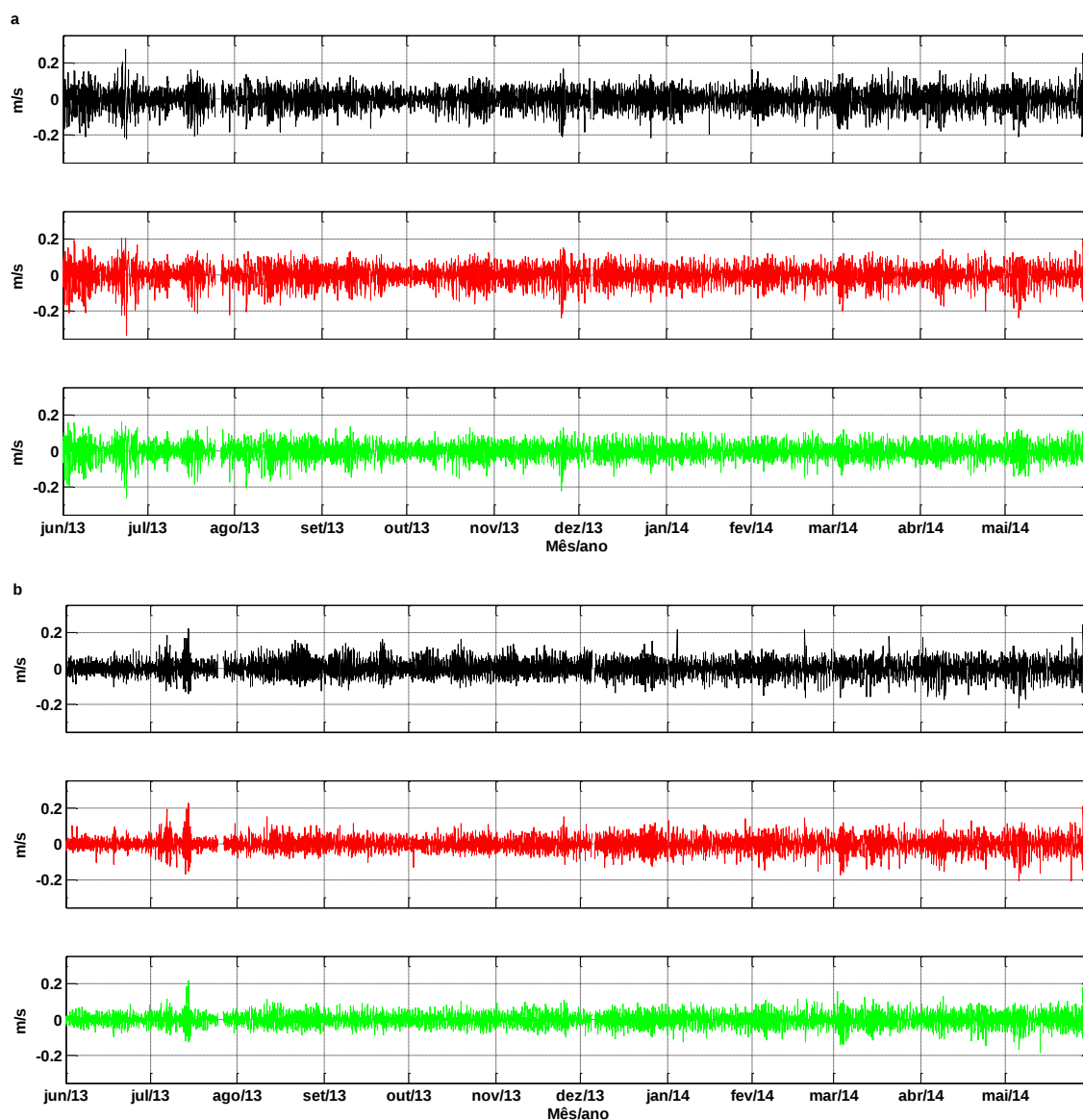


Figura 9 - Série temporal da intensidade de correntes com o uso de filtro passa-alta; (a) componente zonal (u) e (b) componente meridional (v), para as três células de profundidades, estão representadas em ordem da mais superficial a mais profunda.

A alta frequência é responsável por mais de 70% da variância total tanto da componente zonal quanto meridional em toda a série de registros, ou seja, as oscilações dentro das frequências de maré são bastante influentes nas variações totais de corrente no Mar de Dentro do Arquipélago (Tabela 1).

(quarte-diurna), que descreve a principal constituinte lunar da superfície de águas pouco profundas. Seguindo pelo pico referente ao período de 12,20 horas (componente M2 da maré, principal lunar semidiurna). Um pico com menor amplitude, de 3 horas (M6), sobressai na superfície para a componente v.

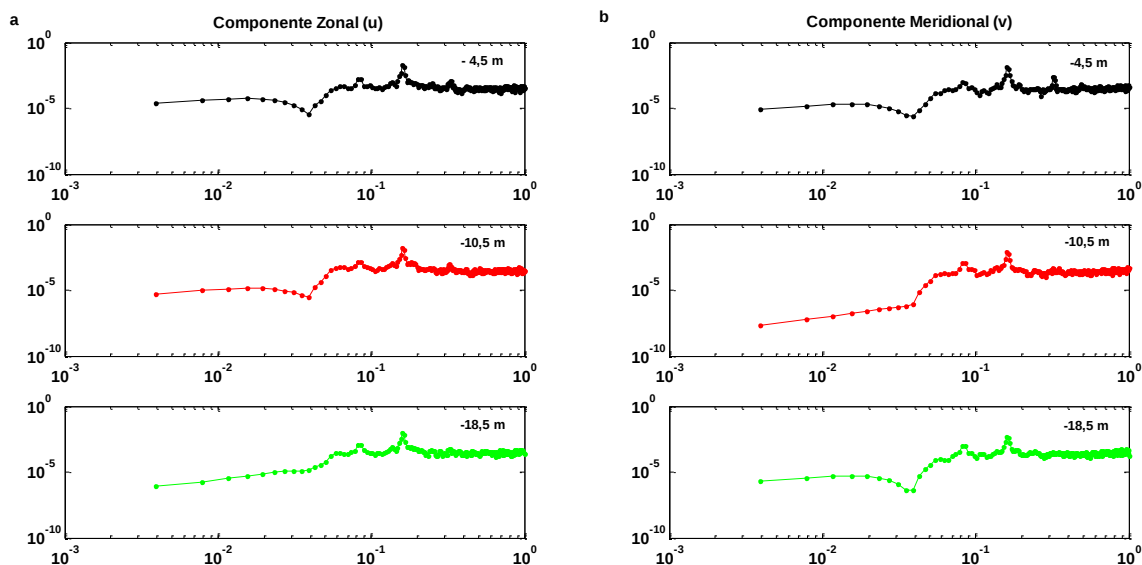


Figura 11 – Estimativa da densidade espectral das componentes zonais (a) e meridionais (b) para as três profundidades.

A mesma série temporal foi submetida à análise harmônica, a qual revelou a predominância semidiurna da onda de maré (componentes M2 e S2 com maiores amplitudes), bem como a presença das componentes *overtides* (LE PROVOST, 1991; PARKER, 1991) de águas rasas (M4 e MS4) para ambas as componentes de velocidade da corrente. O número de forma utilizado para caracterizar as correntes de maré fornece valores de 0,26, 0,25 e 0,18 para a componente u superfície, meio e fundo, respectivamente. E valores de 1,06, 0,87 e 1,29 para componente v, superfície, meio e fundo, respectivamente, o que indica marés semidiurnas.

O principal harmônico da frequência fundamental M2 que foi observado, corresponde à componente M4. A razão entre as amplitudes de marés de águas rasas (M4 + MS4) e as componentes da maré semidiurna (M2 + S2) pode ser usada como uma medida da distorção da componente principal semidiurna, refletindo os efeitos dissipativos, bem como a transferência de energia espectral da M2 para a M4 (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados das razões entre as constantes de maré semidiurna e *overtides* obtidas através da análise harmônica da série temporal de um ano.

Profundidade/ Corrente	Razão entre as amplitudes (m)		Razão entre as fases (°)	
	u	v	u	v
4,5 m	0,11	0,71	175,63	268,46
10,5 m	0,11	0,09	197,57	88,15
18,5 m	0,09	0,17	100,03	83,05

Como essas componentes têm a frequência quase exatamente uma o dobro da outra, a defasagem que se observa entre as mesmas é repetida ao longo dos ciclos, resultando em assimetrias fixas. A comparação das fases entre essas componentes calculadas pela equação (3) fornece o tipo de distorção da maré, com dominância de enchente ou de vazante (PINGREE; GRIFFITHS, 1979; GÓMEZ-VALDÉS et al., 2003; BYUN et al., 2006). A defasagem da M4 em relação à M2 tende a produzir uma assimetria na curva da velocidade, com valores de vazante um pouco maiores do que de enchente.

$$\theta = 2\phi_{M2} - \phi_{M4} \quad (3)$$

- **Regime de marés**

A série de dados de elevação do nível do mar, calculados com base nos registros de pressão aferidos pelo equipamento AWAC mostrou uma variação de +/- 1,6 m, caracterizando o Mar de Dentro da ilha como região de micro maré (DAVIES, 1964). Assim como as correntes, a série foi submetida a análise de densidade espectral, permitindo ter uma avaliação da distribuição relativa de energia nas diferentes frequências. A energia é proporcional ao quadrado da amplitude de cada componente do espectro (MYIAO; HARARI, 1989). Destaca-se dois picos de maiores energias, estes são referentes as bandas de 6,20 horas, seguida pela banda de 12 horas (Figura 12), semelhante ao observado nas correntes de alta frequência.

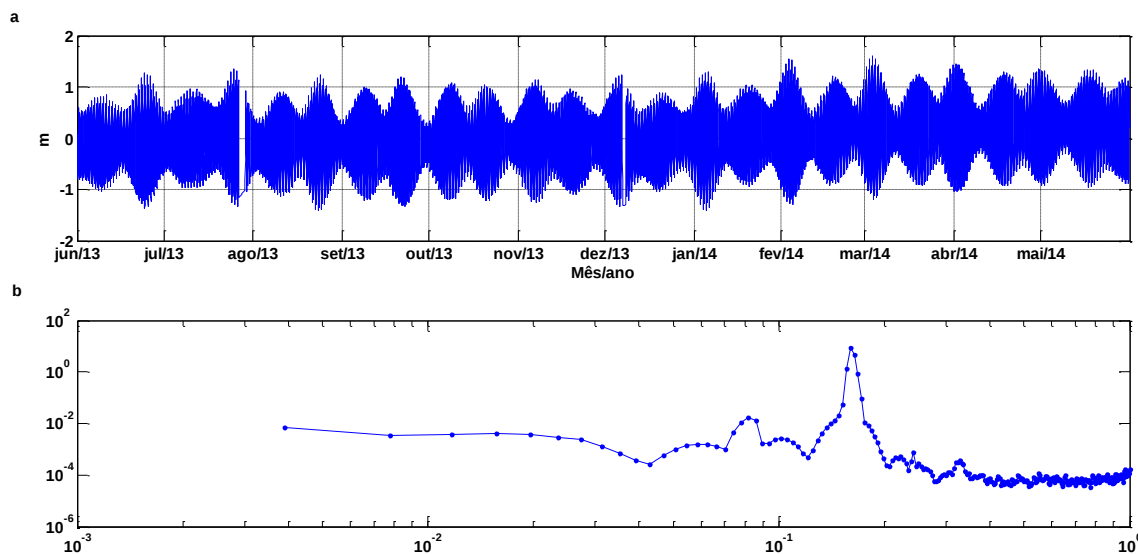


Figura 12 – Série de um ano de registros horários da variação da maré observada na localidade do Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha durante o período de junho de 2013 a maio de 2014 (a). Densidade espectral da maré, referente a todo período de registros (b).

As marés correspondem a movimentos harmônicos compostos que podem ser discretizados em vários movimentos harmônicos simples de diferentes naturezas. A análise harmônica para o período de junho de 2013 a maio de 2014 resultou em um total de 35 constituintes harmônicas principais (Tabela 3), após o programa T_TIDE filtrar as respectivas frequências, tiveram suas influências na variação da maré astronômica determinadas.

Através da análise da figura 13 nota-se a diferença entre as marés observada e prevista (astronômica), apontando que há outras causas da variação da maré além das forçantes astronômicas, podendo ser os fenômenos naturais, como a incidência de ondas do tipo swell comum a região do Arquipélago de Fernando de Noronha e variações dos ventos locais.

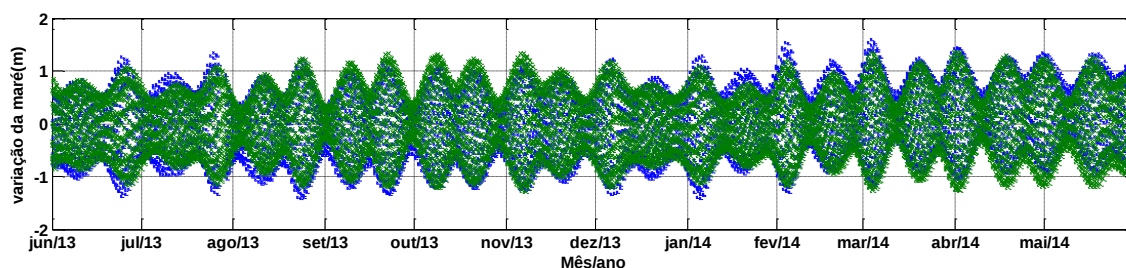


Figura 13 – Série temporal mostrando a elevação da maré prevista x maré observada na localidade da Ilha de Fernando de Noronha durante o período de junho de 2013 a maio de 2014. Série original (azul), série prevista por análise (verde).

Tabela 3— Principais constituintes harmônicas da maré obtidas com o pacote T_Tide para a série temporal de dos dados de variação da maré no Mar de Dentro da Ilha de Fernando de Noronha.

Constituintes	Frequência	Amplitude (m)	Fase (°)
*SSA	0.0002282	0.0507	32.79
*2Q1	0.0357064	0.0044	58.7
*SIG1	0.0359087	0.0032	45.08
*Q1	0.0372185	0.0139	96.98
*O1	0.0387307	0.0476	163.32
*TAU1	0.0389588	0.0015	223.52
*BET1	0.0400404	0.0029	187.18
*NO1	0.0402686	0.0019	280.84
*P1	0.0415526	0.0154	257.68
*P1	0.0415526	0.0168	291.85
*K1	0.0417807	0.0509	284.78
*PHI1	0.0420089	0.0069	343.31
*J1	0.0432929	0.0035	342.26
*2N2	0.0774871	0.0226	87.86
*MU2	0.0776895	0.0315	90.51
*N2	0.0789992	0.1493	133.01
*M2	0.0805114	0.7452	164.47
*MKS2	0.0807396	0.1155	239.96
*LDA2	0.0818212	0.0175	57.64
*S2	0.0833333	0.223	238.1
*K2	0.0835615	0.1051	260.66
*K2	0.0835615	0.0607	260.5
*MO3	0.1192421	0.0011	338.55
*M3	0.1207671	0.0053	204.83
*MK3	0.1222921	0.0015	286.42
*SK3	0.1251141	0.0015	27.82
*M4	0.1610228	0.0024	2.72
*MS4	0.1638447	0.0024	163.54
*MK4	0.1640729	0.0015	219.83
*S4	0.1666667	0.001	72.28
*SK4	0.1668948	0.0016	75.47
*2MN6	0.2400221	0.0005	249.33
*M6	0.2415342	0.0006	353.36
*MSK6	0.2474062	0.0007	177.43
*M10	0.402557	0.0004	98.06

Na figura 14 estão plotados valores referentes aos registros de maré (Figura 12A) bem como de corrente em uma série temporal de um ano de dados horários (Figura 9A). Foram escolhidos dois meses (agosto de 2013 e fevereiro de 2014) para observar a provável semelhança na variação das correntes da plataforma interna da ilha com os ciclos de maré, tanto

diários (marés altas e baixas) bem como sazonais (sizígia e quadratura). Os meses foram escolhidos com base no padrão observado quanto as direções predominantes das correntes, da diferença de variação do nível do mar, do padrão de ondas e de ventos locais, estes dois últimos parâmetros serão passados a seguir.

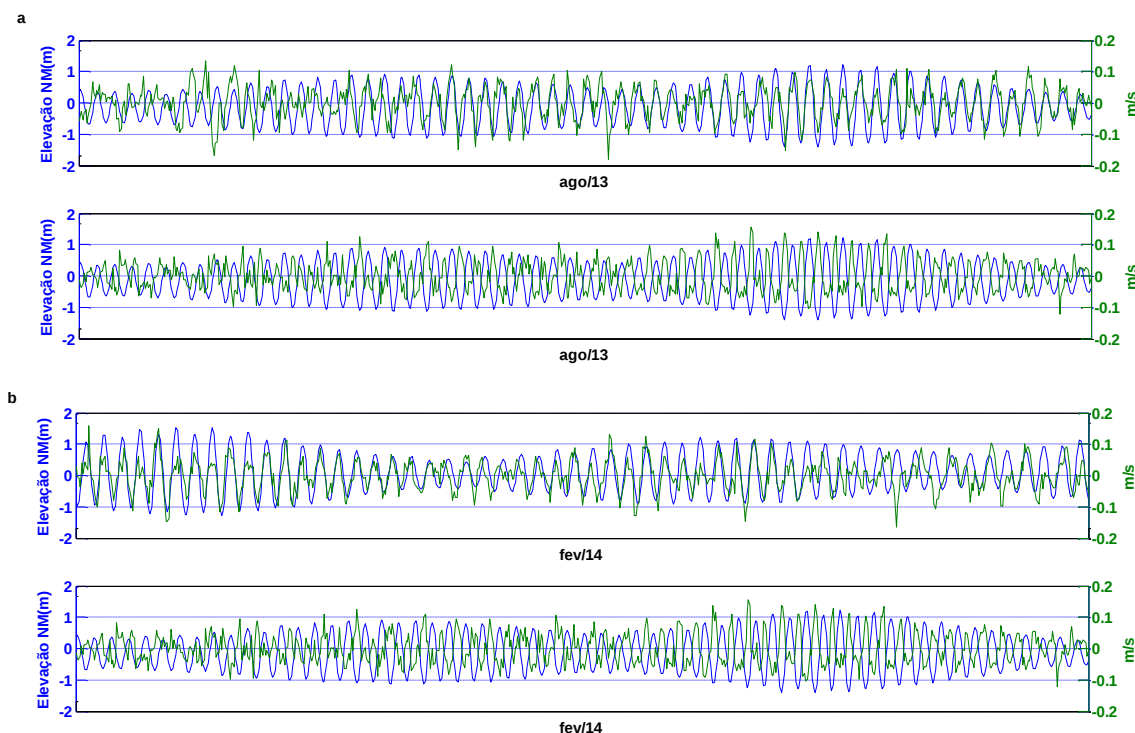


Figura 14 – Série temporal da elevação da superfície do mar e das variações da intensidade das componentes u e v da corrente no Mar de Dentro da Ilha de Fernando de Noronha para os meses de agosto de 2013 (a) e fevereiro de 2014 (b).

- **Regime de ondas**

Os parâmetros de ondas (H_s – altura significativa; Dir – direção de incidência; T_p – período de pico) obtidos através do perfilador acústico, são apresentados na figura 15. Os registros de ondas mostram que o arquipélago está sob influência de dois tipos de ondas principais, as ondas locais conhecidas como *wind sea* caracterizadas por períodos menores do que 10 s e as ondas de tempestades, os *swells*, caracterizados por possuírem períodos acima de 10 s (Figura 15A). A figura 15B e C se referem as direções das ondas, *wind sea*, causadas pelos ventos locais, essas predominam por todo o ano de registro, já as ondas causadas por

tempestades foram mais frequentes nos meses de outubro, novembro e dezembro, variando a direção de origem.

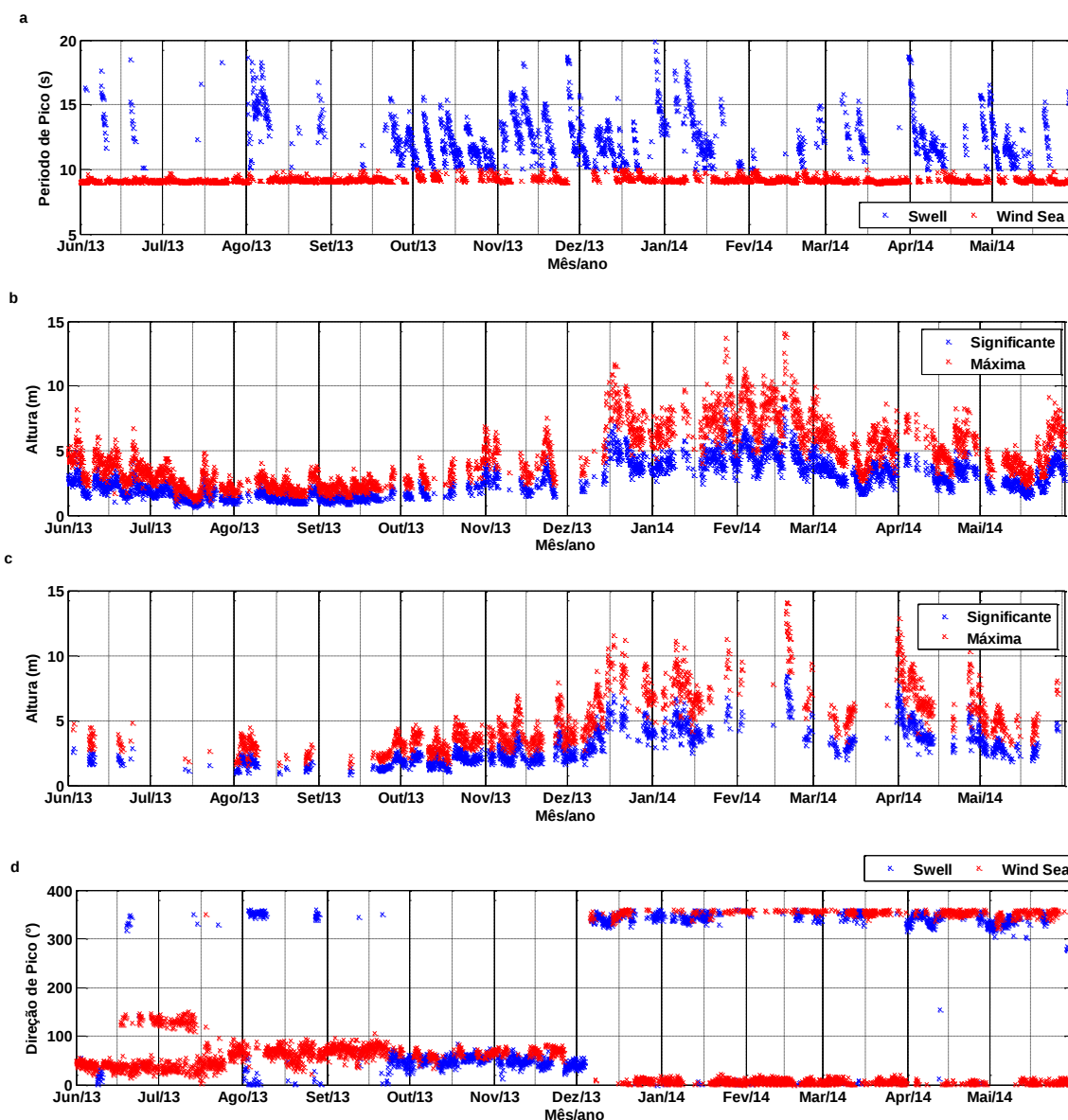


Figura 15 – Séries temporais dos parâmetros de ondas obtidos em um ano de fundeio do AWAC. (a) Período de pico; (b) Altura das ondas do tipo *wind sea*; (c) Altura das ondas do tipo *swell*; e (d) Direção de incidência das ondas.

A partir de dezembro quando as ondas alcançam as maiores alturas tem por motivo a chegada dos *swell* de norte, causando empilhamento de água direto sobre a ilha. Tal fenômeno reflete na mudança de direção média das correntes locais, passando de predominantemente de L-SE para o setor S-SW como pode ser observado na figura 16, onde foram escolhidos dois meses representando os diferentes padrões encontrados, agosto representando o período de

predomínio das ondas do setor nordeste e fevereiro para o período referente a maior incidência das ondas de norte. Tal variação é sentida nos primeiros 4 metros de profundidade, seguindo o padrão de mudança para maiores profundidades.

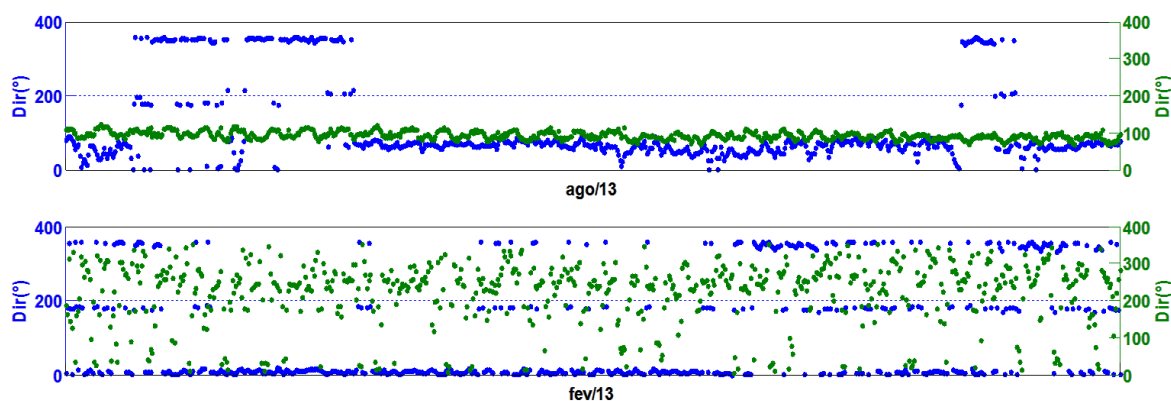


Figure 16 – Diferença entre os meses de agosto de 2013 e fevereiro de 2014 das variações horárias das direções de ondas e correntes características do Mar de Dentro de Fernando de Noronha. O eixo esquerdo referente às ondas e o eixo direito referente às correntes.

- **Regime de ventos**

A análise da série temporal dos dados de vento (intensidade e direção) obtida através da plataforma ASCAT ratificam o padrão de ventos da região equatorial na qual a ilha está inserida. A região é caracterizada pelo domínio dos ventos alísios de sudeste por todo o ano, no entanto a presença dos alísios de leste se fez presente com evidencia a partir de dezembro, quando os alísios de sudeste estão mais fracos (Figura 17). Essa variação dos ventos na região de estudo é atribuída a migração meridional da zona de baixa pressão conhecida como Zona de Convergência Intertropical (ITCZ).

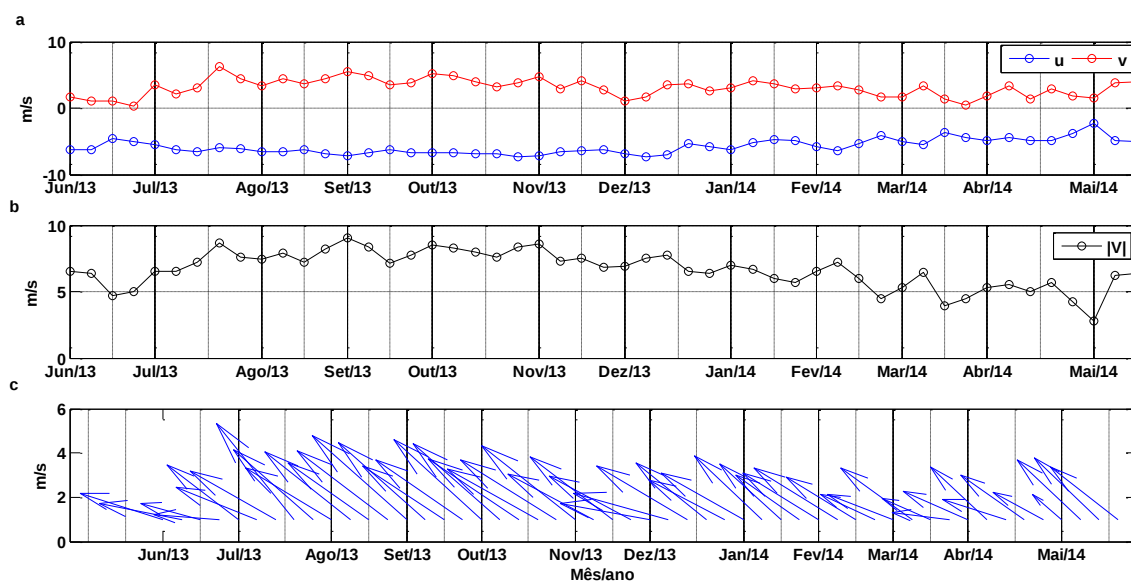


Figure 17 – Padrão de vento próximo a ilha de Fernando de Noronha, durante o período de junho de 2013 a maio de 2014. (a) Variação da intensidade das componentes zonal e meridional do vento; (b) Velocidade resultante do vento; e (c) Vetores referentes a variação da magnitude e direção dos ventos, em médias semanais.

- **Relação das correntes com as forçantes**

Estudar o comportamento conjunto de uma ou mais variáveis a partir de dados reais, medido *in situ* pode não resultar em correlações ditas estatisticamente satisfatórias. O comportamento conjunto de duas variáveis, correntes e forçante, neste caso, pode ser inferido por meio de correlação linear. A seguir, as tabelas de 4 a 6 mostram os valores das análises de correlação linear de cada variável explanatória (maré, Hs e vento) com as correntes (componentes u e v separadamente) para superfície, meio e fundo da coluna d'água.

Os resultados dos coeficientes de correlação da relação variação da maré com a variação das componentes zonal (u) e meridional (v) são mostrados na tabela 3. Percebe-se que a maré exerce um maior relacionamento entre a componente zonal da corrente local, decrescendo com o aumento da profundidade.

Tabela 4 – Resultados das correlações entre as componentes da velocidade e a variação da elevação do nível do mar.

Profundidade/ Corrente	u	v
4,5 m	0,48	-0,18
10,5 m	0,40	0,04
18,5 m	0,36	0,03

Através da análise dos resultados da correlação linear entre as variações das componentes zonais e meridionais das correntes com a variação da altura de ondas ao longo de um ano de registros (Tabela 5), observa-se que tanto a intensidade das correntes zonais quanto as meridionais são mais influenciadas pelas ondas na camada mais superficial, sendo mais influente na componente meridional. O sinal negativo do coeficiente de correlação indica uma correlação inversa entre essas variáveis, componentes mais intensas durante ondas de Hs menores. Como pôde-se observar nos gráficos de sobreposição da figura 18.

Tabela 5 – Resultados das correlações entre as componentes da velocidade e a variação da Hs.

Profundidade/Corrente	u	v
4,5 m	-0,31	-0,47
10,5 m	0,19	0,02
18,5 m	0,19	0,29

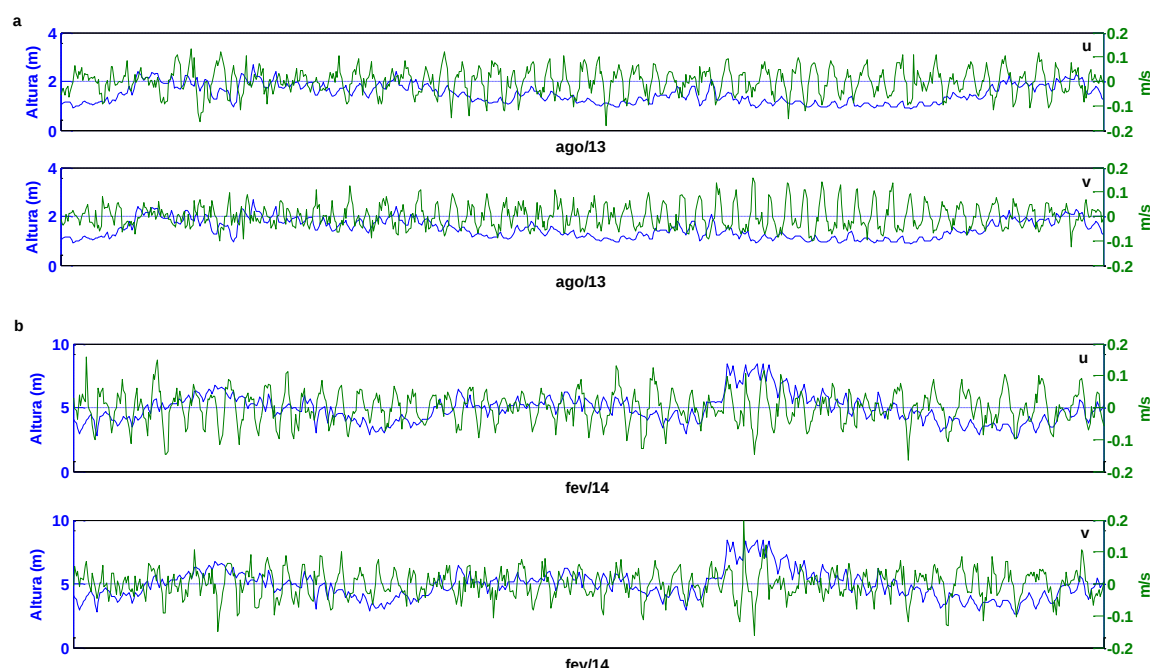


Figure 18 – Diferença entre os meses de agosto de 2013 e fevereiro de 2014 das variações horárias da Hs das ondas e intensidade das componentes u e v das correntes características do Mar de Dentro de Fernando de Noronha. O eixo esquerdo referente às ondas e o eixo direito referente às correntes. (a) para o mês de agosto e (b) para o mês de fevereiro.

Quanto a correlação entre a velocidade do vento (componentes zonal e meridional), com as componentes das correntes superficiais, verifica-se que os valores dos coeficientes de correlação (Tabela 6) indicam uma maior relação do vento com a componente v das correntes

loais. A interferência do vento sobre as correntes é melhor observada para as bandas de baixa frequência das correntes.

Tabela 6 – Coeficientes de correlação obtidos entre as componentes da velocidade de correntes e a variação do vento resultante, bem como de suas componentes.

Profundidade	Vento	V		u		v	
	Corrente	u	v	u	v	u	v
4,5 m		0,12	0,44	0,08	-0,35	0,25	0,37

- **Regressão múltipla entre as correntes e as forçantes (maré, ondas e vento)**

Com base na análise das séries temporais acima trabalhadas, o objetivo passou a ser evidenciar, através de uma função linear de coeficientes de ponderação (β), o relacionamento entre as variáveis x_i (forçantes) e a variável explicada y_i (correntes). Os valores das componentes zonais e meridionais das correntes para as três profundidades analisadas foram submetidos a análises de regressão múltipla com relação à variação da maré, variação da altura significativa das ondas e a variação da intensidade das componentes do vento.

Para realizar a regressão linear (equação 1) as séries temporais foram normalizadas, permitindo a comparação direta entre elas, devido aos dados estarem a uma mesma escala. O procedimento de normalização para todas as séries (Correntes, Maré, Ondas e Vento) foi realizado como apresentado na equação 4, onde st = série temporal. Na tabela 7 são apresentados os coeficientes de ponderação obtidos.

$$st_{\text{normalizada}} = \frac{\text{Original}_{st} - \text{Média}_{st}}{\text{Desvio Padrão}_{st}} \quad (4)$$

Tabela 7 – Coeficientes de regressão tomadas com base nos resultados da regressão múltipla. Os sinais “ * ” representam a significância da variável explanatória para com a variável explicada, onde: * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$, sendo então significantes.

	$\beta \cdot 10^{-1}$			
	Maré	Hsonda	uVento	vVento
u4m	1,6**	-2,4**	2,4**	2,0**
u10m	1,8**	1,1**	1,0	0,4
u18m	1,3**	1,2**	0,1	-0,2
v4m	-2,4**	-2,9**	-1,4**	2,1
v10m	-0,5	0,6	0,2	1,0*
v18m	0,9*	2,2**	1,2**	-0,2

A contribuição de cada variável explicativa (forçantes) à variável explicada (correntes), obtidas através da equação 2 está apresentada na tabela 8, onde a coluna Explicação (Σ) foi baseada em Tamtare (2013), e o R^2 é resultante da regressão linear. Observando os resultados das contribuições de cada forçante para com o padrão de correntes, tem-se que as correntes superficiais, u e v, foram explicadas em mais de 80% quando somada cada a contribuição de cada forçante individualmente. O valor de R^2 , que representa a interação entre as forçantes, demonstra uma explicação com máximo de 38%. No meio da coluna d’água e no fundo, o somatório das ações das forçantes é apontada como menos de 50%, e o R^2 chega somente a 11%.

Tabela 8 – Percentuais de explicação de cada forçante sob o padrão de corrente, bem como da interação entre elas.

	%					R^2
	Maré	Hsonda	uVento	vVento	Explicação (Σ)	
u4m	15,86	23,70	24,10	19,95	83,61	17
u10m	17,96	10,79	9,75	3,92	42,42	8
u18m	12,88	12,54	1,39	2,80	29,61	5
v4m	23,61	39,44	13,64	21,13	97,82	38
v10m	4,79	6,13	2,44	9,88	23,24	0,6
v18m	8,67	22,30	12,22	1,71	44,90	11

DISCUSSÃO

Investigando a hidrodinâmica do Mar de Dentro da ilha de Fernando de Noronha, através do perfilador acústico fundeado próximo a isóbata de 20 m, resultou em uma base de dados de 365 dias, com registros horários entre o período de junho de 2013 - maio de 2014, três variáveis puderam ser quantificadas: a maré, o padrão de ondas e as correntes costeiras.

Com base nas séries temporais das correntes locais sobre a plataforma insular de Fernando de Noronha, os dados mostram que quanto a intensidade não há mudanças tão expressivas sazonalmente, com fraca variabilidade, as componentes flutuam na ordem de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, oscilando entre negativa e positiva, referente a direção. Os valores máximos de $0,33$ e $0,25 \text{ ms}^{-1}$ para u e v , respectivamente, foram encontrados na camada mais superficial e nos meses de junho e julho, período que segundo Molinari (1982) é o período de intensificação da componente zonal do ramo central da CSE (CSEc), corroborado por medidas de Stramma e Schott (1999) e descrito como resultado de modelagem por Tchamabi, et al. (2017). A componente v apresentou, em média, valores menores no que a componente zonal.

Quanto a direção, fica caracterizado as correntes abrangendo os setores L-S e S-SW. A na predilecência da direção média das correntes resultantes do setor L-S para o setor S-SW, marca o período entre meados do mês de dezembro até o mês de maio. Tal fato é reflexo da mudança da direção preferencial de incidência das ondas no Mar de Dentro do setor N-NE para o setor N-NW, a qual ocorre como resposta da variação da intensidade dos ventos alísios de sudeste e nordeste, bem como a chegada das ondas de tempestade, *swells* vindas do hemisfério norte incidindo diretamente sobre a plataforma insular de Fernando de Noronha que fica voltada para o equador.

A separação das componentes zonal e meridional em bandas de frequências passa baixa e alta, indica que a interferência dos fatores externos de alta frequência (representadas principalmente pela maré e ondas), reflete na diminuição expressiva da intensidade das correntes locais, oscilando entre $0,2$ a $\pm 0,1 \text{ ms}^{-1}$ com nenhuma ou pouca variação na coluna d'água. No entanto, a direção preferencial do fluxo direcional das correntes não varia entre as séries temporais dos dados brutos e de passa baixa, indicando que nessa banda a direção das correntes está mais influenciada pelos ventos, fator observado quando feita a correlação entre vento e corrente.

O regime de maré do Arquipélago é dado como micro marés, amplitude menor que 2 m. A análise harmônica tanto das marés como das correntes apontou um regime preferencialmente semidiurno prevalecendo a geração de *overtides*, apontado no espectro de densidade na banda quarte-diurna, processo não linear dominante para regiões costeiras resultante da interação entre o fluxo da onda de maré e a topografia local (DAVIES, 1964; LE PROVOST, 1991; PARKER, 1991; VALDÉS, et al., 2003; MÖLLER, et al., 2007).

Os resultados harmônicos apontam uma frequência fundamental M2 correspondente a transferência de energia espectral da M2 para a M4, pico de 6,20 horas visualizado em todos as densidades espectrais, diminuindo de intensidade com a profundidade e para a componente meridional quando comparada a zonal. O impacto da maré sobre as correntes é visto desde os ciclos diários quando as correntes de vazante são pouco maiores do que as de enchente, bem como a diferença é vista entre os períodos de sizígia e quadratura.

A inferência do fator de relacionamento de cada forçante individualmente, bem como a integração delas com o fluxo de correntes no Mar de Dentro, através de equação matemática de regressão linear, aponta que na camada mais superficial a componente zonal das correntes está sendo mais influenciada pela componente zonal do vento (24%), já o fluxo meridional das correntes está respondendo de maneira mais forte a ação das ondas (39%). As componentes do meio da coluna d'água estão sendo forçadas mais pela maré com 18% de influência no fluxo zonal, e pela componente meridional do vento (10%) forçando o fluxo meridional. Na camada mais profunda, maré (13%) e onda (22%) são dominantes para o fluxo zonal e o meridional, respectivamente.

A explicação total ($\sum$ do % de cada forçante) da interferência da maré, onda e vento sobre o padrão de correntes nessa região demonstrou que tais forçantes explicam em mais de 80% o fluxo das componentes zonais e meridionais da corrente na superfície. No entanto, nas camadas mais profundas (meio e fundo da coluna d'água) as explicações não alcançaram 50%, tal resultado pode estar atrelado a interferência no atrito do fluxo com o fundo, variável que não foi inserida nesta equação.

O R^2 se refere a porcentagem de resposta dada pela interação dos coeficientes de ponderação da regressão linear, normalmente quanto maior este valor da determinação múltipla, melhor o modelo se ajusta aos dados. Os valores de R^2 foram abaixo de 40%, indicando que uma variável forçante está inibindo a ação da outra, por exemplo, os valores dos coeficientes de ponderação β para as componentes do vento só foram significantes para o fluxo zonal nos

4,5 m de profundidade, logo nas camadas inferiores a interferência dessa variável (vento) mascara os valores das outras forçantes. Dessa maneira, tem-se que o modelo de regressão múltipla como tentativa de explicar as respostas das correntes por meio da co-interação das forçantes maré, altura de ondas e componentes da velocidade do vento, deve ser ajustado.

CONCLUSÃO

Diante do processamento e análise dos dados referente a hidrodinâmica costeira do Mar de Dentro da ilha principal do Arquipélago de Fernando de Noronha, pode-se inferir que:

- As velocidades costeiras são pequenas, no entanto semelhante ao que se espera uma região insular;
- O estresse do vento, principalmente da sua componente meridional, interfere na dinâmica costeira da ilha, desde na ação sobre as ondas, bem como sobre o movimento da coluna d'água;
- As componentes *overtides* da maré são as mais expressivas na região de fundeio do equipamento, devido ao efeito das correntes de maré sobre a plataforma insular.
- A demonstração do percentual de impacto de cada forçante sobre as correntes, através de equação matemática foi válida, no entanto a equação de regressão deve ser ainda ajustada.

REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, R. V.; SILVA, A. C.; MARTINS, J.; FLORES MONTES, M. **Spatial-temporal variability of the thermohaline properties in the coastal region of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil**. Journal of Coastal and Research, volume 75, páginas 512-516, 2016.
- BROWN J.; COOLING, A.; PARK, D.; PHILLIPS, J.; ROTHERY, D.; WRIGHT, J. **Ocean Circulation**. Oxford: The Open University and Pergamon Press, 238p. 1989.
- BYUN, D. S.; CHO, Y. K. **Double peak-flood current asymmetry in a shallow-water-constituent dominated embayment with a macro-tidal flat**. Geophysical Research Letters. Volume 33; issue 16; pages 1-5. 2006.
- COSTA, R. L. **Estudo sobre a variabilidade sazonal e da estrutura vertical das correntes costeiras da plataforma interna, ao largo de Rio Grande-RS**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Instituto de Oceanografia, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2009.
- DAVIES, J. L. **A morphogenic approach to world shorelines**. Zeitschrift für Geomorphology, 8, Mor-tensen Sonderheft, pp. 127-142. 1964.

EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. Elsevier, 2d ed., pages 533-539. 2004.

ESTON, V. R.; MIGOTTO, A. E.; OLIVEIRA FILHO, E. C.; RODRIGUES, S.A.; FREITAS, J. C. **Vertical distribution of benthic marine organisms on rocky coasts of the Fernando de Noronha Archipelago (Brazil)**. Bolm. Instituto Oceanográfico, São Paulo, 34 (37-53) 1986.

GARRETT, C.; MACCREADY, P.; RHINES, P. **Boundary mixing and arrested Ekman layers: Rotating stratified flow near a sloping boundary**. Annu. Rev. Fluid Mech., 25, 291–323, 1993.

GÓMEZ-VALDÉS, J.; DELGADO, J. A.; DWORAK, J. A. **Overtides, compound tides, and tidal-residual current in Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur, Mexico**. Geofísica Internacional. Volume 42. Issue 4; pages 623-634, 2003.

HIRATA, F. E. **Variabilidade de nível de correntes de baixa frequência na plataforma externa de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande – FURG. 2008.

LE PROVOST, C. **Generation of overtides and compound tides (review)**. Tidal hydrodynamics (Parker, B. B., ed.). John Wiley and Sons, New York, pages 269- 295. 1991.

MIYAO, S.; HARARI, J. **Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia (25°S - 48°W)**. Boletim do Instituto Oceanográfico. 1989. Volume 37; issue 2; pages 107-123.

MOLINARI, R.L. **Observations of near-surface currents and temperature in the central and western tropical Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research, 88, pages 4433-4438. 1983

MÖLLER, O.; CASTAING, P. F.; ELISA, H. L.; LAZURE, P. 2007. **Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations**. Estuaries and Coasts. Volume 30; issue 2; pages 311-320.

PARKER, B. B. **The relative importance of the various non- linear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review)**. Tidal Hydrodynamics, John Wiley, New York, pages 237–268, 1991.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. **Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TIDE**. Computers and Geosciences. Volume 28; issue 8; pages 929-937, 2002.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña and Southern oscillation**. International Geophysics Series, New York: Academic. 293 pages. Volume 46, 1990.

PINGREE, R. D.; GRIFFITHS, D.K. **Sand transport paths around the British Isles resulting from M2 and M4 tidal interactions**. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 59(2), pages 497–513. 1979.

POND, S.; PICKARD, G.L. **Introductory Dynamical Oceanography**. 2 ed, Pergamon Press, 1983.

SPALL, M. A. **Islands in Zonal Flow** Journal of Physical Oceanography. Islands in Zonal Flow Journal of Physical Oceanography. Volume 33; issue 12; Pages 2689-2701, 2003.

STRAMMA, L., ENGLAND, M. **On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research. Volume 104, n. C9, pages 20863-20883, 1999.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. **On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research. 104(C9), 20863-20883. 1999.

TAYLOR, J. R.; SARKAR, S. **Stratification Effects in a Bottom Ekman Layer**. Journal of Physical Oceanography. V. 38, Pag 2535-2555. 2008.

TCHAMABI, CHRISTINE C. ARAUJO, MOACYR SILVA, MARCUS BOURLÈS, BERNARD. **A study of the Brazilian Fernando de Noronha Island and Rocas Atoll wakes in the tropical Atlantic.** Ocean Modelling. 104(C9), 20863-20883. 2017.

THOMSON, R. E., E CHOW, K. Y. **Butterworth and Lanczos-Window Cosine Digital Filters: With application to data processing on the Univac 1106 computer.** Sydney. 1980.

THORPE, S. **The Turbulent Ocean.** Cambridge University Press, 439 pp. 2005.

VINOGRADOV, M. **Ecosystems of equatorial upwelling.** Longhurst, A.R. ed. Analysis of marine ecosystems. New York: Academic, 1981. p. 69-93. 1981.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Os manuscritos apresentados nesta dissertação abordaram a hidrodinâmica e as propriedades físicas e químicas do Mar de Dentro do Arquipélago de Fernando de Noronha, em primeira mão, em uma análise espacial e temporal.

O oceano Atlântico Tropical/Equatorial Oeste, região onde o Arquipélago de Fernando de Noronha está situado, é caracterizado por água pobres em nutrientes, fenômeno que também afeta as águas da plataforma insular do Mar de Dentro do Arquipélago de Fernando de Noronha. O pouco, quase negligenciável, aumento das concentrações no período chuvoso (meses de fevereiro a junho) pode ser atribuído a lixiviação da ilha. As maiores concentrações foram encontradas para silicato, elemento essencial, que, no entanto, não entra no ciclo da matéria orgânica.

As propriedades termohalinas em torno da região de estudo variam pouco da porção mais ao leste (próximo ao porto de Santo Antônio) para oeste, região mais voltada ao continente Americano. Pontuado pela presença da massa d'água Água Tropical (AT) de superfície durante os períodos de coletas. O Mar de Dentro, porém, é discernido por dois períodos cujas características dessa massa d'água são diferenciadas, são: (1) período chuvoso – fevereiro a julho – apontado como possuindo águas mais quentes e menos salinas; e o (2) período de estiagem – agosto a janeiro – onde foram observadas a Água Tropical mais densa, com menores temperaturas e maiores salinidades.

Durante o período chuvoso foram registradas o fluxo de corrente zonal e meridional mais intenso para a região, com $0,33$ e $0,25 \text{ ms}^{-1}$ respectivamente. A literatura a respeito da hidrodinâmica de correntes oceânicas entorno do Arquipélago, demonstra que neste período ocorre uma intensificação relativa da componente zonal do ramo Central da Corrente Sul Equatorial (CSEc), com alcance aproximado de $0,35 \text{ ms}^{-1}$.

As plataformas insulares, naturalmente, estão expostas a ação das ondas. O Mar de Dentro da ilha principal do Arquipélago, durante os 365 dias de observações, foi caracterizado pela presença constante das ondas do tipo *wind sea*, com períodos entre 8 e 10 s, causadas pelos ventos locais. Adicionalmente, a chegada das ondas causadas por eventos de tempestades em áreas mais distantes, dão a ilha um caráter singular com a chegada de ondas do tipo *swell*. A onda do tipo *swell* foi observada em diferentes épocas do ano, com períodos entre 10,1 e 20 e

direções variadas (NE-L e NW-N). As chegadas dos swells de NW-N, com provável origem nas tempestades tropicais durante o inverno boreal, vêm atribuindo a ilha uma elevação do nível de água sobre a plataforma insular, devido ao empilhamento direto sobre esta.

A chegada do swells de norte, ocorre em um período no qual a ITCZ toma posições mais próximas ao equador, tal fator induz a redução da intensidade dos ventos alísios de SE, permitindo a interferência dos alísios de leste agir na região do Mar de Dentro. Este conjunto de fatores reflete a mudança de direção preferencial de incidência das ondas do tipo *wind sea*, bem como, da direção do fluxo de água nesta região, que muda de SE para S-SW.

O fluxo de correntes locais da região oeste do Mar de Dentro da Ilha de Fernando de Noronha apresenta uma fraca variabilidade sazonal, a maior variabilidade é atribuída às correntes de maré (micro maré) de caráter semidiurno com maior interferência das componentes de águas rasas, as *overtides*. Devido ao atrito com o fundo causam uma diferença de fase entre as constantes de maré semidiurna e quaterdiuna, refletindo na intensificação das correntes de fluxo vazante.

Um dos objetivos desta dissertação foi inferir fatores de relacionamento entre as correntes, e as forçantes (variações da maré, altura significativa das ondas (*wind sea* e *swell*, sem distinção) e variações das componentes (zonal e meridional) do vento, de maneira individual, bem como a co-intereção delas.

A inferência foi realizada com base em correlações (forçante e corrente) e em uma equação matemática de regressão linear múltipla, onde obteve-se os valores dos coeficientes de ponderação (β) para cada forçante, bem como o valor do teste de estatística (p). Uma forçante foi considerada não significativa quando $p > 0,05$, de modo que esta variável não é significativa ao nível de significância de 5% tendo em conta as outras variáveis do modelo.

Os resultados dos β apontaram que na camada mais superficial (4,5 m de profundidade), a componente zonal das correntes foi mais influenciada pela componente zonal do vento (24%), já a componente meridional das correntes foi mais influenciada pela ação das ondas (39%). O somatório dos percentuais de explicação (explicação total) de cada forçante para as componentes das correntes, demonstrou que a maré, a onda e o vento influenciam mais de 80% na hidrodinâmica local.

Entretanto, a porcentagem da variação das correntes explicada pela relação conjunta (R^2) - das forçantes acima citadas, ficaram abaixo de 40% na mesma profundidade. Estes

resultados indicam que durante a aplicação da regressão múltipla, uma forçante (não significativa) está a inibir a ação da outra, levando ao decréscimo do R^2 .

Dos dados obtidos no meio e no fundo da coluna d'água, as explicações totais não alcançaram 50%, estes resultados podem estar atrelados a interferência do fluxo atritando com o fundo (variável que não foi inserida no modelo).

No meio da coluna d'água a maré resultou em 18% de influência no fluxo zonal das correntes, e a componente meridional do vento em 10%, com o maior índice de forçantes nas correntes meridionais. No fundo, os valores foram de 13% de influência da maré e de 22% representativo para ondas, essas forçantes foram dominantes para o fluxo zonal e meridional, respectivamente.

Os valores de R^2 alcançaram somente 11% (para a corrente meridional na profundidade de 18,5 m), neste caso o baixo valor representativo de R^2 pode estar atrelado as componentes do vento, as quais foram insignificantes no meio e no fundo da coluna d'água.

Dessa maneira, tem se que o modelo de regressão múltipla como tentativa de explicar a hidrodinâmica local por meio da co-interação das forçantes (maré, altura de ondas e componentes da velocidade do vento), é válida mas deve ser aperfeiçoada com a implementação de outras constantes, como por exemplo a utilização do atrito friccional do fluxo de água com a camada de fundo.

As análises e observações realizadas nesta dissertação atribuem uma grande quantidade de informações científicas para o entendimento dos padrões de distribuição sazonal e espacial dos teores de nutrientes, temperatura e salinidade nas águas que circundam a parte da ilha de Fernando de Noronha voltada para o equador, o Mar de Dentro.

O banco de dados originado durante os 365 dias de coletas obtidas *in situ* para os parâmetros físicos hidrodinâmicos (correntes, ondas e variação da maré) irão auxiliar desde a relação destas variáveis com os padrões biológicos e entendimento dos processos associados as mudanças climáticas, bem como ao entendimento dos processos sedimentológicos na plataforma insular. Os resultados obtidos *in situ* podem servir para desenvolvimento e validação de modelos numéricos ajudando em tomadas de medidas mitigadoras contra as chegadas de eventos de tempestade que podem ocasionar problemas como a erosão costeira, naufrágios e riscos as atividades humanas no mar.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha. Monografia, Divisão de Geologia e Mineralogia.** DGM, 13:1-181. 1955.

Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha.
Ministério da Agricultura - Div. de Geologia e Mineralogia, Rio de Janeiro. 181p. 1958.

Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica.
Terra Didática, 2, 3-18. 2006.

ASSIS, H. M. B. (Coord.) et al. **Modelo digital de terreno da Plataforma Insular do Arquipélago de Fernando de Noronha.** Recife: CPRM, 1 mapa color. 97, 00 x 75, 75 cm, Escala: 1:18.000 (Progra ma Mar, Z ona Costeira e Antártica). 2014.

ASSUNÇÃO, R.V.; SILVA, A.C.; MARTINS J.; FLORES MONTES, M. **Spatial-temporal variability of the thermohaline properties in the coastal region of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil.** Journal of Coastal Research, 75(SI): 512-516. 2016.

BECKER, M. **Hidrologia dos Bancos e Ilhas oceânicas do Nordeste Brasileiro, uma Contribuição ao Programa REVIZEE.** São Carlos, 151f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. Universidade Federal de São Carlos. 2001.

BROWN J.; COOLING, A.; PARK, D.; PHILLIPS, J.; ROTHERY, D.; WRIGHT, J. **Ocean Circulation.** Oxford: The Open University and Pergamon Press, 238p. 1989.

CARDOZO, M. J.; CARVALHEDO, A.; JOSÉ, R.; MARTINS, J. S. **Fernando de Noronha Archipelago: Community Perspectives nn Tourism.** Pag. 34-41Refereed papers from the 7th International Small Islands Conference, Airlie Beach, Whitsundays, Queensland (<http://sicri-network.org/>). 2011.

CASTRO, J. W. A. **Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental.** Revista da Gestão Costeira Integrada. 2010.

COSTA, K. M. P. **Distribución de los nutrientes en el Mediterráneo Occidental (Golfo de León e Mar Catalán) - Influencia de los Factores Físicos.**Barcelona. Tese (Doutorado Em Ciências). Centre D'estudis Avancats de Blanes de la UniversidadPolitécnica de Catalunya. 1996.

COSTA, K. M. P. **Distribución de los nutrientes en el Mediterráneo Occidental (Golfo de León e Mar Catalán) - Influencia de los Factores Físicos.**Barcelona. Tese (Doutorado Em Ciências). Centre D'estudis Avancats de Blanes de la UniversidadPolitécnica de Catalunya. 1996.

DOTY, M. S.; OGURI, M. **The island mass effect.** Conseil International pour l'Exploration de la Mer., 22,33-37. 1956.

EMERY, W.J.; THOMSON, R.E. **Data analysis methods in physical oceanography**. Second and revised edition. Elsevier: Amsterdam. ISBN 0-444-50757-4, 638 pp. 2004

ESTON, V. R.; MIGOTTO, A. E.; OLIVEIRA FILHO, E. C.; RODRIGUES, S.A.; FREITAS, J. C. **Vertical distribution of benthic marine organisms on rocky coasts of the Fernando de Noronha Archipelago (Brazil)**. Bolm. Instituto Oceanográfico, São Paulo, 34 (37-53) 1986.

FLORES MONTES, M. J. **Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos: a importância do fluxo de difusão dos nutrientes para a biomassa do fitoplâncton na região oceânica do nordeste brasileiro**. Universidade Federal de Pernambuco, Tese de Doutorado (Recife, Brasil), 179p. 2003.

FONSECA, G. A. B.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G. **Conservation of island biodiversity – importance, challenges and opportunities**. Center for Applied Biodiversity Sciences, Conservation International, 16 p., Washington, DC, USA. 2006.

FONSECA-NETO, F. P. da. **Aves marinhas da Ilha Trindade**. In: Branco, J. O. (org.). *Aves marinhas insulares brasileiras: bioecologia e conservação*, p. 119-146, Editora UNIVALI, Itajaí, SC, Brasil. UNIVALI Ed., Itajaí-SC. 2004

GASPARINI, J. L.; MACIEIRA, R. M. **Nossas Ilhas Oceanicas**. 3ª parte: Coleção Explorando o Ensino - O mar no espaço geográfico brasileiro, pag. 65-135. 2005.

Arquipélago de Fernando de Noronha. Nossa Ilhas Oceânicas. Capítulo 3. Expensgeo. 2014.

GENIN, A.; BOEHLERT, G. W. **Dynamics of temperature and chlorophyll structures above a seamount: An oceanic experimente**. Journal of Marine Research, 43.901-924, 1985.

GRASHOFF, K.; EHRHARDT, K.M.; KREMLING, K. **Methods of Seawater Analysis**. 2nd edn. Verlag Chemie, Weinheim, Germany, 317p. 1983.

HARGRAVES, P. E.; BRODY, R. W.; BURKHOLDER P. R. **A study of phytoplankton in the Lesser Antilles region**. Bulletin of Marine Science, 20, 331-349. 1970.

HAZIN, F. H. V. **Fisheries-Oceanographical study on tunas, billfishes and sharks in the Southwestern Equatorial Atlantic ocean**. D.Sc These. Tokyo University of Fisheries. Department of Marine Science and Tecnology. 286 p. 1993.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,
<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=260545>, acessado em 01 de fevereiro de 2017.

ICMBio – Instituto Chico Mendes MMA,
<http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros/marinho/unidades-de-conservacao-marinho/2242-apa-de-fernando-de-noronha>, acessado em 27 de janeiro de 2017.

JONES, E. C. J. **Evidence of an island effect upon the standing crop of zooplankton near the Marquesas Islands, Central Pacific.** Journal du Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer, 27, 223-231. 1962.

LIMA, J. C. **Dinâmica do fitoplâncton e microfitobentos da baía do sueste, arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco, Brasil.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para aquisição do grau de Mestre em Oceanografia. 2012.

LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. L. **Near-surface circulation in the tropical Atlantic Ocean.** Deep Sea Research, 52(3), 495–518. 2005.

MACEDO, S. J.; MONTES, M. J. F.; LINS, I. C.; COSTA, K. M. P. **REVIZEE – Programa da Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva.** SCORE/NE. Relatório da Oceanografia Química. p. 1-37. UFPE, Recife, 1998.

MEDEIROS, C., ARAUJO FILHO, M.C.; ROLLNIC, M.; FREITAS, E I. **Estrutura termohalina da região oeste do Atlântico Tropical - ZEE/NE.** Meteorologia e sensoriamento remoto, oceanografia física, oceanografia química e oceanografia geológica – Programa REVIZEE – SCORE Nordeste [Hazin, F.H.V. (Ed.)]. Fortaleza, CE: Editora Martins & Cordeiro, pp. 40-55. 2009.

MOHR, L. V.; CASTRO, J. W. A.; COSTA, P. M. S.; ALVES, R. J. V. **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo.** Vol. II, MMA Secretaria de Biodiversidade e Floresta, Brasília, Brasil, 496p. 2009.

MOLINARI, R.L. **Observations of near-surface currents and temperature in the central and western tropical Atlantic Ocean.** Journal of Geophysical Research, 88, pages 4433-4438. 1983.

MOORE, E., SANDER F. **A comparative study of zooplankton from oceanic shelf and harbour waters of Jamaica.** Biotropica, 11, 196-206. 1979.

OLIVEIRA, F.S. **Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas brasileiras.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. 2008.

OXENFORD, H. A., MAHON, R., FUNTE, W. **The eastern Caribbean Flyingfish Project.** Organization of Eastern Caribbean States (OECS). Fishery Report. V.9. ST. Vincent, 133p. 1993.

PAULAY, G. **Biodiversity on oceanic islands—its origin and extinction.** 1994.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. **Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TIDE.** Computers and Geosciences. Volume 28; issue 8; pages 929-937, 2002.

PEREIRA R. C.; SOARES – GOMES A. **Biologia Marinha.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 382 p. 2002.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña and Southern oscillation**. International Geophysics Series, New York: Academic. 293 pages. Volume 46, 1990.

PHILANDER, S. G.; PACANOWSKI, R. C. **A model of the seasonal cycle in the tropical Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research, 91, 14.192–14.206. 1986.

REVIZEE. **Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na zona Econômica Exclusiva**. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 303p. (In Portuguese). 2006.

SANDER, F. **A Preliminary Assessment of the Main Causative Mechanisms of the "Island Mass" Effect of Barbados**. Marine Biology, 64, 199-205. 1981.

SERAFINI, T.Z.; FRANÇA, G. B.; ANDRIGUETTO-FILHO, J.M. **Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana**. Revista da Gestão Costeira Integrada, v.10, n.3, p.281-301. 2010.

SILVA, A.C.; ARAÚJO, M., AND BOURLÈS, B. **Variação sazonal da estrutura de massas d'água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente**. Revista Brasileira de Geofísica, 23(2), 145-157. (In Portuguese). 2005.

SILVEIRA, I. C.; MIRANDA, L. B.; BROWN, W.S. **On the origins of the North Brazil Current**. Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 22501. 1994.

SOUZA, C. S.; LUZ, J. A. G.; MACÊDO, S. J.; MONTES, M. J. F.; MAFALDA, P. J. R. **Chlorophyll a and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical southwestern Atlantic**. Marine and Freshwater Research, 64, 168-184. 2013.

STRAMMA L. **Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic**. Journal of Marine Research, 49(2): 281-294. 1991.

STRAMMA, L., ENGLAND, M. **On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research. Volume 104, n. C9, pages 20863-20883, 1999.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean**. Deep-Sea Research II, v. 46 279—303. Topical Studies in Oceanography, 1999.

STRICKLAND J. D. H; PARSONS T. R. **A practical handbook of seawater analysis**. 2nd edn, Fish Res. Bd. Can. Bull., Ottawa, Bulletin, 167, 1-311. 1972.

TCHAMABI, C.; ARAUJO, M; SILVA, M.; BOURLÈS, B. **A study of the Brazilian Fernando de Noronha Island and Rocas Atoll wakes in the tropical Atlantic**. Ocean Modelling. 104(C9), 20863-20883. 2017.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U. G.; MENOR, E. A.; TEIXEIRA, M. G.; LINSKER, R. **Arquipélago de Fernando de Noronha o paraíso do vulcão**. São Paulo: Terra Virgem, 2003.

THOMSON, R. E.; CHOW, K. Y. **Butterworth and Lanczos-Window Cosine Digital Filters: With application to data processing on the Univac 1106 computer.** Technical Report. Institute of Ocean Science, Sydney, B.C., 1980.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. **A practical guide to wavelet analysis.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 79, p. 61-78. 1998.

TRAVASSOS, P. E. P. F.; HAZIN, F. H. V.; ZAGAGLIA, J. R.; ADVÍNCULA, R. **Estrutura Termohalina da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Nordeste brasileiro, durante a Expedição Oceanográfica JOP“S II do NOc.** “VicyorHensen“: Influência das ilhas e bancos oceânicos. Resumos. São Paulo, 1997. P. 502. 1997.

VELEDA, D.; ARAUJO, M.; ZANTOPP, R.; MONTAGNE, R. **Intraseasonal variability of the North Brazil Undercurrent forced by remote winds.** Journal of Geophysical Research, v. 117, 2012.

VINAGRADOV, M. **Ecosystems of equatorial upwelling.** Longhurst, A.R. ed. Analysis of marine ecosystems. New York: Academic, 1981.

WHEELER, M.C.; NGUYEN, H. **Tropical meteorology and climate - equatorial waves.** Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 102-112, v6. 2015.

WILDNER, W.; FERREIRA, R. V. **Geoparque Fernando de Noronha- PE: proposta.** Pag. 1-5 serviço geológico do brasil. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2011.