

**Universidade Federal do Rio Grande - FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

**MORFODINÂMICA DAS PRAIAS ARENOSAS  
E RISCOS COSTEIROS DO SETOR LESTE  
DA ILHA DA TRINDADE, ES**

**Yuri Gomes Pinheiro**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Oceanografia  
Física, Química e Geológica, como parte  
dos requisitos para a obtenção do Título  
de Mestre

Orientador: *Prof. Dr. LAURO J. CALLIARI*

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Co-orientadora: *Prof. Dr. ELAINE SIQUEIRA GOULART*

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Julho de 2017

# **MORFODINÂMICA DAS PRAIAS ARENOSAS E RISCOS COSTEIROS DO SETOR LESTE DA ILHA DA TRINDADE, ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia  
Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do  
Título de Mestre

**Yuri Gomes Pinheiro**

Rio Grande, RS, Brasil

Julho 2017

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.

PINHEIRO, YURI GOMES

Morfodinâmica das praias arenosas e riscos costeiros do setor leste da Ilha da Trindade, ES./ Yuri Gomes Pinheiro – Rio Grande: FURG, 2017.

Número de páginas p. 134.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande. Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica. Área de Concentração: Oceanografia Geológica.

1. Estágios de praia. 2. Comportamento praial . 3. Risco costeiro. I. Morfodinâmica das praias arenosas e riscos costeiros do setor leste da Ilha da Trindade, ES.

# Índice

Índice .....	IV
Lista de Figuras .....	VI
Lista de Tabelas .....	XI
Resumo .....	XIII
Capítulo I: Introdução .....	15
1.1. A ilha da Trindade .....	15
1.2 Ondas e aplicação de modelos .....	17
1.3 Processos de transformação de ondas .....	19
1.3.1 Modificações de ondas em águas rasas.....	20
1.4 Setores praiais e processos associados .....	21
1.5 Morfodinâmica de praia.....	25
1.5.1 Estágios / Estados de praia .....	25
1.5.2 Riscos Costeiros.....	28
Capítulo II: Área de Estudo .....	33
2.1 Características Gerais e Localização .....	33
2.2 Caracterização climatológica .....	34
2.3 Regime de ondas .....	35
2.4 Distribuição e características dos sedimentos .....	36
2.4.1 Praias predominantemente arenosas .....	38
2.4.2 Identificação e caracterização das praias arenosas .....	42
Capítulo III: Objetivo Geral .....	54
3.1 Objetivos Específicos .....	54
Capítulo IV: Materiais e Métodos .....	55
4.1 Levantamento dos dados .....	55
4.2 Coleta e análise dos sedimentos .....	56
4.3 Velocidade de sedimentação e parâmetro <i>Ômega</i> .....	57
4.4 Modelagem numérica.....	59
4.4.1 NWW3 (Wave Watch III).....	59
4.4.2 SWAN.....	60
4.4.3 Aquisição e processamento dos dados hidrodinâmicos (ADV) ....	64
4.5 Perfilis topográficos.....	67

Capítulo V: Resultados e Discussão .....	69
5.1    Clima de ondas no segmento Leste .....	69
5.2    Variabilidade dos sistemas praiais .....	79
5.3    Variações morfológicas e riscos costeiros associados aos sistemas praiais .....	84
5.4    Estudo de caso .....	115
6    Conclusões .....	124
7    Referências bibliográficas.....	126

# **Lista de Figuras**

Figura 1. Área referente à Zona Econômica Exclusiva e vista aérea da Ilha da Trindade. Fonte Marinha do Brasil / Google Earth .....	16
Figura 2. Terminologia acerca do ambiente praial proposto por Hoefel (1998). ....	22
Figura 3. Tipos de quebra de onda segundo Galvin (1968). ....	22
Figura 4. Esboço esquemático de praias dominadas por ondas (1-6), modificado pela maré (7-9) e estagios de praia dominados pela maré (10-13); e praias com rochas ou recifes na porção frontal (14-15). Modificado de (Short & Jackson, 2013). ....	27
Figura 5. Ilha da Trindade com destaque no segmento leste em vermelho com identificação das praias. ....	34
Figura 6. Altura e direção das ondas para a Ilha da Trindade a partir dos dados de reanalise do NOAA WWIII. Retirado de Calliari <i>et. al.</i> 2016. ....	36
Figura 7. Percentual de carbonato de cálcio entre as praias do segmento Leste (Calliari, <i>et. al.</i> , 2016). ....	39
Figura 8. Estágios morfodinâmicos propostos por Wright and Short (1984). As praias arenosas da Ilha da Trindade são classificadas como refletivas + terraço de baixa mar.....	40
Figura 9. Parâmetro de embaiamento de praias proposto por Short & Masselink (1999). ....	41
Figura 10. Fração areia da Praia dos Cabritos de coloração mista. Foto: Lauro J. Calliari.....	42
Figura 11. a- Vista geral da Praia dos Cabritos. b- Vista lateral da Praia dos Cabritos coberta por seixos.....	43
Figura 12. Perfil médio da Praia dos Cabritos. a- Parte superior do Pós-Praia. b- Parte do Pós-Praia onde ocorre a mudança na textura do sedimento. c- Face Praial recoberta por seixos. d- Recife de algas calcárias. Retirado de Calliari <i>et. al.</i> (2016). ....	44
Figura 13. a- Vista geral da Praia da Calheta e afloramento rochoso. b- Vista lateral destacando presença de rochas esparsas na face de praia.....	45
Figura 14. Fração areia da Praia da Calheta de coloração clara. Foto: Lauro J. Calliari. ....	45

Figura 15. Perfil médio da Praia da Calheta. a- Parte superior do Pós-Praia limitada pela estrada de acesso. b- Pós-Praia com rochas esparsas. c- Face de praia de pendente íngreme com rochas expostas. d- Zona de desembarque..	46
Figura 16. a- Vista Geral da Praia dos Andradas. b- Vista lateral com sedimentos pobemente selecionados provindo de fluxos gravitacionais. ....	47
Figura 17. Fração areia da Praia dos Andradas. Foto: Lauro J. Calliari.....	48
Figura 18. Perfil médio da Praia do Andrada. a- Pós-praia com sedimentos de tamanhos variados. b- Presença de cama de tartarugas no pós-praia. c- Presença de cúspides praiais. d- Zona do Estirâncio e seta vermelha indicando uma Corrente de retorno. Retirado de Calliari et. al. (2016).....	49
Figura 19. a- Vista Geral da Praia das Tartarugas. b- Vista lateral evidenciando a presença de <i>beachrock</i> e fragmentos de antigos recifes na face de praia de pendente bastante íngreme.....	50
Figura 20. Fração areia da Praia das Tartarugas de coloração clara. Foto: Lauro J. Calliari. ....	50
Figura 21. Perfil médio da Praia das Tartarugas. a- Região superior ao pós-praia com vegetação permanente. b- Região superior ao pós-praia com vegetação espaçada e pacote sedimentar eólico. c- Pós-praia com camas de tartarugas. d- Zona do Estirâncio com a presença de laje rochosa. Modificado de Calliari et. al. (2016). ....	51
Figura 22. a- Vista geral da Praia Vermelha. b- Vista lateral evidenciando alta declividade. ....	52
Figura 23. Fração areia da Praia Vermelha de coloração escura. Foto: Lauro J. Calliari. ....	52
Figura 24. Perfil médio da Praia do Túnel. a- Aventais de talude. b- Pós-praia com a berma de tempestade. c- Pós-praia com berma de tempo bom. d- Zona do Estirâncio. Modificado de Calliari et. al. (2016). ....	53
Figura 25. Organograma indicando os procedimentos realizados para a presente pesquisa. ....	56
Figura 26. Batimetria utilizada na simulação pelo SWAN. ....	62
Figura 27. Grade utilizada na simulação pelo SWAN.....	62
Figura 28. Equipamento utilizado na medição dos parâmetros hidrodinâmicos ADV ( <i>Acoustic Doppler Velocimeter</i> ).....	64

Figura 29. Local do fundeio do equipamento (ADV) na Enseada dos Portugueses. a-Vista aérea com ponto vermelho na posição do fundeio (Fonte: Google Earth) e b-Vista lateral Enseada dos Portugueses.....	65
Figura 30. Altura (preto) e Período (cinza) das ondas medidas pelo ADV entre 10/04/2014 e 24/05/2014 na Enseada dos Portugueses.....	65
Figura 31. Comparação entre os dados medidos com o ADV (preto) e os simulados pelo SWAN (cinza) da altura significativa de onda ( $H_{sig}$ ) para o período entre 10/04 e 24/05/2014. ....	66
Figura 32. a- Estação total Nikon Nivo 2C. b- Levantamento dos perfis topográficos com estação total na Ilha da Trindade.....	67
Figura 33. Vista aérea com região mais energética indicada em vermelho, entre setor Leste e Sudoeste da Ilha da Trindade, com destaque para os locais utilizados na extração dos dados do modelo SWAN (pontos vermelhos). .....	70
Figura 34. Direção e altura preferencial de ondas extraídos do WW3, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Ilha da Trindade.....	71
Figura 35. Comportamento da altura significativa de onda entre os anos de 2013 e 2014 para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.....	74
Figura 36. Comportamento do período de ondas entre os anos de 2013 e 2014 para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.....	75
Figura 37. Distribuição percentual de classes (0,5m) da altura significativa de ondas para as diferentes praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.....	77
Figura 38. Distribuição percentual de classes (5 s) de período de ondas para as diferentes praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.....	78
Figura 39. Variação dos perfis topográficos entre os anos de 2013 e 2016, para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.....	83
Figura 40. Perfis topográficos transversais realizados entre os anos de 2013 e 2016 na Praia dos Cabritos, com destaque para as linhas segmentadas indicando os máximos acrescivos e erosivos.....	88
Figura 41. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia dos Cabritos. ....	90
Figura 42. Análise espectral do clima de ondas para a Praia dos Cabritos, entre os anos de 2013 e 2014.....	92

Figura 43. Perfis topográficos transversais realizados entre os anos de 2013 e 2016 na Praia da Calheta, destacando com linhas segmentadas o máximo acrescivo em vermelho, e erosivo em azul. ....	94
Figura 44. Análise espectral do clima de ondas da Praia da Calheta, entre os anos de 2013 a 2014.....	96
Figura 45. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia da Calheta. ....	98
Figura 46. Perfis topográficos realizados na Praia dos Andradas entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acrescivo e erosivo, com linhas segmentadas em amarelo e preto. ....	100
Figura 47. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia dos Andradas. ...	103
Figura 48. Análise espectral do clima de ondas para a Praia dos Andradas, entre os anos de 2013 e 2014.....	104
Figura 49. Perfis topográficos realizados na Praia das Tartarugas entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acrescivo e erosivo, com linhas segmentadas em verde e amarelo.....	106
Figura 50. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia das Tartarugas. .	107
Figura 51. Análise espectral do clima de ondas para a Praia das Tartarugas, entre os anos de 2013 e 2014.....	109
Figura 52. Perfis topográficos realizados na Praia Vermelha entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acrescivo e erosivo, com linhas segmentadas em preto e cinza. ....	111
Figura 53. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia Vermelha. ....	113
Figura 54. Análise espectral do clima de ondas para a Praia Vermelha, entre os anos de 2013 e 2014.....	114
Figura 55. Vista aérea da Ilha da Trindade destacando os pontos (vermelhos) com maior número de ocorrência de acidentes.....	116
Figura 56. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 22/10/2005, evidenciando a condição de alta energia na Ponta Norte, identificada com ponto vermelho.....	117

Figura 57. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Ponta Norte, entre os anos de 2013 e 2014.....	118
Figura 58. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 15/08/2007, evidenciando a condição de alta energia na Praia do Eme, identificada com ponto vermelho.....	119
Figura 59. Praia do Eme antes e durante a Onda Camelo (Foto: POIT). a - Antes da ocorrência súbita de onda. b - Depois da passagem da onda. ....	119
Figura 60. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Praia do Eme, entre os anos de 2013 e 2014. ....	120
Figura 61. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 03/06/2008, evidenciando a condição de alta energia nas proximidades da Pedra do Xaréu, identificada com ponto vermelho.....	121
Figura 62. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Pedra do Xaréu, entre os anos de 2013 e 2014.....	121
Figura 63. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 17/07/2010, evidenciando a condição de alta energia na Pedra da Garoupa, identificada com ponto vermelho.....	122
Figura 64. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Pedra da Garoupa, entre os anos de 2013 e 2014. ....	123

# **Lista de Tabelas**

Tabela 1. Riscos físicos costeiros com impacto na segurança de banhistas (Short et. al., 1993).....	29
Tabela 2. Relação de equilíbrio entre estado praial e valor médio de $\Omega$ . Retirado de Wright et al., (1985). .....	58
Tabela 3. Resumo das características da grade. ....	61
Tabela 4. Gráfico de dispersão entre os dados medidos (ADV) e os simulados (SWAN) à esquerda com valor da correlação. À direita os parâmetros estatísticos de desempenho do modelo. Bias, rmse, SI e MPI. * Situações consideradas satisfatórias na bibliografia retir.....	66
Tabela 5. Média entre as estações para altura significativa de onda para as praias do segmento Leste, nos anos 2013 e 2014 e direção da exposição das distintas praias. ....	72
Tabela 6. Alturas significativas e Períodos médios de onda para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade e respectivos parâmetros estatísticos entre os anos 2013 e 2014.....	76
Tabela 7. Parâmetros morfométricos propostos por Wright & Short (1984) para as praias arenosas do segmento leste da Ilha da Trindade. ....	80
Tabela 8. Identificação dos principais riscos costeiros associados aos ambientes praias que compõem o segmento leste da Ilha da Trindade. ....	86
Tabela 9. Parâmetros de onda para dias de ocorrência de onda Camelo em águas profundas, e parâmetros modelados para águas rasas (indicados por *), na Ilha da Trindade. ....	116

# **Lista de abreviações**

- POIT - Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade
- SIGEP - Comissão Brasileira de sítios Geológicos e Paleontológicos
- CNUDM - Convenção das Nações Unidas sobre Direito do Mar
- CIRM - Comissão interministerial para Recursos do Mar
- PROTRINDADE - Programa de Pesquisas Científicas na Ilha da Trindade
- DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação
- LOG - Laboratório de Oceanografia Geológica
- ADV - Acoustic Doppler Velocimeter
- NCEP - National Center for Environmental Prediction
- NOAA - National Oceanic & Atmospheric Administration
- NWW3 - NOAA Wave Watch 3
- SWAN - Simulating Waves Nearshore
- SIG - Sistema de Informação Geográfica

# Resumo

A ilha oceânica da Trindade faz parte de uma grande cadeia vulcânica submarina denominada Vitoria-Trindade, pertencente ao estado do Espírito Santo. As diferentes composições granulométricas e mineralógicas e grau de exposição das praias ao regime hidrodinâmico bem como a presença de terraços de recifes de algas calcárias na zona de arrebentação e arenitos de praia (*beach rocks*) no estirâncio (face da praia) condicionam ambientes distintos entre si. Para análise das variações morfodinâmicas e os riscos associados às praias que compõem o segmento leste da ilha foi realizado o monitoramento costeiro por meio de observações visuais, coleta de sedimentos em conjunto de perfis topográficos transversais, além do fundeio de um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) a 10 m de profundidade na enseada dos Portugueses para determinação das condições hidrodinâmicas, tendo em vista a escassez de dados de ondas incidentes em águas rasas. Foi utilizado o enfoque da escola australiana de geomorfologia costeira para as caracterizações morfodinâmicas. Para compreensão do comportamento hidrodinâmico em águas rasas foram realizadas simulações de propagação de ondas de águas profundas com base no banco de dados do NOAA Wave Watch III utilizando o modelo SWAN, para os anos de 2013 e 2014. Os ambientes selecionados para o levantamento foram as praias: Cabritos, Calheta, Andradas, Tartarugas e Vermelha, na porção oriental da ilha. Um estudo de caso foi realizado nos principais pontos de ocorrência de acidentes envolvendo óbitos (Pedra do Xaréu, Pedra da Garoupa, Praia do Eme e Ponta Norte).

As simulações mostraram distintos padrões hidrodinâmicos em águas rasas entre os sistemas em consequencia da batimetria *offshore* e configuração das baías. Os resultados indicam como mais energética a praia Vermelha na porção sudeste da ilha, e, a de mais baixa energia, a praia da Calheta na porção central. O estudo caracterizou os diferentes sistemas praiais quanto a sua variabilidade, identificando como mais sensíveis a processos de erosão/acresção as praias da Calheta e Vermelha ( $\sigma_yb = 3,14$  e  $1,51m$  e  $CV = 5,82$  e  $3,20\%$ , respectivamente) em razão da ausência de estruturas na zona

de arrebentação, seguido da Andradas, Cabritos e Tartarugas com valores inferiores de  $\sigma_y b$  (0,67 a 0,77m) e CV (0,16 a 1,36%) em consequência da presença do recife. Foi identificado ciclicidade no comportamento morfológico nos diferentes sistemas praiais, representado pelo aumento do volume sedimentar nos meses de verão com posterior perda no período de inverno, evidenciando a troca de sedimento entre praia emersa e submersa. As alterações morfológicas ocorreram principalmente na face de praia e pós-praia inferior, como desenvolvimento de berma e exposição de rochas, relacionadas às variações nos níveis de energia.

As análises das condições hidrodinâmicas em associação ao comportamento da morfologia permitiram verificar os principais riscos costeiros associados a cada ambiente, identificando como de maior grau de periculosidade as praias Vermelha e Tartarugas, seguido de Andradas, Cabritos e Calheta. Os resultados do estudo de caso mostraram condições altamente energéticas para os pontos de ocorrência de acidentes.

A análise morfodinâmica além de contribuir na gestão e planejamento, permitiu propor medidas preventivas à segurança de praia e ações para minimizar os riscos associados aos processos oceanográficos e geomorfológicos desses ecossistemas.

# **Capítulo I: Introdução**

**A**ssim como diversas outras praias continentais e insulares no território brasileiro, as praias arenosas da ilha da Trindade oferecem grande interesse para pesquisas com relação à diferenciação geomorfológica, estudos sedimentológicos e morfodinâmicos, tendo em vista as características peculiares de seus ambientes praiais e da restrita plataforma insular e arredores o que lhe confere características únicas. O entendimento acerca da evolução e do comportamento dos processos geomorfológicos, em alta e baixa frequência, das ilhas oceânicas brasileiras contempla o estudo de temas que contribuem para o conhecimento da composição, estrutura e dinâmica desses ecossistemas e têm sido uma preocupação constante do governo brasileiro e da comunidade científica em geral.

## **1.1. A ilha da Trindade**

A descoberta da Ilha da Trindade foi atribuída ao navegador espanhol João da Nova, que partiu de Lisboa no ano de 1501 a serviço de Portugal, no qual atribuiu o nome de Assunção sendo substituído no ano seguinte para Trindade, por Estevão da Gama quando a visitou. Centenas de anos mais tarde, no ano de 1957, durante o Ano Geofísico Internacional, a Marinha do Brasil que tem prestado apoio às atividades de investigação e de conservação na ilha desde 1916, estabeleceu o Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade (POIT). Desde então, as atividades na ilha somente tem sido viável, ainda que de forma limitada, em virtude do apoio da Marinha, sendo esta a responsável por garantir a presença do Estado brasileiro naquela longínqua porção do território e do mar que a circunda. Sendo assim, a Ilha da Trindade é uma área gerenciada pela Marinha do Brasil, e foi reconhecida, em 2001, pela Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos -SIGEP/UNESCO-, como patrimônio geológico brasileiro. Ressalta-se ainda a importância do posicionamento estratégico em latitude próxima das principais bacias

petrolíferas e do incremento na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) de 200 milhas náuticas no entorno da ilha (Figura 1), segundo a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM-1982) caracterizado pela Lei n 8.617/1993 (Almeida 1995; Alves 1998) Marinha do Brasil).

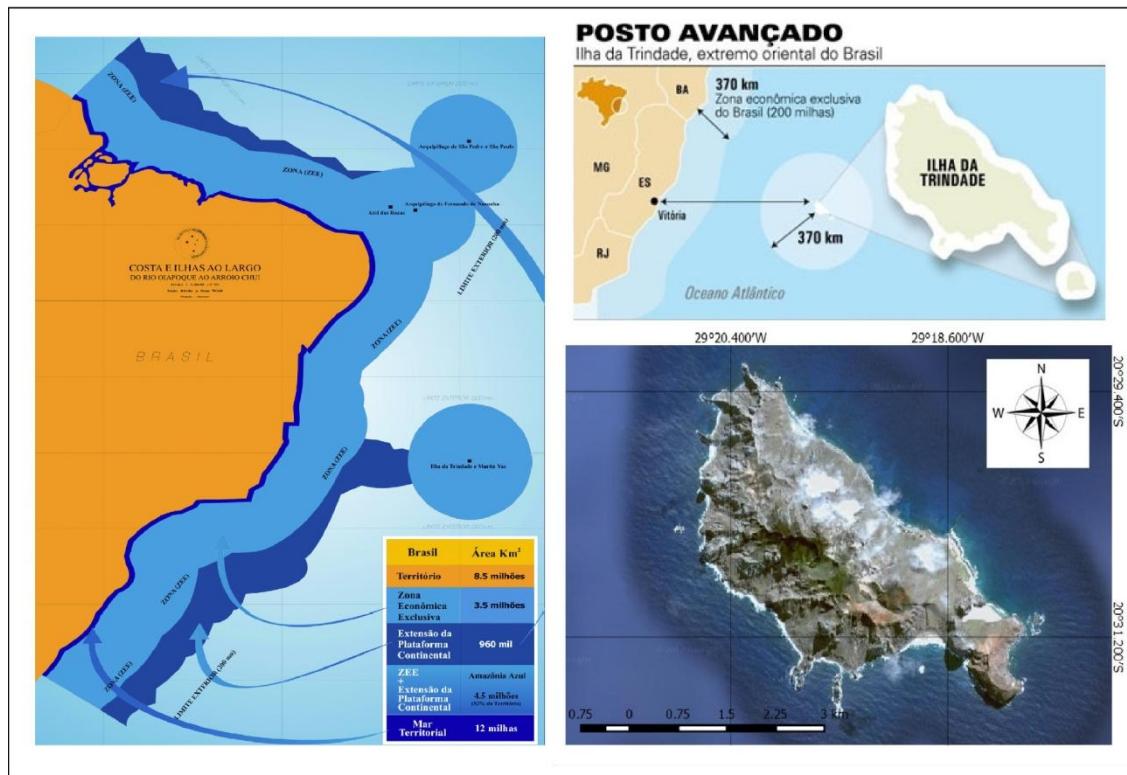


Figura 1. Área referente à Zona Econômica Exclusiva e vista aérea da Ilha da Trindade. Fonte Marinha do Brasil / Google Earth

Em Abril de 2007 foi criado pela Marinha do Brasil, sob a égide da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), o Programa de Pesquisas Científicas na Ilha da Trindade (PROTRINDADE), destinado a gerenciar o desenvolvimento de pesquisas científicas na Ilha da Trindade, Arquipélago de Martin Vaz e na área marítima adjacente.

Os ambientes geológicos desta ilha são caracterizados por rochas vulcânicas e piroclastos diversos, recifes de algas, praias estreitas, depósitos eólicos móveis (dunas), pequenos depósitos fluviais e numerosos cones e aventais de talude. Tal como Fernando de Noronha, Trindade constitui uma das séries vulcânicas oceânicas mais sódicas senão a mais sódica do mundo,

sendo o único local em território brasileiro em que ainda se pode reconhecer parte de um cone vulcânico (Almeida, 1995, 1961; Mohr, 2009).

As zonas costeiras estão entre as áreas mais energéticas, onde os processos de modificação da costa podem ser observados de forma contínua como consequência da integração dos processos marinhos, atmosféricos e dos atuantes sobre os continentes.

## 1.2 Ondas e aplicação de modelos

A geração e a energia das ondas são determinadas pelo tempo de duração da atuação do vento na superfície do oceano, pela velocidade do vento e pelo comprimento da pista (*fetch*), que é a área de ação do vento (Komar, 1976). Posterior à formação em águas oceânicas profundas, as ondulações ficam livres do mecanismo de geração, o vento, e podem viajar por distâncias consideráveis com perda mínima de energia. Tal fato ocorre por meio de um mecanismo no qual as ondulações (*swell*) evoluídas de um mar com características de vagas (*sea*), diminuem em altura e aumentam em comprimento (Short, 1999).

São vários os processos físicos que podem atuar sobre um campo de ondas superficiais propagando-se de águas profundas para águas rasas. Diferentes mecanismos conservam, adicionam ou removem a energia do campo de ondas. Estas propriedades tornam-se ainda mais importantes quando a plataforma, sobre a qual o campo de ondas se propaga, tem característica como curta extensão ou mesmo fundo formado por sedimentos grossos (WMO, 1988). Os processos de transformação das ondas geradas em águas profundas, se propagando até águas mais rasas, têm implicações importantes no transporte de sedimentos e como consequência tem efeito direto sobre a morfologia costeira (Matos *et al.* 2014). Assim sendo, o conhecimento detalhado do grau de agitação marítima tem importância fundamental para o planejamento de construção de estruturas *offshore* e gerenciamento da área (Akpinar *et al.* 2012).

Com o objetivo de descrever o clima de ondas predominante para a costa do Brasil, Pianca *et al.* (2010) fizeram uma análise estatística simples, baseada em onze anos (Jan/1997-Dez/2007) de dados extraídos do modelo operacional de reanálise para previsão de ondas NWW3 (NOAA WAVE WATCH 3, Tolman, 1999) do NOAA-NCEP, para determinados setores da costa do Brasil. De acordo com os autores, o principal fator controlador da energia de onda para as proximidades da Ilha da Trindade são as frentes frias advindas da região Sul do Brasil.

As ondas que atingem a Ilha da Trindade podem ser classificadas em três tipos, cuja ocorrência se dá muitas vezes concomitantemente: ondulações (*swell*), vagas (*sea waves*) e ondas de tempestade (*storm waves*). O regime das ondas é o maior responsável pelas variações temporais da zona de arrebentação, enquanto as variações espaciais são consequência da interação das ondas com a topografia e com o tipo de sedimento. Fatores como a exposição e orientação da linha de costa podem ampliar ou minimizar a ação dos agentes físicos (Sonu, 1973; Sunamura, 1984).

A dificuldade na obtenção de dados em campo que permitam uma adequada representação do clima de ondas seja pelos equipamentos ou meios humanos envolvidos muitas vezes esbarra em dificuldades operacionais e econômicas, considerando que demandam longos períodos de coleta com ampla espacialização de estações de medição. Além disso, para determinadas áreas, os dados, quando existentes, são pontuais e com pouca representatividade espacial (Matos *et al.*, 2014)

Para extensa costa do Brasil, mas principalmente para as ilhas oceânicas, informações sobre as ondas incidentes são raras. Para suprir essa carência de dados, a modelagem numérica associada às observações de campo aparece como alternativa para a caracterização da agitação marítima, visto que permite prever o clima de ondas e, principalmente, permite sua análise a curto, médio e longo prazo. Sendo assim, a aplicação de modelos numéricos tem sido usada extensivamente nas últimas décadas na busca de compreender questões relativas à hidrodinâmica em zonas costeiras, e serviu como uma ferramenta de auxílio para melhor compreensão e interpretação das variações morfodinâmicas da presente pesquisa.

Os modelos integram e extrapolam informações a partir de medições e descrevem a hidrodinâmica e processos de dispersão de constituintes, favorecendo simulações de alterações na geometria das zonas costeiras. Por ser uma ilha oceânica, Trindade apresenta configuração diferenciada dos ambientes litorâneos continentais, com a região da antepraia e plataforma insular muito estreitas, apresentando profundidades de 10 m a aproximadamente 0,5 km, e profundidades de 100 m a apenas 1 km da praia. Na grande maioria das praias continentais brasileiras essas profundidades ocorrem a distâncias bem maiores podendo chegar a dezenas de quilômetros. Como consequência ocorre pouca dissipação da energia, de forma que os processos de transformação das ondas de águas profundas para rasas tornam-se extremamente importantes. Segundo Dean (1973) ondas esbeltas, muito altas e com curto período, representam condições de alta energia e propiciam a migração de sedimentos em direção ao mar. Com o início do decaimento do regime energético ocorre o oposto, acumulando sedimentos em direção à costa.

As consequências de tais processos de transformação de ondas e suas respectivas contribuições às alterações / respostas na morfologia das praias frente às variações espaço-temporais das condições ambientais é um dos elementos de interesse na presente pesquisa.

### **1.3 Processos de transformação de ondas**

Para o estudo dos padrões e processos de transformação de ondas, o setor de praia de interesse maior foi a estreita antepraia, que compreende a zona do início da plataforma interna ao fim da zona de surf (ponto de quebra), onde as profundidades podem ser variáveis. Este é um ambiente de transição, onde as ondas são a força mais importante na configuração do fundo, porém os fluxos de plataforma aumentam sua importância em direção ao oceano (Stanley & Swift, 1976).

A antepraia tem como características perfil côncavo em um eixo transversal à costa, e normalmente não apresenta grandes variações no

sentido longitudinal (Niedoroda *et al.*, 1985). Os processos oceanográficos e geológicos neste domínio determinam como a morfologia da linha de costa vai responder às variações nas condições hidrodinâmicas, alterações no nível do mar e mudanças nas reservas de sedimento (Thieler, 1996). As praias arenosas oceânicas são sistemas transicionais altamente sensíveis e dinâmicos, e constantemente se ajustam às flutuações dos níveis locais de energia sofrendo retrabalhamento por processos eólicos, biológicos e hidráulicos (Hoefel, 1998).

Os principais processos de transformação do campo de ondas incidentes que envolvem mudanças no comprimento de onda ( $L$ ), velocidade de fase ( $C_g$ ), entre outros, ocorrem na antepraia devido ao decaimento exponencial da profundidade, desde a plataforma interna até a zona de surf. A partir deste ponto, operam sobre as ondas quatro processos básicos de transformação de ondas em águas rasas: o empolamento, a refração, a difração e a dissipação por atrito com o fundo. Esses processos são particularmente importantes por causarem aumentos e diminuições na altura de onda (Wright *et al.*, 1987). As ondas incidentes de águas profundas passam a ser modificadas pelo fundo quando a razão entre a profundidade local e o seu comprimento ( $h/L$ ) torna-se menor que 1/2. Em um sentido mais estrito, alterações significativas são notadas em  $h/L < 1/4$  (Komar, 1976).

### **1.3.1 Modificações de ondas em águas rasas**

O empolamento (*shoaling*) segundo o princípio da lei conservação do fluxo de energia, caracteriza-se pelo aumento da energia em decorrência da diminuição do comprimento de onda devido o decréscimo da profundidade, ou do comprimento da frente de onda, expresso fisicamente através de seu crescimento em altura. Tal processo proporciona aumento da altura de onda até um momento em que se torna instável e tende a arrebentar, proporcionando ao mesmo tempo dissipação e transferência de energia ao longo da costa (Komar, 1998).

A refração é a reorientação dos raios de onda os quais tendem a se posicionar normais aos contornos batimétricos, com a diminuição da

profundidade e a diminuição da velocidade de fase. De acordo com a batimetria local, ao aproximar-se da costa as ondas vão sofrendo diferencialmente os efeitos do empolamento, de modo que as porções de frentes de ondas que estiverem sobre regiões de menor profundidade terão suas velocidades retardadas em relação àquelas que se encontrarem sobre regiões mais profundas. É o fenômeno através do qual os raios de onda são redirecionados pela batimetria, segundo a lei de Snell (Komar, 1998).

A difração segundo Wright & Short (1984) é o processo caracterizado pela redistribuição lateral de energia ao longo da crista de onda, fenômeno que ocorre quando há um gradiente de altura pronunciado ao longo da crista de onda (perpendicularmente aos raios de onda) e a energia é transferida lateralmente das áreas com maior concentração para as regiões com menor energia concentrada, ou seja, dos pontos de maior altura para os de menor respectivamente.

Considerando o amplo conhecimento relacionado aos processos de transformação de ondas, Wright & Short (1984) dão ênfase a importância da dissipação de energia por fricção com o fundo na determinação do clima de ondas na costa, uma vez que ondas maiores tenderão a sofrer mais acentuadamente estes efeitos do que ondas menores. Segundo os autores este processo pode ser responsável pela diminuição da variabilidade temporal do clima de ondas incidente em determinada praia, e ainda pela própria atenuação da altura de onda recorrente, de forma que quanto maior a alteração pela morfologia da plataforma interna menor a tendência de variação do clima de ondas da praia.

## 1.4 Setores praiais e processos associados

O ambiente praial de definição mais ampla pode ser dividido em diferentes setores distinguidos pelos processos hidrodinâmicos e as características morfológicas inerentes a cada um. Devido a falta de padronização dos termos, para a abordagem descritiva das alterações na morfologia decorrentes das variações espaço-temporais e das condições

oceanográficas, será aplicada a definição segundo Hoefel (1998) subdivididos em zonação morfológica e hidrodinâmica, evidenciados na Figura 2.

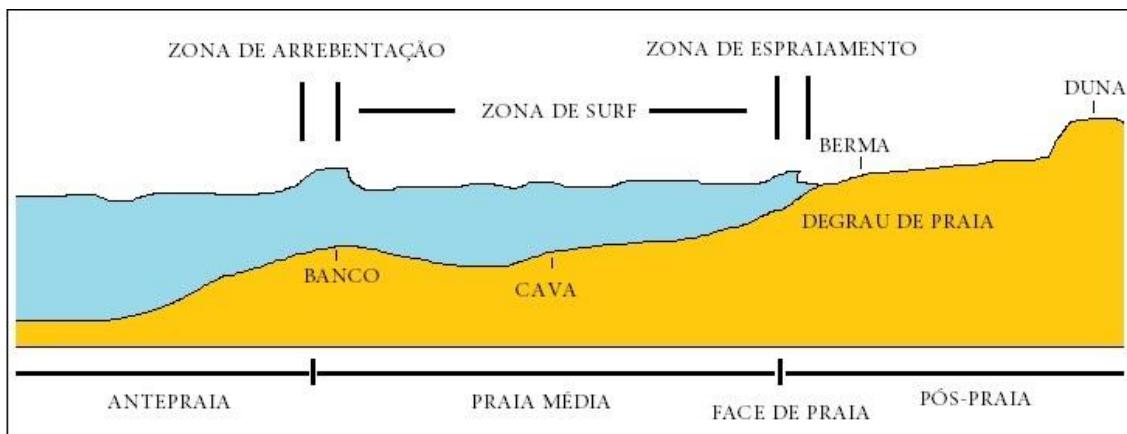


Figura 2. Terminologia acerca do ambiente praial proposto por Hoefel (1998).

#### Zonação hidrodinâmica:

- Zona de arrebentação (*breaking zone*): porção do perfil praial caracterizada pela dissipação da energia de onda sobre a praia. As ondas incidentes ao se aproximarem de águas mais rasas, tendem a se instabilizar até que a velocidade na crista da onda exceda a velocidade de grupo das mesmas, ocorrendo a quebra da onda. Existem quatro tipos de quebra de onda (Figura 3) dependentes da declividade, altura e comprimento da onda: progressiva ou deslizante, mergulhante, ascendente e frontal (Galvin, 1968).

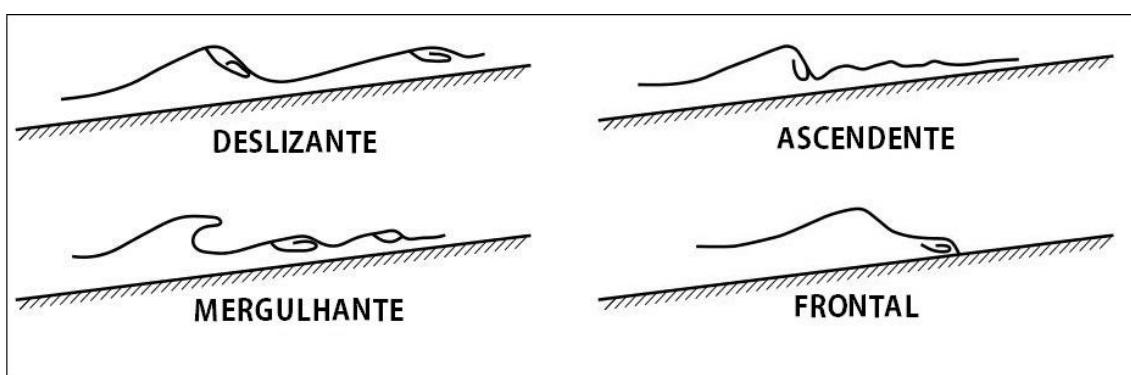


Figura 3. Tipos de quebra de onda segundo Galvin (1968).

- Zona de surfe (*surf zone*): zona compreendida entre a zona de arrebentação e a zona de espraiamento, determinada pela distância que a onda percorre desde a quebra até atingir a linha de praia. A caracterização deste setor é

diretamente dependente do grau de declividade da praia e consequentemente do modo de dissipação da energia das ondas incidentes. A zona de surf é a mais variável dentre as zonas, e consiste em uma ampla gama de processos dinâmicos decorrentes da transformação e quebra de ondas. Durante o percurso da onda grande parte da energia é transferida para geração das correntes de deriva litorânea (*longshore currents*) e correntes de retorno (*rip currents*). Tanto as rupturas das ondas de gravidade como as ondas de infragravidade amplificadas contribuem para a forma e o caráter da morfologia da zona de surfe, incluindo a disposição dos bancos, cavas e canais (Short, 1979).

- Zona de espraiamento (*swash zone*): porção do perfil praial definida pelos limites máximo e mínimo do espraiamento das ondas. O fluxo bidirecional ocorrente nesta zona é influenciado por inúmeros processos incluindo tipo e altura de onda, estado e variação da maré, morfologia da praia, largura e declividade, tamanho do grão, permeabilidade, entre outros (Short, 2006). O limite máximo do espraiamento (*run-up*) determina o nível máximo de atuação dos agentes hidrodinâmicos sobre a praia. Comumente podem ser observadas nesta porção do perfil, feições rítmicas de expressão longitudinal à costa, como cúspides e mega-cúspides praiais, podendo ou não estar associadas às feições da zona de surfe. Na região acima da zona de espraiamento pode ocorrer a presença da feição deposicional denominada berma, e em praias bastante íngremes, na porção inferior da zona de espraiamento pode-se observar a ocorrência de um degrau (*beach step*).

#### Zonação morfológica:

- Antepraia (*shoreface*): corresponde à porção do perfil dominada por processos de empolamento de onda (*wave shoaling zone*), sempre submersa e mais inclinada, que se estende do fim da praia média até o ponto em que as ondas não mais atuam sobre os sedimentos de fundo (profundidade de fechamento), incluindo a zona de arrebentação. À medida que as ondas se movem sobre esta zona, a decrescente profundidade resulta numa interação crescente das ondas com o fundo, levando a velocidades mais altas e movimentos orbitais mais longos que transportam mais sedimento, criando

assim uma inclinação mais pronunciada. Caracteriza-se por declive côncavo e pela presença de bancos arenosos que podem se apresentar sob diversas formas: bancos longitudinais lineares e em crescente (*crescent bars*), bancos transversais (*transverse bars*) e bancos oblíquos (Short, 2006). Segundo Calliari *et al.* (2016) devido a presença de recifes de algas calcárias e rochas vulcânicas na praia média, essas feições são praticamente inexistentes nos sistemas praiais do setor Leste da Ilha da Trindade

- Praia média: zona que compreende desde o limite inferior da antepraia a zona de espriamento, entre o banco e os degraus da praia respectivamente, onde ocorrem os processos da zona de surf e da zona de arrebentação.
- Face praial (*beachface*): zona situada entre o nível médio de maré baixa e o nível médio da maré alta, comumente subdividido em face de praia inferior e superior. Também conhecido como estirâncio, é a porção do perfil em que ocorrem os processos de espriamento. Pode apresentar feições como cúspides (*beach cusps*) e degraus (*beach steps*).
- Pós-praia (*backshore*): corresponde à zona situada entre o limite superior do espriamento (pós-praia inferior) e a primeira mudança fisiográfica brusca, observada na direção do interior (duna frontal, falésia ou vegetação), em que somente é atingida pelas águas do mar em marés altas excepcionais ou ondas de tempestade (pós-praia superior), estando geralmente sob influência eólica, responsável pelo transporte subaéreo da praia. É neste subambiente que se encontra a berma e o terraço sedimentar formado pela ação das ondas.
- Duna frontal (*foredune*): ambiente de transição entre a praia e áreas mais interiores, estando geralmente sob influência eólica, podendo eventualmente ser atingido por ondas de tempestade. Desempenha importante papel na proteção do litoral e na manutenção do equilíbrio do estoque sedimentar da praia.

As variações ocorrentes ao longo da costa são impulsionadas por mudanças nas características das ondas e processos relacionados, e podem ocorrer nas zonas de *shoaling*, *surf* e *swash*. Durante o empolamento (*shoaling*) da onda, a refração e a variável atenuação de onda são a causa mais comum de mudanças no comprimento e na direção da onda. Seus principais impactos são, em primeiro lugar, a refração da onda que faz com que

a crista sobre, o que normalmente leva a uma curvatura na linha costeira adjacente. Em segundo lugar, a refração e / ou atenuação produzirão uma variação na altura da onda, que por sua vez influenciará nas características bidimensionais (Short, 2006).

## 1.5 Morfodinâmica de praia

Uma das definições do termo morfodinâmica de praias é o “ajustamento mútuo da topografia e da dinâmica dos fluídos, envolvendo o transporte de sedimentos” (Wright e Thom, 1977 *apud* Short, 1999). A interação dos efeitos dos ventos, ondas, correntes, e marés, somando-se às características do material formador das praias, determina a variação morfológica do sistema praial. Da mesma forma que a dinâmica origina a morfologia, esta condiciona a dinâmica, ou seja, dinâmica e morfologia evoluem conjuntamente (Wright & Short, 1984).

Os processos costeiros envolvem diferentes escalas temporais e espaciais que vão desde segundos a séculos e de milímetros a quilômetros, da turbulência à variabilidade interanual, respectivamente (Thornton *et al.*, 2000). Morfológicamente a praia constitui um dos ambientes mais variáveis em curtas escalas de tempo (Fachin, 1998).

### 1.5.1 Estágios / Estados de praia

Estudos sistemáticos relacionados às variações tridimensionais do relevo praial tiveram inicio na década de 60 e 70 no Japão e Estados Unidos, respectivamente, porém apresentavam certas limitações com relação à extração de resultados e aplicabilidade mais ampla. Os primeiros modelos sequenciais da variação praial foram publicados no fim dos anos 70, baseados na classificação quantitativa dos sistemas praiais segundo o Parâmetro Dimensionador do Surfe ou o Parâmetro de Similaridade do Surfe (Guza & Inman, 1975). A inclusão deste enfoque gerou a possibilidade de relacionar

diretamente os processos ocorridos na região de antepraia e a morfologia associada, contribuindo para o desenvolvimento de estudos que buscavam descrever sequências morfológicas explicando sua ocorrência e formação.

O nível de energia necessário para uma praia mudar de um tipo morfológico para outro foi descrito por Short (1981). Ainda na década de 80, (Wright & Short, 1984) introduziram a classificação morfodinâmica de praias utilizando o conceito de "estado ou estágio morfodinâmico" para se referir às assembleias deposicionais completas, processos de redistribuição de sedimentos e assinaturas de processos hidrodinâmicos associados a uma praia sob determinadas condições, de forma que o estado modal da praia ou mais recorrente representa uma resposta às características mais frequentes da arrebentação e do tipo de sedimentos. Este modelo sequencial teórico, inicialmente criado para praias de micro-maré dominadas pela ação de ondas, foi desenvolvido com o objetivo de descrever a evolução dos estágios praiais e as respectivas variações nas alturas das ondas. O modelo é composto por um extremo refletivo associado a menor altura de onda e um extremo dissipativo associado a maior altura de onda, como sugeridos e identificados por Guza & Inman (1975), porém apresentando estágios intermediários entre os extremos.

De forma geral, o estudo do comportamento de praias exige inúmeras variáveis responsáveis pela compreensão dos seus processos. Assim sendo, Short (1999) sugere alguns parâmetros fundamentais, sendo eles: variação de maré, altura e período das ondas, tamanho dos grãos, comprimento da praia / embaiamento, que são incorporados em equações que podem ser usadas para descrever as principais características dos sistemas praiais. Estas equações incluem o tipo de praia, declive da praia, número de bancos, parâmetro de embaiamento, entre outros. A presença de recifes de algas calcárias na zona de arrebentação, afloramentos rochosos bem como a presença de pontais rochosos (promontórios) introduz alterações nessa classificação geral uma vez que modifica os processos na zona de arrebentação, entre eles a presença de correntes de retorno perpendiculares e oblíquas às praias.

Após a compilação de diversos estudos que procuraram estabelecer modelos do comportamento sequencial morfodinâmico das praias durante décadas, Short (2006) aprimorou um modelo tridimensional composto por

quinze estágios de praia, sendo seis dominados por onda, três modificados pela maré, quatro dominados pela maré e duas com presença de rochas e recifes. O reconhecimento das particularidades impostas pelo controle geológico em cada estágio resultou no desenvolvimento de novos estágios de praia geologicamente controladas para classificar os sistemas de praias australianas.

Em suma, o comportamento da praia varia entre dois estágios em equilíbrio de erosão e acresção interligados por fases de transição que vão desde alta energia de ondas em praias com múltiplos bancos com zonas de surf de 300 - 500m até praias de baixa energia dominadas pela maré (Figura 4). Cada fase ilustra parte do ciclo, e deve ser entendido que entre cada uma das etapas existe um contínuo de transição nos aspectos morfodinâmicos da praia. Assim sendo, um novo perfil seria formado a cada condição reinante através da constante acomodação da morfologia, condições que definem um "equilíbrio dinâmico" (Wright et al. 1985; Short 2006).

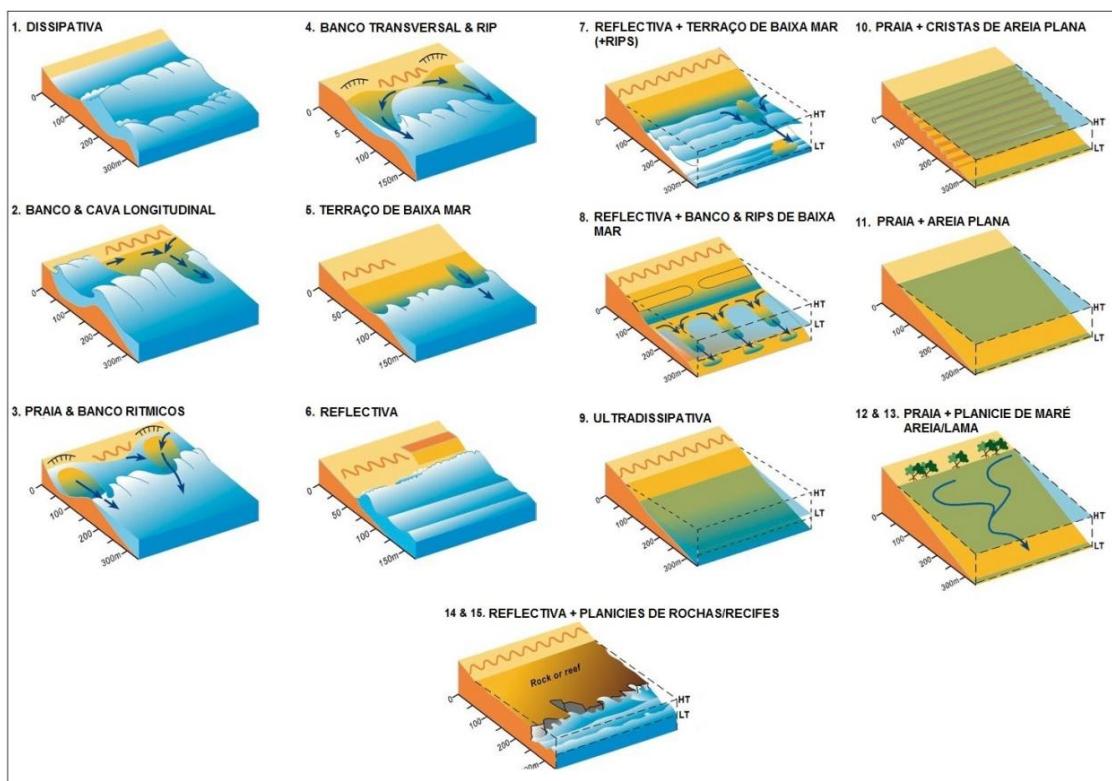


Figura 4. Esboço esquemático de praias dominadas por ondas (1-6), modificado pela maré (7-9) e estágios de praia dominados pela maré (10-13); e praias com rochas ou recifes na porção frontal (14-15). Modificado de (Short & Jackson, 2013).

A mudança na geometria do perfil é caracterizada por um ciclo de corte no volume de sedimentos do pós-praia e posterior recuperação. Este movimento claramente representa um transporte de sedimentos perpendicular à costa (*cross-shore*) e uma troca entre os bancos distais (*offshore bars*) que se desenvolvem durante períodos mais energéticos, e o pós-praia, que aumenta em elevação e volume de sedimentos em estações de menor energia (Komar, 1998).

Os estados de praia podem ser definidos separadamente pela representação morfológica e / ou regimes dinâmicos, indicado parcialmente pelo nome dado a cada um. Assim sendo, o modelo base utilizado e mais aceito para a classificação morfológica global de uma praia é o da Escola Australiana de Geomorfologia Costeira.

### **1.5.2 Riscos Costeiros**

As praias oceânicas arenosas são ambientes altamente dinâmicos e sob determinadas condições hidrodinâmicas conferem certos perigos, expondo a riscos que eventualmente possam vir causar danos à vida e a integridade física do usuário Short (1999). Para tal, algumas definições são necessárias. O termo risco segundo Lacey & Pike (1989) é definido como o grau de exposição à determinada quantidade de perigo, sendo o perigo definido como uma gama de circunstâncias e processos que podem levar aos danos e prejuízos.

Segundo Short *et. al.* (1993) os riscos podem ser relacionados a fenômenos físicos e biológicos. Os riscos físicos incluem quebra de ondas, variabilidades da topografia da praia e zona de surfe, variabilidade das correntes na zona de arrebentação, profundidade, presença de rochas e recifes, podendo ser classificados em permanentes e não permanentes (Tabela 1). No âmbito dos riscos não permanentes, o de maior destaque são as variações topográficas de fundo.

Tabela 1. Riscos físicos costeiros com impacto na segurança de banhistas (Short et. al., 1993).

Riscos Permanentes	Riscos Não Permanentes
Falésias	Topografia da zona da praia e zona de surf: -Variações na profundidade
Plataformas Costeiras	-Bancos, cavas e canais
Rochas	Quebra de ondas e vagalhões
Recifes	"set up" e "set down" das ondas
Desembocaduras	Correntes de maré e na zona de surf
Profundidade	Marés meteorológicas

Klein et al. (2003) e Hoefel & Klein (1998) estudando praias na costa brasileira relatam a predominância de determinantes sociais em relação aos naturais na questão de segurança de praia, entretanto, 86% dos casos de afogamento registrados ocorreram sob condições de fraca a moderada corrente de retorno, sendo 80% em dias com altura de onda inferior a 1 metro. Pereira et al. (2001) abordam o tema nas praias oceânicas do extenso litoral Sul utilizando fotografias, perfis topográficos e dados de afogamento para associar riscos aos banhistas a condições morfodinâmicas e ambientais dominantes. Para o presente estudo, dentre as variações morfo-sedimentares e certificação do estado morfodinâmico reinante, a definição do grau de periculosidade dos distintos ambientes leva ainda em consideração a identificação de evidências morfológicas, litológicas e estruturais, que são utilizados como indicadores de área de risco aos usuários.

De acordo com Short & Hogan (1994) estágios de praias oferecem particularidades que podem oferecer riscos. Os principais riscos associados ao estágio de praia Dissipativo seriam a altura das ondas e o "set-up" e "set-down". Para as praias no estágio refletivo, os principais riscos estão relacionados à alta profundidade próxima a linha de praia e a arrebentação das ondas na face praial. Estágios intermediários possuem como principal risco a presença de correntes de retorno (*rip currents*), considerada como um dos maiores perigos na zona de surfe, devido à combinação de correntes moderadas a rápidas geralmente no sentido do oceano, com a possibilidade de quebra de onda ao longo e no término da corrente. Segundo os autores, as

correntes de retorno são responsáveis por 89% dos acidentes nas praias da costa do estado de New South Wales na Austrália.

De acordo com Wright & Short (1984) o perigo natural de uma praia aumenta com a dissipatividade do sistema e com incrementos na altura de arrebentação das ondas. Características físicas particulares como a presença de molhes, píers, rochas submersas, desembocaduras de rios e outros obstáculos representam fontes de perigo, aumentando pontualmente o nível de periculosidade das praias (Short & Hogan, 1993).

As praias da Ilha da Trindade, em sua grande maioria, apresentam riscos costeiros permanentes associados aos ambientes seja pela presença de rochas ou mesmo o rápido aumento da profundidade (Calliari *et. al.*, 2016). Mudanças abruptas na morfologia de fundo da antepraia em associação à características específicas de onda tem proporcionado a formação de um pico na altura de onda, denominada "Onda Camelo" devido à semelhança com perfil de uma corcova de camelo, surpreendendo pela ocorrência súbita podendo causar acidentes. Relatos feitos por militares e pesquisadores desse tipo de formação têm sido comuns em pontos específicos da ilha, como na porção próxima ao Túnel, e a Pedra da Garoupa nas proximidades da Praia do Príncipe, por vezes envolvendo óbitos sendo sete no total.

Calliari *et. al.*, 2016 fizeram uma interpretação inicial das informações dos locais e dados associados às ocorrências os quais indicam que ondas acima de 2 m de altura com períodos maiores que 12 segundos ao se aproximarem de águas rasas, diminuem de comprimento e sofrem aumento abrupto da altura podendo assim “galgar” (processo de galgamento de ondas na engenharia costeira) paredões rochosos. De acordo com dados recentes da literatura, características como a profundidade na frente da falésia ou costão rochoso e a altura da onda, são elementos chave que indicam os locais com maiores riscos de ocorrência. Determinados setores do costão rochoso no entorno da ilha apresentam declive acentuado, facilitando o processo de galgamento, sendo este dependente da profundidade local e da morfologia do costão. Alternativamente, observações visuais e imagens de vídeos nas proximidades da plataforma rochosa do Túnel sugerem a possibilidade de

interação entre a chegada de uma onda e outra refletida pela parede rochosa formando uma imensa crista, o qual tende a sobrepor a plataforma.

Assim sendo, a permanência constante de militares e pesquisadores na ilha releva a importância de se conhecer os padrões hidrodinâmicos dominantes e suas respectivas contribuições às alterações na costa, de forma a mitigar possíveis riscos associados aos usuários, além de contribuir na logística para o desembarque de pessoal e material e gestão destes ambientes únicos.

A análise do clima de ondas que atinge a Ilha da Trindade por meio da modelagem e a respectiva configuração morfológica da plataforma insular adjacente permite realizar simulações de propagação de ondas de águas profundas para águas rasas e avaliar a distribuição de energia de ondas no entorno da ilha. O conhecimento da distribuição diferenciada de energia ao longo da costa em conjunto do monitoramento morfológico permite avaliar condições aproximadas de ondas na arrebentação e o respectivo comportamento morfodinâmico nos diferentes ambientes praiais. Desta forma, investigações acerca da resposta morfodinâmica de cada segmento de praia e das condições de ondas em águas rasas permitirão brevemente associar altura de ondas aos respectivos estágios morfodinâmicos e, com isso, avaliar a frequência e magnitude dos perigos nas praias sejam eles, o tipo de arrebentação e / ou a variabilidade morfológica do fundo.

O estudo dos processos de morfodinâmica de praia desde a sua gênese, por fenômenos meteorológicos, gera informações e contribuições para a compreensão do comportamento praial como um todo. Dessa maneira, conhecendo como o sistema praial se comporta em função do regime hidrodinâmico a curto e médio prazo, pode-se utilizar tais informações para a mitigação de possíveis riscos associados aos estágios de praias dominantes (rápido aumento da profundidade/ correntes de retorno / onda camelo) tendo em vista o número de acidentes envolvendo óbitos, assim como planejar futuras obras de engenharia (píer, plataformas), definindo a melhor forma de uso e gestão dos ambientes praiais desta ilha oceânica. Sob o enfoque de processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos, essa pesquisa representa uma

tentativa de contribuir e se integrar a outros estudos que levem ao melhor entendimento deste ecossistema.

# Capítulo II: Área de Estudo

## 2.1 Características Gerais e Localização

**A**Ilha da Trindade faz parte de uma grande cadeia vulcânica submarina orientada a leste-oeste no chamado lineamento Vitória-Trindade, com inicio no talude continental ao largo da capital capixaba a 175 quilômetros da costa. Está constituída por aproximadamente 30 montes submarinos e *guyots* com altura superior a 1000 m, retrabalhados pelo mar e nivelados a menos de 100 m de profundidade. No entanto, a ilha por ter sua atividade vulcânica mais recente, ainda se eleva acima da superfície oceânica (Almeida, 1961; Almeida, 2006; Castro & Antonello, 2006). Os montes submarinos têm forma geral de cone, constituído por elevação no sopé, edifício vulcânico principal e topo planar (Motoki *et al.*, 2012).

Esta ilha oceânica situa-se entre os paralelos de 20° 29' e 20° 32' S e os meridianos de 29° 17' e 29° 21' W no oceano Atlântico Sul (Figura 5), aproximadamente 1140 km da linha de costa no paralelo de Vitória, Espírito Santo. Dispõe de 13,5 km<sup>2</sup> de área e apenas 2,5 km de largura, caracterizada por relevo bastante íngreme, possuindo em suas regiões centrais picos de 500 a 600 m de altitude (Almeida 2006; Almeida 1995). Apresenta forma alongada, com aproximadamente 6 km de comprimento, com eixo principal Noroeste-Sudeste e perfil transversal assimétrico, sendo a vertente Sudoeste mais íngreme que a Nordeste.

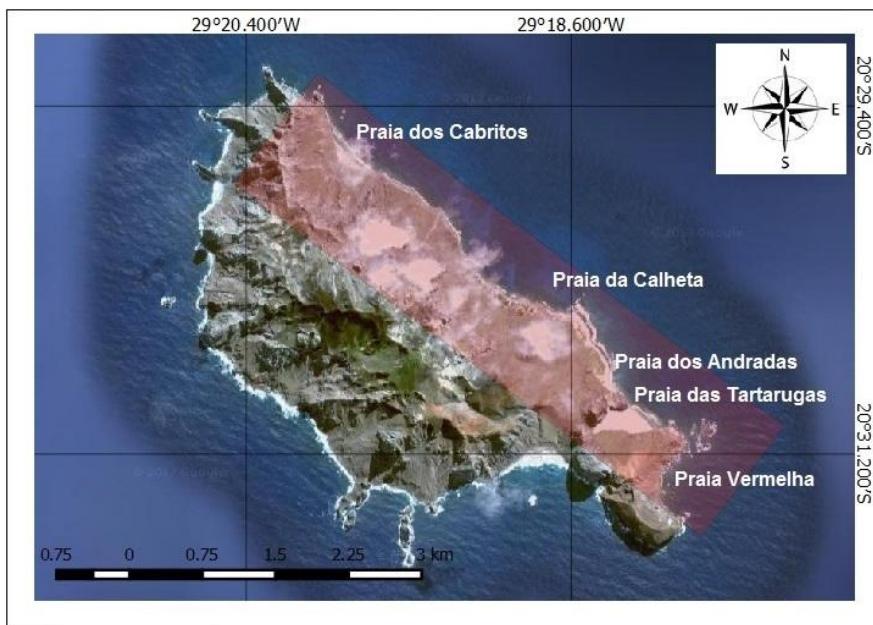


Figura 5. Ilha da Trindade com destaque no segmento leste em vermelho com identificação das praias.

A parte emersa da ilha em forma de um cimo erodido repousa sobre o assoalho oceânico a quase 5.500 metros de profundidade, com a plataforma insular variando entre 800 e 3000m (Castro & Antonello, 2006; Almeida, 1961).

A Ilha da Trindade é constituída basicamente de rochas vulcânicas, sendo uma série alcalina com predominância de grandes corpos fonolíticos, e outra básica, com derrames de lavas basálticas (Clemente *et al.*, 2012). A idade mais antiga identificada em rochas da ilha foi de 3,6 Ma em um dique de rocha ultrabásica em tufos da praia dos Cabritos no segmento leste da ilha, porém as grandes intrusões fonolíticas acusaram idades 2,3 a 2,9 Ma (Cordani, 1970).

## 2.2 Caracterização climatológica

O clima característico da ilha é do tipo oceânico tropical semi-úmido ao semi-árido, com temperatura média anual de 25,2°C estando esta sobre domínio dos ventos alísios de leste (Soares, 1964; Almeida, 1995). A precipitação é sazonal e variável apresentando baixa precipitação média anual

(923mm) (Clemente *et al.*, 2009), com ocorrência de chuva torrencial rápida conhecida como "Pirajá" quase diariamente no verão.

Ocorrem duas estações bem definidas, sendo a seca de janeiro a março. O clima tropical oceânico é mitigado pelos ventos alísios, sendo fevereiro o mês mais quente (30,2°C) e agosto o mais frio (17,3°C). A vertente sul da ilha é mais frio e úmido sendo coberto por uma vegetação exuberante com predominio das samambaias gigantes. Durante os meses de outono-inverno (Abril a Outubro) frentes frias atingem periodicamente a ilha com intervalos de aproximadamente uma semana (Alves, 1998; Almeida, 2002; Clemente *et al.*, 2012 ).

## 2.3 Regime de ondas

Recentemente Calliari *et al.* (2016), utilizando o banco de dados do NOAA-NCEP para o intervalo de aproximadamente 10 anos (2005-2014) com ponto definido nas proximidades da Ilha da Trindade, verificaram que 33,7% das ondas são provindas do sul, 23,4% sudoeste, 18,1% leste, apresentando altura significativa média de 2,14m e período de 11,07s. Os autores afirmam ainda que altura de onda significativa variando entre 4 e 6m são menos frequentes (1,1%) e chegam principalmente do quadrante Sul, sendo formados por ciclones extratropicais gerados no Atlântico Sudoeste (Figura 6).

De acordo com as tábuas de marés da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), a maré astronômica observada é semi-diurna com amplitude de 1,3m, sendo assim considerada de acordo com a classificação de Davies (1964), sob domínio do regime de micromaré. A retração e progradação de areia nas áreas costeiras submetidas a um regime de micromarés, é principalmente resultante da dinâmica entre a quantidade e o tipo de suprimento de sedimentos, energia física induzida por ondas e mudanças no nível do mar (Toldo Jr. *et al.* 2005).

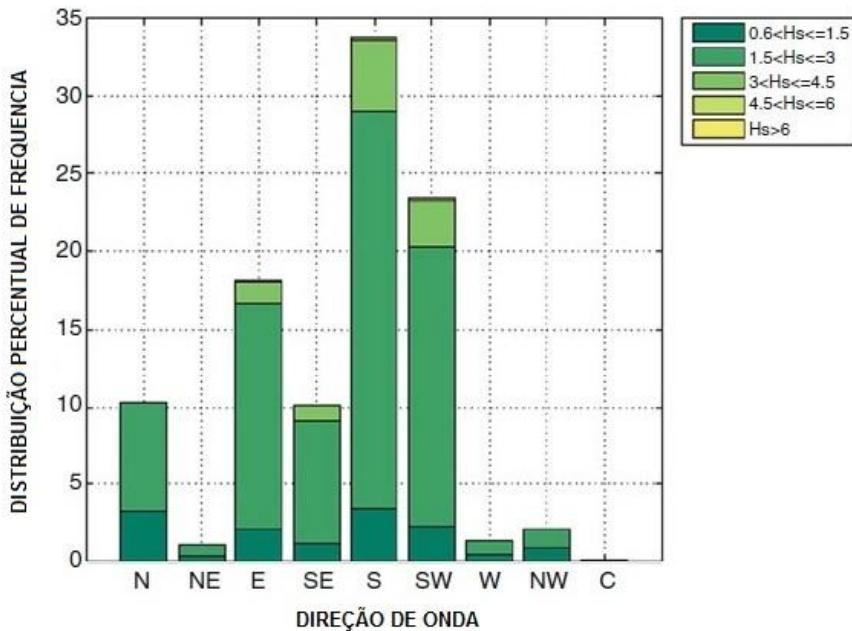


Figura 6. Altura e direção das ondas para a Ilha da Trindade a partir dos dados de reanalise do NOAA WWIII. Retirado de Calliari *et. al.* 2016.

## 2.4 Distribuição e características dos sedimentos

Devido à litologia variada e dos diferentes graus de exposição e consequentemente da energia de ondas, as praias apresentam certo grau de compartimentação apresentando características granulométricas e mineralógicas distintas (Calliari *et. al.*, 2016). As composições da sedimentologia nas diferentes praias refletem a mineralogia das rochas adjacentes, constituídas principalmente de piroclastos com elevadas porcentagens de minerais pesados (Almeida, 1961; Castro & Antonello, 2006; Clemente *et al.*, 2006).

O processo deposicional é resultado do transporte sedimentar de curta distância entre a rocha fonte e a praia (Almeida, 1995; 1961). Ocorrem também sedimentos ricos em carbonatos biogênicos ao longo do litoral (Clemente *et. al.*, 2012). Apesar dos escassos 13 km<sup>2</sup> de área, a ilha possui praias de areias escuras ricas em minerais primários de origem vulcânica inexistentes em toda

a extensão litorânea brasileira em seus 8.500.000 km (Souza & Schaefer 2011).

A ilha apresenta um total de dezesseis praias de naturezas variáveis, sendo poucas bem desenvolvidas com reserva de areia e seixos. Estreitas praias existem, sobretudo no litoral nordeste da ilha, onde também se desenvolvem recifes de algas calcárias. Os arrecifes calcários se alternam com diques de fonolito e aparecem pouco acima da superfície da água apenas nas marés vazantes. As praias apresentam características granulométricas e mineralógicas diferenciadas (Souza & Schaefer, 2011; Calliari *et. al.*, 2016).

Sedimentologicamente as praias podem ser formadas por diferentes composições e granulometrias, sendo esta última variável em combinação com o clima de ondas incidente, o que determinam a morfologia do perfil praial (Hoefel, 1998). Os sedimentos unimodais exercem importante efeito sobre o perfil praial, com grãos mais finos tendendo a repousar em equilíbrio em pendentes suaves, enquanto que o incremento do diâmetro do grão gera perfis de equilíbrio gradualmente mais íngremes (Komar, 1976; Pethick, 1984). Com relação à granulação do material sedimentar foi constatado que as praias voltadas para o quadrante oeste-sudoeste são compostas por areia média a grossa. Já na face litorânea voltada para leste-nordeste, as areias variam de fino a médio. Comparando ambas as faces litorâneas, foi observado que nas praias do segmento Oeste / Sudoeste, os sedimentos são mais grossos (Castro, 2005), o que favorece o aumento na declividade do perfil praial.

Castro & Antonello (2006) evidenciaram o acúmulo de minerais pesados na parte superior da face da praia, devido a energia do espraiamento das ondas promoverem a seleção hidráulica das partículas sedimentares de acordo com a densidade dos grãos, nas praias do segmento Sudoeste e Nordeste da ilha. As maiores densidades tendem a ser depositadas na linha de preamar máxima. Os autores ressaltam que as praias voltadas para Nordeste-Leste, apresentam menor probabilidade de processos erosivos, ao passo que a face voltada para Sudoeste-Oeste, a possibilidade de erosão costeira é maior em decorrência da linha de costa se encontrar exposta a ondas de tempestades provenientes principalmente de Sudoeste, comprovado pela presença de escarpas de praia bem caracterizadas. No entanto, é necessária uma análise

mais detalhada dos ângulos de incidência, processos de transformação de ondas e correntes predominantes em associação à topografia e a composição granulométrica para que se possa melhor compreender o comportamento dos sistemas praiais.

Na face Leste da ilha ocorrem depósitos eólicos móveis (dunas) provenientes exclusivamente das contribuições de recifes algálicos, materiais piroclásticos e tufo vulcânicos (Castro, 2009).

#### **2.4.1 Praias predominantemente arenosas**

A Ilha da Trindade apresenta poucos locais com suficiente reserva de sedimentos na forma de areia e seixos que caracterizam praias bem desenvolvidas. As praias de areia ocorrem predominantemente na costa Leste, enquanto praias compostas de areia e seixos predominam no lado ocidental e são geralmente de contorno levemente côncavo. Apresenta comprimento total da linha de costa de 21,7 km, dos quais 16,7 km (76,7%) são rochosos e 5,1 km (24%) são compostos por areia, de forma que as praias predominantemente de areia ocupam 1,2 km (24%), as praias compostas de areia e seixos compreendem 1,94 km (38%) e os seixos e pedregulhos ocupam 1,9 km (38%). Os seixos nas praias voltadas para o lado oriental apresentam aspecto de seixos rolados, enquanto que as das praias voltadas para o Brasil (O) são irregulares, com as bordas abruptas, raramente arredondadas. Como padrão geral, as praias são compostas principalmente por areia variando de média a grossa apresentando fragmentos calcários numa gama de 19-66% (Figura 7), no qual aumentam em conteúdo em direção à costa (Alves, 1998; Castro, 2006 ; Calliari *et. al.*, 2016).

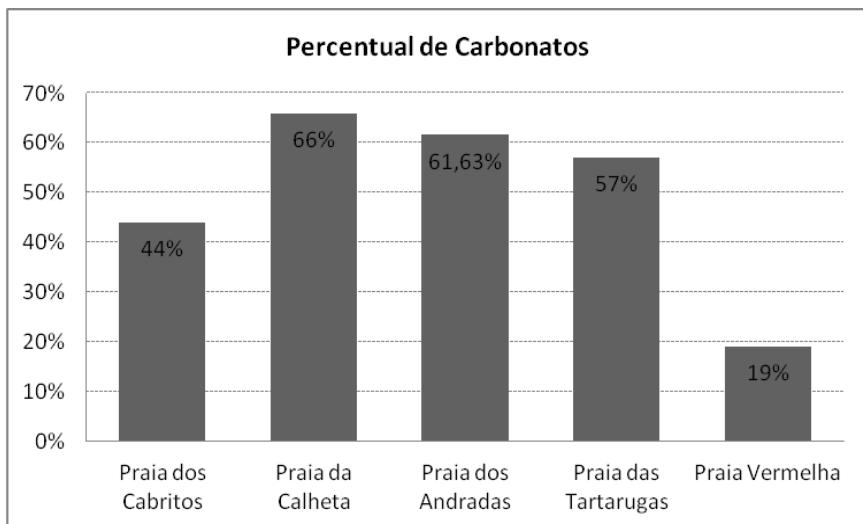


Figura 7. Percentual de carbonato de cálcio entre as praias do segmento Leste (Calliari, et. al., 2016).

As praias que apresentam maior quantidade de sedimentos caracterizados pelo tamanho de grão areia são: Cabritos, Calheta, Andradas, Tartarugas e Vermelha. Com base na quantidade de minerais claros e escuros presentes na fração areia, as praias diferenciam-se em praias de areias escuras, de areias mistas e de areias claras. Nas praias mais escuras predominam os minerais máficos (magnetita, ilmenita, clorita, serpentinas, tremolita e titanita) além dos minerais félscicos pirofilita e aragonita de origem vulcânica e nas mais claras o material carbonático de origem biogênica (fragmentos de algas calcárias, moluscos e outros organismos). É notável a inexistência de areia constituída por grãos de quartzo os quais predominam nas praias continentais ao longo da costa brasileira (Souza & Schaefer, 2011).

A porção leste/sudeste da ilha apresenta praias mais bem desenvolvidas, estando exposta a alta energia de ondas provindas do quadrante Sul. O grau de embaimento existente em cada praia ao longo da costa resulta em uma atenuação e refração de onda diferencial. A presença de recifes de algas calcária e formações rochosas representam controles topográficos e fontes de sedimentos adicionais para tal, os quais influenciam diretamente a energia de ondas e a hidrodinâmica local. Nota-se que as praias dominadas por ondas apresentam características refletivas modificadas pela presença destas estruturas naturais (Calliari et al, 2016).

Dentro da classificação global de praias em função do tipo de areia, das características das ondas e marés (Wright & Short, 1984), as praias arenosas da Ilha da Trindade classificam-se como estados mais representativos em refletivas a intermediárias e refletivas com terraço de baixa-mar (R+TBM) (Calliari *et. al.*, 2016). Essencialmente significa que as praias são compostas por areias médias a grossas, zona de arrebentação relativamente estreita com ondas do tipo mergulhante, face da praia apresentando acentuada inclinação fazendo com que grande parte da energia das ondas seja refletida de volta para o oceano, sendo modificadas pela maré (Figura 8).

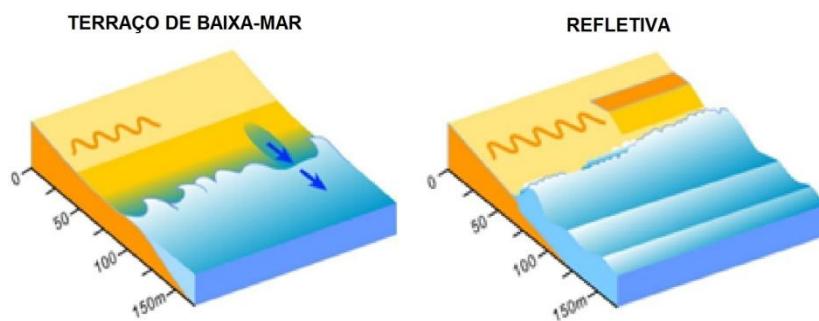


Figura 8. Estágios morfodinâmicos propostos por Wright and Short (1984). As praias arenosas da Ilha da Trindade são classificadas como refletivas + terraço de baixa mar.

Praias refletivas são favorecidas pela combinação de ambientes profundamente embaiados ou semiprotegidos, onde a refração e filtragem reduzem substancialmente a altura das ondas antes de chegarem à costa, em conjunto de material sedimentar relativamente grosso. O potencial de transporte de areia induzido por ondas no sentido *onshore*, em geral, é mínimo. O tamanho do grão com o qual a reflexão é persistentemente associada depende do grau de exposição da praia, sendo que, em ambientes abrigados, ocorrem praias compostas por areia fina a média, enquanto que as mais expostas, em condições de reflexão de alta energia, ficam restritas a praias de areia grossa e cascalho (Wright *et al.*, 1979, Wright, 1981).

As praias da porção oriental da Ilha da Trindade, apesar da presença de *beachrock* na face de praia e recifes de algas calcárias variando de 84 a 120m

de largura atuando como terraço de baixa-mar, exibem circulação celular dominadas por promontórios segundo o parâmetro proposto por Masselink & Short (1993), em função do grau de embaiamento (Figura 9), o que indica que a circulação é controlada pela topografia do entorno (Calliari et. al., 2016).

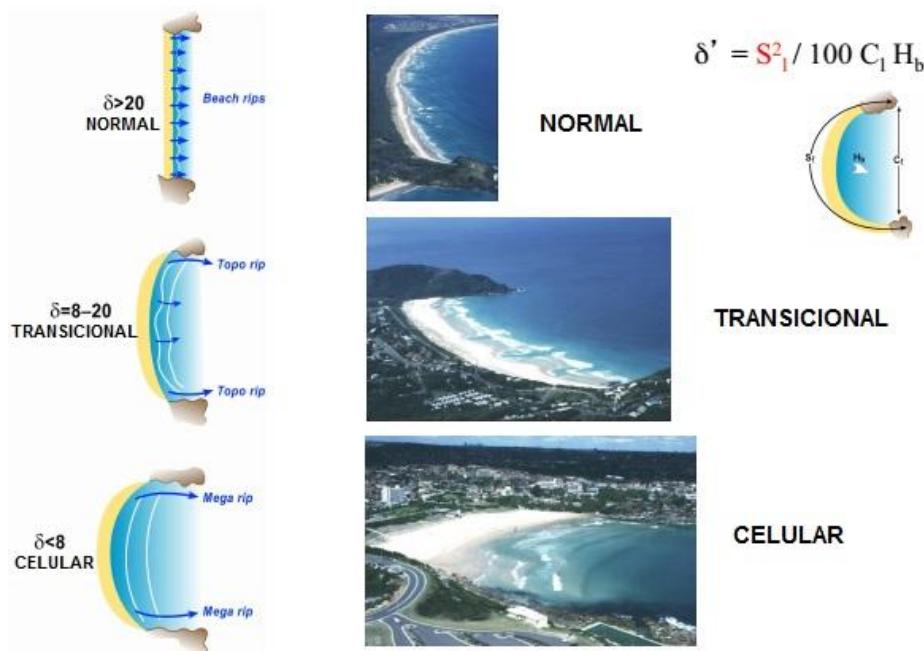


Figura 9. Parâmetro de embaiamento de praias proposto por Short & Masselink (1999).

A proteção eficaz oferecida pelas costas rochosas tem influência significativa na forma do perfil e na morfodinâmica das praias embaiadas. Características como comprimento da praia, a presença de correntes de retorno e bancos submersos, o estado morfodinâmico, a distribuição longitudinal do sedimento e a inclinação da praia são fatores extremamente importantes não podendo ser desconsiderados. Adicionalmente o controle estrutural aumenta ou limita certos processos hidrodinâmicos, como o transporte de sedimentos e a distribuição de energia nas praias (Short, 1999; Klein, 2004; Jackson et al., 2005; Loureiro, 2012)

Os diferentes sistemas praiais apresentam papel fundamental do ponto de vista ambiental, social e estratégico, tendo em vista a ocupação humana, desova de tartarugas na grande maioria das praias, desembarque constante de material para a comunidade científica e militar associados a esses ambientes.

## 2.4.2 Identificação e caracterização das praias arenosas

### Praia dos Cabritos

A Praia dos Cabritos está localizada na porção mais ao norte do segmento Leste da Ilha da Trindade com aproximadamente 550m de comprimento sendo composta segundo Souza & Schaefer (2011) por areia média de coloração mista (Figura 10) com presença de seixos e grânulos crescentes em direção ao mar.



Figura 10. Fração areia da Praia dos Cabritos de coloração mista. Foto: Lauro J. Calliari.

De acordo com Alves (1998) os seixos apresentam de 3 a 15 cm de diâmetro com superfícies bem lisas, que separa a faixa de areia calcária da água com os arrecifes. No arco praial dos Cabritos, próximo à ponta do Valado, Castro (2009) observou movimentos de blocos rochosos nas superfícies inclinadas, e em alguns casos, tais blocos se encontravam parcialmente submersos, destacando-se do talude devido à perda de apoio.

Na região da face de praia inferior, de pendente bastante íngreme, areia recoberta por seixos imbricados conecta-se com o recife de algas calcárias na zona de arrebentação, o qual confere certa proteção à mesma (Figura 11). Na porção superior do pós-praia o perfil é caracterizado por irregularidades devido principalmente ao processo de escavação para confecção dos ninhos pelas tartarugas verdes no momento da desova, denominadas "camas de tartarugas".



Figura 11. a- Vista geral da Praia dos Cabritos. b- Vista lateral da Praia dos Cabritos coberta por seixos.

Na Figura 12 podemos observar claramente a mudança na cobertura sedimentar do pós-praia em direção à zona de estirâncio ou face praial no qual apresenta menos de 45% de calcário biogênico em sua composição. A Praia dos Cabritos foi classificada por Calliari *et. al.* (2016) como refletiva com terraço de baixa-mar (R-TBM) de acordo com a classificação de Short (2006).

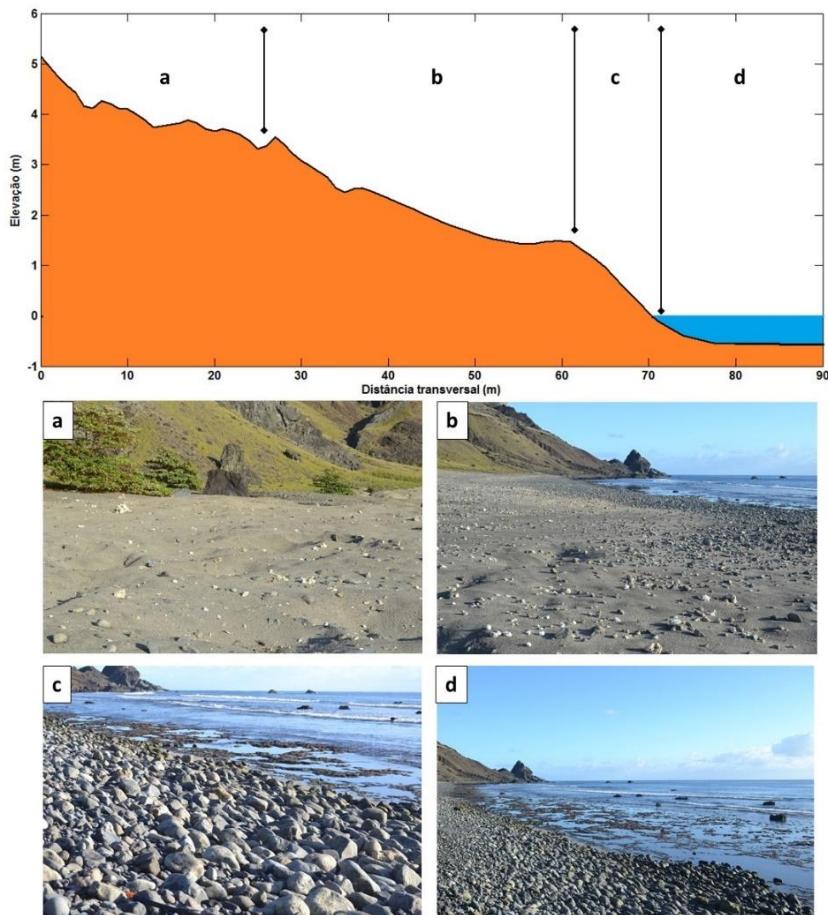


Figura 12. Perfil médio da Praia dos Cabritos. a- Parte superior do Pós-Praia. b- Parte do Pós-Praia onde ocorre a mudança na textura do sedimento. c- Face Praial recoberta por seixos. d- Recife de algas calcárias. Retirado de Calliari et. al. (2016).

### Praia da Calheta

Localizada na porção central do lado oriental da ilha e desprovida de estruturas contínuas na zona de arrebentação, porém dispondo de pronunciado costão rochoso na margem sul e esparsas rochas submersas que oferecem certa proteção contra incidência de ondas, a Praia da Calheta é amplamente utilizada para o desembarque do material via barco durante as expedições, estando diariamente ocupada apresentando maior fluxo de pessoas dentre as praias da ilha (Figura 13).

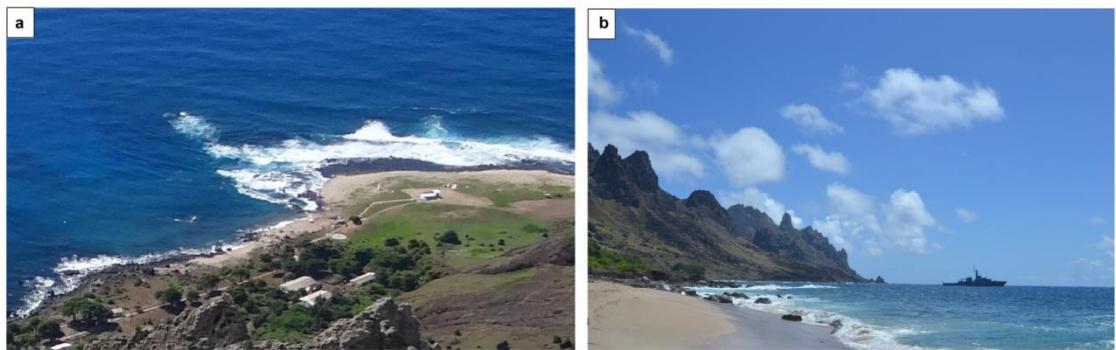


Figura 13. a- Vista geral da Praia da Calheta e afloramento rochoso. b- Vista lateral destacando presença de rochas esparsas na face de praia.

O pós-praia tem como seu limite superior a presença de uma pequena estrada e o heliporto de acesso ao POIT. O sedimento na Praia da Calheta é bem selecionado, de coloração em sua maioria clara (Figura 14) composta por areia média, com presença de areia grossa no topo da berma e na base da zona do estirâncio.



Figura 14. Fração areia da Praia da Calheta de coloração clara. Foto: Lauro J. Calliari.

Nesta pequena porção de areia com menos de 50m de comprimento de linha de costa, Calliari *et. al.* (2016) notaram mudança vertical acentuada no perfil da praia (Figura 15).

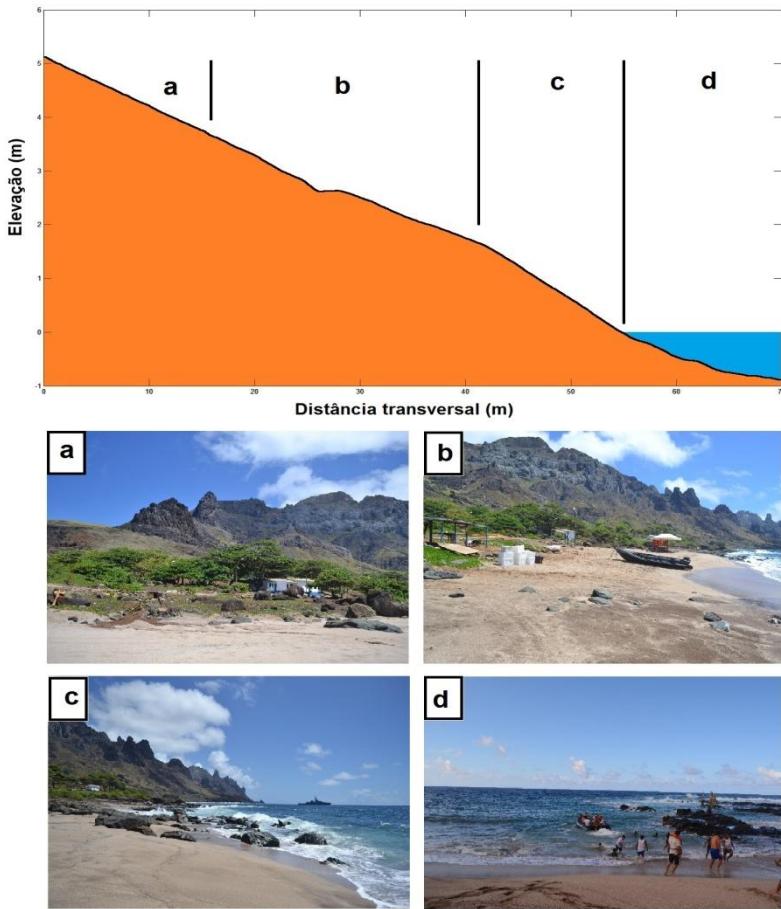


Figura 15. Perfil médio da Praia da Calheta. a- Parte superior do Pós-Praia limitada pela estrada de acesso. b- Pós-Praia com rochas esparsas. c- Face de praia de pendente íngreme com rochas expostas. d- Zona de desembarque.

Os perfis de praia variam na ordem de 1 a 2m caracterizando desta forma troca efetiva de areia entre a praia emersa e a zona de arrebentação, semelhante ao que ocorre nas praias continentais brasileiras. A Praia da Calheta foi classificada como intermediária a refletiva devido à ampla variação do perfil constatada ao longo dos anos (Calliari *et al.*, 2016).

Devido principalmente ao alto risco de acidentes durante o desembarque a Marinha do Brasil almeja num futuro próximo a construção de um píer de atracação, de forma que esta pesquisa visa contribuir com o planejamento na busca de diminuir os impactos ambientais respeitando a dinâmica e a biota local.

### Praia dos Andradadas

Situada entre a Praia da Calheta (a oeste), separada por afloramento rochoso de aproximadamente 750 metros de comprimento, e a Praia das Tartarugas (a leste), a Praia dos Andradadas (Figura 16) possui aproximadamente 200 metros de comprimento, apresentando segundo Souza & Schaefer (2011) derrames de analcita-ankaratrito dispersas na zona de arrebentação atuando como barreira natural às ondas provenientes do quadrante Nordeste e Sudeste.

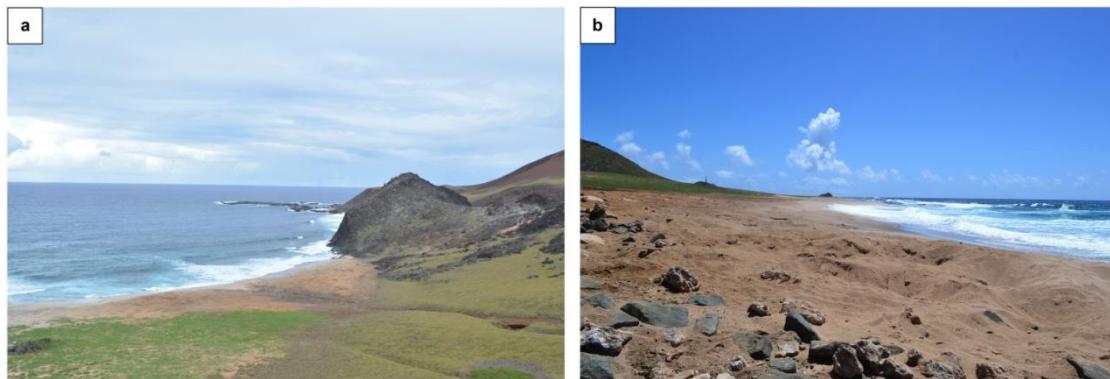


Figura 16. a- Vista Geral da Praia dos Andradadas. b- Vista lateral com sedimentos pobemente selecionados provindo de fluxos gravitacionais.

Os autores ressaltam que na porção mais interior aos referidos derrames na face da praia, os sedimentos caracterizam-se por uma granulometria variando de média a grossa, composto por olivinas, magnetitas, piroxênios, biotitas, anfibólios e rutilo (Figura 17).



Figura 17. Fração areia da Praia dos Andradas. Foto: Lauro J. Calliari.

Na parte superior do pós-praia os sedimentos são pobemente selecionados provindos de fluxos gravitacionais causados pela erosão das encostas dos morros próximos à praia (Figura 18). A mineralogia encontrada na Praia dos Andradas se assemelha em grande medida aos minerais encontrados na Praia das Tartarugas.

O pacote sedimentar da Praia dos Andradas apresenta aparente estabilidade devido à proteção exercida por promontórios e afloramentos rochosos, sendo comum observar uma corrente de retorno associada a uma laje rochosa não contínua na antepraia (Calliari *et al.*, 2016).

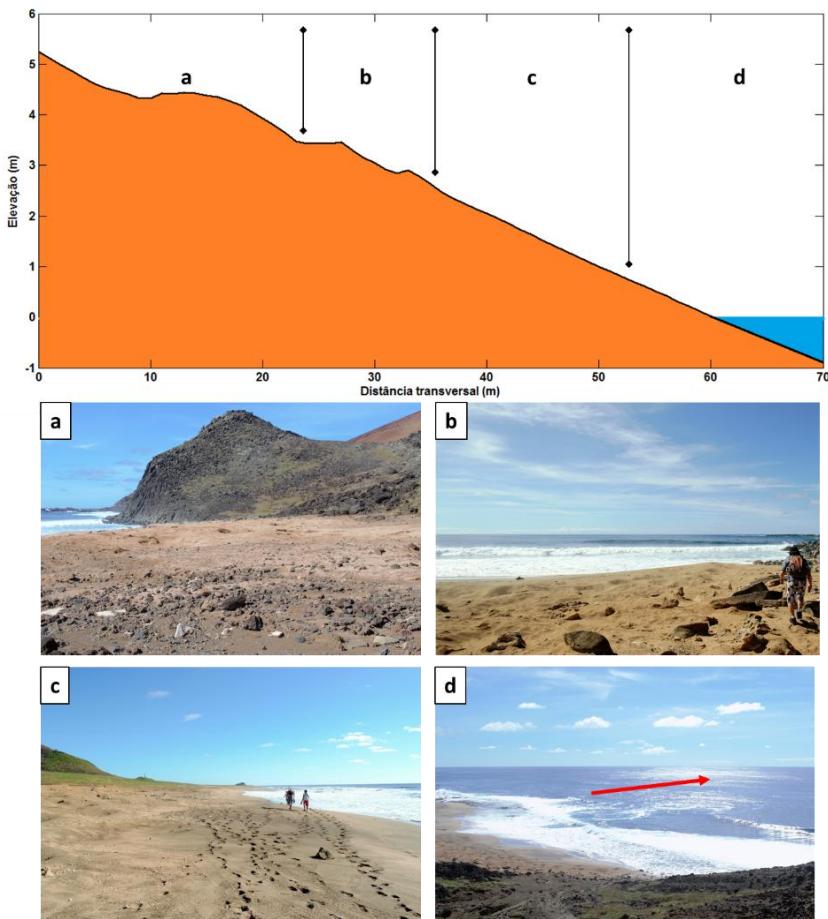


Figura 18. Perfil médio da Praia do Andrada. a- Pós-praia com sedimentos de tamanhos variados. b- Presença de cama de tartarugas no pós-praia. c- Presença de cúspides praiais. d- Zona do Estirâncio e seta vermelha indicando uma Corrente de retorno. Retirado de Calliari et. al. (2016).

### Praia das Tartarugas

Localizada ao sul da Praia dos Andradas, tem como característica o aporte de sedimentos de domos e necks de fonólito a oeste, tufo e derrames de ankaratritos do Vulcão do Paredão a leste e, material biogênico por parte de restos de conchas e corais transportados pelo mar (Almeida, 1961).

Com aproximadamente 310 metros de comprimento e 470 metros de largura a Praia das Tartarugas (Figura 19) oferece o maior estoque sedimentar dentre as praias da ilha apresentando um vasto campo de dunas móveis, e em conjunto com a Praia da Calheta e dos Andradas constituem as praias com maior percentagem de calcário biogênico (50-60%). Este ambiente abriga um dos maiores locais de reprodução da tartaruga verde do mundo.



Figura 19. a- Vista Geral da Praia das Tartarugas. b- Vista lateral evidenciando a presença de *beachrock* e fragmentos de antigos recifes na face de praia de pendente bastante íngreme.

A praia, ao que tudo indica, não apresenta troca significativa de sedimentos entre zona emersa e zona de arrebentação devido principalmente à presença de estruturas naturais contínuas representadas por recifes de algas calcárias (*reef flats*) e diques de rochas mais resistentes bem como arenitos (*beach rock*), os quais afloram durante a maré vazante, com largura variando entre 60 e 90m. O *foreshore* inferior é composto por areia (Figura 20), fragmentos de rochas e minerais pesados parcialmente cobertos por lajes de *beach rock*.

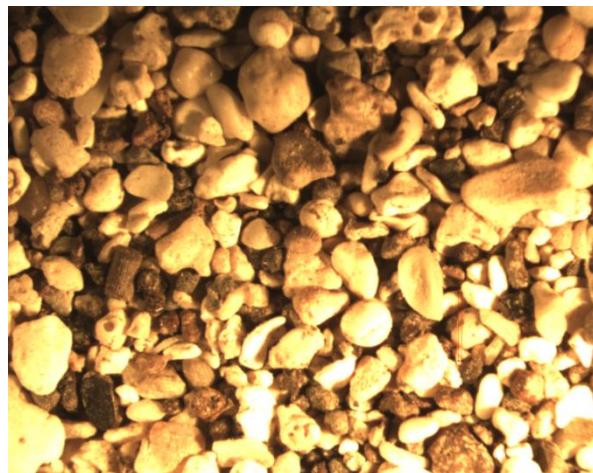


Figura 20. Fração areia da Praia das Tartarugas de coloração clara. Foto: Lauro J. Calliari.

Durante a maré baixa as ondas quebram sobre o recife proporcionando características intermediarias a praia (Figura 21).

Informações fornecidas por pesquisadores indicam que ao largo do *reef flat* a profundidade aumenta subitamente, o que dificulta que o sedimento

transportado durante eventos de alta energia para além do arrecife retorno com a posterior diminuição da energia de onda (Calliari *et. al.*, 2016). Durante operações de mergulho foi possível notar a presença de esparsos depósitos de areia ou mesmo ausência na região de antepraia e zona de arrebentação.

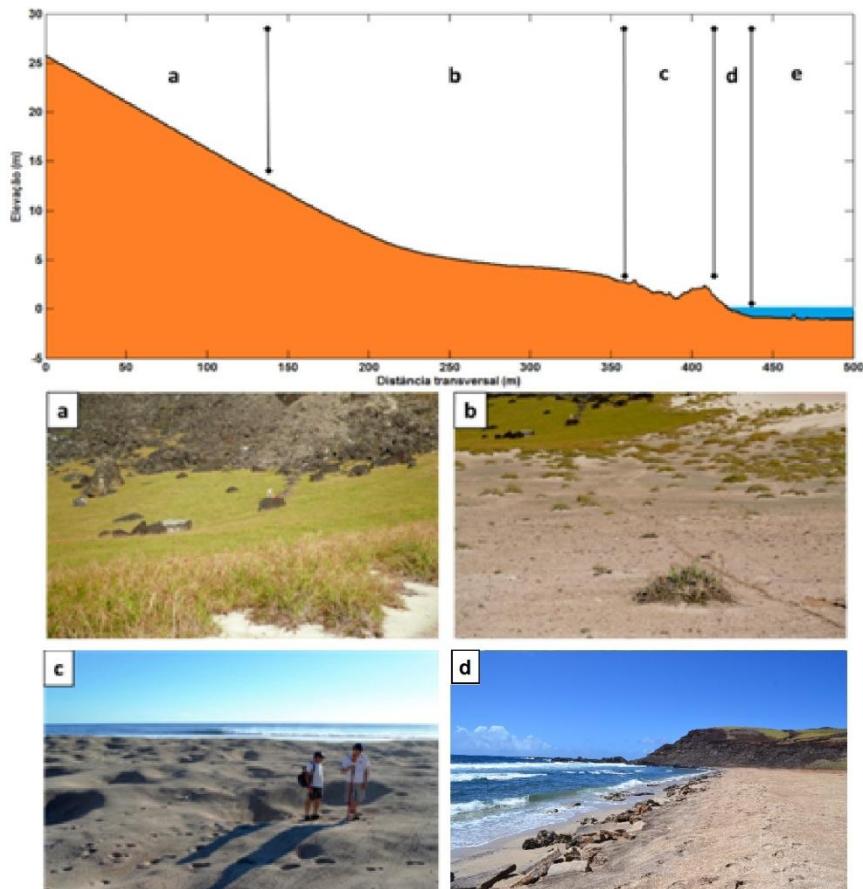


Figura 21. Perfil médio da Praia das Tartarugas. a- Região superior ao pós-praia com vegetação permanente. b- Região superior ao pós-praia com vegetação espaçada e pacote sedimentar eólico. c- Pós-praia com camas de tartarugas. d- Zona do Estirâncio com a presença de laje rochosa. Modificado de Calliari *et. al.* (2016).

À primeira vista, as principais modificações ocorrem de forma restrita no imenso pós-praia principalmente pela atuação de ventos de sudeste e pela ação de tartarugas que cavam revirando sedimentos para confecção dos ninhos, representadas por alterações topográficas significativas os quais puderam ser bem observadas nos perfis longitudinais (Castro & Antonello, 2006; Castro, 2009; Calliari *et al.*, 2016).

### Praia Vermelha (ou do Túnel)

Localizada na porção mais a leste do lado oriental da ilha e abrigado por promontórios e blocos rochosos na parte submersa da antepraia, a Praia do Túnel possui aproximadamente 330 metros de comprimento com pendente bastante inclinada (Figura 22).

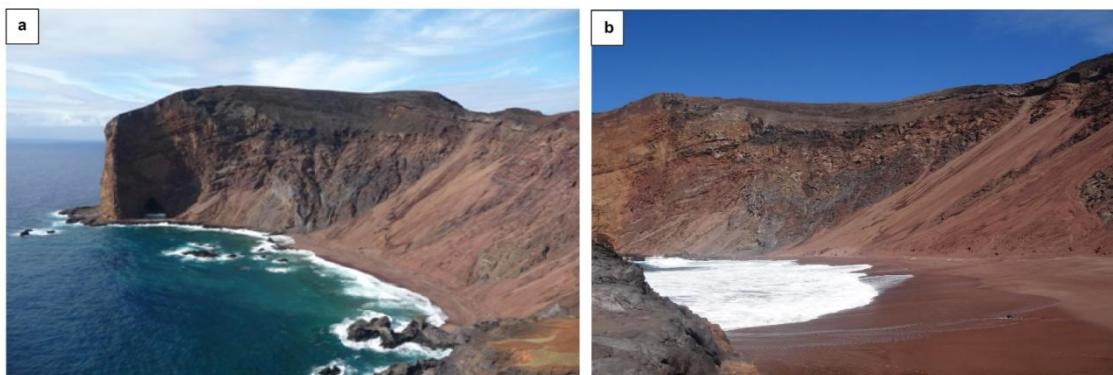


Figura 22. a- Vista geral da Praia Vermelha. b- Vista lateral evidenciando alta declividade.

Esta praia é caracterizada pela coloração avermelhada de suas areias (areia escura), com percentual de calcário biogênico inferior a 20% sendo formadas por minerais maficos e félsicos influenciadas predominantemente por piroclastos e derrames de ankaratrito material poroso e de fácil desagregação física (Figura 23), garantindo à praia um grande e constante aporte de sedimento (Souza & Schaefer, 2011; Calliari *et. al.*, 2016).

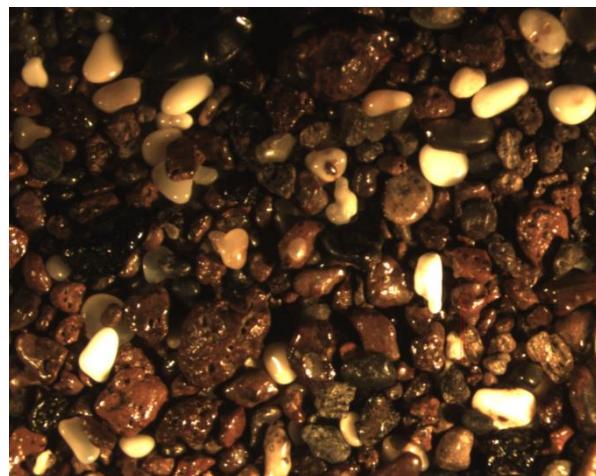


Figura 23. Fração areia da Praia Vermelha de coloração escura. Foto: Lauro J. Calliari.

Como consequência da alta declividade a quebra de onda do tipo mergulhante ou mesmo ascendente ocorre próxima à linha d'água, resultando em fluxos de subida e descida (*backwash*) muito forte oferecendo risco a banhistas. A presença de cúspides praiais é frequente com espaçamentos entre 35 e 50m (Calliari et. al., 2016), como evidenciados na Figura 24.

Castro (2009) verificou a ocorrência de movimento de massa (*landslides*) em superfície, induzido principalmente por gravidade, na vertente sudeste da Praia do Túnel.

Distância Transversal (m)	Elevação (m)
0	6.5
10	5.0
20	3.0
30	2.0
40	1.5
50	0.5
60	0.0

Figura 24. Perfil médio da Praia do Túnel. a- Aventais de talude. b- Pós-praia com a berma de tempestade. c- Pós-praia com berma de tempo bom. d- Zona do Estirâncio. Modificado de Calliari et. al. (2016).

53

# **Capítulo III: Objetivo Geral**

**A**nalisar o comportamento morfodinâmico das praias que compõem o segmento leste da ilha da Trindade, abrangendo as praias Cabritos, Calheta, Andradas, Tartarugas e Vermelha.

## **3.1 Objetivos Específicos**

- Investigar como a morfologia das praias varia em função do regime hidrodinâmico verificando a existência de sazonalidade em seu comportamento.
- Determinar os principais parâmetros morfométricos dos sistemas praiais.
- Verificar a influência da batimetria *offshore* na transformação de ondas.
- Caracterizar o grau de risco costeiro associado a cada praia.

# **Capítulo IV: Materiais e Métodos**

## **4.1 Levantamento dos dados**

Foram realizadas cinco expedições por meio do Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) com o apoio da Marinha do Brasil, através do Programa de Pesquisas Científicas da Ilha da Trindade (PROTRINDADE) entre 2013 e 2016. Cinco sistemas praiais foram selecionados para a realização do monitoramento costeiro sendo: Praia dos Cabritos, Praia da Calheta, Praia dos Andradadas, Praia das Tartarugas e Praia Vermelha, localizadas entre os setores Norte (N) e Sudoeste (SO) na porção oriental da ilha. Posteriormente foram coletadas amostras de sedimentos em conjunto de perfis topográficos transversais, fundeio do equipamento ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) para aquisição dos dados hidrodinâmicos e observações visuais da morfologia praial.

A Figura 25 representa o esquema de procedimentos metodológicos e abaixo uma descrição detalhada das metodologias.

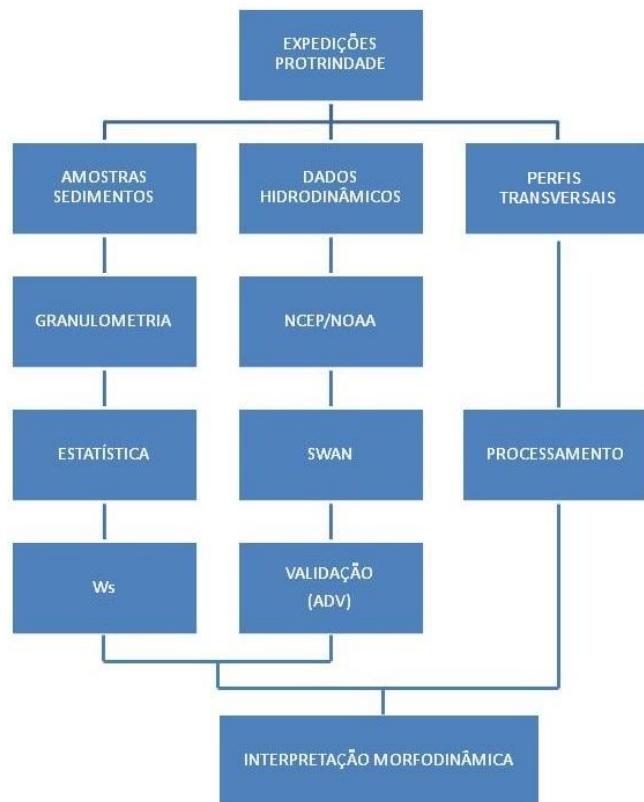


Figura 25. Organograma indicando os procedimentos realizados para a presente pesquisa.

## 4.2 Coleta e análise dos sedimentos

Amostras superficiais ao longo de todo ambiente praial foram coletadas transversalmente a praia simultaneamente ao levantamento topográfico nos diferentes sistemas praiais.

As amostras foram tratadas em laboratório por procedimento padrão. Os sedimentos foram lavados sucessivas vezes com água destilada para retirada do excesso de sais solúveis, e posteriormente colocados para secagem em estufa. Após a lavagem e secagem, as amostras foram quarteadas, obtendo-se assim uma fração representativa de cada uma delas. Em seguida utilizou-se um conjunto de peneiras com intervalo de  $1/2 \text{ phi}$ , de acordo com a escala granulométrica de Wentworth (1922), e posterior pesagem da quantidade de material retido em cada peneira. O material retido foi pesado e os resultados foram tabelados e analisados com relação à granulometria e percentual de

carbonato de cálcio. Os dados foram então introduzidos no software SYSGRAN para obtenção dos parâmetros estatísticos e análises posteriores.

### 4.3 Velocidade de sedimentação e parâmetro *Ômega*

Para determinação da velocidade de sedimentação dos grãos, foi coletado material sedimentar com auxílio de uma pá na face de praia e amostra d'água em recipiente previamente ambientado. Em laboratório foi inserida em uma proveta com marcação a amostra d'água e calculado a distância do topo da superfície ao fundo ( $d(m)$ ). Foi umedecida a ponta de uma almofada do instrumento utilizado na proveta e, em seguida distribuído os grãos na mesma, posteriormente tocando a superfície d'água. As medições foram realizadas utilizando-se a classe modal da amostra (mais representativa). Na sequencia foi calculado por meio de um cronômetro o tempo ( $t(s)$ ) que o grão leva para percorrer o caminho até atingir o fundo, denominado velocidade de cimento do grão ou sedimentação, por meio da fórmula

$$V = \frac{d (m)}{t (s)}$$

Tendo em vista a mineralogia diferenciada das praias da ilha da Trindade e, de maneira a contribuir na caracterização dos tipos morfológicos predominantes, foram calculados os valores de *Ômega* ( $\Omega$ ) para três diferentes sistemas com base nas condições hidrodinâmicas modeladas: Praia da Calheta, Praia das Tartarugas e Praia Vermelha (Túnel), as quais representam bem a composição sedimentar das praias da porção oriental da ilha, sendo reproduzidas trinta vezes, para que se estabelecesse um valor médio representativo. Depois de obtido o valor médio ( $W_s$ ) foi inserido nos cálculos do parâmetro *Ômega* proposto por Dean (1973).

Utilizando o parâmetro *Ômega* Wright & Short (1984) estabeleceram uma relação entre o estado de uma praia e as características das ondas e dos sedimentos. Este parâmetro empírico e adimensional ( $\Omega$ ) tenta relacionar o

tamanho modal do grão com a energia de onda, indicando se um grão de areia colocado em suspensão pela passagem de uma onda se deposita ou não, durante o fluxo de água induzido pela ação de onda em direção à praia, auxiliando na diferenciação dos estados de praia, calculado por meio da fórmula

$$\Omega = \frac{H_b}{(w_s * T)}$$

Onde  $H_b$  é a altura da onda na arrebentação;  $w_s$  é a velocidade de sedimentação do grão na face da praia e  $T$  é o período do trem de onda. Segundo Short & Klein (2016) o valor de  $\Omega$  quantifica a contribuição relativa da altura e do período da onda e do tamanho do grão de sedimento (expresso como velocidade de queda do sedimento) à morfodinâmica da praia.

Wright *et al.* (1985) atribuíram valores médios de  $\hat{\Omega}$  para diferentes estágios de praia (Tabela 2), ressaltando a importância da variação temporal da altura de arrebentação ( $H_b$ ), em função dos processos de transformação com a propagação de ondas de águas profundas para águas rasas, de forma que, grandes variabilidades na altura de arrebentação, determinam sistemas praiais de ampla mobilidade, típicas de praias intermediárias, com grandes alterações variando entre estágios refletivos e dissipativos.

Tabela 2. Relação de equilíbrio entre estado praial e valor médio de  $\Omega$ . Retirado de Wright *et al.*, (1985).

ESTÁGIO DE PRAIA	$\hat{\Omega}$ MEGA ( $\Omega$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )
<b>Refletivo</b>	<1.5	-
<b>Terraço de Baixa-mar</b>	2.40	0.19
<b>Banco e praia</b>	3.15	0.64
<b>Transversal</b>		
<b>Praia e Banco Rítmicos</b>	3.50	0.76
<b>Banco Longitudinal</b>	4.70	0.93
<b>Dissipativo</b>	>5.50	-

Praias refletivas são representadas por valores inferiores a dois, com baixa altura de onda, granulometria grossa, pendente abrupta (declividade > 5°) e zona de surfe estreita; valores acima de seis são típicos de praias dissipativas, caracterizadas por pendentes suaves (1° - 2°), granulometria entre areia fina e muito fina e alta energia de ondas, sendo a zona de surfe bastante ampla; entre esses dois extremos estariam os estágios intermediários, entre eles o banco e cava longitudinal e o terraço de baixa-mar (Wright & Short 1984).

## 4.4 Modelagem numérica

Na busca de compreender as condições hidrodinâmicas inerentes a cada ambiente, a modelagem numérica foi aplicada na geração de séries de onda se propagando de águas profundas para zona costeira, considerando os processos de transformação de ondas atuantes em águas rasas. A modelagem foi utilizada como ferramenta de auxílio visando o estudo da variação da energia de ondas ao longo da costa (segmento leste), de forma a contribuir para análise do comportamento e evolução geomorfológica em planta e perfil dos ambientes praiais e posterior geração de diversos cenários hidrodinâmicos com diferentes regimes de ondas incidindo na região e suas respectivas considerações.

### 4.4.1 NWW3 (Wave Watch III)

Os dados de entrada foram extraídos do modelo operacional de reanálise para previsão de ondas NWW3 (NOAA WAVE WATCH III) do NOAA-NCEP desenvolvido no *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos da América. O modelo inclui os seguintes processos físicos: refração e deformação do campo de ondas devido a variações espaciais e temporais na profundidade e correntes médias, crescimento e decaimento das ondas devido

a ação do vento, interações ressonantes não-lineares, dissipação por "white capping" e fricção com o fundo. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Tolman (1999).

O banco de dados da NOAA (NCEP), disponibiliza gratuitamente no link: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves> resultados de simulações globais do modelo WWIII que têm como forçante de entrada resultados de reanálise de vento geradas pelo próprio NCEP.

Com o propósito de se obter informações sobre a ondulação incidente em águas rasas, foi necessário realizar simulações numéricas para propagar as características das ondas geradas pelo modelo WWIII (água profundas) para a região do entorno da ilha. O modelo numérico selecionado para tal foi o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*).

#### 4.4.2 SWAN

A definição do modelo SWAN está nas vantagens operacionais que o modelo oferece, sendo de utilização aberta (*freeware*), capacidade de modelar grandes áreas, execução em modo estacionário e não estacionário, além dos resultados dos parâmetros de ondas ocorrerem em cada ponto do domínio geográfico da área modelada.

O SWAN -*Simulating WAves Nearshore*- é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima baseado na equação para a conservação da energia de onda, desenvolvido na Holanda na *Delft University of Technology* utilizado para fornecer estimativas realistas de parâmetros de ondas em mar aberto e zonas costeiras influenciados por ventos, características do fundo e condições das correntes (Padilla-Hernandez & Monbaliu, 2001). É um modelo de ondas não-estacionário, de terceira geração, que descreve a evolução do espectro de duas dimensões em condições arbitrárias de vento, corrente, e batimetria. O modelo engloba todos os processos relevantes de geração, dissipação e interações onda-onda não lineares (Ris *et al.*, 1999).

Além dos dados de onda do WWIII foram utilizados dados de vento de reanálise também disponibilizados online pelo *National Center for Atmospheric Research & National Centers for Environmental Prediction* (NCAR / NCEP), no link: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>.

A batimetria utilizada consistiu em uma junção de cartas batimétricas da Marinha do Brasil (disponível em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-nauticas/cartas.html>), sendo estas 2101 e 2102, abrangendo a região do entorno da ilha e a zona da Enseada dos Portugueses respectivamente. Os dados batimétricos foram digitalizados com a utilização do *software* livre QGIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) licenciado sob a “*GNU General Public License*”.

Foram compilados 23.226 pontos batimétricos, e estes dados foram interpolados pelo método vizinho natural. Os contornos batimétricos posteriores foram extraídos dessa informação (Figura 26). Posteriormente, foi confeccionada a grade batimétrica a ser utilizada no processamento dos dados (Figura 27). Para a definição do tamanho ideal, foi realizado um teste de convergência, onde foi identificado como mais representativo o tamanho de 150 metros (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo das características da grade.

Número de célula longitudinal a costa	Numero de célula transversal a costa	Tamanho das células (m)
47	48	150

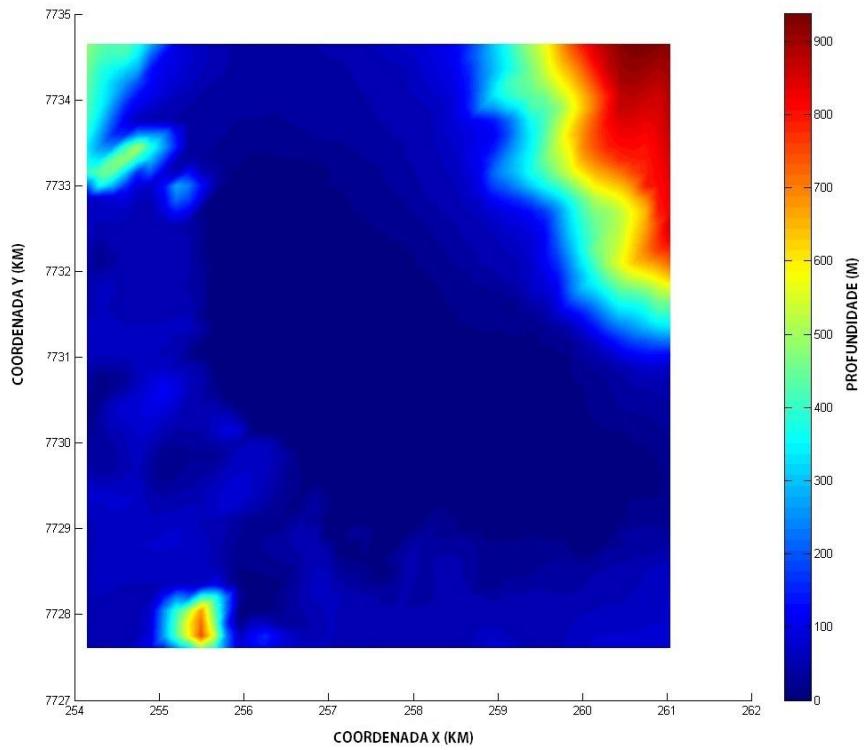


Figura 26. Batimetria utilizada na simulação pelo SWAN.

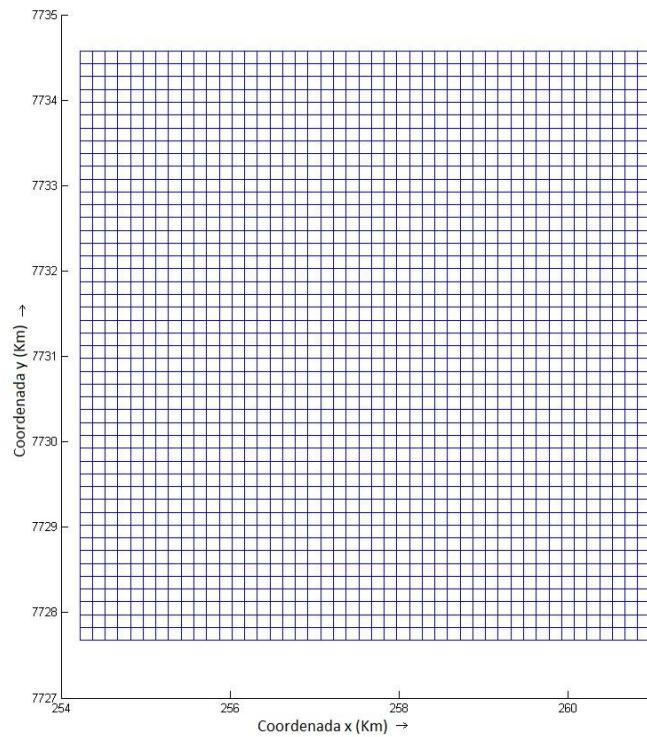


Figura 27. Grade utilizada na simulação pelo SWAN.

Para que os resultados extraídos do modelo representassem de forma mais realista as condições hidrodinâmicas, os resultados foram validados com

os parâmetros adquiridos por meio do fundeio de um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), em um ponto a 10 metros de profundidade, adjacente à zona de surfe defronte a antiga Cabrita na Enseada dos Portugueses, porção central do lado oriental da ilha. A validação do modelo foi feita através da comparação entre o resultado da simulação do SWAN com os dados medidos pelo ADV para altura significativa de onda ( $H_{sig}(m)$ ) e período ( $T(s)$ ) entre 10/04 a 24/05/2014.

#### Verificação de desempenho

Com intuito de quantificar o desempenho dos modelos numéricos, além das correlações lineares, foram utilizados neste trabalho alguns parâmetros comumente utilizados na bibliografia (Ris et al. 1999), sendo eles:

Bias: Erro médio – Média do resultado do modelo menos dados observados.

rmse: Erro médio Quadrático -

$$rms_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (X_n - Y_n)^2}$$

Onde  $X_n$  corresponde aos valores observados,  $Y_n$  aos valores simulados,  $n$  o número de observações.

SI: Scatter Index – Índice de espalhamento, definido como o erro médio quadrático normalizado pelo valor médio observado:

$$SI = \frac{rms_e}{\bar{X}}$$

Onde  $\bar{X}$  é a média dos valores observados.

MPI: Model Performance Index – Indica em que grau o modelo reproduz as modificações observadas nas ondas:

$$MPI = 1 - \frac{rms_e}{rms_c}$$

A definição de  $rms_c$  (de *changes*, em inglês) é análoga à do  $rms_e$ , no entanto, ao invés de utilizar o valor simulado ( $Y_n$ ), utiliza o valor de onda incidente ( $X_i$ ).

Para o modelo ideal,  $rms_e$  seria igual a 0 e o valor de MPI igual a 1, enquanto que para um modelo errôneo MPI teria valor 0.

#### **4.4.3 Aquisição e processamento dos dados hidrodinâmicos (ADV)**

Para reconhecimento da hidrodinâmica e validação do desempenho do modelo SWAN, foi instalado um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) Sontek (Figura 28) com sensor de pressão utilizado para determinação do regime de ondas em águas rasas, estudos das correntes longitudinais e transversais à costa e nível d'água, para compreensão dos processos morfodinâmicos locais.

Este equipamento calcula parâmetros da ondulação incidente a partir da medição da velocidade das partículas presentes na água através do princípio do efeito Doppler, utilizando transdutores acústicos.

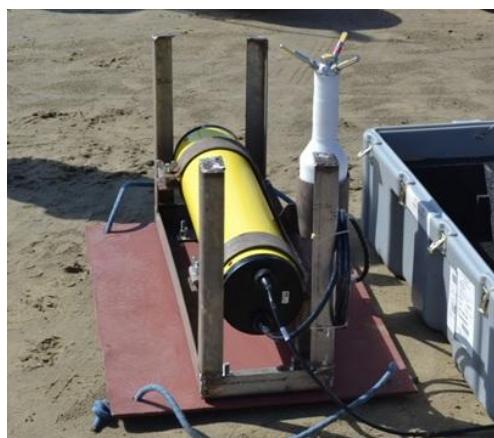


Figura 28. Equipamento utilizado na medição dos parâmetros hidrodinâmicos ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*).

As informações hidrodinâmicas locais referem-se à campanha de campo realizada no ano de 2014 em um ponto posicionado próximo à costa (Figura 29).

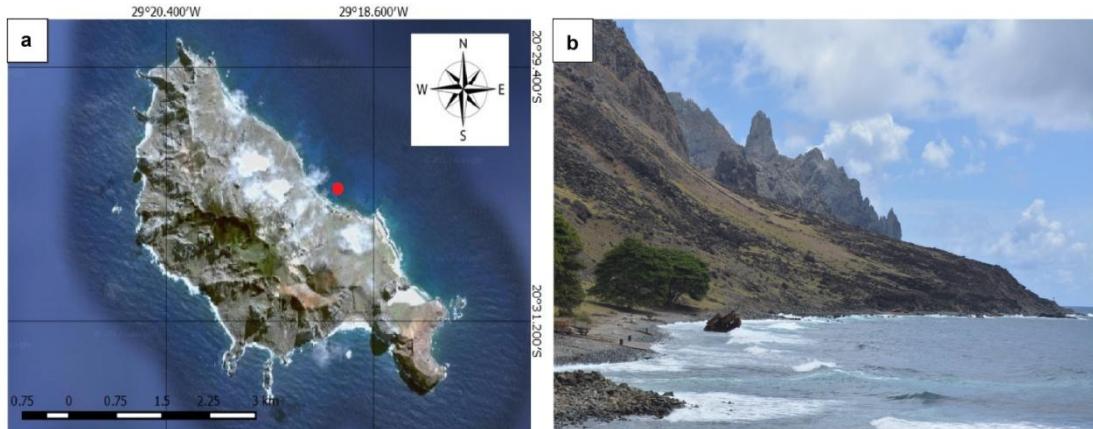


Figura 29. Local do fundeio do equipamento (ADV) na Enseada dos Portugueses. a-Vista aérea com ponto vermelho na posição do fundeio (Fonte: Google Earth) e b-Vista lateral Enseada dos Portugueses.

O equipamento foi fundeado a aproximadamente 10 metros de profundidade em frente à Cabrita (Enseada dos Portugueses) nas proximidades da região de desembarque dos navios da Marinha, permanecendo de 10/04 a 24/05/2014 (Figura 30), em que foram registrados altura significativa média e período médio de onda no valor de 0,74 m e 8,64 s, com picos máximos de 1,43 m e 15,2 s, respectivamente.

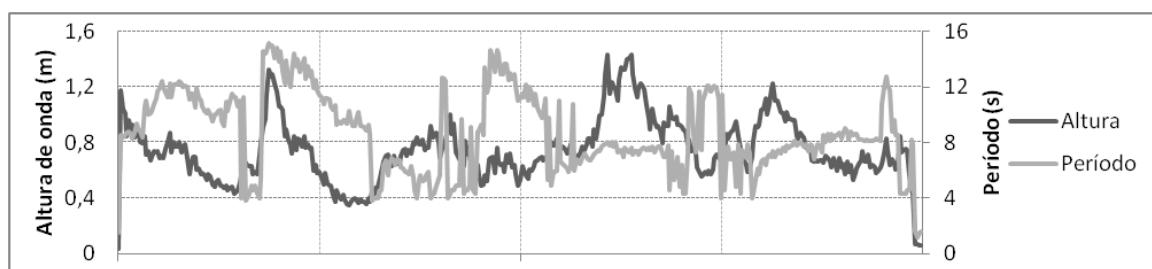


Figura 30. Altura (preto) e Período (cinza) das ondas medidas pelo ADV entre 10/04/2014 e 24/05/2014 na Enseada dos Portugueses.

A partir da Figura 31 é possível concluir que os resultados apresentam adequada representatividade da evolução do parâmetro analisado ( $H_{sig}$ ) estando em boa concordância entre as tendências de crescimento e

decaimento entre os valores reais e simulados, apesar de superestimar alguns picos e subestimar em outros. Para os resultados simulados pelo SWAN, a altura de onda significativa média foi de 0,6 m, relativamente próximo do valor médio mensurado pelo equipamento (0,7 m).

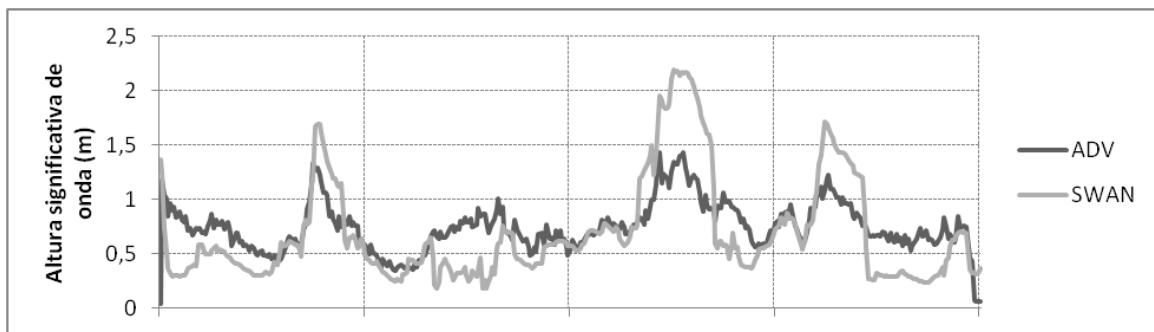


Figura 31. Comparação entre os dados medidos com o ADV (preto) e os simulados pelo SWAN (cinza) da altura significativa de onda ( $H_{sig}$ ) para o período entre 10/04 e 24/05/2014.

Na Tabela 4 está apresentada a correlação linear no gráfico de dispersão entre os dados medidos pelo ADV e os simulados pelo SWAN além dos parâmetros estatísticos para verificação do desempenho do modelo.

Tabela 4. Gráfico de dispersão entre os dados medidos (ADV) e os simulados (SWAN) à esquerda com valor da correlação. À direita os parâmetros estatísticos de desempenho do modelo. Bias, rmse, SI e MPI. \* Situações consideradas satisfatórias na bibliografia retir

Período de medição 10/04/2014 a 24/05/2014		Altura significativa	ADV	SWAN
Número de dados		413	413	
Valor mínimo (m)		0.038	0.17	
Valor máximo (m)		1.43	2.19	
Valor médio (m)		0.74	0.69	
Desvio Padrão		0.22	0.47	
Parâmetros de performance do modelo				
	Bias	rmse	SI	MPI
Norderneyer*	0.25	0.28	0.77	0.89
Haringvliet*	0.23	0.33	0.18	0.82
Goulart, 2014	0.22	0.30	0.36	0.79
Ilha da Trindade	0.05	0.12	0.16	0.95

De forma geral o modelo SWAN conseguiu reproduzir bem o clima de ondas para a Enseada dos Portugueses na Ilha da Trindade. Ao analisar os resultados foi verificado que as alturas significativas apresentam resultados mais aceitáveis em relação aos demais parâmetros. O valor do coeficiente de correlação de 0,82 para a altura significativa ( $H_{sig}$ ) de onda indica uma forte correlação positiva entre os dados, porém para o período ( $T_p$ ) foi moderada com valor de 0,51.

## 4.5 Perfis topográficos

Foram realizados no total aproximadamente 68 perfis praiais nas estações de monitoramento em diferentes épocas do ano, entre Junho de 2013 e Outubro de 2016. O levantamento dos perfis topo-batimétricos foi executado de acordo com o método de nivelamento expedito descrito por Birkemeier (1985). Os perfis foram realizados com auxílio de uma estação total Nikon Nivo 2C (Figura 32) e um prisma óptico, estacionada num mesmo ponto de referência e seguiram um mesmo alinhamento transversalmente a praia, a fim de serem comparados.



Figura 32. a- Estação total Nikon Nivo 2C. b- Levantamento dos perfis topográficos com estação total na Ilha da Trindade.

A elevação média do nível d'água foi calculada pela média dos valores de elevação na posição do espraiamento superior e inferior separadamente para cada praia. Sendo assim, o nível zero representa a posição aproximada

do nível médio do mar. Os perfis estenderam-se mar adentro até uma profundidade máxima de 2,5 m, limitada pela altura da haste do prisma óptico.

Os dados obtidos foram tratados e posteriormente analisados através de software padrão, para a interpolação dos dados de perfil de praia e cálculos volumétricos visando acompanhar a evolução espaço-temporal no estoque de sedimentos dos diferentes sistemas praiais.

Para verificar as tendências de longo prazo, foram realizadas as estimativas da diferença de volume ( $m^3 / m$ ) de sedimentos ao longo dos anos, identificando, por meio dos perfis praiais, a mobilidade dos diferentes sistemas. Os perfis foram comparados qualitativamente, a fim de identificar as principais alterações morfológicas ocorrentes. Posteriormente foram relacionados a intensidade dos eventos de acordo com os respectivos impactos na praia, em relação ao volume de areia ( $m^3 / m$ ) perdido ou acrescido.

Ainda com base nos perfis topográficos foram determinados com o propósito de definir a susceptibilidade ao clima de ondas predominante, os parâmetros morfométricos propostos por Wright & Short (1984).

# **Capítulo V: Resultados e Discussão**

**P**ara as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade foram analisadas as variações das condições hidrodinâmicas ao longo dos anos 2013 e 2014, por meio da modelagem numérica, como ferramenta de auxílio ao estudo da morfodinâmica, o qual fornece uma descrição espacial mais completa das forçantes próximas à costa. Isso permite identificar as direções preferenciais das ondulações, altura de onda e período predominantes na antepraia e as oscilações ocorrentes durante o ano, em razão das distintas configurações praiais. Posteriormente, foram calculados os parâmetros morfométricos e examinadas as características morfológicas reinantes inerentes a cada ambiente. Foram descritas as principais alterações costeiras em decorrência das variações das condições energéticas locais, definindo o grau de sensibilidade ao clima de ondas de cada ambiente, de forma a avaliar o comportamento morfodinâmico geral dos diferentes sistemas praiais.

## **5.1 Clima de ondas no segmento Leste**

Situada a Noroeste do anticiclone oceânico do Atlântico Sul (Almeida, 1961), a direção preferencial das ondas que atingem a ilha para o período analisado por meio da modelagem (2013-14) são provenientes principalmente do quadrante Sul (31%) e Sudoeste (23%), seguido de Leste com 20% indicando como mais energético o setor entre o Sudoeste (SO) e Leste (E), respectivamente, representado pela região compreendida entre os Farrilhões e a Praia da Calheta, destacada na Figura 33.

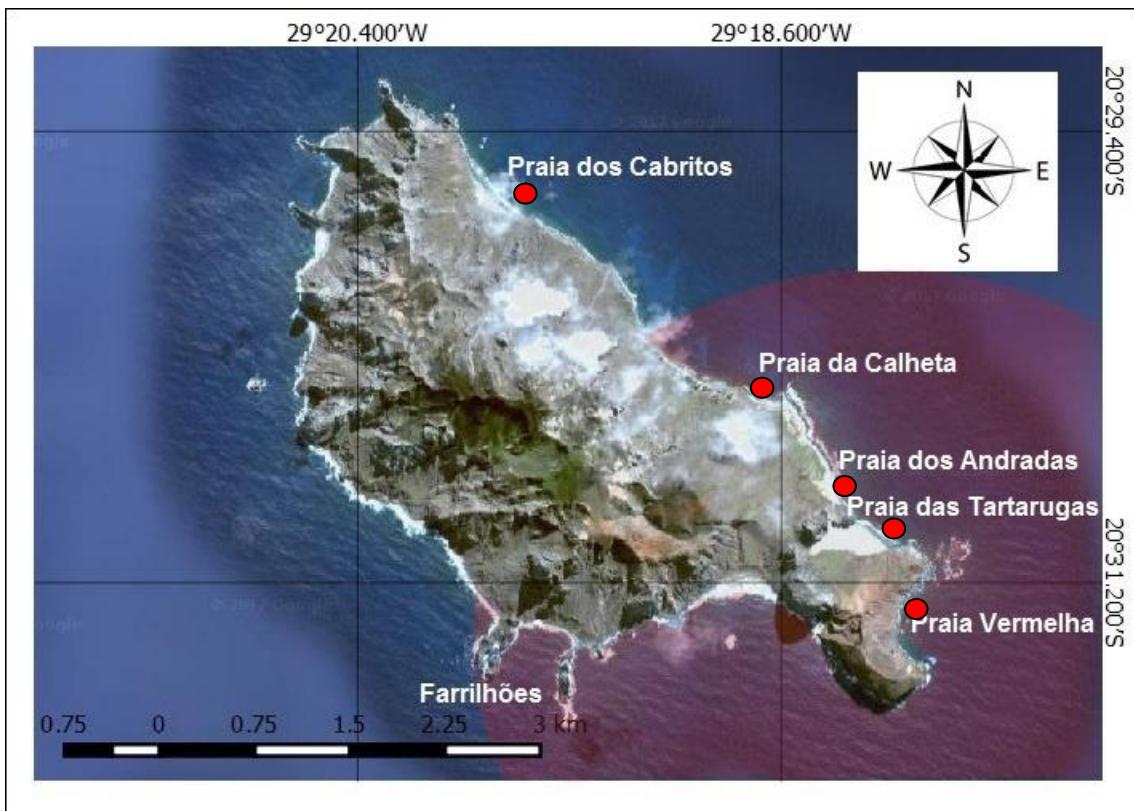


Figura 33. Vista aérea com região mais energética indicada em vermelho, entre setor Leste e Sudoeste da Ilha da Trindade, com destaque para os locais utilizados na extração dos dados do modelo SWAN (pontos vermelhos).

Em razão das variações nas direções preferenciais ocorrentes ao longo do ano (Figura 34) e processos de transformação, ao analisar separadamente o comportamento da altura significativa e período de onda entre as praias pode claramente ser notada ampla diferenciação em decorrência da configuração praial (isto é, topografia, posição do promontório, níveis de embaiamento, configuração e orientação da baía). Desta forma, pode ser verificada a variação de energia ao longo dos anos, assim como estimar a ocorrência e o tempo de permanência dos eventos, uma vez que a variabilidade do clima de ondas tem influência significativa na conformação da praia.

Estudando praias de caráter embaiado, no Sudoeste de Portugal, Loureiro *et al.* (2009) verificaram que a maior diferença nos impactos morfológicos sofridos durante eventos de alta energia está associada à sua posição relativa, uma vez que a orientação da praia tem grande influência sobre o impacto das ondas e sobre a erosão desencadeada.

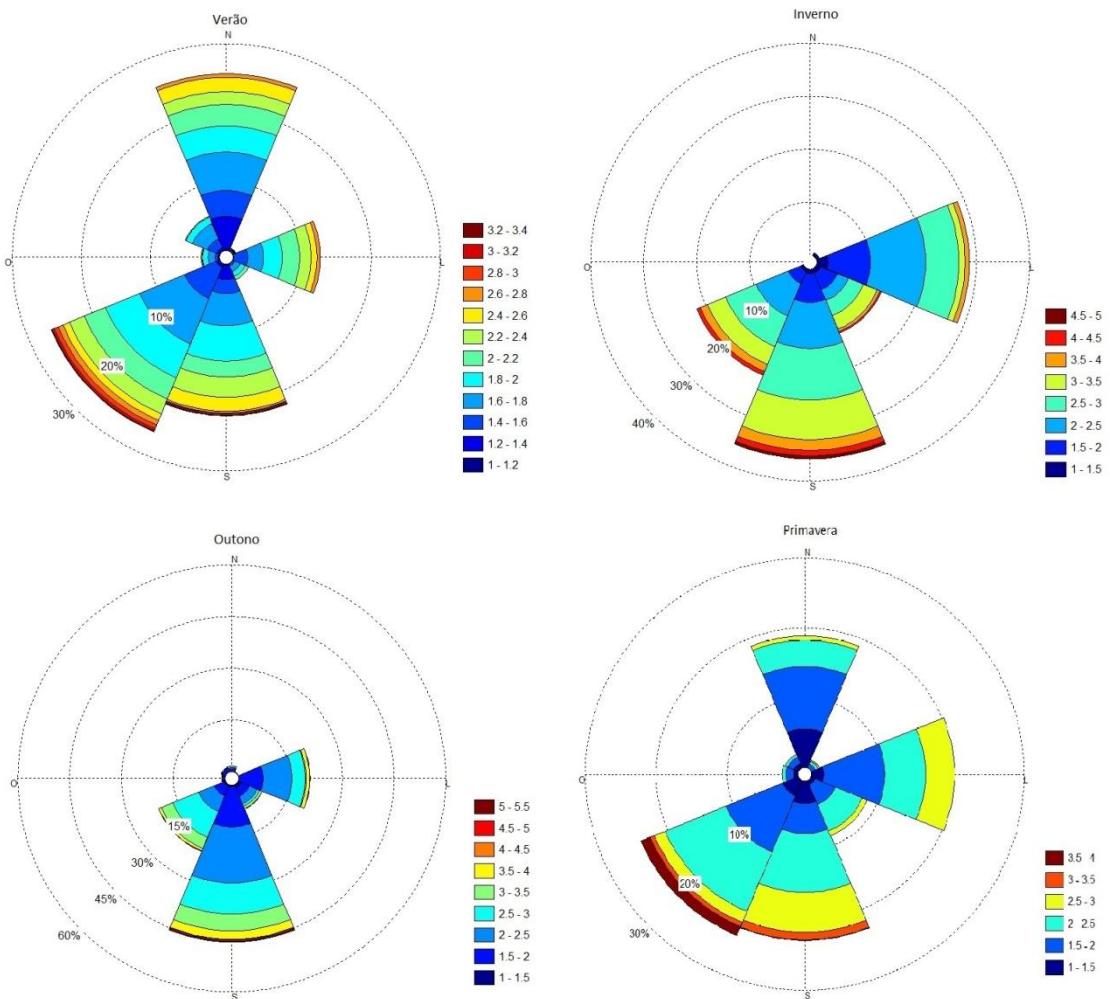


Figura 34. Direção e altura preferencial de ondas extraídos do WW3, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Ilha da Trindade.

Por meio de simulações numéricas da evolução morfológica de um sistema esquemático de praia embaiada, Daly *et al.* (2011) evidenciaram os padrões de circulação dentro da baía como sendo de importância significativa, pois influenciam diretamente a magnitude das correntes ao longo e transversais à costa, que, em última instância, determinam a resposta da linha costeira.

Com a utilização da modelagem de ondas foi possível verificar que os ambientes praiais do segmento Leste da ilha apresentam em sua maioria, sazonalidade da energia de ondas na antepraia, com diminuição da energia durante os meses de primavera-verão seguido de aumento expressivo para os meses de outono-inverno. Os dados foram extraídos das células mais próximas

da costa, na menor profundidade. Exceções ocorreram com a Praia da Calheta e a Praia dos Cabritos, localizadas na porção Central e Nordeste da ilha com baías voltadas à Norte (N) / Nordeste (NE) e Nordeste (NE) / Leste (L), respectivamente. As maiores médias da altura significativa de onda foram registradas no verão e primavera, respectivamente (Tabela 5), influenciada pela angulação da baía exposta a ondulações provindas do quadrante Norte e processos hidrodinâmicos locais. Estas praias posicionadas na porção Norte da ilha, estão provavelmente, sujeitas a maiores modificações sob o clima de ondas em decorrência das direções preferenciais (Sul e Sudoeste) e consequente atuação dos processos de transformação conforme as ondas alcançam águas rasas, promovendo alternâncias no clima local. Do mesmo modo, quando provindas do quadrante Norte (12,2 %), estes ambientes sofrem com maior intensidade experimentando picos de até 3,5 metros para a Praia dos Cabritos.

Tabela 5. Média entre as estações para altura significativa de onda para as praias do segmento Leste, nos anos 2013 e 2014 e direção da exposição das distintas praias.

	<b>Direção de exposição</b>	<b>Verão</b>	<b>Outono</b>	<b>Inverno</b>	<b>Primavera</b>
<b>Praia dos Cabritos</b>	NE / L	1,18	0,95	1,09	1,20
<b>Praia da Calheta</b>	N / NE	0,67	0,47	0,51	0,66
<b>Praia dos Andradas</b>	L	0,90	0,98	1,13	1,05
<b>Praia das Tartarugas</b>	NE / L	0,85	1,04	1,06	1,00
<b>Praia Vermelha</b>	SE / L	1,38	2,34	2,50	1,62

As praias posicionadas na porção ao Sul da ilha (Andradas, Tartarugas e principalmente a Vermelha), de forma geral, obedecem o aumento da intensidade durante o período de outono-inverno, devido à intensificação das frentes. Segundo informações do Comando do Primeiro Distrito Naval, entre os meses de abril e outubro, a Ilha sofre invasões periódicas de frentes frias provindas do polo, em geral, uma por semana.

Por meio da análise espectral do clima de ondas para as diferentes praias foi possível identificar a ocorrência média de picos, associados a eventos de alta energia, a cada dez dias, e picos ainda mais energéticos em intervalos de 20 dias aproximadamente. Durante as estações de primavera e verão, foi constatado, entre as praias, ocorrência média de entrada de três a quatro picos mensais de onda, sendo que, para os meses de outono-inverno, pode ser observado que os picos além de elevados e mais frequentes, têm maior tempo de permanência, ou seja, são mais duradouros, o que favorece a ocorrência de maiores alterações costeiras nestes períodos, entrando em média quatro a cinco por mês, tendo em vista que cada ambiente apresenta uma distribuição de alturas de onda particular. As ondas de tempestade são as principais responsáveis pela indução de mudanças em praias embaiadas (Carter, 1988). Eventos únicos de extrema magnitude produzem severa erosão nas praias, mas sucessivas tempestades podem induzir consequências que vão além de eventos de maior magnitude (Ferreira, 2005).

Além de irregularidades batimétricas, presença / ausência de recifes e promontórios rochosos, a disparidade entre praias pode ser amplificada em função do eixo principal Noroeste-Sudeste da ilha, proporcionando modificações ao clima de ondas das praias mais expostas ao Sul quando comparadas às praias posicionadas na porção Norte. Wright & Short (1984) destacam que quanto mais modificado pela morfologia da plataforma interna, menos variável tende a ser o clima de ondas em uma praia, indicando que a morfologia da plataforma interna e ante-praia pode resultar em um clima de ondas menos variável condicionando praias mais estáveis em perfil transversal. Entretanto, todos ambientes praias da Ilha da Trindade apresentam picos elevados esporádicos de altura significativa de onda ao longo de todo ano, como pode ser observado na Figura 35.

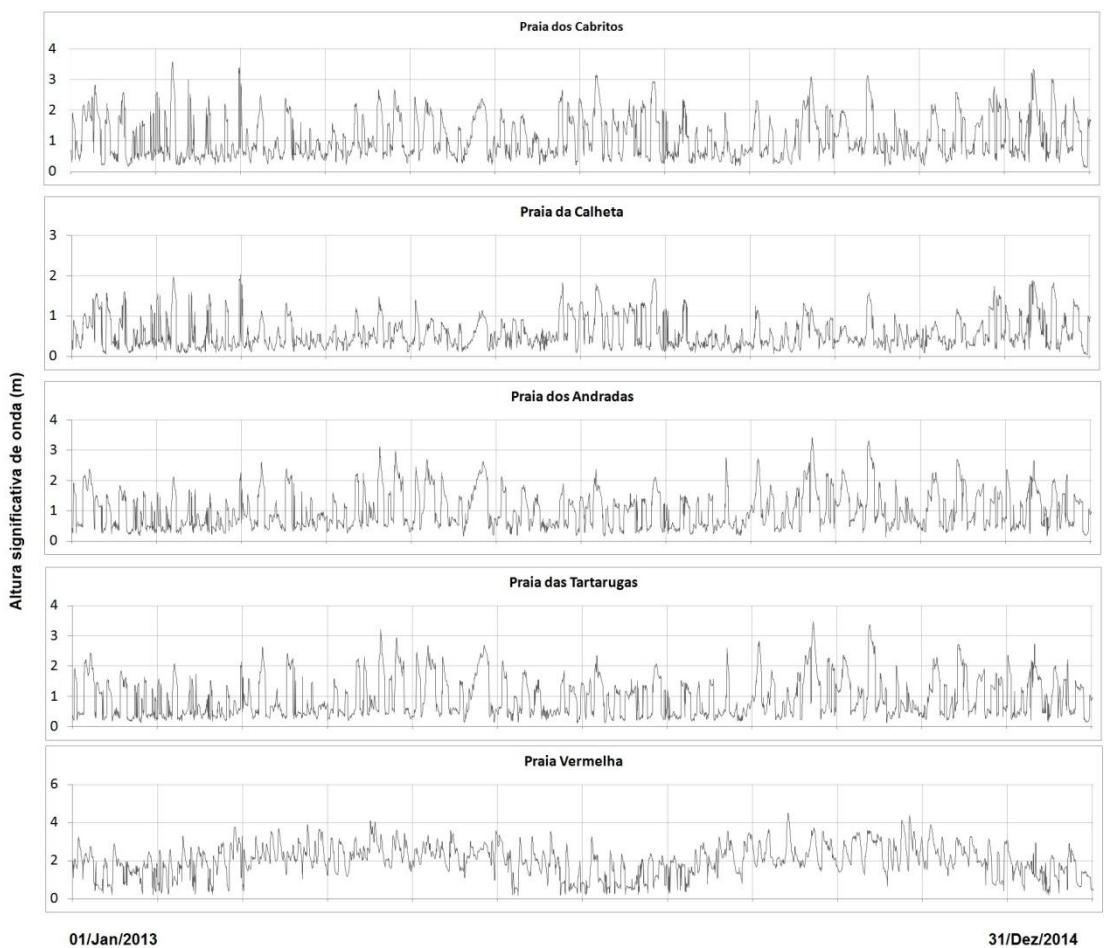


Figura 35. Comportamento da altura significativa de onda entre os anos de 2013 e 2014 para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.

As praias com a baía voltada ao quadrante Sudeste (SE) e Leste (L), posicionadas no intervalo entre a porção central Leste (L) e Sul (S) da ilha, representadas pelas praias dos Andradadas, Tartarugas e Vermelha, apresentam valores médios mais expressivos na altura significativa (entre 1 a 2m) e período de onda (entre 9 e 10s), em decorrência da ampla exposição a ondulações de maior prevalência e processos hidrodinâmicos locais. O comportamento diferencial do período de onda entre os ambientes têm influencia significativa na conformação da praia emersa, configurando fator de extrema importância no que tange ao estudo do comportamento morfodinâmico de praias, evidenciados na Figura 36.

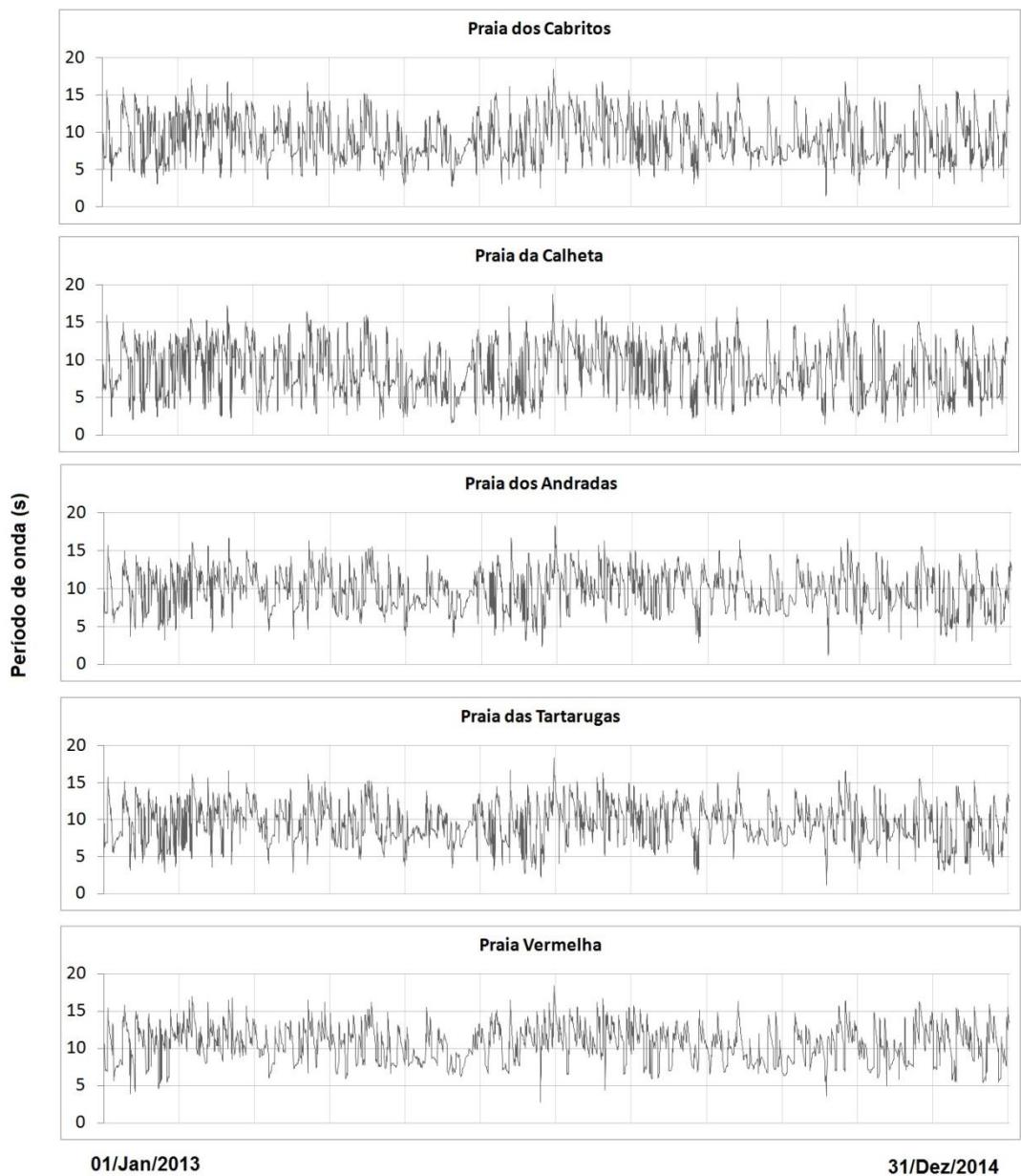


Figura 36. Comportamento do período de ondas entre os anos de 2013 e 2014 para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.

Diferenças no período de onda têm efeitos na troca de sedimentos da baía. Períodos de onda mais longos aumentam a quantidade de sedimentos transportados em direção a praia, e alimentam um avanço para o mar, da linha costeira. Isto pode ser explicado pelo aumento da tensão de cisalhamento do leito em águas mais profundas, o que aumenta o efeito de fluxo de ondas com período mais elevado (Daly *et al.*, 2011), ou seja, ondulações tipo swell condicionam perfis praiais acrescivos.

Embora menos frequentes, ondulações geradas por tempestades em regiões ao Norte da ilha bem como a ocorrência de processos de transformação das ondas provindas de outros quadrantes, possibilitam a chegada de ondulações de maior energia ao setor menos agitado de Noroeste (NW) a Nordeste (NE), representado pelo setor entre a Praia dos Cabritos e a Praia da Calheta, sendo esta a de menor energia (0,5 m). Neste intervalo, foi identificado energia superior de ondas para a Praia dos Cabritos tendo como valores médios da altura significativa e período de ondas, 1,1 m e 9,2 s, em razão da configuração das baías (Tabela 6).

Tabela 6. Alturas significativas e Períodos médios de onda para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade e respectivos parâmetros estatísticos entre os anos 2013 e 2014.

	<b>H<sub>sig</sub></b> <b>(m)</b>	<b>Período</b> <b>(s)</b>	<b>Desvio- Padrão da H<sub>sig</sub> (<math>\sigma</math>)</b>	<b>Coeficiente Variação da H<sub>sig</sub> (%)</b>	<b>Variância da H<sub>sig</sub></b>
<b>Praia dos Cabritos</b>	1,1	9,2	0,69	62	0,48
<b>Praia da Calheta</b>	0,5	8,6	0,39	67	0,15
<b>Praia dos Andradás</b>	1,0	9,7	0,63	62	0,40
<b>Praia das Tartarugas</b>	0,9	9,5	0,67	70	0,45
<b>Praia Vermelha</b>	2,0	10,6	0,83	41	0,68

Ao realizar uma análise estatística simples do padrão da altura significativa das ondas na antepraia, para os distintos sistemas, foram verificadas alternâncias que podem representar fatores que contribuem para mudanças expressivas na variabilidade da configuração praial.

Identificada como mais energética dentre as praias do segmento Leste, a Praia Vermelha apresenta tamanho médio da altura significativa de onda no valor de 2 m com picos de até 4 m ( $\sigma = 0,83$ ), seguido da Praia dos Cabritos,

Andradas, Tartarugas e por fim a Praia da Calheta, com predomínio de baixa energia ( $H_{sig}=0,5$  e  $\sigma = 0,39$ ) apresentando a menor variância (Var = 0,15) sugerindo menores dispersões da altura.

A análise do Coeficiente de Variação revela o mais reduzido valor para a Praia Vermelha, 41 % dos dados distantes da média, indicando maior homogeneidade, isto é, menor variabilidade do clima de ondas estando constantemente exposta à moderada-alta energia, seguido da Praia dos Andradas e Cabritos. As praias as quais apresentam o menor grau de concentração em torno da média, sugerindo maiores variabilidades do clima de ondas foram Tartarugas e Calheta, com valores do Coeficiente de Variação de 70 e 67 %, respectivamente, o que favorece maiores modificações na costa adjacente. Segundo Short (1999) a variabilidade do clima de ondas tem influência significativa na configuração das praias (favorecendo ou não modificações no perfil transversal), intensificando ou não determinados processos hidrodinâmicos.

As alturas significativas de onda inerentes a cada ambiente foram inseridas dentro das seguintes classes: <0,5m; 0,5 a 1,0m; 1,0 a 1,5m; 1,5 a 2,0m; 2,0 a 2,5m e >2,5m (Figura 37).

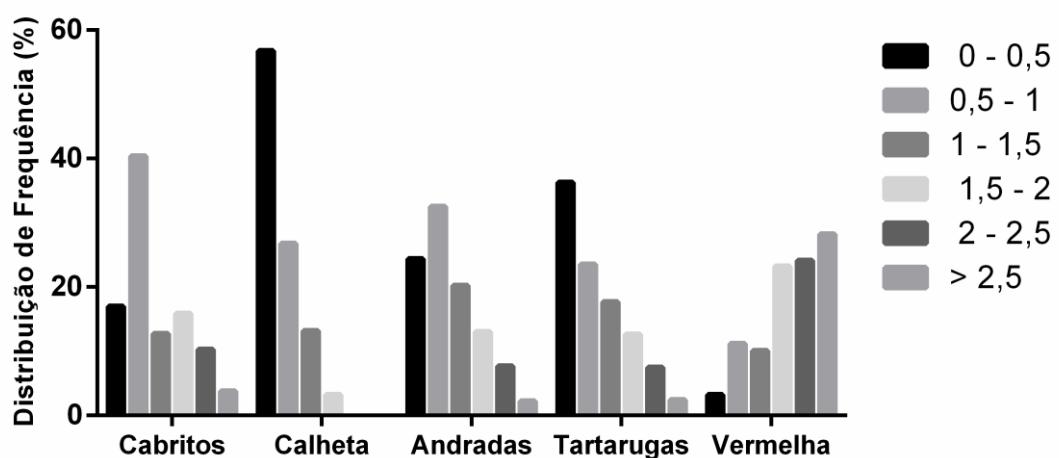


Figura 37. Distribuição percentual de classes (0,5m) da altura significativa de ondas para as diferentes praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.

Foram constatadas que, em decorrência das distintas configurações e dos processos de transformação de ondas resultantes, os ambientes praiais

apresentam distintas classes de onda, como evidenciados na distribuição percentual de frequência das alturas de onda mais ocorrentes. O gráfico destaca a menor variedade de classes de onda para a Praia da Calheta, aumentando gradativamente entre Andradas, Tartarugas, Cabritos e Vermelha, as quais recebem ondulações com ampla classe de altura ao longo do tempo, resultando em comportamento diferencial entre os sistemas.

Procedimento análogo foi realizado com os períodos de onda, inseridos nas seguintes classes: 0 a 5 s; 5 a 10 s; 10 a 15 s e 15 a 20 s (Figura 38).

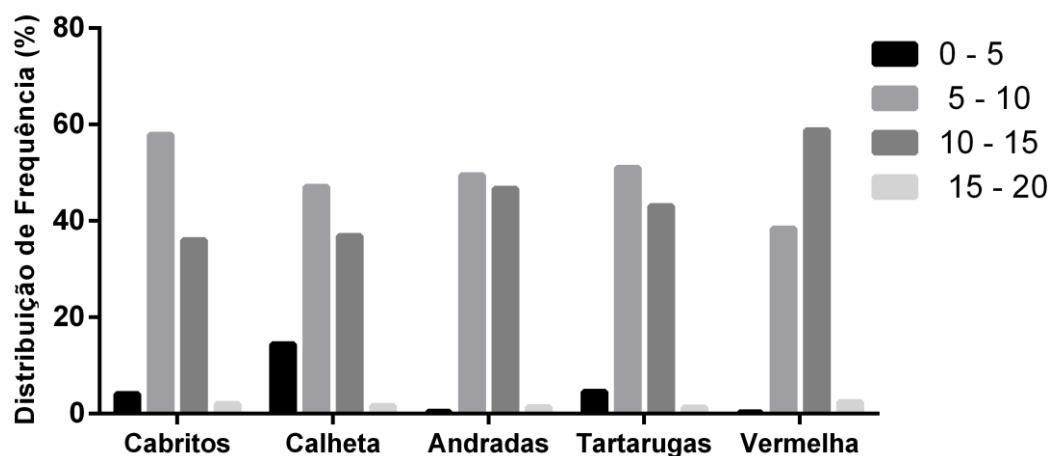


Figura 38. Distribuição percentual de classes (5 s) de período de ondas para as diferentes praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.

Por meio da distribuição percentual das classes de período de onda foi possível identificar diferenciações expressivas entre os ambientes, no decorrer dos anos, o que contribui para o comportamento diferencial dos sistemas, visto que o período exerce influencia primordial na troca de sedimentos.

A heterogeneidade nos níveis de energia entre as praias da Ilha da Trindade está intimamente relacionada com a direção preferencial do ângulo de incidência de ondas, a posição e forma alongada com eixo principal Noroeste-Sudeste da ilha e a orientação geral das baías. Esta diferenciação da distribuição de energia ao longo da costa Leste devido às diferentes configurações têm implicações importantes na variabilidade morfo-sedimentar, e refletem conformidade com as alterações morfológicas mencionadas por Calliari *et. al.* (2016), principalmente para as praias com presença de estruturas

de proteção na zona de arrebentação, cuja variação da energia de onda não resulta em alterações significativas na morfologia costeira.

## 5.2 Variabilidade dos sistemas praiais

Segundo Komar (1976), as dimensões físicas do perfil são tão importantes quanto a composição sedimentar para definir o grau de retrabalhamento e a mobilidade de uma praia. Dolan *et al.* (1978) definiram o conceito de mobilidade praial a partir do desvio padrão da largura média da praia. Posteriormente Short & Hesp (1982) utilizaram este conceito para classificar praias no litoral norte da Austrália, quanto à mobilidade a partir de perfis topográficos. A mobilidade das praias caracteriza sua susceptibilidade à troca de sedimentos entre a parte emersa e submersa, e indica a tendência da praia em alternar-se entre diferentes estágios praiais ao longo do tempo.

Com o propósito de verificar a susceptibilidade das praias da Ilha da Trindade ao clima de ondas, e auxiliar na melhor compreensão do comportamento dos estágios morfodinâmicos predominantes, foram calculados os parâmetros morfométricos propostos por Wright & Short (1984), com base nos perfis topográficos, sendo: 1) a variação quantitativa do volume de sedimento na região da praia subaérea definido por uma função integral ( $m^3/m$ ); 2) a largura média da praia ( $\gamma_b$ ) definida a partir das distâncias entre o limite entre as dunas e o pós-praia até a posição onde o perfil intercepta o datum; 3) a variação da largura média da praia ( $\sigma_{\gamma_b}$ ) calculado pelo desvio padrão destas larguras; 4) o coeficiente de variação desta largura (CV), que define a proporção (%)  $\sigma_{\gamma_b}/\gamma_b$ ; e 5) o grau de inclinação da praia ( $\beta$ ) em graus e o parâmetro adimensional Ômega ( $\Omega$ ), evidenciados na Tabela 7.

De grande importância para a gestão ambiental de praias, a determinação de sua sensibilidade a processos erosivos permite uma indicação do quanto este ambiente é suscetível à perda da sua faixa arenosa (Bird, 1985).

Tabela 7. Parâmetros morfométricos propostos por Wright & Short (1984) para as praias arenosas do segmento leste da Ilha da Trindade.

<b>Parâmetros Morfométricos</b>	<b>Praia da Calheta</b>	<b>Praia das Tartarugas</b>	<b>Praia Vermelha</b>	<b>Praia dos Cabritos</b>	<b>Praia dos Andradas</b>
<b>Variação total do volume da praia (Vv)</b>	21,66	25,60	17,00	17,83	21,87
<b>Largura média da praia (<math>\gamma_b</math>)</b>	53,97	425,75	47,41	74,46	56,92
<b>Variação da largura média da praia (<math>\sigma_{\gamma b}</math>)</b>	3,14	0,71	1,51	0,67	0,77
<b>Variabilidade largura (%)</b>	5,82	0,16	3,20	0,90	1,36
<b>Grau de inclinação da praia (<math>\beta</math>)</b>	6,80	7,80	6,16	6,90	6,00
<b>Ômega (<math>\Omega</math>)</b>	0,58	0,79	2,22	-	-

Estudando praias em diferentes posições geográficas da costa dos EUA, Aubrey (1983) verificou que as mais variáveis morfológicamente, são aquelas expostas ao clima de ondas oceânico aberto, ou seja, clima de ondas mais variado, e conforme diminui a pista de vento disponível para geração de ondas locais e / ou aumento do grau de proteção das praias, menor a variabilidade morfodinâmica destas.

Tendo em vista a análise da susceptibilidade morfo-sedimentar decorrente da ação de ondas, a partir de uma análise mais detalhada, puderam ser bem observadas alterações morfológicas expressivas no perfil ativo, principalmente para a Praia Vermelha, exposta a ondulações de alta energia provindas do quadrante Sul / Sudeste, e sobretudo para a Praia da Calheta, exposta ao quadrante Leste / Nordeste e, segundo Calliari *et. al.* (2016) com maior grau de embaiamento ( $\delta=1,95$ ). Os controles geológicos resultam em uma atenuação e refração de onda diferencial e reduzem a altura de quebra de

onda dentro das imediações (Klein & Menezes, 2001), principalmente para a Praia da Calheta.

As praias com os mais expressivos valores dos parâmetros morfométricos ( $\sigma_y b = 3,14$  e  $1,51m$  e  $CV = 5,82$  e  $3,20\%$ ) são Calheta e Vermelha, respectivamente, indicando maiores mobilidades do ambiente praial. As praias estão expostas ao clima variado de ondas com ausência de estruturas de proteção na zona submersa. Ambos sistemas são mais susceptíveis a episódios constantes e significativos de erosão-acresção, evidenciados pelos altos valores de desvio padrão da largura do pós-praia e da variação da posição da linha d'água. Estes ambientes, de certa forma, são menos estáveis, sendo mais sensíveis à ocorrência de processos erosivos. No entanto, mesmo com clima de ondas mais energético da Praia Vermelha, foram registradas alterações morfológicas inferiores quando comparadas, possivelmente relacionado à densidade da diferenciada composição sedimentar, a configuração da baía que limitaria ou intensificaria processos hidrodinâmicos e, principalmente, a menor variabilidade (CV) do clima de ondas da mesma.

Outras praias relativamente expostas ao clima variado de ondas de moderada a alta energia, não apresentam tamanha modificação devido à presença de recifes e rochas esparsas na zona de arrebentação, os quais correspondem a um terraço conferindo proteção contra ação de ondas. Tal fato ocorre com a Praia das Tartarugas, Andradas e Cabritos, classificadas como estado morfodinâmico mais representativo o refletivo com terraço de baixa-mar, representadas por índices inferiores de  $\sigma_y b$  ( $0,67$  a  $0,77m$ ) e  $CV$  ( $0,16$  a  $1,36\%$ ), indicando a menor mobilidade dos sistemas praiais. Característicos deste estado, as praias apresentam baixa mobilidade ( $\sigma_y b$  e  $CV$ ), exibindo pendente bastante íngreme durante preamar e declividade inferior no decorrer da baixa-mar, sofrendo poucas modificações, caracterizando ambientes de alta estabilidade. Estados como refletivo com terraços rochosos e de recifes de alga calcária, não são suportados por uma parametrização clara, pois a especificidade do local dificulta a identificação de parâmetros de controle ambiental adequados (Loureiro *et al.* 2013).

Dentre as praias protegidas por estruturas, alterações representativas no perfil ativo puderam ser observadas na Praia dos Andradas, protegida por recife calcário com descontinuidade no setor ao norte da praia, frequentemente proporcionando a formação de corrente de retorno, o que favorece a troca efetiva de sedimentos entre praia emersa e zona de arrebentação, contribuindo para maiores modificações no perfil; e na Praia dos Cabritos, onde puderam ser observadas variações no desenvolvimento e posição da berma, de acordo com aumento / diminuição da intensidade dos eventos, ao longo de todo ano. A Praia das Tartarugas apresenta a menor variabilidade, com alterações mínimas no perfil de praia ativo, ocorrendo variações expressivas ao longo do extenso pós-praia associadas principalmente a processos eólicos e construção dos ninhos de tartarugas, o que confere alta estabilidade a praia.

Os valores de  $\hat{\Omega}$  calculados para as praias variaram de 0,58 a 2,22, o qual possuem relativa representatividade na classificação proposta por Short & Jackson (2013), onde praias refletivas com terraço de baixa-mar, modificadas pela maré, correspondem a valores próximos a 2,4, e praia intermediárias a refletivas, entre o intervalo de 1 e 5. O baixo valor do parâmetro adimensional  $\hat{\Omega}$  indica a alta refletividade dos sistemas, identificadas como refletiva com terraço de baixa-mar e refletiva a intermediária, fornecendo suporte para o modelo, o qual foi derivado com base em informações de praias australianas.

Entretanto, Loureiro *et al.* (2013) destaca que o parâmetro  $\Omega$  fornece informações limitadas e geralmente são insuficientes para fornecer uma caracterização significativa do estado da praia, particularmente em praias embaiadas, onde o controle geológico modula a forma e segmentação da praia, tamanho e disponibilidade de sedimentos, alterações no campo de ondas incidentes e a circulação costeira. Os autores ressaltam que abordagens paramétricas baseadas em  $\Omega$ , devem ser utilizadas apenas como descritores elementares do estado da praia, auxiliando na diferenciação genérica entre os três principais estados de praia (refletivo-intermediário-dissipativo), uma vez que os modelos de estado de praia existentes são incapazes de representar adequadamente as condições amplamente variáveis observadas em praias embaiadas.

Devido ao grau de embaiamento, com presença ou não de estruturas na zona de arrebentação, e consequente diferenciação do clima de ondas e composição sedimentar adjacente, as praias apresentam determinadas divergências quanto à variabilidade morfológica dos sistemas praiais. A análise dos perfis topográficos torna ainda mais evidente as distintas sensibilidades, respondendo de modo diferente à variação do clima de ondas no tempo.

A Figura 39 mostra envelopes de perfis topográficos entre os anos de 2013 e 2016, na qual pode ser observada expressiva diferença vertical entre os perfis na parte subaérea da praia, bem como pelos parâmetros morfométricos calculados. As maiores mobilidades refletem no comportamento intermediário encontrado nos locais, com predominância entre estágios do tipo intermediário e refletivo, para aqueles desprovidos de proteção.

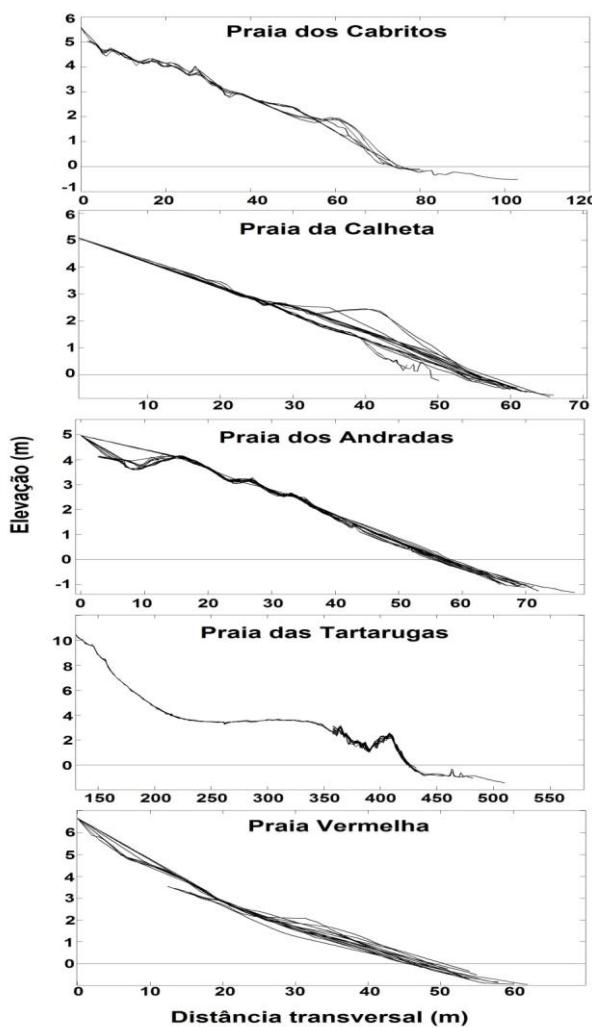


Figura 39. Variação dos perfis topográficos entre os anos de 2013 e 2016, para as praias do segmento Leste da Ilha da Trindade.

Embora as mais relevantes modificações registradas estarem associadas a Praia da Calheta e Vermelha, de maior sensibilidade ao clima de ondas classificadas como estado mais representativo o intermediário a refletivo, e, a Praia dos Andradas, Tartarugas e Cabritos, sofrerem relativamente suaves variações do perfil em decorrência da presença de estruturas na zona submersa, favorecendo a ocorrência do estágio refletivo com terraço de baixa-mar, de maneira geral, todas as praias necessitam acompanhamento, tendo em vista a ocorrência de mudanças climáticas globais e possibilidade de processos erosivos futuros em praias de extrema importância ambiental, social e estratégica.

Visando o conhecimento do comportamento praial como um todo, foram compiladas as informações dos parâmetros calculados, condições ambientais e uma série de perfis inerentes a cada ambiente, sendo verificadas as variações na morfologia assim como os principais riscos costeiros associados.

### **5.3 Variações morfológicas e riscos costeiros associados aos sistemas praiais**

A proposta deste tópico é analisar uma série de perfis de praia para a zona costeira insular de ambientes dominados por ondas, influenciados pela maré semi-diurna (amplitude 1,3 m) e por vezes com presença de estruturas fixas na zona de arrebentação na costa leste da Ilha da Trindade, com geomorfologia de promontórios com caráter embaiado. A variação da morfologia da praia (série de perfis) é resultado da distância do promontório, da forma e orientação da baía, da direção preferencial das ondas, da distribuição do tamanho do grão, da inclinação da costa e processos hidrodinâmicos locais.

A avaliação do balanço entre os estados construtivos e destrutivos de um perfil praial proporciona o gerenciamento dos recursos envolvidos na estruturação desse sistema permitindo o planejamento ordenado de uma área altamente dinâmica. Através dos perfis foi possível notar as alterações ao longo de toda extensão da praia em diferentes meses, ao passar de três anos, como

berma mais desenvolvida nos meses de verão, e perfil íngreme e levemente côncavo, nos meses de inverno. Analisando a sequência de perfis, foi possível perceber o ciclo gradual de erosão / construção da praia no decorrer do ano.

Por meio dos padrões de onda analisados e da resposta morfo-sedimentar que cada ambiente apresenta sob determinada circunstância, pode ser definido o estado morfodinâmico reinante das praias que, efetivamente, podem expor usuários a riscos. Os processos hidrodinâmicos locais ocorrentes em águas rasas, se desenvolvem em função do grau de mobilidade e da capacidade que cada ambiente tem de se adequar momentaneamente às condições oceanográficas e meteorológicas, adquirindo características diferenciadas até mesmo em segmentos distintos de um mesmo arco praial.

As divergentes variações morfo-sedimentares nos diferentes sistemas praiais apresentam absoluta relação à disparidade de energia de ondas identificada ao longo do segmento Leste da ilha por meio da modelagem, em função da diferenciada configuração praial. Tais modificações foram minuciosamente analisadas entre os distintos perfis, ao longo dos anos de 2013 a 2016, onde foram calculadas as diferenças no volume sedimentar ( $m^3/m$ ) a curto e longo prazo, identificadas variações (presença / ausência de berma e sua respectiva posição, formação de degrau, exposição de rochas, entre outros.) e relacionadas às condições hidrodinâmicas dominantes, quando existentes.

O entendimento dos processos operantes leva a crer na existência de um valor crítico a partir do qual as ondulações passam a se tornar de fato perigosas ao público usuário, seja pela arrebentação ou pela capacidade de formação de células de circulação com formação de correntes de retorno moderadas a fortes. Desta forma, o estágio morfodinâmico no momento da observação é o elemento primordial na definição dos perigos associados a cada segmento de praia (Bulhoes, 2005). Os principais riscos costeiros associados aos ambientes praias que compõem o segmento leste da Ilha da Trindade estão destacados na Tabela 9, sendo estes, variáveis ao longo do ano em razão das oscilações de energia, aumentando / diminuindo o grau de risco.

Tabela 8. Identificação dos principais riscos costeiros associados aos ambientes praias que compõem o segmento leste da Ilha da Trindade.

	<b>"Rips"</b>	<b>Pendente</b>	<b>Quebra</b>	<b>Recifes</b>	<b>Rochas</b>	<b>Repuxo</b>
		<b>íngreme</b>	<b>abrupta</b>		<b>esparsas</b>	<b>(backwash)</b>
<b>Praia dos</b>		x	x	x	x	
<b>Cabritos</b>						
<b>Praia da</b>		x	x		x	
<b>Calheta</b>						
<b>Praia dos</b>	x	x	x	x	x	
<b>Andradas</b>						
<b>Praia das</b>		x	x	x	x	
<b>Tartarugas</b>						
<b>Praia</b>	x	x	x		x	x
<b>Vermelha</b>						

A análise detalhada da sequência de perfis possibilitou avaliação preliminar da variabilidade temporal das praias em função das condições hidrodinâmicas pertinentes a cada ambiente. Ainda, investigações acerca da resposta morfodinâmica e das condições de ondas em águas rasas permitiram associar altura de ondas aos respectivos estágios morfodinâmicos, avaliando a constância e magnitude dos perigos nas praias.

Variações morfológicas estão principalmente relacionadas às mudanças na direção dos ventos, aumento / diminuição da intensidade dos eventos e suas respectivas posições de formação e deslocamento. Segundo Dean (1972) o perfil de praia pode se reconstituir, não havendo outro evento, num período próximo de 1 - 2 semanas. Alterações antrópicas também influenciam significativamente na configuração da praia, como a remoção parcial da linha de rochas de praia para possibilitar a atracação de barcos, que originou um recuo da linha de costa nas proximidades do Posto Oceanográfico (POIT), onde a estimativa de recuo da linha de praia após a remoção foi na ordem de 20 m (Mohr *et al.*, 2009). Segundo os autores, durante a passagem de ondas de tempestades, o local tornou-se mais vulnerável ao processo de erosão costeira, de maneira que para um cenário futuro, se confirmadas as mudanças climáticas globais, a planície costeira voltada para Nordeste (NE) envolvendo

as praias dos Cabritos, Calheta, Andradas e Tartarugas serão as mais afetadas por processos de recuo de linha de praia.

Estudando o efeito da ação de ondas em praias embaiadas, Daly *et al.* (2011) verificaram que para o mesmo período de onda, o aumento da altura faz com que a forma final da baía se situe mais em direção ao mar do que para as alturas de ondas mais baixas. Da mesma forma, para a mesma altura de onda, o aumento do período faz com que a praia se move em direção ao mar (acrescão), embora em maior grau. Segundo os autores o aumento da altura das ondas geram correntes mais fortes que aceleram o desenvolvimento morfológico da baía, levando a uma costa mais íngreme e mais curva, sendo capaz de gerar correntes ao longo da costa e transversais nas periferias da baía. Desta forma, os eventos de alta energia desempenham um papel importante no desenvolvimento morfológico da praia.

### **Praia dos Cabritos**

Em virtude da configuração da baía e da presença de recifes na zona de arrebentação, a Praia dos Cabritos sofreu moderadas modificações (Figura 40). A análise detalhada da sequência de seis perfis topográficos, ao longo dos anos 2013 a 2016, contribui consideravelmente para o melhor entendimento do comportamento do ambiente praial, e relacionados às condições hidrodinâmicas locais reinantes, fornecem auxílio no estudo da morfodinâmica.

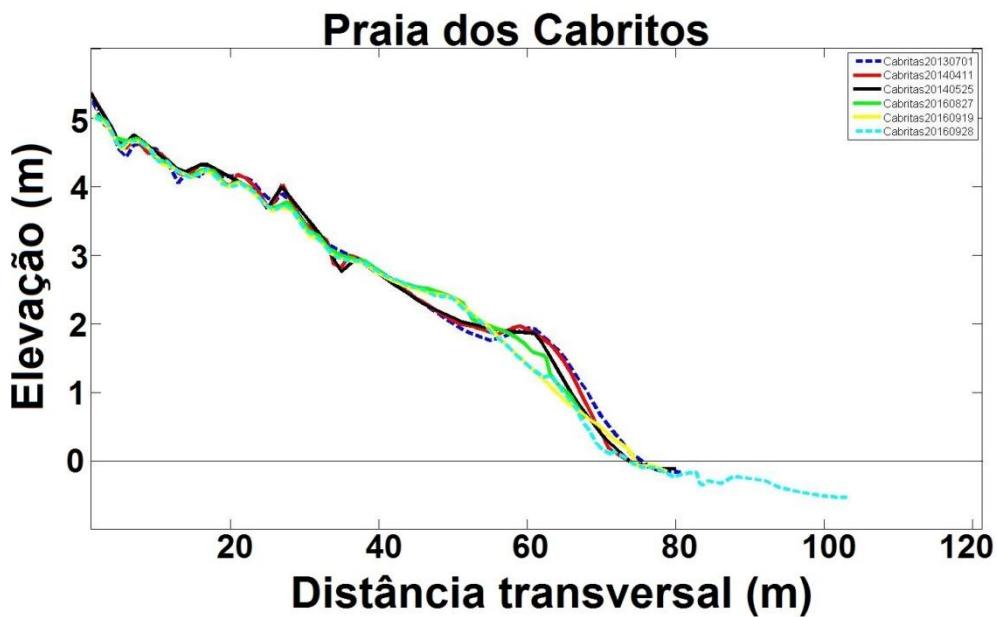


Figura 40. Perfis topográficos transversais realizados entre os anos de 2013 e 2016 na Praia dos Cabritos, com destaque para as linhas segmentadas indicando os máximos acrescivos e erosivos.

As maiores variações registradas ocorreram na face de praia com aumento / diminuição da declividade, representada nos perfis entre o final da berma e a posição média da linha de costa (0m). Este subambiente praial é caracterizado por alta instabilidade, onde o espraiamento da onda atuando diariamente, induz variações sedimentológicas e morfológicas em curto espaço de tempo, de forma que os sedimentos são constantemente retrabalhados. Grandes variações também foram observadas ao longo do pós-praia inferior, zona relativamente estável, com diferenciação entre a posição da "berma de tempestade", localizada mais afastada do oceano nas proximidades do início do pós-praia superior e, de "tempo bom", bem desenvolvida e mais próxima ao mar no limite superior da face, além de irregularidades topográficas em decorrência da variação das condições hidrodinâmicas, ação eólica e movimentação de animais. Essas alterações morfológicas estão provavelmente relacionadas às mudanças na orientação dos ventos, assim como a diminuição / aumento do número de frentes e suas respectivas posições de formação e deslocamento, e no entanto ocorrem de forma alternada.

A zona de surfe é estreita com presença de estruturas fixas conferindo proteção à costa, deficiente em sedimentos e com alta profundidade recife

afora. Assim sendo, para os dias de perfis com as respectivas condições hidrodinâmicas modeladas (2013 e 2014), a altura significativa de onda não ultrapassou 0,5 m na antepraia, provindas sobretudo do quadrante Sul e Sudoeste, propiciando o desenvolvimento de pronunciada berma e pendente bastante íngreme, por vezes, gerando pequenas perdas de sedimentos.

Durante condições de onda modal, a face da praia mantém aparente equilíbrio com baixa mobilidade de praia, de forma que, a largura da praia, definida em cada perfil pela distância horizontal, em metros, que separa o limite entre as dunas e o pós-praia do ponto até onde os perfis alcançaram a elevação zero (0 m), praticamente não sofre variação. Sob determinadas circunstâncias, pode ser identificada a presença de leve degrau no limite superior da face de praia, provavelmente relacionado à variação da maré ou "set up" de onda. Em situação de baixa-mar a praia apresenta-se com características mais dissipativas e, quando em preamar apresenta condições refletivas, típicos de estados refletivos com terraço de baixa-mar.

Condições de onda superiores a 1 m, com prevalência acima de 42 % na antepraia, aparentemente configuram um valor crítico no qual passam a remobilizar maiores quantidades de sedimento da praia emersa, atingindo a face e pós-praia inferior com maior energia. Considerando o percentual de tamanhos de ondas mais ocorrentes durante o ano, a Figura 41 evidencia a prevalência de ondas maiores que 1 m principalmente para o verão (47 %) e primavera (49 %), relacionados às direções preferenciais de incidência Norte (26,3 %) / Sudoeste (26,7 %) e Sul (22,8 %) / Sudoeste (24,15 %), respectivamente, embora ocorram picos durante todo ano. As maiores alturas estiveram relacionadas principalmente às ondulações provindas do quadrante Norte e Leste. Em associação a altura de ondas, as variações do período no decorrer dos anos configura fator primordial no comportamento da zona costeira.

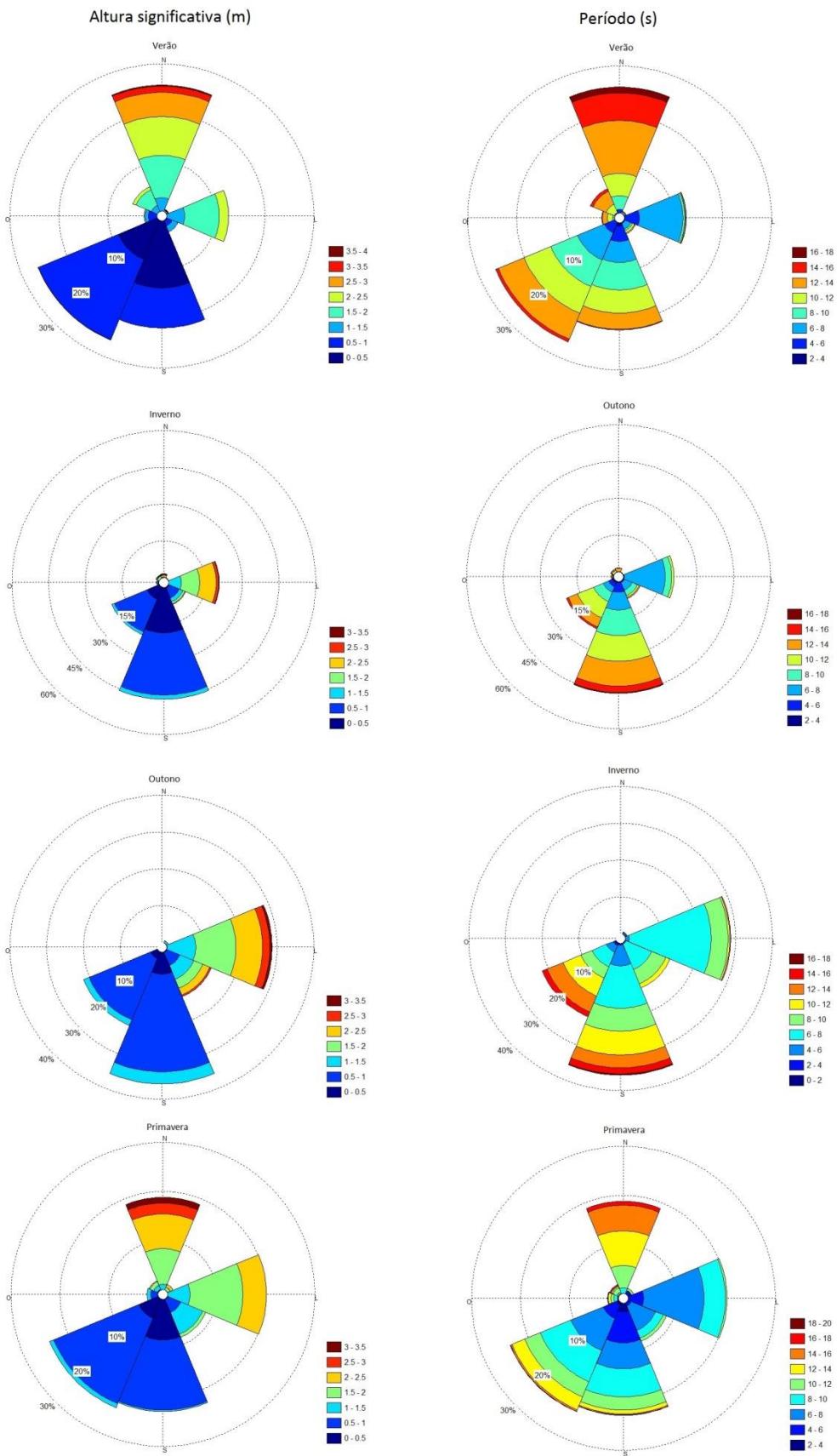


Figura 41. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia dos Cabritos.

Em função da permanência de baixa energia de onda incidente, constatado por meio da modelagem, associado a baixo períodos (71 % entre 5 e 10 s), a ocorrência do perfil máximo acrescivo foi registrado em 01/07/2013, com grandes quantidades de sedimento armazenado. Com ondulação se propagando de águas profundas provindas do quadrante Sul (159,37°) com altura significativa de onda de 1,48 m e período 11,83 s, até águas rasas, em decorrência dos processos de transformação de ondas atuantes foi verificada grande perda de energia atingindo a Praia dos Cabritos com altura significativa de onda na antepraia de 0,44 m e período 10,89 s para o dia. As condições hidrodinâmicas dominantes favoreceram desenvolvimento de pendente íngreme com 7,58° da face de praia, ocorrido no período anterior à entrada de frentes. O vento no sentido Leste (L) beneficia o desenvolvimento do perfil. O sedimento é armazenado na praia subaérea, com berma pronunciada e reflexiva no limite superior da face de praia.

Ainda que pouco frequentada em decorrência do difícil acesso, sob condições de energia moderada a alta de ondas durante os meses de primavera-verão, em que foram identificadas entrada média de 3 a 5 pulsos mensais esporádicos de onda ( $H_{sig}$  até 3,5 m), os principais riscos costeiros relacionados ao estado morfológico dominante para a Praia dos Cabritos estão associados ao desenvolvimento da pendente íngreme com rápido aumento da profundidade, a possibilidade de quebra abrupta de onda na face de praia em situações de preamar ou mesmo sob alta energia de ondas, além dos riscos permanentes como a presença de estruturas na zona de arrebentação e a alta profundidade da zona de surfe recife afora.

Morton *et al.* (1995) relatam que a vulnerabilidade da praia à ação de tempestades, depende parcialmente da diferença entre a frequência das tempestades e o período de recuperação das praias, de tal forma que, a erosão é acentuada quando a frequência das tempestades excede o período de recuperação da praia para tempestades individuais. Por meio da análise espectral do clima de ondas foi possível identificar a ocorrência de picos associados a eventos de alta energia em intervalos de 11,64 dias e 21,33 dias aproximadamente, como evidenciados na Figura 42, sugerindo rápida recuperação do perfil praial.

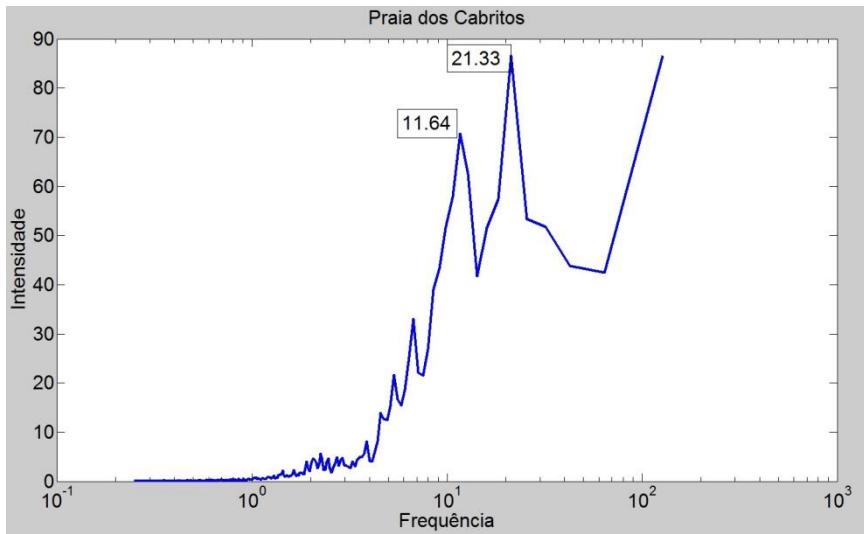


Figura 42. Análise espectral do clima de ondas para a Praia dos Cabritos, entre os anos de 2013 e 2014.

Durante evento de alta energia, posteriormente a passagem de consecutivas frentes ao longo dos meses de outono-inverno com quantidades expressivas de sedimentos retiradas gradualmente, foi registrada a ocorrência do perfil máximo erosivo em 28/09/2016. Foi verificada grande retração da berma, posicionada no pós-praia inferior, com o mar alcançando essa região em períodos energéticos promovendo aplainamento do perfil, gerando inclinação de  $6,48^\circ$  na face de praia. Parte do sedimento é provavelmente redistribuído na praia submersa, em áreas mais afastadas, além do recife calcário, podendo ou não retornar à praia emersa com a diminuição da energia.

A diferença no volume sedimentar entre máximo acrescivo e erosivo foram da ordem de  $17,83 \text{ m}^3 / \text{m}$ , com modificações ao longo de toda extensão e variação vertical inferior a 0,5 m de altura do perfil. Menores erosões de praia ocorrem com bastante frequência, durante todo o ano, mas de extensão e duração limitadas. Com recuperação da praia aparentemente rápida, e o pós-praia, escarpado ocasionalmente, a praia tende a permanecer relativamente estável ao longo do tempo, apresentando alterações mínimas na extensão do perfil. De maneira geral, a oscilação energética das ondas, identificada por meio da modelagem, apresenta certa desconformidade com a variabilidade morfológica temporal da praia, em função da ciclicidade destas. Possivelmente,

grande parte da energia é filtrada em decorrência da presença do recife dissipando a energia.

No entanto, embora aparentemente diminua a frequência e magnitude, aumentam consideravelmente o tempo de permanência dos eventos, assim como a frequência de ondulações com períodos mais baixos, durante os meses de outono-inverno, passando a remover gradualmente maiores quantidades de sedimentos aumentando substancialmente o grau de riscos costeiros para a Praia dos Cabritos. Perante as expressivas modificações morfo-sedimentares associadas ao período, além dos riscos à segurança deparados em situação de "praia gorda", a exposição de rochas em consequência do aplainamento do perfil, e o alcance do mar a regiões mais afastadas com quebra abrupta de onda do tipo mergulhante, aumentam significativamente o risco ao banho de mar ou permanência no costão, bastante comum durante a prática de pesca.

Em decorrência da configuração praial, embora apresentando média a alta energia e considerável variabilidade do clima de ondas na antepraia, o perfil praial exibe estabilidade com moderada variação no volume ao longo dos anos, em consequência principalmente da proteção exercida pelo recife na zona de arrebentação, proporcionando grau de periculosidade moderado ao sistema.

Os volumes máximos de erosão em relação ao verão anterior ocorreram no final do inverno e início da primavera, caracterizado pelo aumento do tempo de permanência dos eventos de alta energia, mostrando que esta erosão desenvolve-se de modo gradual, intercaladas a eventos mais extremos e também a pequenas acresções. Todo este processo obedece ao aumento da intensidade dos eventos verificado para o outono e o inverno no Atlântico Sul, embora ocorram significativas modificações também nos meses de verão, em razão da angulação da praia exposta às ondulações do quadrante Norte. O caminho inverso é lento e, com a chegada da primavera, inicia-se o período de construção, que também é intercalado por tempestades e processos erosionais de menor escala, conferindo padrão cíclico à praia.

## Praia da Calheta

A Praia da Calheta, devido a facilidade de acesso e proximidade ao POIT, apresenta a maior série com 18 perfis, estando constantemente ocupada. Foi a mais variável dentre as praias, de maior mobilidade, sofrendo modificações expressivas ao longo do estreito perfil, em decorrência configuração praial particular e da alta variabilidade do clima de ondas, caracterizada por alternados padrões hidrodinâmicos. A pequena largura de praia e os altos índices de variação no pacote sedimentar evidenciam elementos característicos de estados intermediários a refletivos (Figura 43). A estreita zona de surfe é escassa em sedimentos, com aumento exponencial da profundidade. Diferentemente da maioria das praias, estruturas fixas na zona de arrebentação são ausentes.

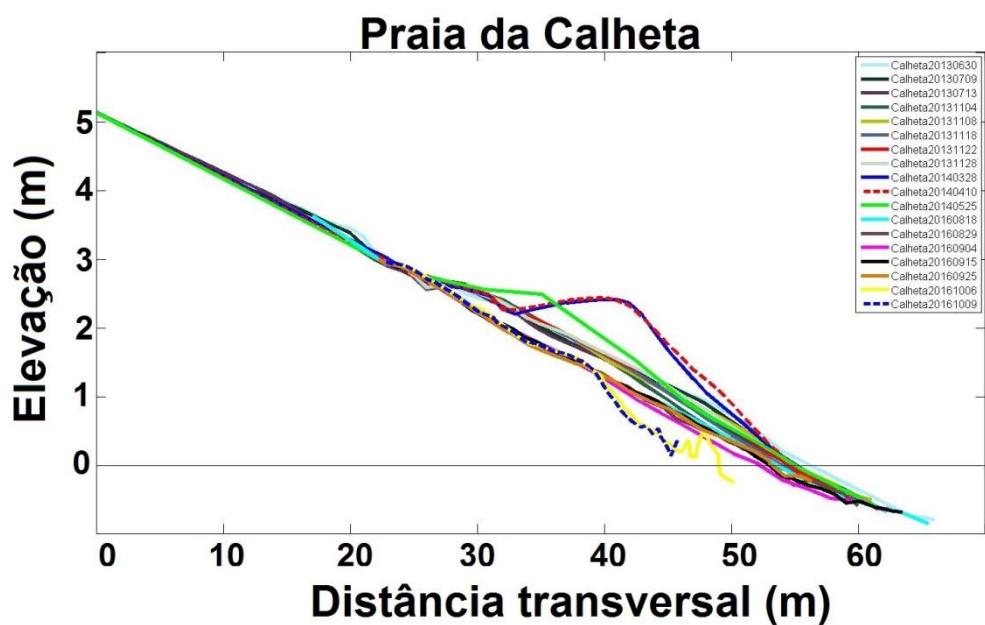


Figura 43. Perfis topográficos transversais realizados entre os anos de 2013 e 2016 na Praia da Calheta, destacando com linhas segmentadas o máximo acrescivo em vermelho, e erosivo em azul.

Praias sob condições refletivas são mais susceptíveis a ondas mais altas e experimentam processos erosivos rápidos e intensos. Qualquer elevação da energia das ondas nestas praias pode induzir a erosão, devido à dissipaçao direta da energia das ondas na face da praia (Short, 1999). Dessa forma, a variação da magnitude, frequência e tempo de permanência dos eventos no

decorrer do ano proporciona ampla variação no volume sedimentar, no qual claramente evidencia a troca de sedimentos entre a praia emersa e zona de arrebentação. Entretanto, devido o exponencial aumento da profundidade em decorrência da estreita plataforma insular, o sedimento que é transportado em direção ao mar em situações extremas, durante eventos de alta energia e que tenderia a ser transportado de volta à costa com o decaimento energético, encontra nesta pendente íngreme uma barreira física que impede que este ciclo se complete, podendo por vezes não se recuperar, gerando erosão, sendo a declividade nesta situação responsável por um déficit de sedimentos na praia adjacente.

Em consequência de longo período de calmaria e do gradual incremento sedimentar, o perfil máximo acrescivo foi registrado em 10/04/2014, possibilitando o armazenamento de grandes quantidades de sedimento na praia subaérea, com desenvolvimento de pronunciada berma com altura próxima de 2,5 m acima do nível do mar, configurando perfil de alta declividade de 9,24°, dando características refletivas à praia. A ondulação provinda do quadrante Sul (193°) de altura significativa 2,07 m e período 11,18 s, se propagando de águas profundas para águas rasas, atingiu a Praia da Calheta com mínima energia decorrente dos processos de transformação, apresentando média de 0,17 m e período 11,77 s para o dia. Com sentido do vento Sudeste, em conjunto da condição hidrodinâmica local, favoreceu o desenvolvimento de extenso perfil, com aproximadamente 55 metros, de elevado volume sedimentar, essencialmente na face de praia superior, embora ocorrente ao longo de toda extensão.

A condição morfológica dominante durante os meses de primavera-verão oferece grau de periculosidade baixo a moderado, em circunstância da alta declividade do perfil e da ocorrência de picos elevados esporádicos de onda em virtude da angulação da baía, propiciando quebra abrupta de onda na face. Sob condição de alta energia, aumentam consideravelmente o grau de risco, principalmente nos costões rochosos comumente utilizados para a prática de pesca. Porém, a ausência de estruturas fixas e rochas relativamente esparsas na face, quando em baixa energia, conferem baixo grau de periculosidade ao usuário. A análise espectral do clima de ondas indica a

ocorrência de eventos de alta energia em intervalos de 10,24 e 12,19 dias, com picos expressivos porém de menor energia a cada 23,27 dias, provavelmente dando origem a maiores modificações no perfil (Figura 44).

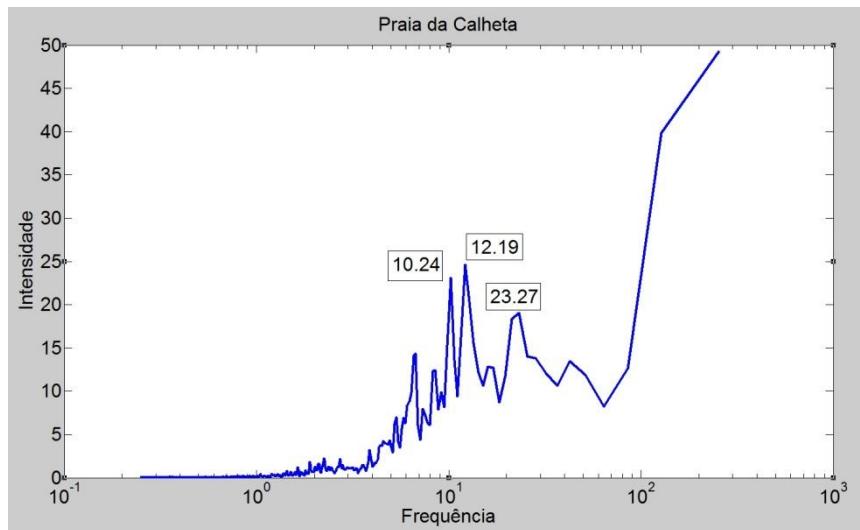


Figura 44. Análise espectral do clima de ondas da Praia da Calheta, entre os anos de 2013 a 2014.

Após a passagem de inúmeras frentes ao longo dos meses de outono-inverno com retirada gradual de sedimentos, recebendo alta energia de ondas evidenciada por pesquisadores, a condição máxima erosiva foi registrada em 06/10/2016. Perante as condições energéticas ocorridas, o resultante perfil exibe pós-praia suavizado devido o alcance do mar, com face de praia de pendente abrupto em decorrência da elevada perda de sedimentos, expondo rochas na face da praia aumentando a oferta de riscos ao usuário. Como resultado, a largura da praia sofreu alterações consideráveis com retração da linha de costa em aproximadamente 10 metros. Perda de volume sedimentar inferiores ocorre com frequência, proporcionando alta variabilidade ao perfil, mas de extensão e duração limitadas. A variação no volume sedimentar, entre máximo acrescivo e erosivo, foi de  $21,66 \text{ m}^3 / \text{m}$ , com variação vertical próximas de 1,5 m de altura do perfil. Tamanha variação é característica de praias intermediárias a Refletivas.

Mesmo sob condições de magnitude e frequência inferiores, o significativo aumento do tempo de permanência dos eventos durante os meses de outono-inverno, amplificam consideravelmente o grau de periculosidade

para a Praia da Calheta. O aplaínamento do perfil com exposição de rochas e a quebra abrupta na face de praia, de rápido aumento da profundidade, aumentam os riscos ao usuário, essencialmente aqueles desprovidos de habilidades aquáticas, podendo por vezes se acidentar gravemente.

A partir da análise do comportamento da variação de energia de ondas e consequente modificação da costa identificadas nos perfis, ao que tudo indica, condições de altura significativa de onda na antepraia superior a 0,5 m, com prevalência acima de 43 % para a antepraia, opera como valor crítico promovendo maiores alterações na costa, ocorrendo com maior frequência no verão (47,7 %) e primavera (54 %), em combinação de ondulações de maior período relacionados às direções preferenciais, semelhante à Praia dos Cabritos, ainda que picos esporádicos ocorram ao longo de todo ano (Figura 45). As maiores alturas estiveram associadas a ondulações provindas essencialmente de Norte e Leste

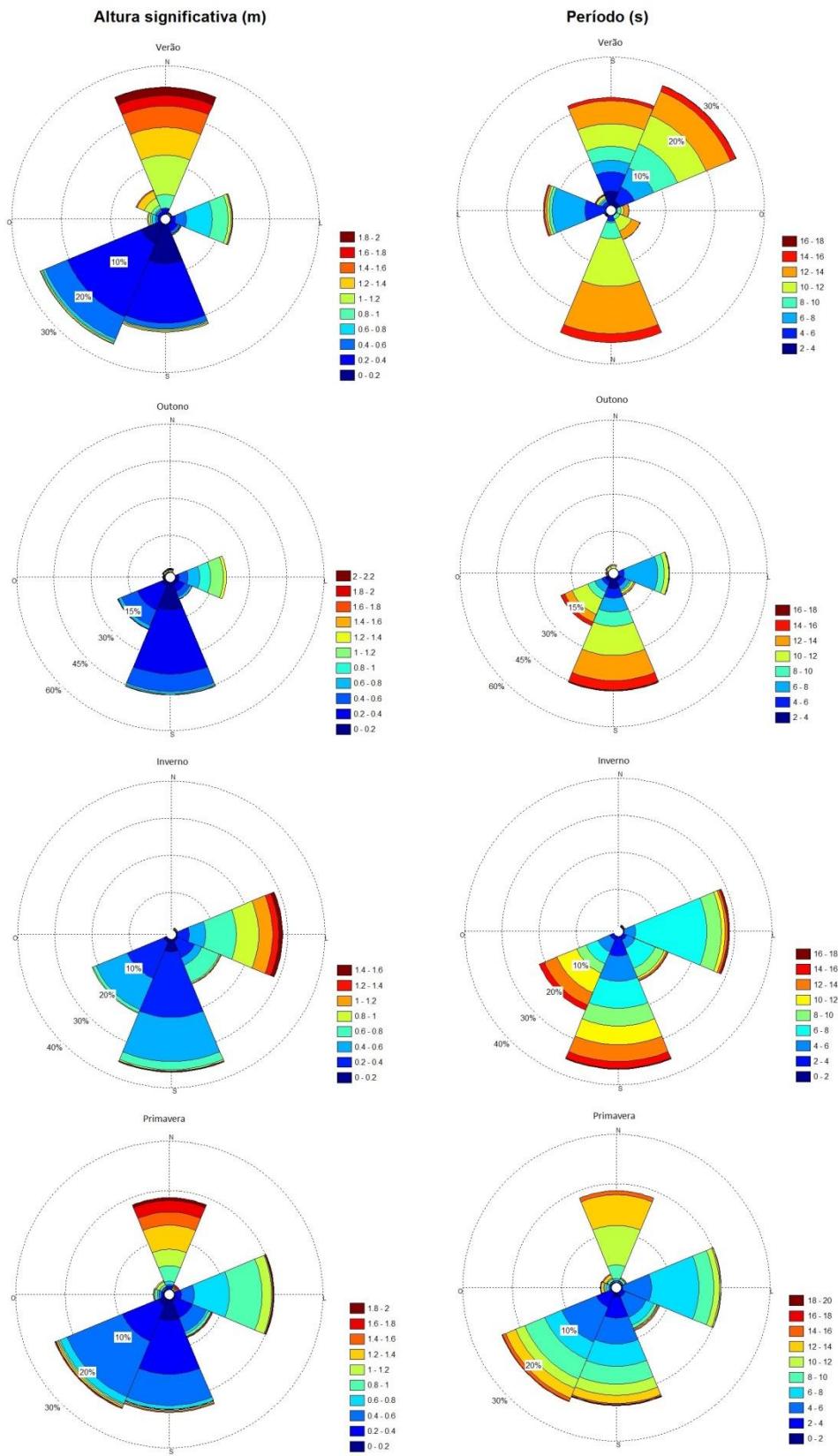


Figura 45. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia da Calheta.

Tendo em vista a mobilidade da praia consideravelmente alta ao longo do ano, durante condições de onda modal, a face da praia aparentemente mantém suficiente equilíbrio. As variações no volume sedimentar entre os perfis, com distância temporal de dias sob condições normais de onda, associadas às mudanças na orientação dos ventos, assim como variações do número e das respectivas posições de formação e deslocamento de frentes, ocorrendo alternadamente, foram da ordem de 0,2 a 2,10 m<sup>3</sup> / m, com modificações por toda extensão. A recuperação da praia ocorre de forma rápida, e o pós-praia, apesar de erodido eventualmente, tende a permanecer relativamente estável ao longo do tempo.

Considerando a ampla variação constatada decorrente das condições hidrodinâmicas, a Praia da Calheta oferece baixo a moderado grau de periculosidade ao usuário, tendo em vista que, sob determinadas situações amplificam consideravelmente o risco, principalmente com ondulações provindas do quadrante Leste, no qual propiciam a ocorrência de maior altura de onda favorecendo alterações costeiras.

Com relação às condições hidrodinâmicas locais modeladas para antepraia, de padrões alternados em virtude da configuração da baía, foi constatada certa discordância com a variabilidade morfológica temporal da praia, cuja resposta da morfologia costeira apresenta padrão comportamental análogo às praias continentais e demais praias da ilha, com tendência de padrões cíclicos, com acréscimo sedimentar gradativo nos meses de primavera-verão e posterior perda durante os meses de outono-inverno.

Com a intensificação das frentes durante os meses de outono-inverno no Atlântico Sul, embora diminuam a frequência e magnitude, essencialmente nas praias ao Norte da ilha, aumentam a frequência de períodos mais curtos e o tempo de permanência dos eventos, passando a promover maiores alterações. A recuperação é lenta e, com a chegada da primavera, tem início o período de construção, que também é intercalado por tempestades e processos erosionais de menor escala, caracterizando o padrão comportamental cíclico, destacando a gradual erosão / construção da praia no decorrer do ano. Os volumes máximos erosivos em relação ao verão anterior ocorreram no final do inverno e início da primavera, quando grandes quantidades de sedimentos são retiradas

gradativamente. Provavelmente, os elevados picos de ondas registrados dentro da baia durante os meses de primavera-verão, em função da direção preferencial das ondas, têm propiciado acréscimo sedimentar possivelmente pelo baixo tempo de permanência dos eventos e processos hidrodinâmicos locais.

### Praia dos Andradadas

Tendo como estado morfodinâmico mais representativo o Refletivo com Terraço de Baixa-Mar, e caracterizada por energia de onda relativamente alta na antepraia, a Praia dos Andradadas sofreu relevantes variações, essencialmente na face de praia e pós-praia inferior, com suavização do perfil, verificada em uma sequencia de 14 perfis (Figura 46). O ambiente praial apresenta estreita zona de surfe, caracterizada pela escassez de sedimento, apresentando laje rochosa descontínua associada à formação de correntes de retorno mesmo em situações de baixa energia, com aumento exponencial da profundidade recife afora.

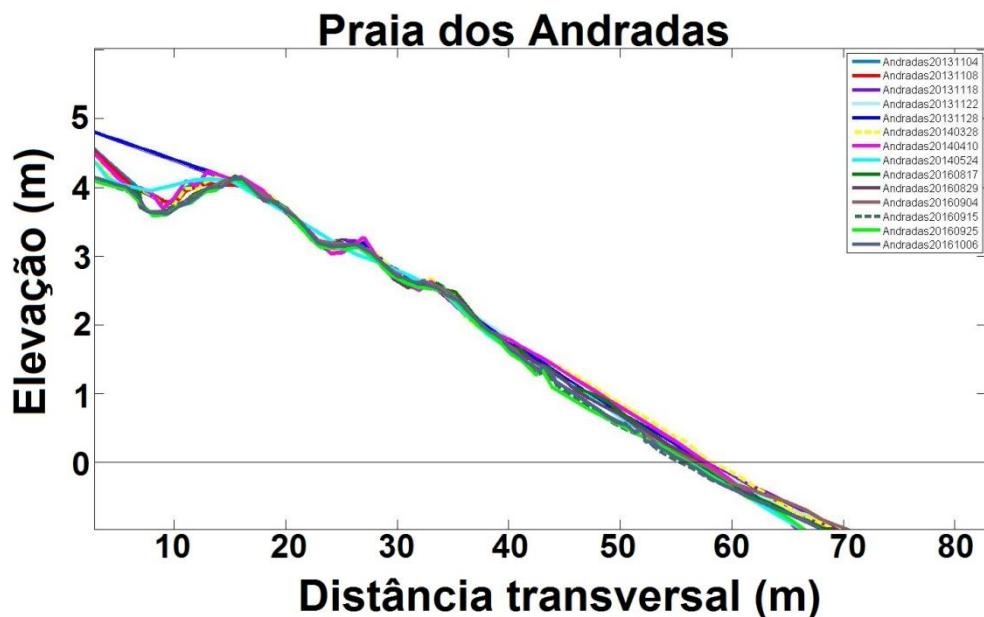


Figura 46. Perfis topográficos realizados na Praia dos Andradadas entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acréscimo e erosivo, com linhas segmentadas em amarelo e preto.

O alcance do mar em regiões mais distantes em condições de alta energia, em conjunto dos processos eólicos, proporcionaram alterações substancialmente elevadas ao longo do perfil, gerando moderada mobilidade. A descontinuidade da laje rochosa, provavelmente favorece a troca de sedimentos entre a praia emersa e submersa. Correntes de retorno (*rip currents*) fornecem um controle espacial importante na forma da praia, com perda de sedimento superior em praias embaiadas com *rips* (Short, 1979; Wright, 1981). A variação do volume de sedimentos entre o máximo erosivo e acrescivo foi de 21,87 m<sup>3</sup> / m. As modificações se prolongaram por todo ambiente praial, expondo rochas na face e pós-praia inferior, com variações da ordem de 1 metro de espessura do perfil.

Assim como outros ambientes com presença de estruturas recifais na zona submersa, tendo estes como estrutura de proteção e fonte de grande parte do material sedimentar na composição da praia, por vezes, o transporte do sedimento a regiões mais afastadas durante condições energéticas, acaba prejudicado pelo recife, que atua como barreira e dificulta o retorno do material com o decaimento da energia, podendo, ocasionalmente, não se recuperar, acarretando erosão, sendo a declividade em conjunto da presença da laje rochosa nesta situação, responsáveis por um déficit de sedimentos na praia adjacente.

Longos períodos de calmaria durante meses de primavera-verão possibilitaram o desenvolvimento de volumoso perfil, beneficiando o desenvolvimento da condição máxima acresciva, registrado em 28/03/2014 com grande volume de sedimento armazenado na praia subaérea. Desta forma, a praia exibindo aproximadamente 58 metros de extensão e pendente íngreme de 6,34°, fornece características Refletivas à mesma, essencialmente sob condições de maré alta. Os parâmetros de onda do dia eram, altura significativa de 2,43 m e período 13,02 s em águas profundas, que ao se propagar para águas rasas provindas do quadrante Sul (200°), em consequência dos processos de transformação de ondas atuantes, sofreram exponencial perda de energia tendo altura significativa média de onda na região de antepraia não excedendo 0,55 m com ventos atuando de Nordeste

(42,73°). Tais condições proporcionaram desenvolvimento de extensa e volumosa berma conferindo forma suavizada e reflexiva ao perfil.

As características morfológicas de maior prevalência do perfil durante os meses de primavera-verão propiciam grau de periculosidade moderado à Praia dos Andradas, tendo em vista os riscos permanentes como a presença de estruturas recifais na zona de arrebentação e elevada profundidade recife afora, e os não permanentes, como ocorrência de picos elevados com quebra abrupta de onda, principalmente em preamar, e possibilidade de ocorrência de correntes de retorno devido uma falha de continuidade do recife mesmo sob condições de baixa energia, considerado como um dos maiores perigos na zona de surfe devido à combinação de correntes geralmente no sentido do oceano.

A altura significativa de onda superior a 1 m na zona de antepraia, ocorreu com prevalência superior a 43 % e, possivelmente atua como valor crítico, passando a alcançar maiores distâncias do perfil promovendo expressivas modificações na costa, ocorrendo com maior frequência no inverno (47,43 %) e primavera (46,95 %), em conjunto de ondulações de baixo período (Figura 47). As maiores alturas de onda nas proximidades da antepraia estiveram relacionadas a ondulações provindas principalmente de Norte, Leste e Sudeste, em razão da angulação da baía.

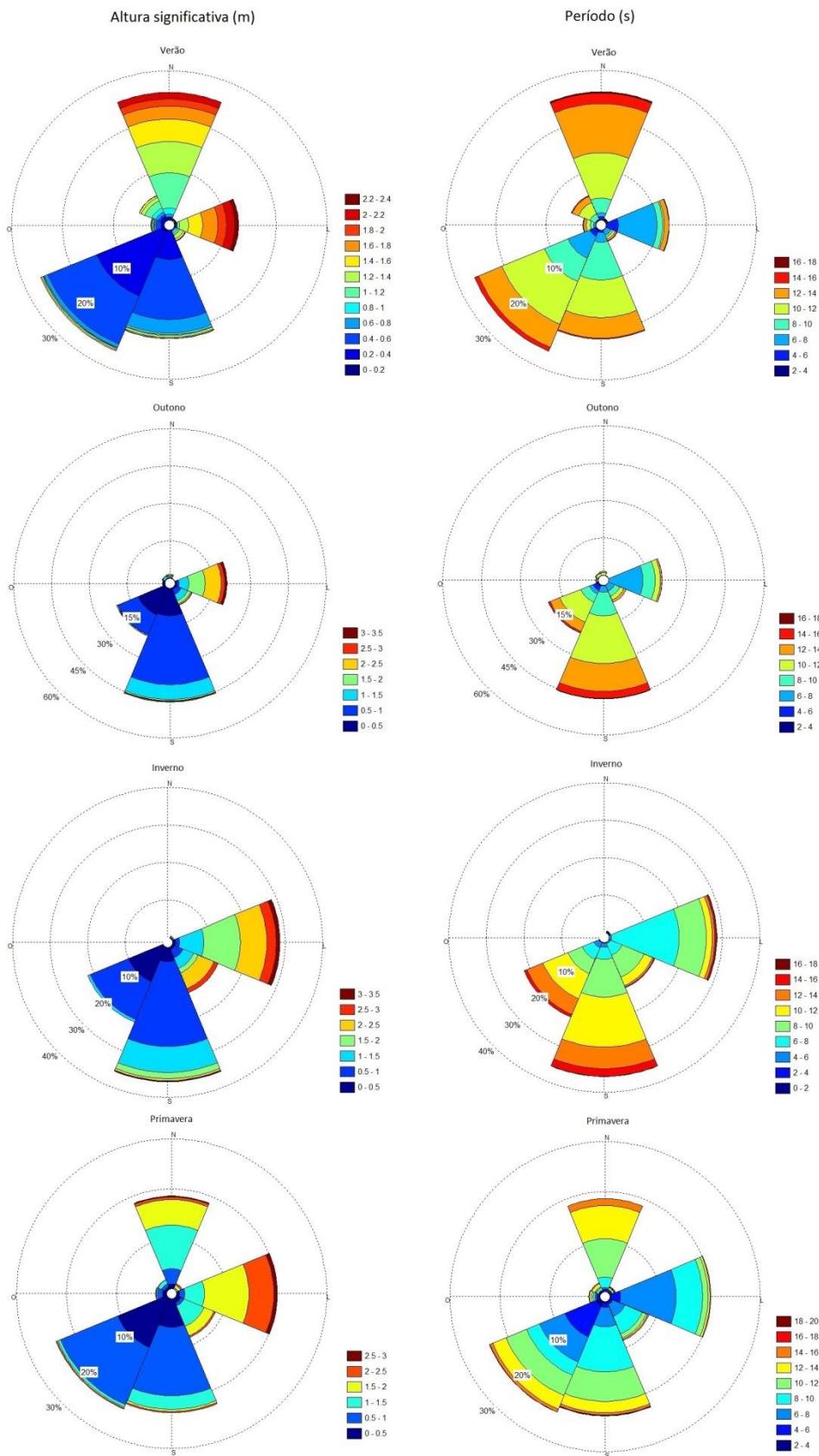


Figura 47. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia dos Andradadas.

Com a intensificação das condições energéticas durante os meses de outono-inverno, o registro da condição de máxima erosão ocorreu em 15/09/2016, posterior à passagem de numerosas frentes, com retirada gradual de sedimentos ocasionando considerável modificação do perfil, expondo rochas na face e pós-praia inferior elevando o grau de riscos. A perda do volume sedimentar gerou retração de aproximadamente 3 metros da linha de costa (55 metros), propiciando aumento da declividade para 7,02°. Erosões de praia de menor escala, de extensão e duração limitadas, ocorrem frequentemente, associadas a variações na direção do vento, diminuição / aumento da intensidade de ondas e respectivas posições de formação e deslocamento de frentes.

A análise espectral do clima de ondas indica a ocorrência de picos associadas a eventos de alta energia, em intervalos de aproximadamente 10,24 dias, picos superiores a aproximadamente 23,27 dias e picos moderados a cada 36,57 dias, sendo os principais responsáveis por alterações na costa (Figura 48).

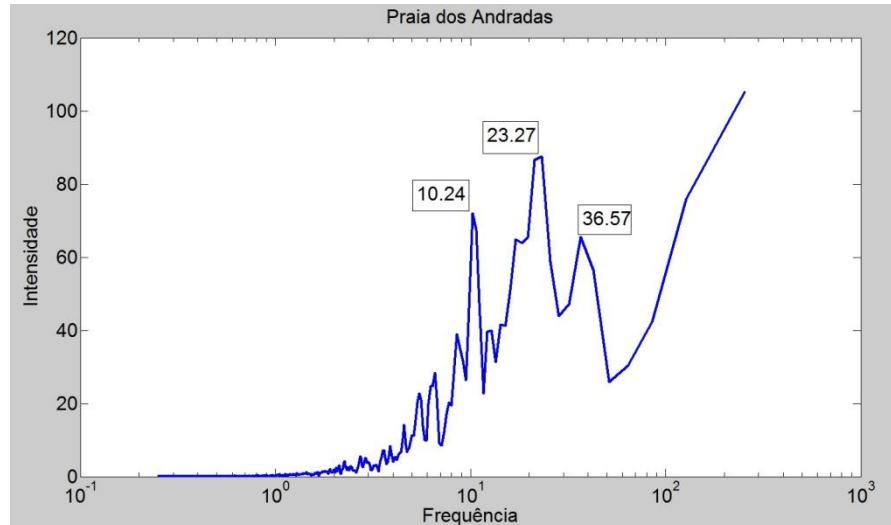


Figura 48. Análise espectral do clima de ondas para a Praia dos Andradatas, entre os anos de 2013 e 2014.

O incremento energético durante o período aumenta consideravelmente o grau de periculosidade ao usuário, em consequência da maior ocorrência da quebra abrupta de onda, expondo maior número de blocos de rochas espalhados principalmente na face de praia e pós-praia inferior, aumento na

frequência de ocorrência e provavelmente na intensidade de correntes de retorno, além dos riscos permanentes, ocorrentes tanto sob condições inferiores de energia quanto em alta energia.

Diante de condições modais de onda, a face da praia mantém relativo equilíbrio, com mobilidade de praia média a baixa. A capacidade de recuperação da praia é moderada, e o pós-praia, embora atingido ocasionalmente, exibe alta estabilidade ao longo do tempo. A análise minuciosa da sequencia de perfis entre eventos de alta energia e posterior diminuição, possibilitou a constatação de inicial recuperação da praia, com aumento do volume sedimentar em torno de  $1,33 \text{ m}^3 / \text{m}$  em aproximadamente 2 semanas, com acréscimo ao longo de todo pós-praia e desenvolvimento de degrau na face, praticamente retrocedendo a condição anterior ao evento. Considerando as características morfológicas dominantes da Praia dos Andradas, o ambiente representa grau de risco ao usuário variando entre moderado a alto, essencialmente sob condições de maior energia de ondas provindas de Sudoeste, aumentando a possibilidade do desenvolvimento de corrente de retorno e de maior altura de onda na antepraia.

O desenvolvimento dos volumes máximos erosivos em relação ao verão anterior ocorreram no final do inverno, caracterizado pela retirada gradual de grandes quantidades de sedimentos, intercaladas a eventos energéticos e também a pequenas acresções, respondendo ao aumento da intensidade dos eventos entre outono e o inverno. Com a entrada da primavera, inicia-se o período de acréscimo, que também é intercalado por eventos energéticos e processos erosionais de menor escala, caracterizando o padrão cíclico, respondendo diretamente a energia das ondas

### **Praia das Tartarugas**

Moldada entre promontórios contendo extenso perfil, exibindo vasto recife calcário na zona de arrebentação, a Praia das Tartarugas é caracterizada pela mais baixa mobilidade com as mais expressivas modificações no pós-praia superior, limitadas à ação eólica e movimentação de animais. A face de praia e pós-praia inferior exibem alta estabilidade, registradas em uma série de 11 perfis topográficos (Figura 49). A zona de surfe é caracterizada pela

escassez de sedimento, associada ao extenso recife, com aumento exponencial da profundidade recife afora.

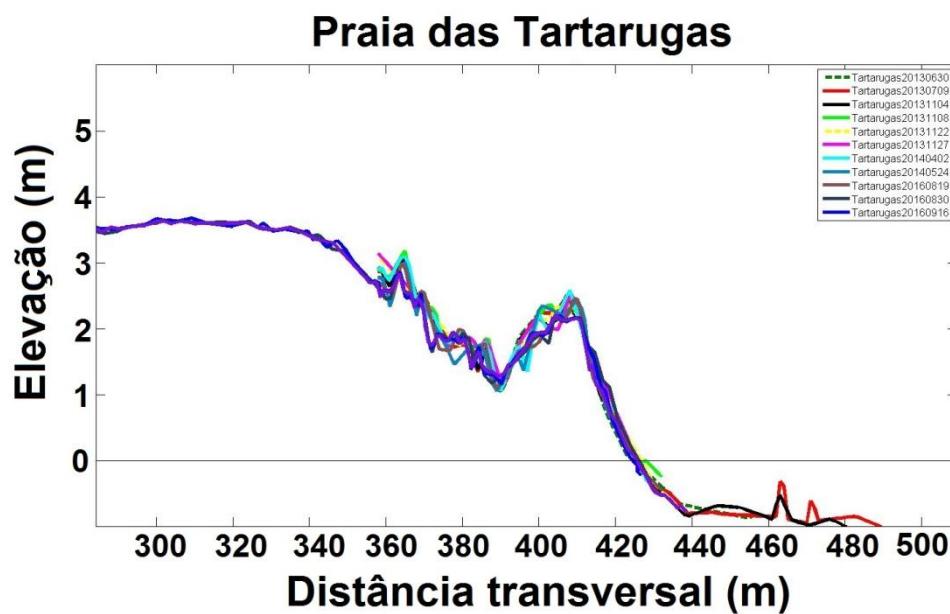


Figura 49. Perfis topográficos realizados na Praia das Tartarugas entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acrescivo e erosivo, com linhas segmentadas em verde e amarelo.

Mesmo sob condições de alta energia de ondas, a presença do extenso recife diminui exponencialmente a energia de ondas na antepraia, de forma que as variações de volume restritas a face e pós-praia inferior (perfil ativo) foram inferiores a  $1,1 \text{ m}^3 / \text{m}$  entre os registros. Condições da altura significativa de onda superior a 1,5 m na região de antepraia ocorreram com frequência superior a 22 % e, aparentemente amplificam as oportunidades de modificações costeiras, possivelmente operando como valor crítico ofertando maiores riscos, com maior prevalência de ocorrência no inverno (29 %) e primavera (25,33 %), relacionadas as direções preferenciais Leste (29,8 %) / Sul (35,4 %) e Sul (22,8 %) / Sudoeste(24,15 %), respectivamente, em conjunto de curtos períodos. Os registros dos mais altos valores da altura de onda estiveram associados a ondulações provindas principalmente do Norte, Leste e Sudeste (Figura 50). Quando quantificada toda extensão do perfil, a variação entre máximo erosivo e acrescivo foi de  $25,6 \text{ m}^3 / \text{m}$ , governada por processos de escavação e ação eólica, sofrendo mínima alteração do perfil ativo.

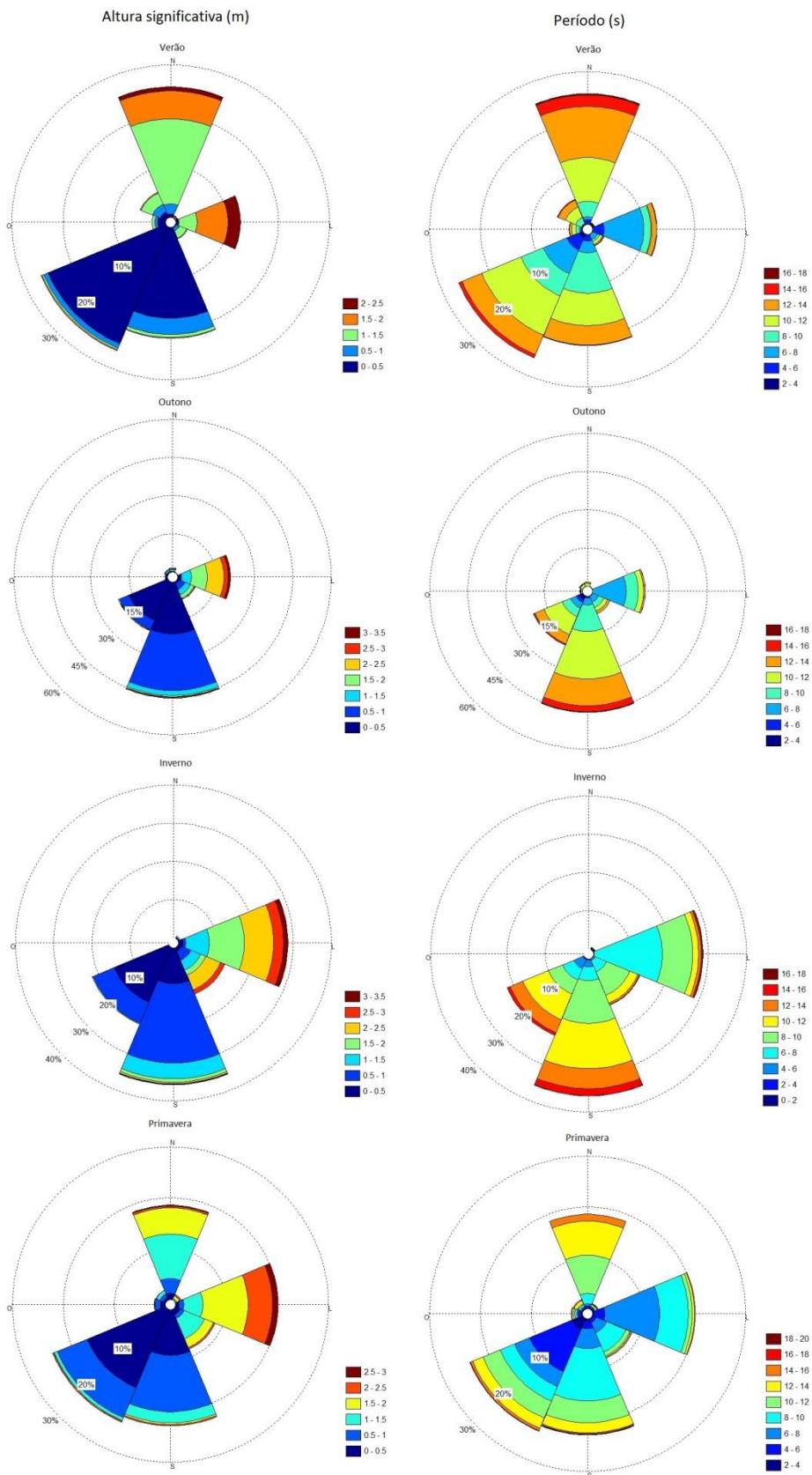


Figura 50. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia das Tartarugas.

Ferrario et al. (2014) estudando o efeito de recifes na atenuação de ondas, como medidas protetivas à costa, observaram que os recifes reduziram significativamente a energia das ondas. A maior parte (86%) da energia das ondas é dissipada pela crista do recife (borda). Esta área relativamente alta e estreita é a mais crítica no fornecimento de benefícios à atenuação de ondas. O recife plano, parte rasa do recife que se estende para fora da costa, dissipava aproximadamente metade da energia da onda remanescente, sendo a maior parte da energia dissipada na primeira porção (isto é, os 150 m mais próximos da crista do recife). Isto significa que, mesmo os recifes planos estreitos contribuem eficazmente à atenuação das ondas, sendo a profundidade dos recifes, particularmente nos pontos mais rasos, crítica para proporcionar benefícios de atenuação das ondas.

Diferentemente das outras praias do segmento, a ocorrência do perfil com volume máximo acrescional foi registrada em 30/08/2016, período normalmente associado à diminuição do volume sedimentar entre as praias. Este ligeiro aumento do volume no perfil ativo, gerou o desenvolvimento de reduzida berma, por vezes escarpada em situações de maré alta, com lajes de *beachrock* encobertas exibindo pendente íngreme de 8,61°.

Através da análise espectral do clima de ondas foi possível identificar a ocorrência de picos associados a eventos de alta energia a cada 10,24 dias, com picos mais elevados em intervalos de 23,27 dias e eventos moderados a cada 36,57 dias, semelhante ao que ocorre na Praia dos Andradas, ambas posicionadas ao Sul da ilha (Figura 51).

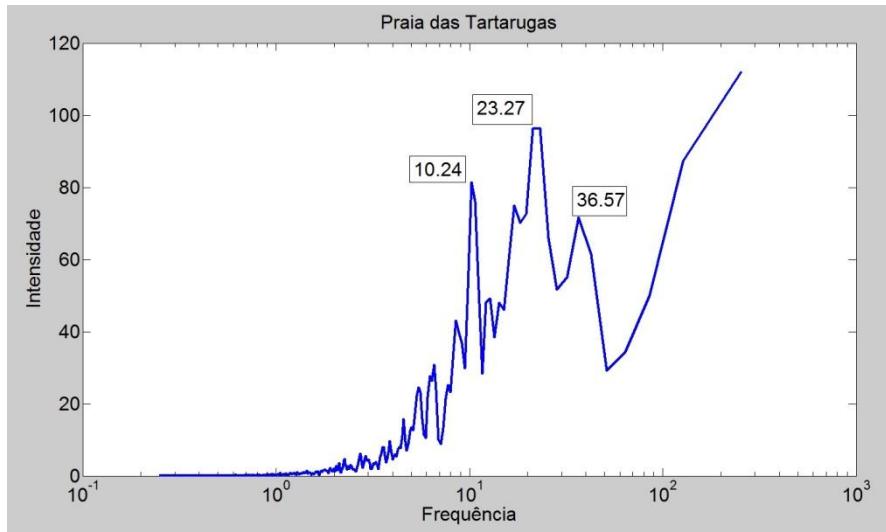


Figura 51. Análise espectral do clima de ondas para a Praia das Tartarugas, entre os anos de 2013 e 2014.

As características morfológicas mais prevalentes durante os meses de primavera-verão, com pendente íngreme e grande parte dos blocos rochosos encobertos na face de praia, faz com que a Praia das Tartarugas ofereça moderado risco ao usuário. O risco permanente do extenso recife, composto por irregularidades e rugosidades, pode ser um grande empecilho à entrada no mar, e, quando em preamar, a possibilidade de quebra de onda amplifica ainda mais o grau de periculosidade.

O perfil com volume máximo erosivo foi observado em 30/06/2013, período característico pelo início da entrada de frentes. Provindas do quadrante Sul ( $162^\circ$ ) com altura significativa de 1,74 m e período 12,09 s em águas profundas, em decorrência da diminuição da profundidade e processos de transformação de ondas associados, a ondulação atingiu a antepraia com altura significativa de 0,71 m período 11,64 s, com ventos atuando de Nordeste ( $36^\circ$ ). Parte dessa energia foi ainda dissipada pelo recife na zona de arrebentação, atribuindo alta estabilidade à praia. A perda do volume sedimentar foi mínima, com aplâinamento e redução do perfil em torno de 1,5 metros de extensão, expondo esparsas rochas e *beachrocks* na face de praia. A condição erosiva exibe o perfil mais íngreme dentre as praias, com  $9,0^\circ$  de inclinação.

Sob condições de aumento da frequência e magnitude dos eventos entre os meses de outono-inverno, ocorreram poucas modificações do perfil em

virtude da proteção exercida pelo extenso recife. Entretanto a morfologia reinante agrava a situação de risco ao usuário, tendo em vista a maior exposição de blocos e lajes rochosas na face de praia durante o período, assim como a maior possibilidade de quebra de onda em águas rasas, principalmente em preamar.

A variação anual do perfil praial, em conjunto da variação de maré, torna evidente como estado mais representativo o Refletivo com Terraço de Baixa Mar. Como consequência da baixa mobilidade e da morfologia dominante entre os anos, a Praia das Tartarugas apresenta grau de risco entre moderado a alto, considerando a presença de lajes rochosas esparsas na face, irregularidades na praia submersa em virtude do extenso recife, pendente bastante íngreme e, quando em preamar, a possibilidade de quebra abrupta de onda.

### **Praia Vermelha**

Desprovida de estruturas na zona de arrebentação, a Praia Vermelha apresenta elementos característicos de praia Refletiva a intermediária, sofrendo expressivas modificações ao longo do tempo. Em virtude da estreita zona de surfe, deficiente em sedimentos e com rápido aumento da profundidade, tornam susceptível a ondas mais altas, experimentando processos erosivos rápidos e acentuados, devido à dissipação direta da energia das ondas na face da praia.

Nas praias em estados intermediários, os elevados gradientes de transporte transversal e longitudinal, asseguram alta variabilidade morfológica e estados de praia dinâmicos. As taxas máximas de transporte de sedimentos são mais altas nos estados intermediários do que em praias Dissipativas e Refletivas (Aagaard *et al.*, 2013).

As condições hidrodinâmicas dominantes favorecem o desenvolvimento de pendente bastante íngreme, com sedimento armazenado na praia subaérea exibindo berma suavizada e reflexiva, de largura estreita. A presença de cúspides é bastante comum, gerando ritmicidade em planta. As principais alterações na morfologia ocorreram na face de praia e pós-praia inferior, gerando diferenças de pouco menos de 1 metro de altura entre o perfil máximo

acrescivo e erosivo, variando entre características Refletivas e intermediárias, registradas em uma série de 14 perfis topográficos (Figura 52).

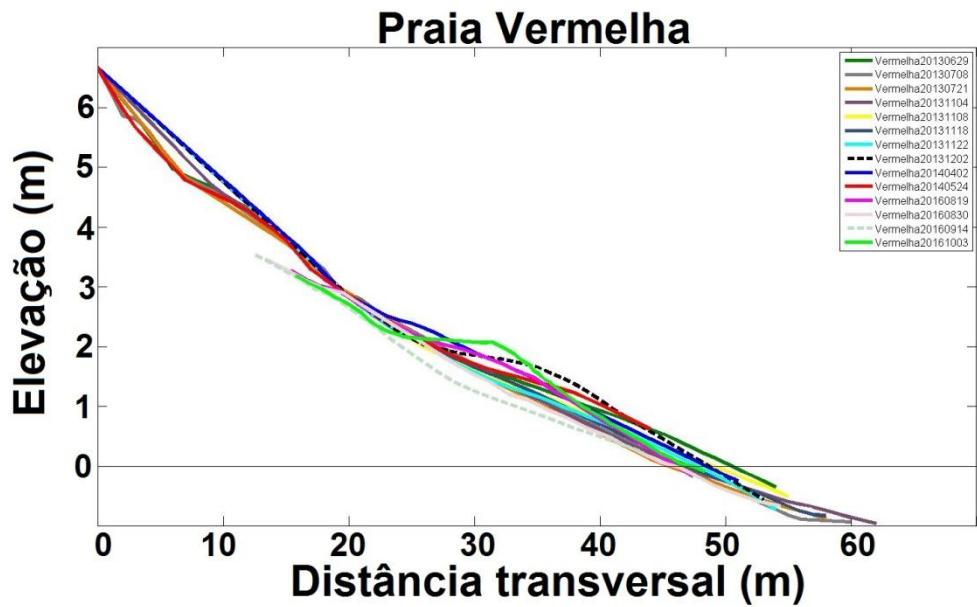


Figura 52. Perfis topográficos realizados na Praia Vermelha entre os anos de 2013 e 2016, com destaque para os máximos acréscimo e erosão, com linhas segmentadas em preto e cinza.

Com o decaimento do tempo de permanência, magnitude, e do número de entrada de frentes durante os meses de primavera-verão, foi registrado o perfil máximo acréscivo em 02/12/2013, conferindo amplo incremento sedimentar à praia emersa, com perfil exibindo pendente de 6,77°. No dia, a ondulação provinda do quadrante Sul (168,37°), com altura significativa de 1,57 m e período de 10,22 s em águas profundas, ao se propagarem até águas rasas, atingiram a Praia Vermelha gerando ligeira amplificação da altura, alcançando 1,60 m na antepraia com redução do período para 9,6 s, como consequência dos processos de transformação de ondas atuantes. O volumoso aporte sedimentar durante a temporada de menor energia, resultou em extensa largura ao perfil (48 m), encobrindo grande parte das rochas, fornecendo elementos de características refletivas a praia.

As alterações morfológicas resultantes da variação da energia de ondas entre os meses de primavera-verão, expõe o usuário a determinados riscos, sejam os permanentes como a elevada profundidade da zona de arrebentação e a presença de esparsas rochas na praia submersa, ou não permanentes,

como o forte *backwash* mesmo sob condições de moderada energia, a quebra abrupta de onda na face de praia e a possibilidade da formação de correntes de retorno, proporcionando moderado a alto grau de risco.

Analizando os padrões do transporte de sedimentos em praias com promontórios, Dai *et al.* (2010) observaram que, conforme as correntes ao longo da costa (*longshore current*) se dissipam enquanto a praia tende para uma forma estável, o transporte cruzado (*cross shore*) torna-se mais dominante e, portanto, leva a maiores mudanças no perfil da praia. As praias com uma forma estável já estabelecida podem, portanto, tender a experimentar maior oscilação (movimento onshore-offshore) do que a rotação da praia. Os autores notaram ainda que, principalmente os eventos de ondas de alta energia, fazem com que as áreas periféricas da baía evoluam e se tornem mais curvas em plano.

O registro do perfil máximo erosivo ocorreu em 14/09/2016, durante a passagem de evento de alta energia, acarretando expressiva perda sedimentar com suavização do perfil, essencialmente na face e pós-praia inferior, expondo rochas. Tamanha variação ocasionou diminuição da extensão do perfil em aproximadamente 5 metros, passando a 5,33° de inclinação, atribuindo elementos de características intermediárias ao sistema. A elevada energia de ondas na zona de arrebentação de alta profundidade amplificam os riscos, proporcionando quebra de onda intensa na face de praia, ocasionando forte *backwash* na pendente íngreme, constituindo o principal perigo à praia. A altura significativa de onda superior a 2,5 m na zona de antepraia, ocorreu com frequência superior a 28 % e, ao que tudo indica, atua como valor crítico, passando a remobilizar maiores quantidades de sedimento ao atingir maiores distâncias do perfil. Ondulações desta configuração tiveram maior prevalência no outono (36,5 %) e inverno (50 %), associados as direções preferenciais Sul (45,6 %) / Sudoeste (21,14 %) e Leste (29,82 %) / Sul (35,42 %), respectivamente, em combinação de curtos períodos, evidenciadas na Figura 53. As mais altas alturas de onda estiveram associadas às ondulações provindas essencialmente do quadrante Sul e Leste.

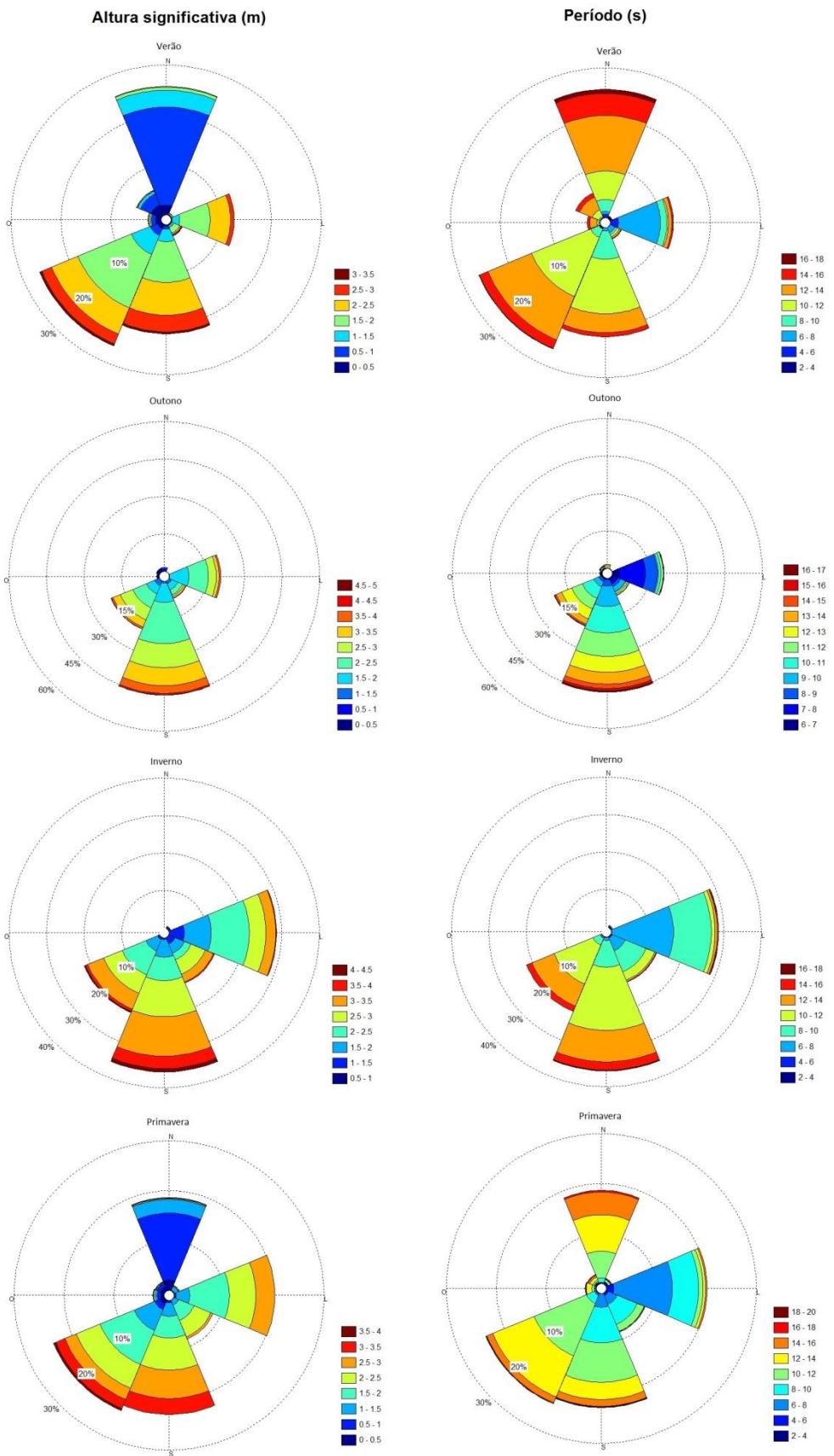


Figura 53. Direções preferenciais da altura e período de ondas, entre as estações, ao longo dos anos de 2013 e 2014 para a Praia Vermelha.

A exposição de rochas na parte emersa e a maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno, acrescem ainda mais o grau de periculosidade podendo, sob determinadas condições, ser evitado a permanência no costão e banho de mar, devido o número de ofertas de alto risco ao usuário.

A diferença no volume de sedimentos entre as situações acrescivas e erosivas, foi da ordem de  $17 \text{ m}^3 / \text{m}$  atribuindo expressiva mobilidade, em razão da morfologia praial. Pequenas modificações do perfil podem ser atribuídas a variações laterais de energia vinculadas à possíveis irregularidades batimétricas próximas a zona de arrebentação.

A análise espectral do clima de ondas indica a ocorrência de picos associados a eventos de alta energia em intervalos de 8 dias, com picos ainda mais elevados a cada 16 dias, indicando maior constância de situações de eventos energéticos dentre as praias do segmento (Figura 54).

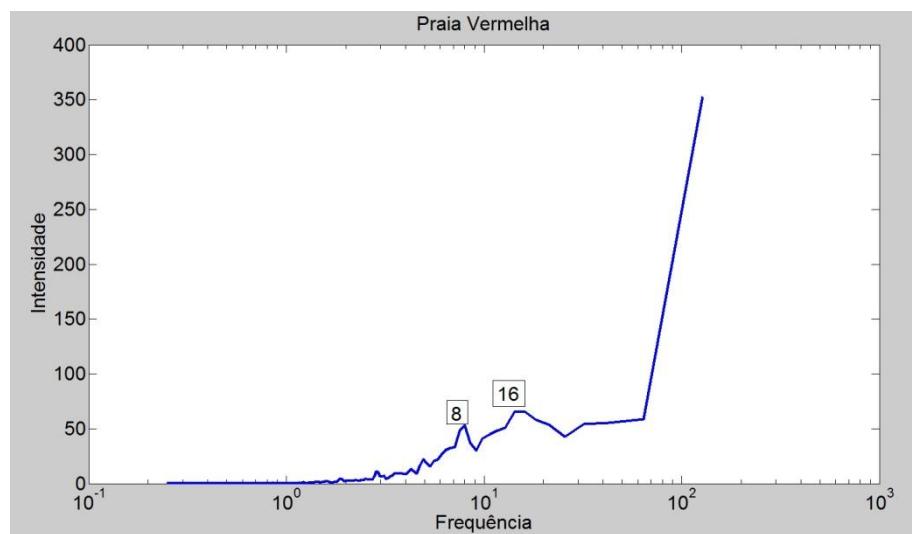


Figura 54. Análise espectral do clima de ondas para a Praia Vermelha, entre os anos de 2013 e 2014.

As alterações no volume sedimentar, com distância inferior a dez dias, alcançaram  $6,58 \text{ m}^3 / \text{m}$  com desenvolvimento de volumosa berma, evidenciando eficiente recuperação. Durante condições modais de onda, a face da praia exibe certa variabilidade, com mobilidade de média a alta. Menores erosões ocorrem com bastante frequência, mas de extensão e duração limitadas. Com recuperação de praia rápida e o pós-praia escarpado

eventualmente, a Praia Vermelha tende a permanecer pouco estável no decorrer do tempo, oferecendo o mais alto grau de risco ao usuário entre as praias, tendo em vista os inúmeros agravantes.

De maneira geral, todos os ambientes praiais do segmento Leste da Ilha da Trindade apresentam períodos de acresção e de erosão, sendo o período de acréscimo nos meses de verão, de dezembro a março com a praia apresentando grande volume sedimentar, exibindo berma desenvolvida, e após este período de acreção, as tempestades de maio praticamente iniciam o ciclo de erosão, com a praia exibindo suavidade do perfil e diminuição do volume sedimentar, expondo rochas na face de praia íngreme. Apesar de ser mais frequente no outono e inverno, os eventos tendem a ser mais destrutivos entre abril e maio, devido a combinação de passagens de frentes frias e perfis ainda apresentando grande volume sedimentar, sendo as praias com ausência de estruturas de proteção mais suscetíveis a processos erosivos por ação de ondas. Todas as praias oferecem riscos ao usuário, inerentes a cada ambiente, variando entre praias de baixo (Praia da Calheta) e alto grau de risco (Vermelha), alternando entre períodos do ano e condições hidrodinâmicas reinantes.

## 5.4 Estudo de caso

A ocorrência de acidentes envolvendo óbitos na Ilha da Trindade não são raros, e muitas vezes estão relacionados às condições altamente energéticas do mar, sendo atribuídas 7 fatalidades desde 1963.

Visando o conhecimento do padrão de onda, por meio da modelagem numérica, foi possível simular propagações das condições de ondas em águas profundas extraídos do modelo operacional WWIII referentes aos dias com registro de ocorrência de acidentes, até águas rasas. Foi analisado os parâmetros de onda nos pontos mais próximos dos respectivos locais (Figura 55), de forma a identificar as condições hidrodinâmicas reinantes em decorrência dos processos de transformação de ondas atuantes.

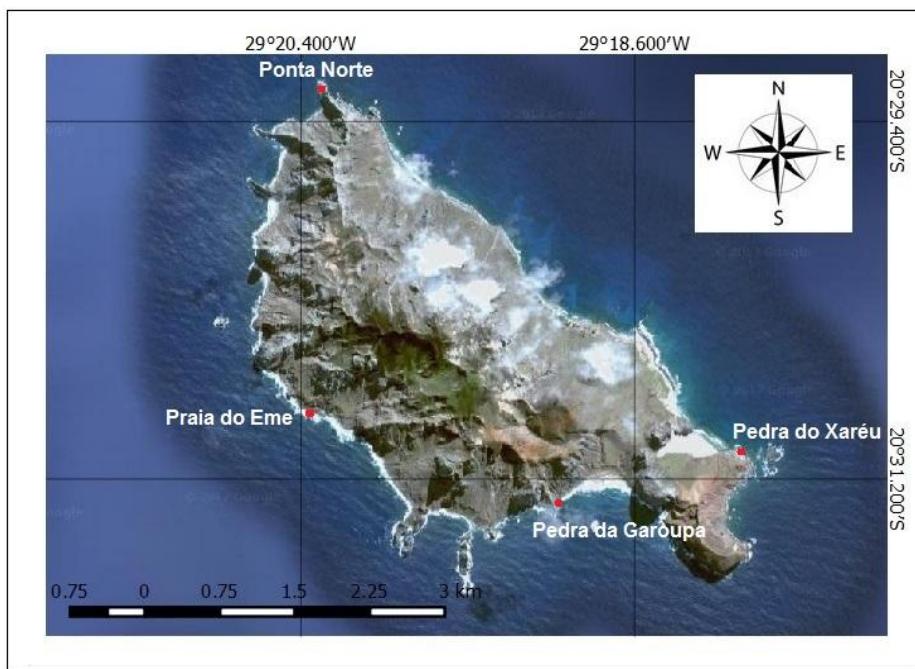


Figura 55. Vista aérea da Ilha da Trindade destacando os pontos (vermelhos) com maior número de ocorrência de acidentes.

Militares e pesquisadores presentes na ilha durante a prática de pesca ou mesmo visitas em determinados locais dos costões rochosos nas proximidades das praias, relatam a ocorrência súbita de ondas surpreendendo e varrendo o pessoal, como sendo o principal agente causador de acidentes, denominada Onda Camelo.

Os locais com a maior frequência de ocorrência estão descritos na Tabela 10 com as condições referentes aos dias de ocorrência de acidentes e a gerada pelo modelo, sendo o de mais alto risco com 4 mortes associadas, a Pedra da Garoupa, imediatamente ao norte da Praia do Príncipe.

Tabela 9. Parâmetros de onda para dias de ocorrência de onda Camelo em águas profundas, e parâmetros modelados para águas rasas (indicados por \*), na Ilha da Trindade.

	Data	H <sub>sig</sub>	T <sub>p</sub> (s)	D <sub>p</sub> (°)	H <sub>sig</sub> (m)*	T <sub>p</sub> (s)*	Obs.
<b>Ponta Norte</b>	22/10/2005	1,96	12,84	349.85	2,62	12,30	1 morte
<b>Praia do M</b>	15/08/2007	3,49	13,15	197.75	2,86	11,76	Acidente

<b>Pedra do Xaréu</b>	03/06/2008	3,03	14,89	200.51	3,01	14,18	1 morte
<b>Pedra da Garoupa</b>	17/07/2010	3,35	12,33	210.09	2,24	11,37	4 mortes

A permanência sob costões e promontórios rochosos caracteriza em si, um elevado risco permanente, tendo em vista a possibilidade de queda, deslizes, quebra de onda com alta energia e inúmeras possíveis consequências, necessitando constantemente maior atenção do usuário.

Sob as determinantes oceanográficas registradas durante o dia 22/10/2005, foi verificada por meio da modelagem a ocorrência de altura significativa de onda de 2,62 m e 12,30 s de período, para o ponto mais próximo da Ponta Norte, condição altamente energética oferecendo elevado grau de risco à permanência no local. A Figura 56 torna evidente o nível acentuado de energia nas proximidades do referido local.

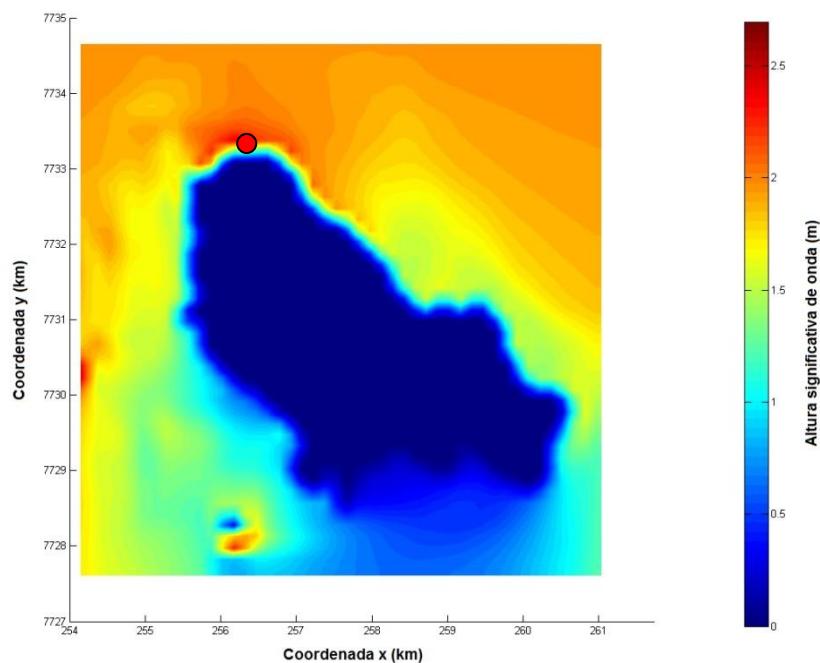


Figura 56. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 22/10/2005, evidenciando a condição de alta energia na Ponta Norte, identificada com ponto vermelho.

Sob condições de mar semelhantes deve ser evitado o acesso ao local e proximidades, essencialmente em áreas expostas à ação de ondas. Se inevitável, adotar maiores cuidados como a identificação em trilhas sob costões e promontórios, regiões de possíveis alcances do mar sob condições revoltas (umidade, presença de organismos, musgo) e o comportamento da maré, são fundamentais no que se refere à segurança e diminuição de risco.

Para as proximidades da Ponta Norte, o comportamento da altura significativa de onda pode ser observado na Figura 57, em que, a frequência de ocorrência de ondulações com altura acima de 2 m foi 22,6 % ao longo dos anos, e maiores de 2,5 m foi de 8,63% com pico superior a 4 m, principalmente entre os meses de primavera-verão, necessitando máxima atenção durante os períodos.

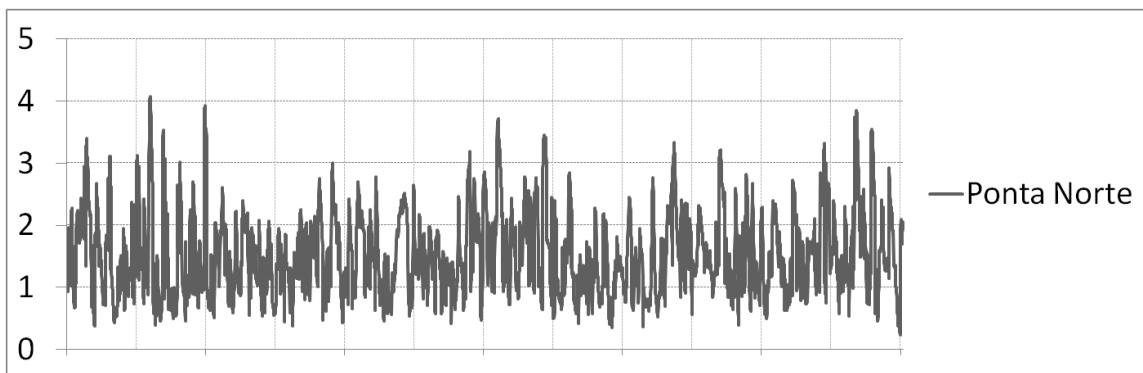


Figura 57. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Ponta Norte, entre os anos de 2013 e 2014.

Condição semelhante foi observada quando analisado o cenário do dia 15/08/2007 para o ponto nas proximidades da Praia do Eme (Figura 58), localizada no lado oriental da ilha. A ondulação atingiu a antepraia com altura significativa de 2,86 m e 11,76 s de período, conferindo alto risco à permanência no local, podendo ser evitada.

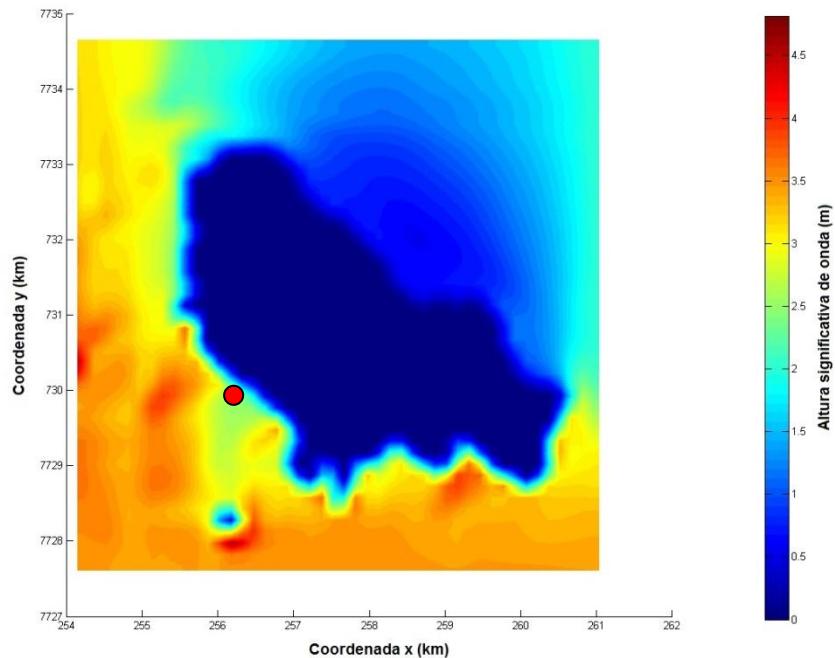


Figura 58. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 15/08/2007, evidenciando a condição de alta energia na Praia do Eme, identificada com ponto vermelho.

Tal situação, foi vivida por pesquisadores do TAMAR (Projeto Tartarugas Marinhas) na Praia do Eme, com as ondas sobrepondo o costão e encobrindo-os acima da cintura, como evidenciada na Figura 59, antes e após ser atingido pela onda.

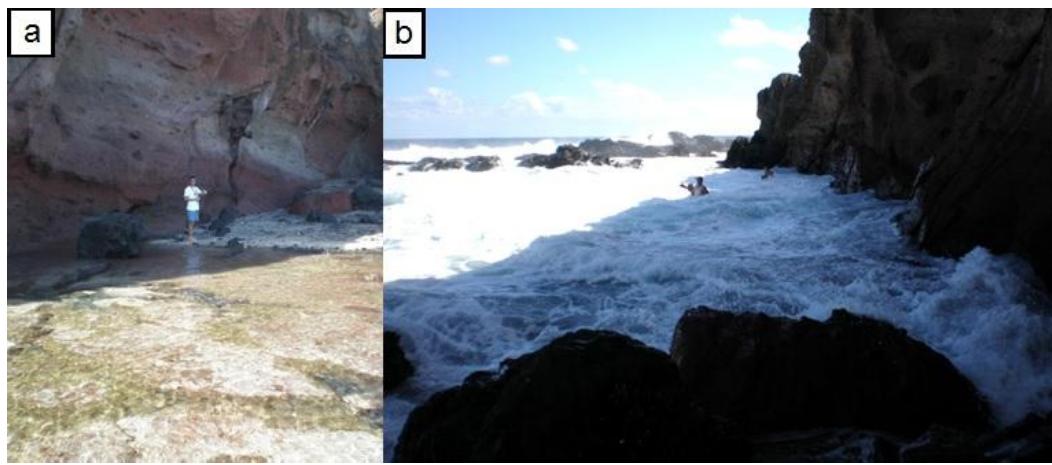


Figura 59. Praia do Eme antes e durante a Onda Camelô (Foto: POIT). a - Antes da ocorrência súbita de onda. b - Depois da passagem da onda.

O padrão da altura significativa de onda para as proximidades da Praia do Eme pode ser observado na Figura 60. Situações com altura significativa de ondas acima dos 2 m ocorreram com frequência de 11,3 %, e, condição de onda superior a 2,5 m com frequência de aproximadamente 3 % com picos de até 3,5 m na região de antepraia, principalmente entre os meses de primavera e verão. Tal padrão confere significativo grau de risco à permanência no local e proximidades sob condições de mar revoltas.

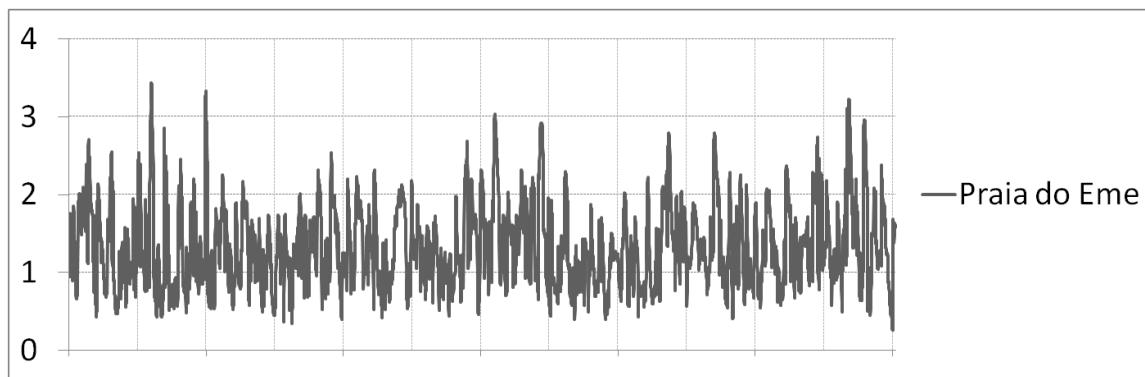


Figura 60. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Praia do Eme, entre os anos de 2013 e 2014.

Para a Pedra do Xaréu, quando verificado os parâmetros de onda referentes ao dia 03/06/2008, relacionado a ocorrência de acidente envolvendo óbito, e propagada a ondulação até águas rasas, foi constatada 3,01 m de altura significativa e 14,18 s de período para o ponto mais próximo do local. Tal condição proporciona alto grau de risco devido a quebra de onda de alta energia, principalmente sob costões e promontórios rochosos, devendo ser evitada qualquer tipo de prática nas proximidades. A Figura 61 destaca a condição altamente energética para as áreas próximas.

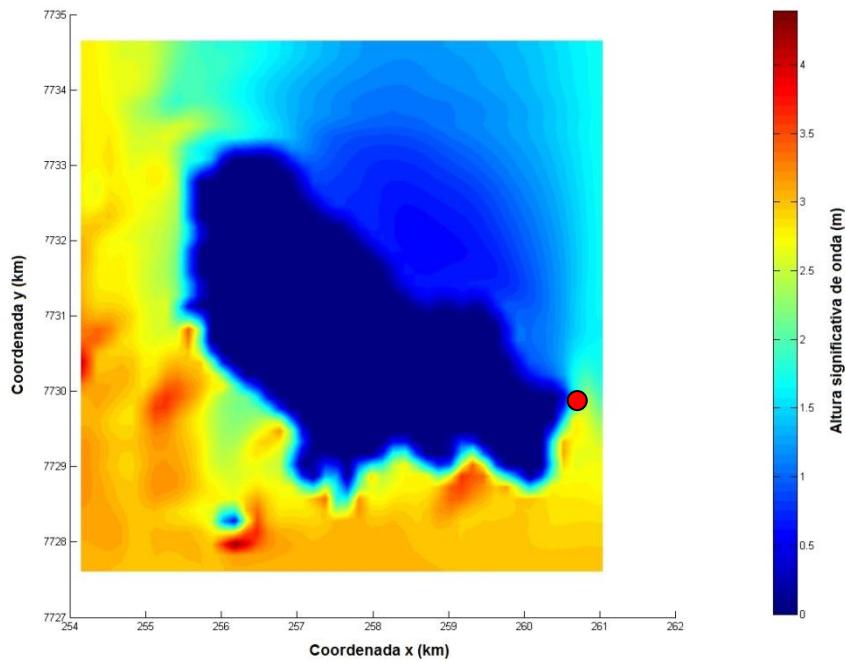


Figura 61. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 03/06/2008, evidenciando a condição de alta energia nas proximidades da Pedra do Xaréu, identificada com ponto vermelho.

O padrão comportamental da altura significativa de onda próxima à Pedra do Xaréu pode ser observado na Figura 62, com destaque para a elevada frequência de ocorrência de altura acima dos 2 m, atingindo 46,7 % e, superior a 2,5 metros, as quais alcançam valores próximos de 24% com picos acima dos 5 m, o que implica alto grau de periculosidade ao local, devendo ser evitado principalmente durante os meses de outono e inverno, tendo em vista a direção preferencial das ondas.

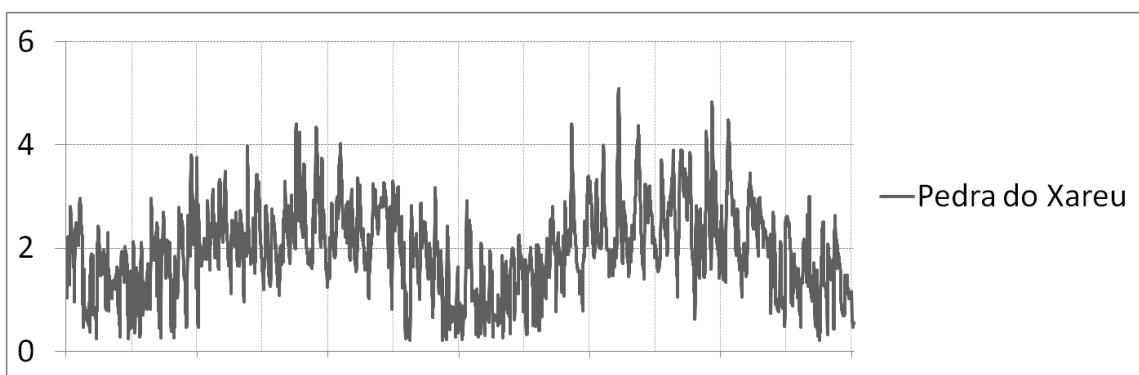


Figura 62. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Pedra do Xaréu, entre os anos de 2013 e 2014.

Reconhecido pelo maior número de acidentes envolvendo óbitos, sob a condição dos parâmetros de onda referente ao dia 17/07/2010 associado a ocorrência de acidente, foi verificado para a Pedra da Garoupa altura significativa de onda de 2,24 m e 11,37 s de período (Figura 63). Tendo em vista a possibilidade de deslizes e / ou quebra de onda com alta energia, sob condições oceanográficas semelhantes, deve ser evitada a permanência no local e proximidades, tendo em vista o elevado grau de risco envolvido dentro deste cenário.

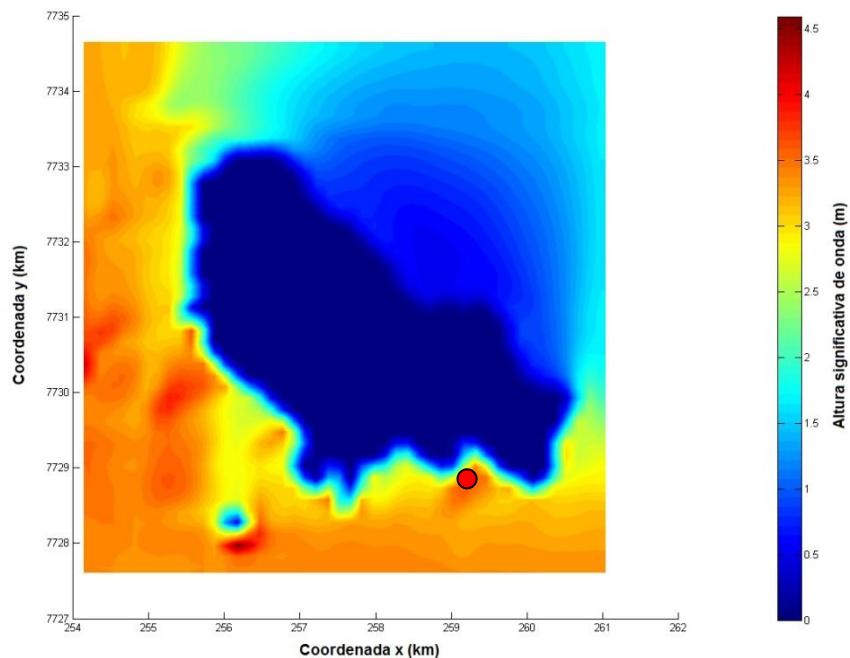


Figura 63. Variação da altura significativa de onda referentes ao dia 17/07/2010, evidenciando a condição de alta energia na Pedra da Garoupa, identificada com ponto vermelho.

Ao analisar o padrão da altura significativa de onda para as zonas próximas à Pedra da Garoupa (Figura 64), puderam ser observadas condições altamente energéticas, com altura acima de 2 m ocorrendo com frequência de 14,5 % e, superiores a 2,5 metros aproximadamente 4,5 % entre os anos de 2013 e 2014, essencialmente entre os meses de outono-inverno, com pico máximo de 4,32 m.

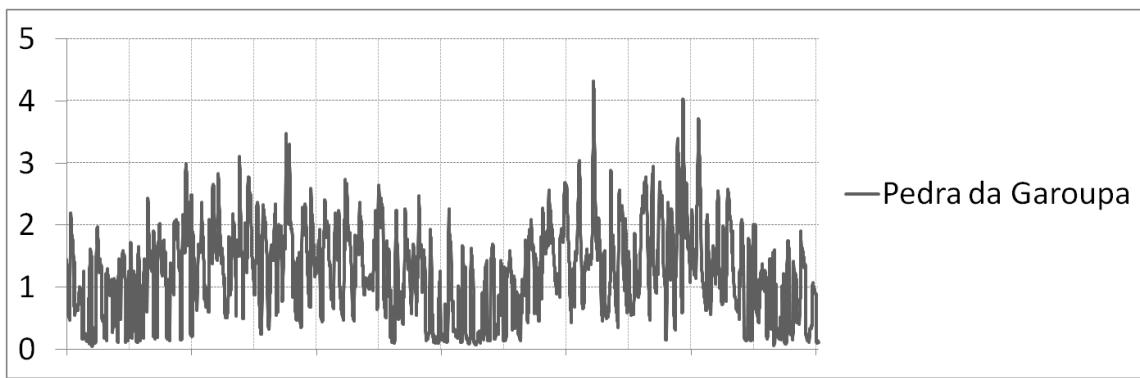


Figura 64. Variação da altura significativa de onda para o ponto mais próximo da Pedra da Garoupa, entre os anos de 2013 e 2014.

De maneira geral, os resultados obtidos através da modelagem de ondas geraram informações importantes com relação à segurança dos usuários. A partir das análises do comportamento hidrodinâmico por meio das simulações para os principais ponto de ocorrência de acidentes foi possível identificar a ocorrência de condições altamente energéticas ao longo de todo ano, sendo sugerido medidas protetivas à permanência nos locais.

## 6 Conclusões

- Os resultados das simulações evidenciaram heterogeneidade no comportamento hidrodinâmico dominante para os cinco sistemas praias que compõem o segmento leste da Ilha da Trindade em consequência da influência da batimetria *offshore* na transformação de ondas até águas rasas e da configuração das baías.
- As praias posicionadas ao norte da ilha apresentam clima de ondas mais energético entre os meses de primavera-verão em razão das direções de exposição da baía, enquanto as praias ao sul obedecem o aumento da intensidade de energia durante meses de inverno com posterior diminuição nos meses de verão.
- Os distintos sistemas praiais apresentam condições diferenciadas da variabilidade do clima de ondas, assim como a frequência e magnitude dos processos hidrodinâmicos, e, em associação a presença / ausência de recifes e rochas e irregularidades batimétricas na antepraia proporcionam comportamentos particulares à cada perfil.
- A análise do comportamento morfológico dos distintos sistemas a curto e médio prazo em função das oscilações energéticas, identificou as principais alterações do perfil ocorrentes essencialmente na face de praia e pós-praia inferior, com o pós-praia superior eventualmente atingido em situações de alta energia.
- Todas as praias apresentam comportamento morfo-sedimentar cíclico, com acréscimo nos meses de verão e posterior diminuição no inverno.
- Apesar da mineralogia diferenciada da ilha Trindade as praias apresentam comportamento morfodinâmico análogo às praias continentais.
- Os baixos valores do parâmetro Ômega ( $\Omega$ ) para as três diferentes praias fornecem suporte para o modelo de classificação praial indicando alta refletividade dos sistemas.
- A partir dos cálculos dos parâmetros morfométricos foram identificadas como mais variáveis: a Praia da Calheta e Vermelha, seguido da Praia dos Andradadas, Praia dos Cabritos e Praia das Tartarugas.

- As praias mais perigosas ao público usuário são: Vermelha e Tartarugas, seguido de Andradas, Cabritos e Calheta. Os principais riscos associados estiveram relacionados a exposição de rochas, quebra abrupta de onda, correntes de retorno e o rápido aumento da profundidade, sendo variáveis no decorrer do ano.
- Os principais locais de ocorrência de acidentes envolvendo óbitos apresentam condições hidrodinâmicas altamente energéticas ao longo de todo ano, devendo ser evitado o acesso visando a segurança dos usuários, essencialmente sob alta energia de onda.

## 7 Referências bibliográficas

- Aagaard, T., Greenwood, B. & Hughes, M., 2013. Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches. *Earth-Science Reviews*, 124, pp. 32–50.
- Akpınar, A., van Vledder, G. P., Kömürcü, M. İ., & Özger, M., 2012. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, 50, pp. 80-99.
- Almeida, F.F.M., 1961. *Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, pp. 197.
- Almeida, F.F.M., 1995. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil: Ilha de Trindade - Registro de vulcanismo cenozóico no Atlântico Sul. *Sigep*, pp. 369–377.
- Almeida, F.F.M., 2006. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. *Terra Didática*, 2(1), pp. 3–18.
- Alves, R.J.V., 1998. Ilha da trindade & Arquipelago Martin Vaz: Um ensaio Geobotânico. Serviço de documentação da Marinha, pp. 144.
- Bird, E.C.F., 1985. Coastline Changes: A Global Review. Chichester: Wiley, pp. 218.
- Birkemeier, W.A., 1985. Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 11(3), pp. 598-602.
- Bulhoes, E.M.R., 2005. Condições Morfodinâmicas associadas a riscos aos banhistas. Em busca de uma contribuição à segurança nas praias oceânicas da cidade do Rio de Janeiro, RJ., pp. 1–11.
- Calliari, L.J., Pereira, P.D.S., Short, A.D., Sobral, F.C., Machado, A.A., Pinheiro, Y.G., Fitzpatrick, C., 2016. Sandy Beaches of Brazilian Oceanic Islands. In A.D. Short & A.H.F., Klein, eds. *Brazilian Beach Systems*. Cham: Springer International Publishing, pp. 543–571.
- Carter, R.W.G., 1988. *Coastal Environments*. London: Academic Press, pp.617.
- Castro, J.W.A., 2003. Campos de dunas escalonares “*Climbing Dunes*” do litoral do Estado do Rio de Janeiro e ilha oceânica da Trindade. In: SBG, Congresso brasileiro de Geologia. 42, Araxá, MG, pp. 64.
- Castro, J.W.A., 2005. Depósitos holocénicos da ilha da Trindade: Gênese e Controle Ambiental. In: Workshop Ilhas Oceânicas brasileiras: Pesquisa e Manejo, 1º. Museu Nacional/UFRJ. Rio de Janeiro, pp.24.
- Castro, J.W.A., Antonello, 2006. Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: *Ilhas oceânicas Brasileiras-da pesquisa ao Manejo*. MMA:SBF, Brasília, pp 29–57.
- Castro, J.W.A., 2009. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 10(3), pp. 303–319.
- Clemente, E.P., Schaefer, C.E., Albuquerque Filho, M.R., Oliveira, F.S.; Alves, R.J.; Melo, V.F., 2006. Solos “Endêmicos” da Ilha da Trindade. Brasília: MMA, SBF, Ilhas Oceânicas Brasileiras – da pesquisa ao Manejo, pp. 59-82.
- Clemente, E.P., Schaefer, C.E., Oliveira F.S., Albuquerque, Filho M.R., Alves,

- R.J., Firme Sá, M.M., Melo, V.F., Corrêa, G.R., 2009. Toposequência de solos na Ilha da Trindade. *Atlântico Sul Rev. Bras. Ciên. Solo* 33(5), pp. 1357–1371.
- Clemente, E. de P., Schaefer, C., Oliveira, F.S., Marciano, L.D.C. & Clemente, A.D., 2012. Geoquímica Dos Solos Da Ilha Da Trindade, Atlântico Sul, Brasil. *Geociências*, 31(1), pp. 57–67.
- Cordani, U. G. ,1970. Idade do vulcanismo do Oceano Atlântico Sul. São Paulo: Instituto de Geociências e Astronomia, Boletim IGA, 1, pp. 9-75.
- Dai, Z.J., Liu, J.T., Lei, Y.P., & Zhang, X.L., 2010. Patterns of sediment transport pathways on a headland bay beach—Nanwan beach, South China: A case study. *Journal of Coastal Research*, 26(6), pp. 1096-1103.
- Daly, C.J., Bryan, K.R., Roelvink, J.A., Klein, A.H.F., Hebbeln, D., & Winter, C., 2011. Morphodynamics of embayed beaches: the effect of wave conditions. *Journal of Coastal Research*, 64, pp. 1003 -1007.
- Davies, J.L., 1964. A morphogenetic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8, pp. 27–42.
- Dean, R.G., 1973. Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone. *Proceedings of Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, pp. 208–214.
- Dolan, R., Hayden, B. & Heywood, J., 1978. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2, pp. 21–39.
- Fachin, S., 1998. Caracterização do Perfil de Equilíbrio da Antepraia na Costa do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 105.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoldi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature communications*, 5, pp. 3794.
- Ferreira, Ó., 2005. Storm Groups versus Extreme Single Storms : Predicted Erosion and Management Consequences. , (42), pp. 221–227.
- Galvin, C.J., 1968. Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, 73(12), pp. 3651–3659.
- Hoefel, F.G., 1998. Livro Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas: uma revisão bibliográfica. *Editora da Universidade do Vale do Itajaí*, pp. 90.
- Hoefel, F.G. & Klein, A.H.F., 1998. Environmental and Social Decision Factors of Beach Safety in the Central Northern Coast of Sc, Brazil. *Notas Técnicas FACIMAR*, 2, pp.155–166.
- Holthuijsen, L.H.; Booij, N.; Ris, R.C.; Haagsma, I.J.G.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Padilla-Hernandez, R., 1999. SWAN Cycle 2 version 40.01. User Manual. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. & Del Rio, L., 2005. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*, 216(4), pp. 297–314.
- Klein, A.H.F. & Menezes, J.T. De, 2001. Beach Morphodynamics and Profile Sequence for a Headland Bay Coast, 17(4), pp. 812–835.
- Klein, A.H.F., 2004. Morphodynamics of Headland Bay Beaches: Examples from the Coast of Santa Catarina State, Brazil. Universidade do Algarve. Portugal. PhD Thesis.
- Klein, A.H.F., Santana, G.G., Diehl, F.L., & Menezes, J.T., 2003. Analysis of hazards associated with sea bathing: results of five years work in oceanic beaches of Santa Catarina State, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 35(35), pp. 107–116.

- Komar, P.D., 1998. Beach processes and sedimentation. *Englewood Cliffs*, NJ, Prentice-Hall, Inc.
- Komar, P.D., 1976. Beach Processes and Sedimentation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 429.
- Lacey, R.F. & Pike, E.B., 1989. Water Recreation and Risk. *Water and Environment Journal*, 3(1), pp.13–21.
- Loureiro, C., Ferreira, Ó. & Cooper, J. a. G., 2009. Contrasting morphologic behaviour at embayed beaches in Southern Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI 56(56), pp. 83–87.
- Loureiro, C., 2012. Geomorphology and Morphodynamics of Embayed Beaches in Contrasting Environments, pp. 183.
- Loureiro, C., Ferreira, Ó. & Cooper, J.A.G., 2013. Applicability of parametric beach morphodynamic state classification on embayed beaches. *Marine Geology*, 346, pp. 153–164.
- Masselink, G. & Short, A.D., 1993. The Effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. 9(3), pp. 785–800.
- Matos, M.F.A., Amaro, V., Fortes, C.J., Scudelari, A.C., 2014. Interação entre ondas oceânicas e fundo marinho: resultados na plataforma continental setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 3, pp. 371-391.
- Mohr, L.V., Castro, J.W.A., Costa, P.M.S., & Alves, R.J.V., 2009. Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo—volume II. *Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas*, pp. 503.
- Morton, R.A., Gibeaut, J.C. & Paine, J.G., 1995. Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology*, 126(1–4), pp.161–179.
- Motoki, A., Motoki, K.F. & Melo, D.P. De, 2012. Caracterização da Morfologia Submarina da Cadeia Vitória-Trindade e áreas adjacentes-ES, Com base na batimetria predita do Topo Versão 14.1. , 2, pp.151–170.
- Niedoroda, A.W., Swift, D.J.P. & Hopkins, T.S., 1985. The shoreface. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, pp. 39–71.
- Padilla-Hernandez, R.; Monbaliu, J., 2001. Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation. *Coastal Engineering*, 43, pp. 131-148.
- Pereira, P.D.S., Calliari, L.J., Lélis, R.J.F., & de Figueiredo, S.A., 2001. Riscos associados ao banho de mar e sua relação com a heterogeneidade morfodinâmica das praias do Rio Grande do Sul, Brasil: Projeto Segurança nas praias, pp. 4–6.
- Pethick, J., 1984. An Introduction to Coastal Geomorphology. Edward Arnold, London, pp. 272.
- Pianca, C., Mazzini, P.L.F. & Siegle, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1), pp. 53–70.
- Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. & Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104, pp. 7667.
- Scott, T., Masselink, G. & Russell, P., 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286(1–4), pp.1–20.

- Short, A.D., 2006. Australian Beach Systems—Nature and Distribution. *Journal of Coastal Research*, 221(1), pp. 11–27.
- Short, A.D., 1981. Beach response to variations in breaker height. In *Coastal Engineering 1980*, pp. 1016-1035.
- Short, A.D., 1979. Three dimensional beach-stage model. , 87(5), pp.553–571.
- Short, A.D., 1999. Beach and Shoreface Morphodynamics. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, pp. 379.
- Short, A.D. & Hogan, C.L., 1994. Impact Currents on Public and Hazards : and Their for Safety Implications Coastal, 12, pp. 14.
- Short, A.D. & Jackson, D.W.T., 2013. Beach Morphodynamics. *Treatise on Geomorphology*, 10, pp. 106–129.
- Short, A.D. & Klein, A.H.F., 2016. *Brazilian Beach Systems*, 17, pp. 611.
- Soares, L.D.C., 1964. As ilhas oceânicas. *Brasil, a terra e o homem, bases físicas*. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 1, pp. 341-378.
- Sonu, C.J., 1973. Three-Dimensional Beach Changes. , 9(1), pp. 1–6.
- Souza, K.K.D. & Schaefer, C.E.G.R., 2011. Imagem de alta resolução como auxílio pré-campo: correlação entre resposta espectral e mineralogia das praias magnéticas da Ilha da Trindade - Atlântico Sul. , pp. 1298–1310.
- Stanley, D.J. & Swift, D.J., 1976. Marine Sediment Transport and Environmental Management, New York: John Wiley e Sons, Inc. pp. 602
- Sunamura, T., 1984. Quantitative predictions of beach-face slopes Quantitative predictions of beach-face slopes, 95(2), 242-245.
- Thornton, E., Dalrymple, T., Drake, T., Elgar, S., Gallagher, E., Guza, R., & Ozkan-Haller, T., 2000. State of Nearshore Processes Research: II. Report based on the Nearshore Research Workshop, St. Petersburg, Florida. Technical Report NPS-OC-00-001. Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Toldo Jr., E., Almeida, L. E. S. B. D. A., Nicolodi, J. L., & Martins, L. R. S., 2005. Retração e progradação da zona costeira do estado do Rio Grande do Sul. *Gravel*, 3(1), pp. 31–38.
- Thieler, E. R., 1996. Shoreface Processes in Onslow Bay. Carolina Geological Society, pp. 23-32.
- Tolman, H.L., 1999. User manual & system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, pp. 118.
- Wentworth, C.K. 1922. A Scale of grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*, 30, pp. 377-392.
- Wright, L.D., Chappell, J., Thom, B.G., Bradshaw, M.P., & Cowell, P., 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Marine Geology*, 32(1-2), pp. 105-140.
- Wright, L.D. & Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1–4), pp. 93–118.
- Wright, L.D., Short, A.D. & Green, M.O., 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. *Marine Geology*, 62(3–4), pp. 339–364.
- Wright, L.D., Short, A.D., Boon, J.D., Hayden, B., Kimball, S., & List, J.H., 1987. The morphodynamic effects of incident wave groupiness and tide range on an energetic beach. *Marine Geology*, 74(1-2), pp. 1-20.

Abaixo está reproduzido o arquivo dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações do modelo SWAN.

[WaveFileInformation]

FileVersion = 02.00

[General]

ProjectName = Trindade

Description = 2013\_2014 - final

OnlyInputVerify = false

SimMode = non-stationary

TimeStep = 2.0000000e+001

DirConvention = nautical

ReferenceDate = 2013-01-01

WindSpeed = 0.0000000e+000

WindDir = 0.0000000e+000

[TimePoint]

Time = 0.0000000e+000

WaterLevel = 0.0000000e+000

XVeloc = 0.0000000e+000

YVeloc = 0.0000000e+000

[TimePoint]

Time = 1.8000000e+002

WaterLevel = 0.0000000e+000

XVeloc = 0.0000000e+000

YVeloc = 0.0000000e+000

.

.

[TimePoint]

Time = 1.0510200e+006

WaterLevel = 0.0000000e+000

XVeloc = 0.0000000e+000

YVeloc = 0.0000000e+000

[Constants]

WaterLevelCorrection = 0.0000000e+000

Gravity = 9.8100004e+000

WaterDensity = 1.0250000e+003

NorthDir = 9.0000000e+001

MinimumDepth = 8.0000000e+000

[Processes]

GenModePhys = 3

Breaking = true

BreakAlpha = 1.0000000e+000

BreakGamma = 7.3000002e-001

Triads = false

TriadsAlpha = 1.0000000e-001

TriadsBeta = 2.2000000e+000

WaveSetup = false

BedFriction = jonswap

BedFricCoef = 1.9900000e-002

Diffraction = true

DiffracCoef = 2.0000000e-001

DiffracSteps = 5

DiffracProp = true

WindGrowth = true

WhiteCapping = Komen

Quadruplets = true

Refraction = true

FreqShift = true

WaveForces = dissipation

[Numerics]

DirSpaceCDD = 5.0000000e-001

FreqSpaceCSS = 5.0000000e-001

RChHsTm01 = 2.0000000e-002

RChMeanHs = 2.0000000e-002

RChMeanTm01 = 2.0000000e-002

PercWet = 9.8000000e+001

MaxIter = 15

[Output]

TestOutputLevel = 0

TraceCalls = false

UseHotFile = true

WriteCOM = false

COMWriteInterval = 1.8000000e+002

[Domain]

Grid = grid\_150m.grd

BedLevelGrid = grid\_150m.grd

BedLevel = grid\_150m.dep

DirSpace = circle

NDir = 36

StartDir = 0.0000000e+000

EndDir = 0.0000000e+000

FreqMin = 5.0000001e-002

FreqMax = 1.0000000e+000

NFreq = 24

Output = true

[Boundary]

Name = Boundary 1

Definition = orientation

Orientation = north

SpectrumSpec = parametric

SpShapeType = jonswap

PeriodType = peak

DirSpreadType = power

PeakEnhanceFac = 3.3000000e+000

GaussSpread = 9.9999998e-003

WaveHeight = 0.0000000e+000

Period = 0.0000000e+000

Direction = 0.0000000e+000  
DirSpreading = 0.0000000e+000

[Boundary]

Name = Boundary 2  
Definition = orientation  
Orientation = east  
SpectrumSpec = parametric  
SpShapeType = jonswap  
PeriodType = peak  
DirSpreadType = power  
PeakEnhanceFac = 3.3000000e+000  
GaussSpread = 9.9999998e-003  
WaveHeight = 0.0000000e+000  
Period = 0.0000000e+000  
Direction = 9.0000000e+001  
DirSpreading = 0.0000000e+000

[Boundary]

Name = Boundary 3  
Definition = orientation  
Orientation = south  
SpectrumSpec = parametric  
SpShapeType = jonswap  
PeriodType = peak  
DirSpreadType = power  
PeakEnhanceFac = 3.3000000e+000  
GaussSpread = 9.9999998e-003  
WaveHeight = 0.0000000e+000  
Period = 0.0000000e+000  
Direction = 1.8000000e+002  
DirSpreading = 0.0000000e+000

[Boundary]

Name = Boundary 4  
Definition = orientation

Orientation = west  
SpectrumSpec = parametric  
SpShapeType = jonswap  
PeriodType = peak  
DirSpreadType = power  
PeakEnhanceFac = 3.3000000e+000  
GaussSpread = 9.999998e-003  
WaveHeight = 0.0000000e+000  
Period = 0.0000000e+000  
Direction = 2.7000000e+002  
DirSpreading = 0.0000000e+000