Talitha de Souza Lourenço

**Variabilidade interanual do clima de ondas e sua influência no litoral
Sudeste e Sul do Brasil**

Dissertação apresentada ao Instituto
Oceanográfico da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências, Programa de Pós
Graduação em Oceanografia, Área de
concentração Oceanografia Geológica
Orientador Dr. Eduardo Siegle

São Paulo

2012

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Variabilidade interanual do clima de ondas e sua influência no litoral Sudeste e
Sul do Brasil

Talitha de Souza Lourenço

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Pós Graduação em Oceanografia, Área de
concentração Oceanografia Geológica

Julgada em 04 / 12 / 2012

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

*Alacir, Carlos, Larissa e Érica,
por todo apoio e amor incondicional.*

Sumário

AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	- 14 -
2. OBJETIVOS	- 15 -
2.1. OBJETIVO GERAL	- 15 -
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 15 -
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 16 -
3.1. ONDAS GERADAS PELO VENTO	- 16 -
3.2. LINHA DE COSTA	- 18 -
3.3. MUDANÇAS CLIMÁTICAS	- 19 -
3.4. EL NIÑO	- 20 -
3.5. LEVANTAMENTO DE ESTUDOS NO BRASIL	- 21 -
4. ÁREA DE ESTUDO	- 23 -
4.1. DINÂMICA ATMOSFÉRICA SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO SUL	- 25 -
4.1.1. CICLONES E CICLOGÊNESE	- 26 -
4.1.2. FRENTES FRIAS	- 26 -
4.2. ENSEADA DE MASSAGUAÇU – CARAGUATATUBA – SÃO PAULO	- 27 -
4.3. REGIÃO SUL DE IMBITUBA – SANTA CATARINA	- 29 -
5. MÉTODOS	- 31 -
5.1. CLIMA DE ONDAS	- 31 -
5.1.1. FORÇA DE ONDA	- 32 -

5.1.2. ANÁLISE DE DADOS DE ONDA	- 33 -
5.2. MODELAGEM NUMÉRICA	- 34 -
5.2.1. MIKE 21 SW	- 34 -
5.2.2. MALHAS MIKE 21	- 37 -
5.2.3. CASOS SIMULADOS	- 39 -
5.2.4. TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS	- 40 -
6. RESULTADOS	- 44 -
6.1. CLIMA DE ONDAS	- 44 -
6.1.1. GERAL (NWW3)	- 44 -
6.1.1.1. VARIAÇÃO ESPACIAL	- 55 -
6.1.2. TEMPESTADES	- 57 -
6.1.2.1. ESPÍRITO SANTO (PONTO 01)	- 57 -
6.1.2.2. RIO DE JANEIRO (PONTO 02)	- 60 -
6.1.2.3. SÃO PAULO (PONTO 03)	- 63 -
6.1.2.4. PARANÁ (PONTO 04)	- 67 -
6.1.2.5. SANTA CATARINA (PONTO 05)	- 70 -
6.1.2.6. RIO GRANDE DO SUL (PONTO 06)	- 73 -
6.1.2.7. VARIAÇÃO ESPACIAL	- 76 -
6.2. MODELAGEM NUMÉRICA	- 78 -
6.2.1. CASOS DO CLIMA DE ONDAS DOMINANTE – SÃO PAULO	- 78 -
6.2.2. CASOS DO CLIMA DE ONDAS DOMINANTE – SANTA CATARINA	- 84 -
7. DISCUSSÃO	- 92 -
7.1. CLIMA DE ONDAS	- 92 -
7.1.1. GERAL (NWW3)	- 92 -
7.1.2. TEMPESTADES	- 94 -
7.2. EFEITO NA COSTA DAS VARIAÇÕES INTERANUAIS DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUA PROFUNDA	- 96 -
7.2.1. SÃO PAULO	- 96 -
7.2.2. SANTA CATARINA	- 97 -
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	- 99 -
9. REFERÊNCIAS	- 101 -
APÊNDICE A	106

Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais, Carlos e Alacir, minhas irmãs, Larissa e Érica, e meu namorado, Wagner, que presentes em minhas conquistas acadêmicas já são um pouco oceanógrafos. Obrigada pela ajuda, apoio, incentivo e paciência, amo muito vocês!

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado e ao CNPq pela bolsa de pesquisa referente ao Edital MCT/CNPq n. 70/2009 – Programa de Expansão da Pós Graduação em Áreas Estratégicas. Ao Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto da Univali agradeço por disponibilizar os dados de linha de costa do SPU-SC. Ao Prof. Dr. Moyses G. Tessler por disponibilizar a fotografia aérea digital do INPE, e à Cassia Pianca pela extração dos resultados do modelo NWW3.

Agradeço ao meu orientador Eduardo Siegle, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por tudo que me ensinou neste processo. À todos do Laboratório de Dinâmica Costeira pelo apoio e agradável companhia, em especial à Ana Amélia pelo auxílio no uso do MIKE 21 SW, à Samara por sempre estar disposta a ajudar, à Mariana por agilizar toda ‘burocracia’ enquanto estava fora e à Juliana pela impressão final. Com certeza aprendi com cada um de vocês, e fico feliz pela oportunidade de tê-los em minha vida.

Agradeço a todos os professores e técnicos que tanto me ensinaram nas diversas disciplinas que cursei e especialmente durante a monitoria do PAE, com certeza foram aprendizados que sempre levarei comigo.

Aos colegas e amigos que fiz em todo este percurso, à grande mesa do café, ao pessoal do café, à todos os amigos de corredores, o meu muito obrigada. Às diversas amigas de apartamento, agradeço a presença e amizade que contribuíram muito pra esta conquista. Sentirei falta de tudo e todos.

Às grandes amigas-irmãs que estiveram tão presentes nesta fase da minha vida, Ana Amélia, Catita, Elizandra, Hamanda, Jana, Mari, Poli e Samara, valeu por tudo!!! Já sinto saudades da convivência! Além das antigas amigas que sempre me deram apoio e carinho! E por fim, obrigada à Deus por permitir mais esta conquista e sempre me cercar de pessoas tão maravilhosas!

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa da área de estudo, litoral Sudeste e Sul do Brasil. Os seis pontos em vermelho indicam a posição dos resultados obtidos no NWW3 para analisar o clima de ondas nos Estados do Espírito Santo (01), Rio de Janeiro (02), São Paulo (03), Paraná (04), Santa Catarina (05) e Rio Grande do Sul (06). As duas áreas marcadas por quadrados vermelhos indicam os setores utilizados para análise dos resultados da modelagem numérica da propagação de ondas e cálculo do transporte de sedimentos: Enseada de Massaguaçu (SP) e região Sul de Imbituba (SC).	- 24 -
Figura 2: Malha utilizada como entrada para as simulações no MIKE 21 SW do Estado de São Paulo. A batimetria está apresentada a direita.	- 38 -
Figura 3: Malha apresentada como entrada no modelo MIKE 21 SW para o Estado de Santa Catarina. A batimetria utilizada está apresentada ao lado direito.	- 38 -
Figura 4: Pontos utilizados para obtenção do transporte de sedimentos na área de interesse no Estado de São Paulo. Eles representam as praias da Cocanha (SP01), Massaguaçu (SP02) e Capricórnio (SP03), com profundidades de 6,34 m, 6,31 m e 6,47 m respectivamente.	- 41 -
Figura 5: Área de interesse no Estado de Santa Catarina, os pontos foram utilizados para cálculo do transporte de sedimentos nas praias da Vila (SC01), Vila Nova (SC02) e Itapirubá (SC03), respectivamente, com profundidades de 7,5 m, 8,7 m e 6,3 m.	- 42 -
Figura 6: Percentual de ocorrência da altura (m) e período (s) nos Estados de Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03), em sequência.	- 49 -
Figura 7: Percentual de ocorrência da altura (m) e período (s) nos Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06), em sequência.	- 50 -
Figura 8: Rosas de altura (esquerda) e período (direita) de onda para os Estados do Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03). Estas rosas apresentam o percentual de ocorrência de cada classe dos parâmetros de onda (altura e período) em cada direção.	- 52 -
Figura 9: Rosas de altura (esquerda) e período (direita) de onda para os Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06). Estas rosas apresentam o percentual de ocorrência de cada classe dos parâmetros de onda (altura e período) em cada direção.	- 53 -
Figura 10: Força de onda (kW/m) máxima, mínima e média apresentados ao longo dos 14 anos analisados para os Estados do Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03), em sequência.	- 54 -
Figura 11: Força de onda (kW/m) máxima, mínima e média apresentados ao longo dos 14 anos analisados para os Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06), em sequência.	- 55 -

Figura 12: Rosas das ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) no Espírito Santo (ponto 01).	- 58 -
Figura 13: Variação interanual do clima de ondas de tempestade, apresentando a direção média, altura média e força média em gráficos de linha no mês de Junho para a plataforma do Espírito Santo (ponto 01).	- 59 -
Figura 14: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo no Espírito Santo (ponto 01). Sendo apresentadas, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima.	- 60 -
Figura 15: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Rio de Janeiro (ponto 02).	- 61 -
Figura 16: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo para o Rio de Janeiro (ponto 02). Foi apresentada, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima.	- 62 -
Figura 17: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado do Rio de Janeiro (ponto 02), apresentando a direção, altura e força média no mês de Junho.	- 63 -
Figura 18: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para São Paulo (ponto 03).	- 65 -
Figura 19: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo no Estado de São Paulo (ponto 03). Foi apresentada, conforme a legenda da figura, a força máxima, a força média e a força mínima, todas em kW/m.	- 65 -
Figura 20: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado de São Paulo (ponto 03), apresentando a direção ($^{\circ}$), altura (m) e força médias (kW/m) no mês de Junho.	- 66 -
Figura 21: Rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Estado do Paraná (ponto 04).	- 68 -
Figura 22: Estatísticas de força de onda de tempestade apresentada ao longo do tempo para o Paraná (ponto 04). Sendo apresentadas a força máxima, a média e a mínima, todas em kW/m.	- 68 -
Figura 23: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado do Paraná (ponto 04), apresentando a direção ($^{\circ}$), altura (m) e força (kW/m) médios no mês de Junho.	- 69 -
Figura 24: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para Santa Catarina (ponto 05).	- 71 -
Figura 25: Estatísticas de força de onda de tempestade ao longo do tempo para Santa Catarina (ponto 05). Foi apresentada, a força máxima, a média e a mínima, todas em kW/m.	- 71 -

Figura 26: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado de Santa Catarina (ponto 05), apresentadas direção ($^{\circ}$), altura (m) e força (kW/m) média no mês de Junho.	- 72 -
Figura 27: Rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Rio Grande do Sul.	- 74 -
Figura 28: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo para o Rio Grande do Sul (ponto 06). Sendo, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima, em kW/m.	- 74 -
Figura 29: Variação interanual do clima de ondas de tempestade, sendo apresentada a direção ($^{\circ}$), altura (m) e força (kW/m) médias para o Rio Grande do Sul (ponto 06).	- 75 -
Figura 30: Ondas de Leste (média no ano de 2008) aproximando-se da região de interesse no Estado de São Paulo. A altura significativa das ondas apresentada ao fundo (escala à direita) e os vetores indicam a direção e a intensidade deste movimento.	- 78 -
Figura 31: Transporte de sedimentos gerados nas praias da Cocanha (14,8 kg/s), Massaguaçu (133,1 kg/s) e Capricórnio (68,0 kg/s) pelas ondas de Sudeste no ano de 2010, no fundo foi apresentada a altura significativa (legenda à direita).	- 80 -
Figura 32: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudeste-Sul em 1998 nas praias da Cocanha (7,5 kg/s), Massaguaçu (5,4 kg/s) e Capricórnio (316,5 kg/s), no fundo foi apresentada a altura significativa das ondas durante a aproximação da costa, legenda à direita.	- 81 -
Figura 33: Transporte longitudinal de sedimentos gerado nas praias da Cocanha (64,3 kg/s), Massaguaçu (55,7 kg/s) e Capricórnio (3,7 kg/s) pelas ondas de Sudeste-Sul no ano de 2006, ao fundo foi apresentada a altura significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita).	- 82 -
Figura 34: Ondas de Sul-Sudoeste (caso de 2010) na plataforma atingindo a região de interesse, no qual a altura significativa (m) está apresentada ao fundo (legenda à direita) e os vetores indicam a direção e a intensidade das propagação destas ondas.	- 83 -
Figura 35: Ondas de Nordeste (2002) na plataforma atingindo a região de interesse no Estado de Santa Catarina. Altura significativa (legenda à direita) apresentada ao fundo e direção e intensidade das ondas representadas pelos vetores.	- 85 -
Figura 36: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudeste no ano de 1997 nas praias da Vila (530,3 kg/s), Vila Nova (1363,5) e Itapirubá (1141,5 kg/s). Os vetores indicam a direção e intensidade de transporte e ao fundo a altura significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita).	- 87 -
Figura 37: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sul no ano de 2006 nas praias da Vila (922,8 kg/s), Vila Nova (506,1 kg/s) e Itapirubá (369,6 kg/s) no Estado de Santa Catarina. No fundo foi apresentada a altura	

significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita) e os vetores indicam a direção e intensidade do transporte de sedimentos em cada praia. - 89 -

Figura 38: Aproximação das ondas de Sudoeste (2008) da região de interesse do Estado de Santa Catarina. Ao fundo apresenta a altura de onda significativa (m) com legenda à direita e vetores indicando a direção e a intensidade das ondas. - 91 -

Lista de Tabelas

Tabela 1: Posição geográfica dos seis pontos extraídos do modelo numérico NOAA WAVEWATCH III (NWW3) da NOAA/NCEP, com o Estado de referencia e a profundidade aproximada.....	- 32 -
Tabela 2: Casos representantes da variação interanual para São Paulo (esquerda) e Santa Catarina (direita). Foram considerados aqueles que representaram mais de 10% das ocorrências. Considerando a altura (H), período (T) e direção (D) médios e o desvio padrão da direção (Ddp) para cada caso.....	- 39 -
Tabela 3: Posição geográfica para os pontos utilizados para cálculo do transporte longitudinal para São Paulo (UTM23) e Santa Catarina (UTM22) e profundidades respectivas, conforme obtido no modelo numérico MIKE 21.-	41
-	
Tabela 4: Inclinação das praias de São Paulo (esquerda) e Santa Catarina (direita) em relação ao Norte. Valores utilizados para cálculo do transporte de sedimentos.	- 43 -
Tabela 5: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Espírito Santo.	- 44 -
Tabela 6: Valores mínimos e máximos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Espírito Santo. ...	- 45 -
Tabela 7: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio de Janeiro.	- 45 -
Tabela 8: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio de Janeiro. .	- 45 -
Tabela 9: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma de São Paulo.	- 46 -
Tabela 10: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma de São Paulo.	- 46 -
Tabela 11: Valores mínimos e máximos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Paraná.....	- 46 -
Tabela 12: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Paraná.....	- 47 -
Tabela 13: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Santa Catarina.....	- 47 -
Tabela 14: Média mensal mínima e máxima da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Santa Catarina.....	- 47 -

Tabela 15: Valores mínimos e máximos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio Grande do Sul.	- 48 -
Tabela 16: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio Grande do Sul. ...	- 48 -
Tabela 17: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência no Espírito Santo.	- 57 -
Tabela 18: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Espírito Santo.	- 57 -
Tabela 19: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos e o ano de ocorrência das ondas de tempestade no Rio de Janeiro.	- 60 -
Tabela 20: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios e ano de ocorrência das ondas de tempestade no Rio de Janeiro.	- 61 -
Tabela 21: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência em São Paulo.	- 64 -
Tabela 22: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência em São Paulo.	- 64 -
Tabela 23: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos e o ano de ocorrência das ondas de tempestade no Paraná.	- 67 -
Tabela 24: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Paraná.	- 67 -
Tabela 25: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência em Santa Catarina.	- 70 -
Tabela 26: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência em Santa Catarina.	- 70 -
Tabela 27: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência no Rio Grande do Sul.	- 73 -
Tabela 28: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Rio Grande do Sul.	- 73 -

Resumo

As ondas geradas por tempestades causam as alterações mais significativas na costa arenosa. Este trabalho avaliou a influência da variabilidade interanual do clima de ondas nos processos costeiros do litoral Sudeste e Sul do Brasil. O clima de ondas foi determinado a partir de resultados entre 1997 e 2010 do modelo numérico NOAA WAVEWATCH III (NWW3) com seis pontos de água profunda. O modelo numérico MIKE 21 SW foi utilizado para verificar o efeito destas ondas na Enseada de Massaguaçu (SP) e no trecho Sul de Imbituba (SC). Foram simuladas as direções de ondas mais frequentes e foi calculado o transporte longitudinal de sedimentos gerado por elas. As ondas do quadrante Sul foram mais energéticas e não foi identificado um padrão na variação interanual do clima de ondas. Em São Paulo, as direções de onda mais frequentes (Sul e Sul-Sudoeste) não geraram quantidade efetiva de transporte de sedimentos, e foram as ondas de Leste-Sudeste a Sudeste-Sul que geraram a maior quantidade de transporte longitudinal de sedimentos. Em Santa Catarina foram as ondas de Leste a Sul que geraram maior transporte longitudinal de sedimentos.

Palavras-chave: Ondas de tempestade, propagação de onda, modelagem numérica, MIKE 21 SW, transporte longitudinal.

Abstract

The coastal dynamics is mainly controlled by waves, being the energetic storm waves the most influential. This study aims to assess the wave climate influence on coastal processes in the South and Southeastern coast of Brazil. The wave climate was defined through NOAA WAVEWATCH III (NWW3) numerical model results for six offshore points, from 1997 to 2010. In order to propagate the waves onshore the Spectral Wave FM from MIKE 21 numerical model has been applied on Massaguaçu bay (SP) and Imbituba (SC). Most frequent storm waves have been simulated for each year and sector and sediment longshore transport along each sector was calculated. Waves from the South are the most energetic. There is no clear interannual pattern in the time-series. For SP, the most frequent directions (South and South-Southwest) do not generate considerable longshore sediment transport, with East-Southeast to Southeast-South waves generating most sediment transport, which was northwards for all beaches. In SC the sediment transport was northwards in Vila and Vila Nova beaches and southwards on Itapirubá beach, with waves from Eastern and Southern quadrants generating more longshore sediment transport.

Key words: Storm waves, wave propagation, numerical modeling, MIKE 21 SW, longshore transport.

1. Introdução

As ondas geradas pelo vento recebem energia do seu agente formador, e a transferem através do oceano até atingir a zona costeira, quando as ondas quebram e a energia liberada gera correntes costeiras (KOMAR, 1998). Desta forma as ondas são um importante fator da dinâmica costeira, pois elas movem sedimento diretamente ou através da geração destas correntes, podendo causar acresção e erosão costeira (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Devido ao aumento na altura das ondas geradas pelas tempestades, são as ondas de tempestade as responsáveis pelas mudanças mais significativas na morfologia da praia.

A dinâmica climática do oceano e da atmosfera estão fortemente ligadas (DODET *et al.*, 2010), portanto alterações na atmosfera irão afetar a dinâmica e o clima de ondas. Evidências indicam mudanças no clima terrestre (TRENBERTH *et al.*, 2007), no entanto ainda existem muitas incertezas em relação às taxas e padrões das alterações, e se esta mudança for lenta o suficiente, o planeta pode adaptar-se a ela (HOUGHTON, 2009). Alterações na frequência e intensidade dos eventos extremos (e.g. TRENBERTH *et al.*, 2007) e na altura de onda já foram identificadas (e.g. KOMAR & ALLAN, 2008; DODET *et al.*, 2010; YOUNG *et al.*, 2011). As alterações no clima de ondas podem resultar em alterações ambientais muito mais rápidas e significativas na costa, se comparada com a elevação do nível do mar, por exemplo.

A maior parte da população mundial vive na costa ou próximo dela (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Sendo a costa um ambiente exposto, o crescimento da densidade populacional e a construção de propriedades, faz crescer a vulnerabilidade e o risco associado nestes ambientes (TRENBERTH *et al.*, 2007). Isto contribui para os grandes prejuízos contabilizados nestas áreas.

Neste contexto, compreender o clima de ondas é fundamental para entender a dinâmica praial, especialmente o transporte de sedimentos. Conhecer a dinâmica costeira é imprescindível para lidar com os efeitos das mudanças climáticas, e só uma avaliação temporal pode identificar as alterações.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência da variabilidade interanual do clima de ondas nos processos costeiros do litoral Sudeste e Sul do Brasil, a partir de quatorze anos de resultados de reanálises de ondas geradas pelo vento na plataforma.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar as variações espacial, sazonal, mensal e interanual do clima de ondas completo e de tempestade da região Sudeste e Sul do Brasil.
- Identificar possíveis mudanças no comportamento interanual das ondas, como a intensificação de eventos extremos.
- Modelar a aproximação das ondas de água profunda para duas regiões da costa estudada.
- Avaliar a influência das variações interanuais no clima de ondas em água profunda nas praias de interesse.
- Avaliar o transporte de sedimentos gerado na costa pelas ondas incidentes.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Ondas Geradas pelo Vento

As ondas são formadas pelo vento sobre a superfície da água (BIGG, 2003; KOMAR, 1998), criando pequenas ondulações, que aumentam se o vento continuar soprando (KOMAR, 1998). Enquanto o vento empurra a água, ele transfere energia para o mar (BIGG, 2003).

As características das ondas, como energia, altura e período, são controladas pela velocidade e duração do vento que as origina e pelo tamanho da pista, que é a distância sobre a água que o vento sopra (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). Quanto mais tempo e mais forte o vento soprar, maiores serão as ondas geradas por ele (KOMAR, 1998). O clima de ondas compreende as condições prevalentes em um local por um período específico, ele é representado pelas variáveis altura, período e direção de onda, e é resultado da soma de vagas (*sea*) formadas pelos ventos locais e marulhos (*swell*) originados de tempestades distantes (INMAN & MASTERS, 1994).

Quando as ondas deixam a área de geração e já não estão sobre influência do vento local ocorre a dispersão de onda, na qual as ondas de período longo viajam mais rápido que as de período curto, desta forma começam a se classificar de acordo com o período (KOMAR, 1998).

A dispersão de onda é a principal responsável pela conversão do mar irregular (vagas) das áreas de geração para o mar regular (marulho) (KOMAR, 1998). As ondas que ocorrem nas áreas de tempestade/geração (ainda sobre influência do vento) são chamadas vagas (*sea*), estas ondas são complexas e irregulares pois constituem um espectro de ondas superpostas com diversos períodos e alturas (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). Marulhos (*swell*) são ondas periódicas, com movimento repetitivo em fixos intervalos de tempo, elas possuem o mesmo período ou períodos muito próximos (KOMAR, 1998).

Quando as ondas passam de águas intermediárias para águas rasas elas começam a sentir o efeito do fundo oceânico (DAVIS JR & FITZGERALD,

2004; KOMAR, 1998), e sofrem uma transformação, onde a velocidade e o comprimento de onda diminuem progressivamente e a altura aumenta, mas o período permanece constante (KOMAR, 1998). Estas transformações geram refração e empinamento da onda.

O processo de refração é resultado da diminuição da velocidade da onda devido à interação com o fundo (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Neste processo as ondas mudam a direção de acordo com a diminuição da profundidade, tendendo a tornar as cristas mais paralelas com a profundidade de contorno e a linha de costa (KOMAR, 1998). Quando o processo de refração gera convergência das ondas, como ocorrem em promontórios, ela potencializa a erosão da área, e quando ocorre divergência das ondas, como em baías, potencializa acúmulo de sedimentos e acresção praial (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998), isto tende a ocorrer devido a concentração e dispersão da energia, respectivamente.

O crescimento da onda devido à interação com o fundo ocorre para conservar a energia da onda (BIGG, 2003) e persiste até a onda se tornar instável e quebrar, quando ela dissipa sua energia (BIGG, 2003; DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). Devido a quebra a onda interage com os sedimentos e causa a sua suspensão, quanto maior a onda, maior a quantidade de sedimentos removidos e mais rápidas as correntes longitudinais geradas (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). A quebra da onda na praia gera correntes costeiras, responsáveis pelo transporte de sedimentos na zona de surfe (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). Estas correntes dão direção ao movimento dos sedimentos da praia e moldam a topografia costeira, e a topografia da praia controla os padrões de corrente (KOMAR, 1998).

Quando as ondas quebram em ângulos consideráveis com a linha de costa elas formam correntes longitudinais (KOMAR, 1998) que atuam na zona de surfe/costeira, entre a linha de quebra e a linha de costa (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). Estas correntes possuem fluxos paralelos a linha de costa (KOMAR, 1998), e a velocidade delas está relacionada ao tamanho de onda e ao ângulo dela em relação a costa durante a quebra (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004).

3.2. Linha de Costa

Praia é uma acumulação de sedimentos inconsolidados (KOMAR, 1998), que atua como proteção da linha de costa das ações do mar (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). A praia se estende da linha de maré baixa até a próxima alteração fisiográfica no continente, como uma duna e escarpa (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998). A morfologia costeira é resultado complexo da tectônica atuante, modificada pelas ações combinadas de agentes, como a composição dos sedimentos, e processos mais locais, como os processos físicos de onda, correntes e transporte de sedimentos que nela atuam (KOMAR, 1998).

Quanto a sua morfologia as praias podem ser dissipativas, reflectivas e intermediárias (entre os dois extremos). A praia dissipativa é pouco inclinada e tem ampla zona de surfe, de forma que as ondas quebram primeiro longe da costa e dissipam a energia das ondas até chegar à linha de costa (KOMAR, 1998). As praias reflectivas são bastante inclinadas (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004), raramente possuem zona de surfe e as ondas incidentes quebram próximo a costa (KOMAR, 1998) com pouca perda de energia anterior (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004; KOMAR, 1998).

O litoral pode ser composto por qualquer material disponível em quantidade significativa e tamanho adequado para permanecer na praia (KOMAR, 1998). As praias sujeitas a maior energia de onda tendem a ser compostas de sedimentos mais grossos, em consequência as praias dissipativas geralmente são compostas de areia fina, e as praias reflectivas de cascalhos (KOMAR, 1998) e outros sedimentos grossos.

Durante eventos de tempestade a altura das ondas aumenta, e assim remove sedimento da praia gerando um perfil de tempestade, caracterizado por uma escarpa erosiva proporcional ao tamanho do evento (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Este perfil é temporário e, se não houver tempestades subsequentes, a recuperação da praia começa logo após o evento quando a dinâmica retorna as condições normais de menor energia (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Como tempestades são muito frequentes durante o inverno, neste período a praia não recupera sua condição de baixa energia (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). Quando as ondas de tempestade, mais

altas, atingem praias dissipativas, as ondas quebram mais longe da costa com mínimo aumento de energia incidente na linha de costa (KOMAR, 1998). Desta forma, praias reflectivas tendem a apresentar condições erosionais e praias dissipativas acresção de sedimentos (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004).

Em teoria, erosão é a remoção de material de um local e transportado para outro, os sedimentos removidos durante uma tempestade causam retração da costa, mas erosão só ocorre se o sedimento for carregado por uma distância significativa transversal ou longitudinal (DAVIS JR & FITZGERALD, 2004), como durante eventos climáticos extremos (INMAN & MASTERS, 1994).

3.3. Mudanças Climáticas

Clima é o estado atmosférico (tempo) médio por um período, influenciado pelos ciclos sazonais (BIGG, 2003; HOUGHTON, 2009). O sistema climático é complexo porque nele ocorre um grande número de processos e trocas que agem em diferentes escalas de tempo e muitas vezes de forma não linear, como interações ar-mar geradas pelo El Niño – Oscilação Sul (ENSO) (1 a 10 anos) e ciclo sazonal (menos de um ano) (BIGG, 2003).

Mudanças climáticas são modificações que ocorrem no clima, identificadas pela alteração na média e/ou variabilidade das propriedades, e que persistem por um período extenso (HEGERL *et al.*, 2007). A principal causa antrópica associada às mudanças climáticas recentes é o aumento da concentração atmosférica dos gases estufas, desde o início da revolução industrial (BIGG, 2003; HEGERL *et al.*, 2007).

A partir do levantamento de trabalhos anteriores, o Quarto Relatório do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) (TRENBERTH *et al.*, 2007) sugere que na segunda metade do século XX as atividades de ciclones têm mudado, aumentando a intensidade das tempestades e diminuindo o número de tempestades totais. Foi observado um aumento na atividade de fortes ciclones e a diminuição da atividade dos ciclones fracos nas regiões ao Sul de 40°S, e também atividade mais forte dos ciclones sobre os trópicos durante as estações quentes (WANG *et al.*, 2006a *apud* TRENBERTH *et al.*, 2007). YOUNG *et al.* (2011) encontrou um aumento na velocidade do vento global nas

últimas duas décadas, com a intensificação dos ventos extremos mais rápida que dos ventos médios, e a tendência foi mais forte no Hemisfério Sul que no Norte.

O primeiro furacão documentado no Atlântico Sul, o Catarina, ocorreu no final de Março de 2004, e atingiu o Estado de Santa Catarina com ventos próximos de 40 m/s (TRENBERTH *et al.*, 2007). PEZZA & SIMMINDS (2005 *apud* TRENBERTH *et al.*, 2007) sugeriram que o regime de circulação atmosférica associado com a tendência positiva no Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* – SAM) foram fator chave para o desenvolvimento do furacão.

Os eventos extremos podem estar relacionados a variações naturais do clima/tempo, mas quando o padrão extremo persiste ele pode ser considerado um evento climático extremo, e então associado às mudanças climáticas (TRENBERTH *et al.*, 2007). Estudos têm relatado um aumento significativo no número e tamanho de ciclones extratropicais intensos, e também mudança no trajeto preferencial das tempestades (TRENBERTH *et al.*, 2007). LIM & SIMMONDS (2002 *apud* TRENBERTH *et al.*, 2007) apontaram uma tendência de aumento significativo no número anual de ciclones extratropicais no Hemisfério Sul entre 1979 e 1999.

Mudanças na altura, período e direção das ondas das últimas seis décadas foram detectadas no Atlântico Nordeste em escalas sazonais e pluridecadais (DODET *et al.*, 2010). Alterações na altura significativa das ondas geradas pelas tempestades extratropicais durante o Inverno do Hemisfério Norte e uma tendência de aumento na altura significativa de ondas geradas por furacões no Verão do Hemisfério Norte desde a década de 70 também foram identificadas (KOMAR & ALLAN, 2008). A tendência de aumento foi mais significativa para as alturas de ondas extremas (KOMAR & ALLAN, 2008; YOUNG *et al.*, 2011), especialmente em altas latitudes (YOUNG *et al.*, 2011).

3.4. El Niño

O El Niño envolve o aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico Leste tropical, enfraquecendo o gradiente da temperatura da superfície do mar e gerando mudanças na circulação oceânica (TRENBERTH *et al.*, 2007). Associado a ele ocorre a Oscilação Sul, que altera os ventos alísios, a

circulação tropical e a precipitação, desta forma eventos El Niño – Oscilação Sul (ENSO) são um fenômeno acoplado oceano-atmosfera (TRENBERTH *et al.*, 2007).

Eventos de El Niño ocorrem a cada 3 a 7 anos, e são alternados com eventos de La Niña, que tem comportamento oposto ao dele (TRENBERTH *et al.*, 2007). Eventos de ENSO envolvem grandes trocas de calor entre oceano e atmosfera e afetam as temperaturas médias globais, ou seja, apesar de ser gerado no Pacífico o ENSO tem impacto no clima global (TRENBERTH *et al.*, 2007).

Entre os eventos mais recentes do El Niño destaca-se o de 1982-1983 que foi o segundo mais intenso do século XX, o de 1990-1995 (atingiu a maturidade em 1992) foi o mais longo do século XX, e o mais intenso do século XX o de 1997-1998 (HOUGHTON, 2009), ele foi o maior em termos de anomalias da temperatura da superfície do mar e temperatura média global (TRENBERTH *et al.*, 2007). Não está claro como o ENSO varia e como interage com as mudanças climáticas (TRENBERTH *et al.*, 2007) induzidas pelo homem, mas é possível haver uma ligação entre eles (HOUGHTON, 2009).

3.5. Levantamento de Estudos no Brasil

Existem poucos dados medidos de ondas no Brasil (e.g. PNBOIA, PEREIRA *et al.*, 2000; ALVES & MELO, 2001; ARAUJO *et al.*, 2003; ALVES *et al.*, 2009; CUCHIARA *et al.*, 2009), portanto o uso de resultados estimados por modelos numéricos de onda é frequente (e.g. CANDELLA *et al.*, 1999; ROCHA *et al.*, 2004; ALVES *et al.*, 2009; CUCHIARA *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2010). A utilização dos resultados modelados disponibilizados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos da América (e.g. CASSIANO & SIEGLE, 2010; PIANCA *et al.*, 2010; SCHETTINI *et al.*, 2010) economiza tempo e permite a realização de análises temporais e espaciais. CUCHIARA *et al.* (2009) caracterizaram o clima de ondas na Plataforma Sul Brasileira baseado na revisão de trabalhos anteriores e em um experimento de modelagem numérica. PIANCA *et al.* (2010) descreveram o clima geral de ondas geradas pelo vento oceânico a partir dos resultados

disponíveis do modelo operacional NOAA WAVEWATCH III (NWW3) entre o período de 1997 e 2007.

Avaliar ondas geradas por tempestades e/ou eventos extremos (e.g. CANDELLA *et al.*, 1999; ROCHA *et al.*, 2004; ALVES *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2010) é uma forma de compreender os processos que geram os efeitos mais significativos na costa (e. g. MACHADO *et al.*, 2010), e também uma forma de compreender e identificar, quando houver uma série temporal significativa, possíveis alterações climáticas. ROCHA *et al.* (2004) avaliaram o estado de mar gerado por seis ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul (entre Abril e Setembro de 1999) a partir de reanálises do modelo de terceira geração WAVEWATCH III.

Dados de onda, medidos e modelados, podem ser utilizados como entrada nos modelos numéricos de propagação de ondas (e.g. SIEGLE & ASP, 2007; CASSIANO & SIEGLE, 2010; SCHETTINI *et al.*, 2010). A partir dos resultados gerados pelos modelos numéricos é possível estimar o transporte de sedimentos gerado pelas ondas (e.g. SIEGLE & ASP, 2007; CASSIANO & SIEGLE, 2010). Avaliar o transporte de sedimentos longitudinal é uma ferramenta importante para compreensão dos processos de erosão e acresção ocorrentes na praia (e.g. BITTENCOURT *et al.*, 2005). SIEGLE & ASP (2007) buscaram entender os padrões de refração de onda e estimar a deriva longitudinal potencial gerada na costa Sul de Santa Catarina, a partir de simulações realizadas com o modelo numérico MIKE 21 NSW.

4. Área de Estudo

O Brasil possui mais de 8000 km de litoral (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005). Deste litoral, o Sudeste e Sul (Figura 1) são os mais atingidos por frentes frias e tempestades.

A margem continental brasileira é uma típica margem passiva, com plataforma, talude e sopé continentais (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004). Considerando a morfotectônica e a morfologia da margem continental, o trecho entre a Cadeia Vitória Trindade (ES) e o extremo Sul do Brasil possui a margem larga e mais suave (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004). Neste trecho a plataforma é progradante e subsidente, como resposta à evolução tectônica meso-cenozóica e ao aporte sedimentar terrígeno, isto favorece a suave transição para o talude continental, cuja quebra ocorre entre 80 e 180 m de profundidade (BAPTISTA NETO *et al.*, 2004).

As regiões Sudeste e Sul brasileira estão sujeitas a um regime de micromarés (amplitude de maré menor que 2 m) (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005). O clima de ondas que atinge a costa brasileira é determinado, principalmente, pelos ventos originados no Atlântico Sul (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005), cuja dinâmica atmosférica está descrita posteriormente (ver tópico 4.1). No litoral de Pernambuco ao Cabo Frio (RJ) as ondas são geradas pelos ventos alísios dos quadrantes Nordeste e Leste (ondas com período médio de 5 a 10 s e altura de 1 a 2 m), que são responsáveis pelo transporte de sedimentos mais efetivo, e pelas frentes frias originadas do Sul (com ondas de Sul e Sudeste, com período médio de 7 a 12 s e altura de 1 a 2 m) que ocorrem de Junho a Setembro; no litoral do Cabo Frio ao Chuí as ondas mais frequentes são as geradas pelos ventos alísios (ondas de Nordeste), mas as que geram maior transporte sedimentar são geradas pelos sistemas frontais (ondas dos quadrantes Sul e Sudeste, com período de 10 a 16 s e altura de 1 a 4 m) (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005).

No litoral Sudeste e Sul, entre o Cabo Frio (RJ) e o Cabo de Santa Marta (SC), a Serra do Mar tem alinhamento quase paralelo à linha de costa e chega à ela em diversos pontos (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005; CUNHA & GUERRA, 2006). Esta variação da distância entre a Serra do Mar e

a linha de costa gera uma grande diversidade de paisagens (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005).

A região entre Santos (SP) e São Francisco do Sul (SC) é caracterizada por planície costeira extensa, já na região entre Cabo Frio e Santos e entre São Francisco do Sul e Cabo de Santa Marta o litoral é recortado com vários afloramentos da Serra do Mar (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005). Deste setor a Enseada de Massaguaçu (SP) e a região das praias da Vila, Vila Nova e Itapitubá (SC), descritas nos tópicos 4.2 e 4.3 respectivamente, foram utilizados para modelagem da refração da onda e transporte longitudinal de sedimentos.

Figura 1: Mapa da área de estudo, litoral Sudeste e Sul do Brasil. Os seis pontos em vermelho indicam a posição dos resultados obtidos no NWW3 para analisar o clima de ondas nos Estados do Espírito Santo (01), Rio de Janeiro (02), São Paulo (03), Paraná (04), Santa Catarina (05) e Rio Grande do Sul (06). As duas áreas marcadas por quadrados vermelhos indicam os setores utilizados para análise dos resultados da modelagem numérica da propagação de ondas e cálculo do transporte de sedimentos: Enseada de Massaguaçu (SP) e região Sul de Imbituba (SC).

Considerando a influência da dinâmica climática no clima de ondas é importante compreender qual é a dinâmica atuante sobre o Oceano Atlântico Sul, conforme será apresentado a seguir.

4.1. Dinâmica Atmosférica sobre o Oceano Atlântico Sul

São três grandes sistemas atuantes no Oceano Atlântico Sul e responsáveis pela geração das ondas que atingem o litoral brasileiro: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul (ATAS) e o Anticiclone Polar Migratório (APM) (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005). Sendo que apenas os dois últimos influenciam a costa Sudeste e Sul do Brasil.

O ATAS é semifixo e responsável pelos ventos alísios que sopram de Nordeste e Leste, durante o ano todo com intensidade variada (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005; MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). Sua posição oscila entre 10°S e 40°S por influência das variações sazonais da ZCIT (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005) e oscila no eixo Leste-Oeste devido às variações sazonais causadas pelo balanço de radiação continental e oceânica (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). Ele forma a Massa Tropical Atlântica (MTA) com alta temperatura e umidade, que atua o ano todo, sendo mais expressiva no verão, e atinge o litoral brasileiro, causando chuvas orográficas (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).

O APM é formado pelo acúmulo de ar polar na zona subpolar do Oceano Pacífico desloca-se para Nordeste e divide-se em dois ramos devido ao atrito e bloqueio gerados pela Cordilheira dos Andes, formando a Massa Polar do Atlântico (MPA) e a Massa Polar do Pacífico (MPP) (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). No Sudeste da América do Sul o APM desloca-se de Sudeste para Nordeste, sempre precedido de um sistema frontal (TESSLER & CAZZOLI Y GOYA, 2005). A MPA é fria e úmida (a temperatura e a umidade são adquiridas depois de sua formação, são maiores que na origem), responsável pelos sistemas frontais e atinge latitudes menores que a MPP, atuando sobre o Centro-Sul-Leste da América do Sul, podendo se desenvolver até o Equador quando atinge intensidade mais expressiva (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).

4.1.1. Ciclones e Ciclogênese

A costa Leste da América do Sul é uma região favorável para a ocorrência de ciclogênese, cuja formação e intensificação apresentam variações espaciais e sazonais marcantes (GAN & SELUCHI, 2009).

Os trabalhos de SINCLAIR (1995 *apud* GAN & SELUCHI, 2009) e GAN & RAO (1991 *apud* GAN & SELUCHI, 2009) mostraram a ocorrência de dois centros de máxima ocorrência ciclogênética na América do Sul. O primeiro fica próximo ao Uruguai e foi relacionado à instabilidade baroclínica e ao efeito montanha e é máximo no Inverno (GAN & RAO, 1991 *apud* GAN & SELUCHI, 2009). O segundo fica próximo do Golfo de San Matias (Argentina), foi máximo no Verão e foi relacionado com o processo de instabilidade baroclínica na corrente dos ventos de Oeste, ajudado pelo contraste continente-oceano (GAN & RAO, 1991 *apud* GAN & SELUCHI, 2009). Ambos os centros tem praticamente a mesma ordem na Primavera e no Outono (GAN & RAO, 1991 *apud* GAN & SELUCHI, 2009).

SINCLAIR (1995 *apud* GAN & SELUCHI, 2009) mostrou um centro bem definido em 30°S no Inverno e um centro em 45°S em ambas as estações. SINCLAIR (1996b *apud* GAN & SELUCHI, 2009) verificou que o máximo sobre o Sul da Argentina ocorre durante o Verão quando a baroclínia se desloca para o Sul, e que o máximo sobre o Uruguai ocorre no Inverno com um pico secundário na Primavera; ele encontrou também um máximo secundário próximo a 25°S no litoral do Brasil com pico nos meses de Verão.

4.1.2. Frentes frias

A América do Sul é afetada por frentes frias durante todo o ano, com deslocamento de Sudoeste para Nordeste sobre o continente e o Oceano Atlântico (CAVALCANTI & KOUSKY, 2009). TESSLER & CAZZOLI Y GOYA (2005) consideraram o período de maior ocorrência de sistemas frontais de Abril a Maio e em Setembro, e CAVALCANTI & KOUSKY (2009) consideraram que as frentes frias no Sul são mais frequentes de Junho a Setembro.

Diversos trabalhos apontam uma diminuição no número de ocorrência de frentes de maiores para menores latitudes, e um aumento no número de ocorrências no Inverno para o Sudeste e Sul do Brasil (CAVALCANTI & KOUSKY, 2009). FEDOROVA & CARVALHO (2000 *apud* CAVALCANTI & KOUSKY, 2009) compararam a ocorrência de zonas frontais em um ano de La Niña (1996-1997) com um de El Niño (1997-1998) e verificaram que entre as latitudes 20°S e 40°S a ocorrência foi maior no ano de El Niño.

4.2. Enseada de Massaguaçu – Caraguatatuba – São Paulo

O litoral paulista tem cerca de 400 km de extensão, com pequenos trechos com instabilidade sedimentar, sofrendo processos de erosão e/ou assoreamento, com causas naturais ou antrópicas (TESSLER *et al.*, 2006). Na maior parte do litoral paulista as correntes de maré não são importantes (TESSLER *et al.*, 2006) e portanto a deriva é determinada pelas ondas. No litoral paulista predominam correntes de deriva litorânea sentido Sudoeste (associada às ondas de Nordeste-Leste formadas pelo ATAS), e quando está sobre influência de frontogêneses ligadas ao APM (ondas de Sudeste-Sul) a deriva é para Nordeste (TESSLER *et al.*, 2006).

Devido à proximidade com a Serra do Mar, o litoral Norte de São Paulo é recortado, com diversas baías, enseadas, praias de bolso e orientações (TESSLER *et al.*, 2006). Este litoral afogado possui várias ilhas e planície costeira reduzida (CUNHA & GUERRA, 2006).

Neste setor a plataforma continental interna se alarga em direção Sudoeste, chegando a 44 km da Ilha Santo Amaro (SP) (CUNHA & GUERRA, 2006). A plataforma continental interna é formada por areias muito finas com setores de lama de areia muito grossa.

Devido à proximidade com a Serra do Mar as precipitações orográficas são frequentes e, conseqüentemente, o clima é bastante úmido (CUNHA & GUERRA, 2006), sendo o litoral Norte de São Paulo considerado uma das áreas mais úmidas do Brasil, com Verões muito úmidos e uma diminuição da pluviosidade no Inverno (CRUZ, 1974). O intenso escoamento superficial no solo causado pelas chuvas pode gerar movimentos de massa (CUNHA & GUERRA, 2006; CRUZ, 1974), sendo o maior escorregamento registrado nas

escarpadas da serra de Caraguatatuba o de Março de 1967 (CRUZ, 1974), chegando a movimentar dois milhões de tonelada de sedimentos (PETRI & SUGUIO, 1971a *apud* CRUZ, 1974).

A Enseada de Massaguaçu está localizada no Município de Caraguatatuba, litoral Norte de São Paulo. Este Município possui 100840 habitantes (população residente) e densidade demográfica de 207,76 habitantes por km² (IBGE, 2012), podendo triplicar ao longo do verão (PREFEITURA DE CARAGUATATUBA, 2012).

A herança geológica da enseada, assim como o restante do litoral brasileiro, foi formada durante a abertura do Oceano Atlântico (período Cretáceo), e resultou na localização geográfica de 23°05'S e 45°19'W com o alinhamento da linha de costa no sentido geral de Sudoeste-Nordeste e abertura para Leste e Sul. As variações do nível do mar durante o Quaternário modelaram a formação atual, na qual a Serra do Mar está próxima à linha de costa, atingindo-a na porção norte da praia. Ao Sul da enseada, fora do arco praial, encontra-se a Ilha de São Sebastião.

A Enseada de Massaguaçu pode ser dividida em três praias, Praia da Cocanha, Praia de Massaguaçu e Praia do Capricórnio. A Praia da Cocanha é bastante urbanizada, localiza-se no trecho Norte da enseada, com orientação Sudoeste-Oeste – Nordeste-Leste, formando uma baía na ponta norte com abertura para Sul e Sudoeste. Próximo a ela encontram-se o Ilhote da Cocanha, e mais longe da costa a Ilha do Tamanduá. Este trecho, especialmente entre a foz fluvial e o paredão rochoso que separa a enseada de Massaguaçu do segmento costeiro seguinte, possui baixa declividade, recebe menor energia de onda e tem períodos de acresção sedimentar (TESSLER *et al.*, 2006).

No centro da enseada a Praia de Massaguaçu tem orientação da linha de costa Norte-Sul. Esta praia é caracterizada, em geral, como uma praia de tombo com alta declividade na face praial e baixa declividade na área marinha adjacente (TESSLER *et al.*, 2006). A Praia de Massaguaçu é bastante urbanizada com a estreita planície costeira quase toda ocupada, próxima a sua linha de costa foi construída a rodovia Rio-Santos na década de 70, e já tem histórico erosivo registrado no seu trecho central (TESSLER *et al.*, 2006). Este trecho da enseada está sofrendo aceleração das tendências erosivas em

diversos segmentos, perdendo mais de 30 m de faixa arenosa nos últimos anos; a causa desta amplificação ainda não foi determinada, podendo ser natural ou antrópica (TESSLER *et al.*, 2006).

A Praia de Capricórnio, no Sul da enseada, também é urbanizada e possui orientação Noroeste-Norte – Sudeste-Sul. Ela possui um segmento fluvial (Rio Massaguaçu) cuja foz é fechada pelos sedimentos arenosos grossos a muito grosso depositados pelas ondas de grande energia (TESSLER *et al.*, 2006), este local é conhecido como Lagoa Azul e o banco pode ser rompido em vazante extrema.

4.3. Região Sul de Imbituba – Santa Catarina

O Estado de Santa Catarina possui 500 km de litoral (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2012), da qual a porção Centro-Sul é caracterizada pela alternância entre afloramentos do embasamento e sistemas deposicionais marinhos e eólicos, formando arcos praias separados por promontórios rochosos e com alguns sistemas lagunares (CUNHA & GUERRA, 2006). Neste trecho o transporte litorâneo é para Nordeste, devido às ondas predominantes de Sudeste (CARUSO Jr., 1995 *apud* CUNHA & GUERRA, 2006).

A plataforma continental interna (da linha de costa até a isóbata de 50 m) é estreita, de no máximo 17 km nas áreas de maior reentrância, e com afloramentos rochosos, formando altos-fundos e pequenas ilhas (CUNHA & GUERRA, 2006). No litoral Centro-Sul a plataforma continental interna é composta de areia muito fina e a externa de lamas (FIGUEIREDO & TESSLER, 2004).

A região que abrange as praias da Vila, da Vila Nova e de Itapirubá está localizada no Sul do Município de Imbituba, Centro-Sul de Santa Catarina. Este Município possui 40170 habitantes e densidade demográfica de 220,06 habitantes por km² (IBGE, 2012), e, junto ao de Garopaba, chega a receber 100 mil turistas na temporada (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2012).

Nesta região a herança geológica, oriunda da abertura do Oceano Atlântico como todo o litoral brasileiro, gerou o alinhamento Sul-Sudoeste – Norte-Nordeste da região que está posicionada na latitude 28° 17' S e longitude 48° 41' W, com abertura para os quadrantes Norte, Leste e Sul.

Devido às variações do nível do mar durante o quaternário, neste trecho do litoral a Serra do Mar está distante da linha de costa com a planície costeira mais extensa, na qual encontra-se a laguna denominada Lagoa Mirim e o campo de dunas transgressivas de Itapirubá, formado a partir do trecho Sul da praia. Cerca de 5 km do trecho Sul da costa encontra-se a Ilha das Araras. A região é limitada por dois promontórios, no que limita o setor ao norte encontra-se o Porto de Imbituba, cujas plataformas de atracação estão na enseada ao norte desta, na qual foi construído um molhe de proteção.

Morfológicamente as praias desta região são dissipativas, com areia fina e extensa zona de surfe. Para análises posteriores a região foi dividida em três setores, de Norte para Sul, Praia da Vila, Praia da Vila Nova, e Praia de Itapirubá. A Praia da Vila é bastante urbanizada, possui orientação Sudoeste-Nordeste, possui bancos submersos e próximo à ela encontram-se as ilhas Santana de Dentro e Santana de Fora. Estas ilhas influenciam na formação de ondas ótimas para o surfe, chegando a atingir 5 m de altura (PREFEITURA DE IMBITUBA, 2012), levando a praia a sediar a etapa brasileira do Campeonato Mundial de Surfe (WCT).

A Praia da Vila Nova possui orientação Norte-Nordeste – Sul-Sudoeste e é bastante urbanizada na porção Norte, e pouco na porção Sul, região que permite a alimentação do campo de dunas. A Praia de Itapirubá tem orientação Sul-Sudoeste – Norte-Nordeste com uma baía no trecho Sul com abertura para Norte e Nordeste, nela encontra-se a maior parte do campo de dunas e a urbanização concentra-se na porção sul.

5. Métodos

Neste trabalho foi analisado o clima de ondas na plataforma continental da região Sudeste e Sul do Brasil (tópico 5.1) e, a partir destes resultados, foi analisado o efeito do clima de ondas encontrado em duas regiões costeiras (tópico 5.2), uma no Estado de São Paulo e outra no Estado de Santa Catarina.

5.1. Clima de Ondas

O clima de ondas na região Sudeste e Sul do Brasil (Figura 1) foi determinado a partir de resultados do modelo numérico NOAA WAVEWATCH III (NWW3), desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da NOAA (TOLMAN *et al.*, 2002), disponível no site <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>. Este modelo obtém o clima de ondas a partir de dados de vento obtidos por imagem de satélite. PIANCA *et al.* (2010) comparam qualitativamente reanálises do NWW3 com dados medidos (ARAÚJO *et al.*, 2003) por uma boia localizada próximo à Ilha de Santa Catarina no período de Dezembro de 2001 a Janeiro de 2003.

Nas rosas de ondas sazonais comparativas apresentadas por PIANCA *et al.* (2010) foi observado que as ondas de Nordeste tiveram o percentual de ocorrência superestimado pelo modelo NWW3 no Verão, Inverno e Primavera, e as maiores classes de altura superestimadas no Verão e no Inverno. O percentual de ocorrência das ondas de Leste foi semelhante em todas as estações, e as classes de maiores altura foram superestimadas pelo modelo na Primavera. As ondas de Sudeste tiveram o percentual de ocorrência subestimado em todas as estações, e as ondas mais altas foram subestimadas no Verão e no Inverno. As ondas de Sul tiveram o percentual de ocorrência subestimado pelo modelo no Verão e superestimado no Outono e na Primavera, e as ondas mais altas foram superestimadas no Verão e no Outono e subestimadas na Primavera. PIANCA *et al.* (2010) consideraram os padrões sazonais encontrados similares entre dados medidos e modelados e consideraram o clima de ondas bem representado pelo modelo NWW3.

Para análise do clima de ondas no presente trabalho foram selecionados seis pontos de água profunda (Figura 1 e Tabela 1), de acordo com a malha do NWW3, a proximidade com a quebra da plataforma continental e a distribuição entre a costa brasileira Sudeste e Sul, região mais atingida por frentes frias. A série utilizada foi de Janeiro de 1997 a Dezembro de 2010, totalizando 14 anos.

Tabela 1: Posição geográfica dos seis pontos extraídos do modelo numérico NOAA WAVEWATCH III (NWW3) da NOAA/NCEP, com o Estado de referencia e a profundidade aproximada.

Ponto	Estado	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Prof. (m)
P01	Espírito Santo	20	38,75	1500
P02	Rio de Janeiro	23	41,25	50
P03	São Paulo	24	43,75	180
P04	Paraná	26	46,25	200
P05	Santa Catarina	29	47,50	1000
P06	Rio Grande do Sul	33	50,00	1000

Nas análises foram consideradas ondas de tempestade as 15% mais altas ondas do espectro completo de cada ponto. Esta porcentagem foi definida a partir da consideração de que são quase dois meses de eventos de tempestade em um ano.

5.1.1. Força de Onda

De acordo com a teoria de onda de Airy durante a propagação das ondas ocorre transferência de energia sobre a superfície do oceano, o fluxo desta energia é dado por $P = EC_n = EC_g$, onde E é a energia total, C a velocidade da onda individual (a velocidade de fase ou celeridade), e C_g a velocidade de grupo (KOMAR, 1998).

O fluxo de energia (P) é também conhecido como força de onda, pois representa o poder por unidade de comprimento de crista de onda (KOMAR, 1998). Em água profunda $n = \frac{1}{2}$ (KOMAR, 1998), portanto $P = \frac{1}{2} EC$. Desta forma, para calcular a força foi utilizada seguinte equação

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32 \pi}$$

onde ρ é a densidade da água do mar ($1,027 \text{ kg/m}^3$), g a força da gravidade ($9,81 \text{ m/s}$), H a altura (m), T o período (s) e a força de onda resultante foi dada em kW/m.

5.1.2. Análise de Dados de Onda

O clima de ondas foi analisado a partir de estatísticas básicas (valor máximo, mínimo e diferença entre eles, média, desvio padrão e variância) da altura, período, direção e força, avaliando a variação espacial, anual, sazonal e mensal. Também foi calculada a ocorrência de ondas em cada classe de altura (maior que 2, 3, 4, 5, 6 e 7 m) para as mesmas variações.

Foram utilizados gráficos com os dados completos de cada região para auxílio na determinação geral do clima local e análise da variação espacial. Foram utilizados gráficos dos parâmetros apresentados ao longo do tempo associado à sua média mensal, relacionando média mensal com máximos e mínimos mensais, e o percentual de ocorrência da relação do período e altura.

As rosas de ondas mostram a frequência de ocorrência de cada direção de onda associada a classes de um segundo parâmetro (altura, período ou força). Foram elaboradas rosas para os dados completos de cada ponto, para cada ano e cada estação do ano.

A partir da média de cada mês em cada ano para todos os parâmetros analisados foram avaliadas as variações interanuais. Para isto foram elaborados gráficos de barra para cada mês, a fim de observar as variações na direção de onda e gráficos de linha e coluna para avaliar variações interanuais na altura, período, força e direção.

A partir da avaliação da contribuição de ondas em cada uma das dezesseis direções em cada ano da série analisada foram avaliadas as direções mais frequentes e a partir delas determinados os casos a serem simulados. Para isto foram também obtidas as médias de todos os parâmetros (altura, período, direção e força) em cada um destes casos.

Estas análises foram realizadas para os resultados completos obtidos no NWW3 e para as ondas de tempestade, considerando suas adaptações e limitações. Devido ao grande volume de informação gerada, foram apresentados apenas aqueles resultados mais importantes para as discussões

levantadas. Para avaliar as variações interanuais das ondas de tempestade foi escolhido o mês de Junho, pois em todos os pontos ele esteve entre as duas maiores forças médias.

5.2. Modelagem Numérica

O efeito das ondas geradas em água profunda aproximando-se da costa foi observado a partir de resultados obtidos com o módulo de ondas (Spectral Wave FM) do modelo numérico MIKE 21 da DHI Water & Environment. Apesar de não existir uma validação para o MIKE 21 no Brasil, devido à pequena quantidade de dados medidos disponíveis, este modelo já foi aplicado em outros trabalhos referentes ao litoral brasileiro, como os realizados por SIEGLE & ASP (2007), CASSIANO & SIEGLE (2010), e SCHETTINI *et al.* (2010).

Para analisar costas sujeitas a diferentes climas de onda, foram realizadas simulações para a Enseada de Massaguaçu, localizada no Município de Caraguatatuba, litoral Norte do Estado de São Paulo, que inclui além da praia de mesmo nome as praias da Cocanha e Capricórnio, e a região que engloba as praias da Vila, Vila Nova e Itapirubá, Município de Imbituba, litoral Centro-Sul de Santa Catarina (Figura 1). Estes locais foram definidos com base em suas características morfológicas e no clima de ondas incidentes, na Enseada de Massaguaçu a incidência de ondas é influenciada por fatores morfológicos, como a Ilha de São Sebastião e a porção Norte da enseada. E a região de Imbituba não possui grandes influências morfológicas e está sujeita a um clima de ondas de maior energia. Estes resultados permitiram analisar a ação das ondas na costa, e avaliar processos como erosão e deposição a partir do transporte longitudinal.

5.2.1. MIKE 21 SW

O módulo de ondas do MIKE 21 (MIKE 21 SW – Spectral Waves) é um modelo espectral de ondas de vento da nova geração, e simula o crescimento, decaimento e as transformações de vagas e marulhos em áreas oceânicas e costeiras (DHIa, 2007). Este modelo é baseado na equação de balanço da

ação de onda (*wave action balance equation*), onde o campo de ondas é representado pelo espectro densidade da ação de onda $N(\sigma, \theta)$ e o parâmetro fase independente é a frequência angular (intrínseca) relativa, $\sigma = 2\pi f$, e a direção da propagação de onda, θ (DHI, 2007a).

O módulo de ondas possui duas formulações espectrais, a formulação paramétrica dissociada direcional (*directional decoupled parametric formulation*) e a formulação espectral completa (*fully spectral formulation*). A completa é baseada na equação da conservação da ação de onda (DHI, 2007b):

$$\frac{\partial N}{\partial T} + \nabla \cdot v N = \frac{S}{\sigma}$$

onde t é o tempo; v é a velocidade de propagação de um grupo de ondas em quatro dimensões ($c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$); S é o termo fonte de energia ($S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$); e ∇ é o operador diferencial em quatro dimensões. A equação está apresentada em coordenadas cartesianas como é utilizada para pequena escala.

Quanto ao tempo a formulação poder ser quase-estacionária ou instacionária. Na formulação quase estacionária o tempo é removido como variável independente e a solução é calculada a cada passo de tempo.

Quando as ondas se propagam em água rasa, a interação da água com o fundo torna-se importante. Na formulação espectral completa a dissipação de energia devido a fricção com o fundo (S_{bot}) é baseada na teoria linear e foi calculada conforme Weber (1991 *apud* DHI, 2007a):

$$S_{bot}(\sigma, \theta) = - C_f \frac{k}{\sin(2kh)} E(\sigma, \theta)$$

onde C_f é o coeficiente de dissipação devido a fricção com o fundo, k é o número de onda, h a profundidade e $E(\sigma, \theta)$ é a densidade de energia. O coeficiente de dissipação é calculado a partir de $C_f = f_w U_{bm}$, onde f_w é o fator de fricção da onda e U_{bm} é a velocidade máxima da partícula próxima a camada, ele depende da hidrodinâmica e das condições do sedimento e ele pode ser determinado a partir do tamanho do grão de areia (d_{50}).

Os domínios utilizados para São Paulo e Santa Catarina foram malhas elaboradas no MIKE ZERO Mesh Generator, conforme descrito posteriormente. Para ambos os locais o módulo de ondas MIKE 21 SW foi utilizado com a

formulação espectral completa e formulação temporal quase estacionária, desta forma foi possível manter a acurácia do modelo e diminuir a demanda computacional. A simulação foi realizada com 360 passos de 60 s, tempo suficiente para o modelo estabilizar o resultado. Não foram consideradas a variação do nível da água, as correntes, o vento (S_{in}) e a cobertura de gelo.

Os parâmetros utilizados na aplicação do modelo correspondem ao padrão utilizado pelo modelo MIKE 21 SW, pois devido a falta de dados para a calibração e validação não foram feitos ajustes nos parâmetros. Neste formato a discretização da frequência foi feita a partir da distribuição logarítmica e a discretização direcional com 360° e 16 direções. A solução técnica para a formulação quase estacionária foi determinada com iterações a partir do método Newton-Raphson. As condições iniciais do espectro foram determinadas a partir da fórmula empírica da expressão de crescimento da pista de JONSWAP.

Para a transferência de energia a partir da interação não linear entre as ondas (S_{nl}) foi considerado o método de interação quádrupla de onda parametrizada a partir da Interação Discreta Aproximada (*Discrete Interaction Approximate*, DIA) conforme KOMEN *et al.* (1994 *apud* DHI, 2007b). A dissipação devido a quebra induzida pela profundidade (S_{surf}) foi calculada a partir da fórmula proposta por Eldeberky & Battjes (1995 *apud* DHI, 2007a) com o parâmetro de quebra livre (γ) de 0,8 e a constante de calibração (α) 1. A dissipação de energia na crista da onda (*whitecapping*) (S_{ds}) foi obtido com parâmetros constantes C_{dis} de 4,5 e ΔL_{dis} de 0,5, conforme sugerido por KOMEN *et al.* (1994 *apud* DHI, 2007a).

Para calcular a dissipação devido à fricção (S_{bot}) com o fundo foi utilizada a granulometria na plataforma continental interna a partir de um mapa gerado pelo Programa de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva – REVIZEE (FIGUEIREDO & TESSLER, 2004). Para o domínio de São Paulo foi utilizado o valor de 0,0625 mm (o valor limite entre as duas classes demonstradas no mapa, areia muito fina e lama) e para Santa Catarina 0,0937 mm (valor médio da classe de areia muito fina).

As condições limites foram determinadas a partir das análises do clima de onda (altura média, período médio, direção média e desvio padrão da direção) e foram consideradas iguais nas três margens.

5.2.2. Malhas MIKE 21

A linha de costa do Estado de São Paulo foi digitalizada a partir de imagens do satélite Landsat e de uma fotografia aérea digital do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). As imagens obtidas no site do INPE, são referentes ao satélite Landsat-7, sensor Mapeador Temático Aprimorado (*Enhanced Thematic Mapper* – ETM) com as seguintes órbitas, pontos e datas: 218/076 de 08 de Julho de 2007, 218/077 07 de Maio de 2005, 219/076 de 07 de Junho de 2002 e 219/077 de 02 de Agosto de 2005. A linha de costa foi obtida na projeção Universal Transversal de Mercator (UTM) com datum Sul Americano (SAD69) e zona 23S.

A linha de costa para o Estado de Santa Catarina foi obtida a partir do levantamento realizado pela Secretaria de Patrimônio da União de Santa Catarina (SPU-SC) na região continental e digitalizada a partir de imagens Landsat na Ilha de Santa Catarina e nas pequenas ilhas da região de interesse. As imagens foram obtidas no site do INPE, e são referentes ao satélite Landsat-7, com sensor ETM, na órbita 220, nos pontos 079 (10 de Março de 2002) e 080 (13 de Julho de 2001), respectivamente. A linha de costa foi obtida na projeção UTM-SAD69 e zona 22S. Ambas as batimetrias foram obtidas de cartas náuticas e folhas de bordo digitalizadas, complementadas com dados do Etopo nas áreas oceânicas.

No Mesh Generator, parte do MIKE ZERO (módulo de pré e pós processamento do MIKE 21), foram elaboradas as malhas (domínio) amostrais das duas regiões de interesse a partir das linhas de costa e batimetria obtidas. Em ambos os Estados a malha foi dividida em três regiões, sendo a mais externa com área máxima de $5 \times 10^6 \text{ m}^2$, a região intermediária limitada a $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ e a região de Caraguatatuba (Figura 2) e a de Imbituba e Laguna (Figura 3) com área máxima de $5 \times 10^5 \text{ m}^2$ cada.

A malha do Estado de São Paulo foi triangulada com $10 \times 10^{12} \text{ m}^2$ de área elementar máxima, 30° o menor ângulo permitido e 1410065408 o número máximo de nós permitidos, e suavizada com 10 iterações. Esta malha possui 17852 elementos e 9357 nós (Figura 2). Para Santa Catarina a triangulação foi feita com área elementar máxima de $10 \times 10^{12} \text{ m}^2$, menor ângulo permitido de

30° e número máximo de nós de 10×10^9 , e a suavização com 100 iterações. Foi gerada uma malha com 19292 elementos e 10025 nós (Figura 3). Em ambas as malhas, a batimetria foi interpolada a partir do método dos vizinhos naturais (*natural neighbour*).

Figura 2: Malha utilizada como entrada para as simulações no MIKE 21 SW do Estado de São Paulo. A batimetria está apresentada a direita.

Figura 3: Malha apresentada como entrada no modelo MIKE 21 SW para o Estado de Santa Catarina. A batimetria utilizada está apresentada ao lado direito.

5.2.3. Casos Simulados

Foram realizadas simulações a partir das variações interanuais encontradas no clima de ondas de tempestade em água profunda a fim de avaliar o efeito do clima de ondas da plataforma na costa em cada região de interesse. Para a variação interanual foram consideradas as direções de ondas de tempestades mais frequentes (10%) em cada ano em cada Estado, foram 49 casos em São Paulo e 51 em Santa Catarina, totalizando 100 simulações (Tabela 2). Nestes foram utilizados como entrada altura, período e direção médios e desvio padrão da direção de cada caso.

Tabela 2: Casos representantes da variação interanual para São Paulo (esquerda) e Santa Catarina (direita). Foram considerados aqueles que representaram mais de 10% das ocorrências. Considerando a altura (H), período (T) e direção (D) médios e o desvio padrão da direção (Ddp) para cada caso.

Caso	H (m)	T (s)	D (°)	Ddp	Caso	H (m)	T (s)	D (°)	Ddp
SP_97_ESE	2,91	7,77	113,40	6,52	SC_97_SE	3,79	10,65	133,11	5,78
SP_97_SES	3,77	11,17	154,58	5,80	SC_97_S	3,19	11,26	184,65	4,94
SP_97_S	2,90	11,61	184,57	6,31	SC_97_SSO	3,59	10,60	199,39	5,90
SP_97_SSO	2,92	11,31	197,38	4,41	SC_98_NEE	3,16	7,61	67,60	4,93
SP_98_SE	2,75	9,27	137,89	6,44	SC_98_S	3,41	10,21	182,12	5,96
SP_98_SES	2,87	9,18	157,83	6,22	SC_98_SSO	3,42	10,04	199,26	6,40
SP_98_S	2,75	10,50	184,29	5,95	SC_98_SO	3,43	7,82	224,63	6,28
SP_98_SSO	2,81	10,38	197,74	5,60	SC_99_S	3,54	11,20	182,87	6,15
SP_99_SE	2,93	9,77	133,62	7,13	SC_99_SSO	3,69	9,55	200,21	6,54
SP_99_S	2,79	11,25	182,73	5,78	SC_99_SO	4,11	8,45	224,78	6,08
SP_99_SSO	3,12	10,13	198,92	5,16	SC_00_SE	3,20	8,43	137,50	7,18
SP_00_SES	2,59	9,69	163,02	5,10	SC_00_SES	3,16	9,36	155,67	6,48
SP_00_S	2,75	11,01	181,94	6,38	SC_00_S	3,39	10,76	183,46	6,07
SP_00_SSO	2,83	10,04	198,35	4,89	SC_00_SSO	3,61	9,72	201,19	6,67
SP_01_ESE	2,54	9,09	111,24	6,71	SC_00_SO	3,67	8,27	223,71	5,45
SP_01_SE	2,73	9,48	135,06	6,46	SC_01_NEE	3,33	7,99	70,30	5,57
SP_01_SES	2,68	10,24	156,82	6,51	SC_01_SE	3,30	9,50	134,69	6,60
SP_01_S	2,93	11,05	184,57	5,20	SC_01_S	3,48	10,95	182,95	5,32
SP_01_SSO	3,09	9,48	199,98	5,25	SC_01_SSO	3,67	9,05	202,45	7,04
SP_02_SES	2,71	8,97	158,84	5,99	SC_01_SO	3,61	7,90	222,30	6,39
SP_02_S	2,86	11,42	182,59	6,33	SC_02_NE	3,29	7,94	51,97	3,81
SP_02_SSO	2,86	10,82	196,67	5,16	SC_02_NEE	3,18	8,07	59,46	2,02
SP_03_S	2,83	10,97	183,44	6,30	SC_02_SES	3,23	10,60	160,73	6,03
SP_03_SSO	3,02	10,72	197,74	5,36	SC_02_S	3,52	11,10	181,79	7,02
SP_04_SES	2,90	10,22	157,54	6,63	SC_02_SSO	3,43	10,01	199,61	7,04
SP_04_S	2,88	11,20	183,13	6,76	SC_02_SO	3,69	7,99	222,27	5,21
SP_04_SSO	2,98	11,25	197,34	5,16	SC_03_S	3,36	10,78	185,01	4,67
SP_05_ESE	2,87	9,11	109,07	3,79	SC_03_SSO	3,61	10,12	199,47	6,63
SP_05_S	2,89	10,60	183,18	5,58	SC_03_SO	3,95	8,45	223,47	6,73
SP_05_SSO	2,92	10,96	196,35	3,53	SC_04_ESE	3,55	8,69	112,19	5,66

SP_06_SES	3,03	11,24	156,64	5,87	SC_04_S	3,50	11,46	184,41	5,82
SP_06_S	3,00	11,13	182,05	5,64	SC_04_SSO	3,54	10,72	198,55	6,08
SP_06_SSO	3,17	11,11	197,42	4,12	SC_05_SE	4,16	9,43	129,21	3,64
SP_07_S	2,92	11,73	184,17	6,32	SC_05_S	3,37	11,13	185,07	5,22
SP_07_SSO	3,19	10,69	197,89	4,77	SC_05_SSO	3,52	10,01	198,58	5,84
SP_08_E	2,67	7,95	93,67	5,07	SC_05_SO	3,49	7,81	223,34	5,89
SP_08_ESE	2,90	8,70	113,73	6,86	SC_06_S	3,71	11,26	182,25	5,72
SP_08_SE	2,89	9,10	133,65	6,54	SC_06_SSO	3,74	10,27	200,00	5,80
SP_08_SES	2,60	11,03	156,77	6,42	SC_07_S	3,40	11,11	183,40	6,12
SP_08_S	2,77	11,36	183,17	6,43	SC_07_SSO	3,82	10,10	200,22	6,50
SP_08_SSO	2,97	10,68	197,85	4,85	SC_07_SO	3,87	8,24	222,08	5,45
SP_09_SES	2,92	9,95	160,64	5,78	SC_08_NEE	3,45	8,28	69,65	6,54
SP_09_S	2,92	11,59	184,63	6,03	SC_08_S	3,39	11,08	182,24	7,03
SP_09_SSO	2,97	11,30	196,59	5,07	SC_08_SSO	3,72	9,84	200,17	6,59
SP_10_ESE	3,15	8,97	113,48	5,34	SC_08_SO	3,83	8,39	225,05	6,10
SP_10_SE	3,10	10,19	134,34	6,35	SC_09_S	3,52	11,46	185,31	5,16
SP_10_SES	3,20	9,87	157,16	7,28	SC_09_SSO	3,54	10,48	198,02	6,38
SP_10_S	3,03	10,57	182,92	6,85	SC_10_E	3,62	9,36	93,21	4,37
SP_10_SSO	2,96	11,49	197,16	4,66	SC_10_ESE	3,52	9,83	112,33	5,40
					SC_10_S	3,44	10,95	182,55	6,18
					SC_10_SSO	3,60	10,74	198,86	6,26

5.2.4. Transporte Longitudinal de Sedimentos

O transporte longitudinal foi calculado a partir dos resultados gerados pelo modelo numérico MIKE 21 SW. Para isto foram selecionados três pontos (centro e extremos) de cada região (Figura 4, Figura 5, Tabela 3). Os valores obtidos nestes pontos foram gerados a partir da interpolação linear dos vértices do elemento ao qual ele pertence (DHI, 2007a), e com estes resultados foi calculado o transporte de sedimentos para cada um destes setores. Foi utilizada a Equação Simplificada para Transporte Longitudinal de Areia proposta por VAN RIJN (2002) para determinação da deriva litorânea:

$$Q_{t, \text{mass}} = K_0 K_{\text{swell}} K_{\text{grain}} K_{\text{slope}} (H_{s, \text{br}})^{2,5} V_{\text{eff}, l}$$

onde $Q_{t, \text{mass}}$ é o transporte longitudinal de areia (kg/s, massa seca); $H_{s, \text{br}}$ é a altura significativa na linha de quebra (m); $V_{\text{eff}, l} = [(V_{\text{wave}, l})^2 + (V_{\text{tide}, l})^2]^{0,5}$ é a velocidade longitudinal efetiva no meio da zona de surfe (m/s) para a velocidade induzida pela maré ($V_{\text{tide}, l}$) e para a velocidade induzida pela onda ($V_{\text{wave}, l}$) na mesma direção (para direções opostas o sinal é negativo), sendo $V_{\text{wave}, l} = 0,3 (g H_{s, \text{br}})^{0,5} \sin(2 \theta_{\text{br}})$, θ_{br} é o ângulo de incidência da onda na linha de quebra, em relação à normal à linha de costa; $K_0 = 42$; $K_{\text{swell}} = T_{\text{swell}}/T_{\text{ref}}$ é o fator de correção para marulhos (swell), onde $T_{\text{ref}} = 6$ s é o período de referencia da onda e T_{swell} é o período; $K_{\text{grain}} = (d_{50, \text{ref}} / d_{50})$ é o fator de correção

para o tamanho de grão, sendo $d_{50,ref} = 0,2 \text{ mm}$; $K_{slope} = (\tan\beta / \tan\beta_{ref})^{0,5}$ é o fator de correção para inclinação da camada, sendo $\tan\beta$ a inclinação atual e $\tan\beta_{ref} = 0,01$ a inclinação referente ao perfil de Egmond (Holanda).

Tabela 3: Posição geográfica para os pontos utilizados para cálculo do transporte longitudinal para São Paulo (UTM23) e Santa Catarina (UTM22) e profundidades respectivas, conforme obtido no modelo numérico MIKE 21.

São Paulo	Leste	Norte	Prof. (m)
Praia da Cocanha	467500	-2608700	6,34
Praia de Massaguaçu	465000	-2610500	6,31
Praia de Capricórnio	464000	-2612500	6,47

Santa Catarina	Leste	Norte	Prof. (m)
Praia da Vila	729500	-3127000	7,46
Praia da Vila Nova	727000	-3131000	8,74
Praia de Itapirubá	725500	-3136000	6,34

Figura 4: Pontos utilizados para obtenção do transporte de sedimentos na área de interesse no Estado de São Paulo. Eles representam as praias da Cocanha (SP01), Massaguaçu (SP02) e Capricórnio (SP03), com profundidades de 6,34 m, 6,31 m e 6,47 m respectivamente.

Figura 5: Área de interesse no Estado de Santa Catarina, os pontos foram utilizados para cálculo do transporte de sedimentos nas praias da Vila (SC01), Vila Nova (SC02) e Itapirubá (SC03), respectivamente, com profundidades de 7,5 m, 8,7 m e 6,3 m.

Em função da limitação da batimetria em regiões próximas à costa no modelo numérico, foi considerada a linha de quebra de ondas os três pontos de saída selecionados. Os valores de $H_{s,br}$ e T_{swell} foram obtidos a partir da altura significativa e período médio apresentados nos resultados da simulação em cada um dos pontos analisados, e o θ_{br} foi calculado a partir da direção média (D) obtida nestes resultados, considerando a inclinação (LC) das praias em relação ao Norte (Tabela 4), com a seguinte equação $\theta_{br} = LC - D$, na qual o

resultado positivo e negativo sugerem transporte de sedimentos para direita e esquerda, respectivamente, considerando que o observador está na praia olhando para o mar. Em São Paulo, transporte para direita e esquerda representou, respectivamente em cada praia, transporte longitudinal de sedimentos para Sudoeste e Nordeste na Praia da Cocanha, e Sul-Sudoeste e Norte-Nordeste nas praias de Massaguaçu e Capricórnio. Em Santa Catarina o transporte longitudinal de sedimentos para direita e esquerda representou, respectivamente em cada praia, para Sudoeste e Nordeste na Praia da Vila, Sul-Sudoeste e Norte-Nordeste na Praia da Vila Nova, e Sudeste-Sul e Noroeste-Norte na Praia de Itapirubá. Não foi utilizada a variação de maré nas simulações, portanto $V_{\text{tide},l} = 0$, e foi considerada gravidade de 9,81 m/s. Os valores de d_{50} e $\tan\beta$ utilizados foram teóricos, sendo declividade 0,0156 (valor próximo ao limite máximo sugerido) e areia grossa (0,75 mm) para as praias de São Paulo (reflectivas), e declividade de 0,008 (valor próximo ao do perfil de Egmond) e areia fina (0,1875 mm) para as três praias de Santa Catarina (dissipativas).

Tabela 4: Inclinação das praias de São Paulo (esquerda) e Santa Catarina (direita) em relação ao Norte. Valores utilizados para cálculo do transporte de sedimentos.

Praia	Inclinação (°)	Praia	Inclinação (°)
Cocanha	51	Vila	48
Massaguacu	22	Vila Nova	30
Capricornio	32	Itapiruba	162

6. Resultados

6.1. Clima de Ondas

O clima de ondas foi determinado a partir dos resultados gerados pelo NWW3, que fornece altura significativa, período médio e direção média. A partir daqui serão utilizados apenas os termos altura, período e direção para referir-se a estes dados, e, por exemplo, quando for utilizado o termos média estará referido a média destes dados (média da altura significativa, média do período médio, média da direção média). Além destes parâmetros foi utilizada também a força de onda.

O clima de ondas foi apresentado em duas formas. A primeira, com os dados completos apresentando as características gerais de cada ponto focando na variação mensal e padrões sazonais, e a variação espacial entre os pontos, ver tópico 6.1.1. Já no segundo formato foi utilizado o clima de ondas de tempestade, as mais altas (15%), para avaliar as características gerais de cada ponto, a variação interanual em cada ponto e a variação espacial entre os pontos, conforme apresentado no tópico 6.1.2.

6.1.1. Geral (NWW3)

Na plataforma do Espírito Santo (ponto 01, Tabela 5 e Tabela 6) a altura média nos 14 anos analisados foi de 1,8 m, sendo que ondas maiores que 4 m só ocorreram nos meses de Abril a Setembro e em Novembro. O período médio em todos os anos foi de 8,5 s, a força de onda média foi de 32,2 kW/m e a direção média foi de 124,8°.

Tabela 5: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Espírito Santo.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,62	Março	4,8	Abril/Junho
Período (s)	2,75	Março	18,34	Maio
Força (kW/m)	1,69	Agosto	303,57	Julho

De maneira geral, as alturas médias foram maiores nos meses de Inverno, e o período médio e força média foram maiores nos meses de Outono e Inverno. A direção média no Espírito Santo variou entre 96,7° (Dezembro) e 158,1° (Maio), e foi de Sudeste-Sul nos meses de Outono e Sudeste nos de Inverno.

Tabela 6: Valores mínimos e máximos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Espírito Santo.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,49	Fevereiro	2,07	Setembro
Período (s)	7,26	Dezembro	9,68	Maio
Força (kW/m)	19,04	Fevereiro	43,55	Maio

Na plataforma do Rio de Janeiro (ponto 02, Tabela 7) a altura média do espectro completo de ondas foi de 1,9 m e ondas maiores que 5 m ocorreram de Abril a Julho. O período médio neste ponto foi de 8,5 s, a força de onda média foi de 36,2 kW/m e a direção média foi de 130,1°.

Tabela 7: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio de Janeiro.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,46	Março	5,73	Abril
Período (s)	3,13	Março/Abril	18,16	Maio
Força (kW/m)	1,2	Março	412,2	Abril

As médias do período e da força de onda foram maiores nos meses de Outono e Inverno no Rio de Janeiro (Tabela 8). Nesta região a direção média variou entre Leste (104,4°) em Janeiro e Sudeste-Sul (106,7°) em Maio e foi de Sudeste-Sul em todos os meses de Outono.

Tabela 8: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio de Janeiro.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,59	Fevereiro	2,21	Setembro
Período (s)	7,42	Janeiro	9,69	Maio
Força (kW/m)	22,17	Fevereiro	49,98	Maio

Na plataforma de São Paulo (ponto 03, Tabela 9 e Tabela 10) a altura média do espectro completo foi de 1,8 m e ondas maiores que 5 m ocorreram entre Abril e Julho. O período médio deste ponto foi de 8,6 s, a força média foi 32,1 kW/m e a direção média foi de 138,8°.

Tabela 9: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma de São Paulo.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,4	Março	5,45	Abril
Período (s)	2,82	Julho	16,75	Julho
Força (kW/m)	0,89	Março	363,26	Abril

A média mensal (Tabela 10) do período e da força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno. A direção média mensal foi de Leste-Sudeste (122,1°) em Janeiro a Sudeste-Sul (162°) em Maio, sendo desta direção em todos os meses de Outono.

Tabela 10: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma de São Paulo.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,47	Fevereiro	2,09	Setembro
Período (s)	7,75	Janeiro	9,63	Maio
Força (kW/m)	19,6	Janeiro	45,2	Maio

No Paraná (ponto 04) ondas maiores que 5 m ocorreram nos meses de Abril a Agosto, exceto em Junho (Tabela 11). As características médias do espectro completo foi altura de 1,9 m, período de 8,3 s, força de onda 34,5 kW/m e direção de 132,6° na plataforma do Paraná.

Tabela 11: Valores mínimos e máximos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Paraná.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,48	Agosto	5,51	Agosto
Período (s)	2,87	Junho	16,34	Setembro
Força (kW/m)	0,95	Agosto	348,3	Abril

A média mensal (Tabela 12) do período e da força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno. A direção média na plataforma do Paraná variou entre Leste-Sudeste (116°) em Janeiro e Sudeste-Sul ($155,4^{\circ}$) em Maio.

Tabela 12: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Paraná.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,59	Fevereiro	2,21	Setembro
Período (s)	7,49	Dezembro	9,18	Maio
Força (kW/m)	23,07	Janeiro	47,6	Maio

Na plataforma de Santa Catarina (ponto 05) ocorreu apenas uma onda maior de 7 m, no mês de Maio, e as ondas maiores que 6 m ocorreram de Maio a Agosto e em Dezembro (Tabela 13). Neste Estado a altura média das ondas foi de 2,1 m, o período médio foi de 8,0 s, a força de onda média foi de 42,9 kW/s e a direção média foi de 127° .

Tabela 13: Valores máximos e mínimos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Santa Catarina.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,45	Março	7,31	Maio
Período (s)	3,05	Novembro	17,5	Março
Força (kW/m)	0,86	Março	555,29	Maio

A média mensal (Tabela 14) do período e da força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno. A direção média foi de Leste-Sudeste ($110,6^{\circ}$) em Janeiro a Sudeste-Sul ($147,8^{\circ}$) em Maio.

Tabela 14: Média mensal mínima e máxima da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Santa Catarina.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,79	Janeiro/Fevereiro	2,43	Setembro
Período (s)	7,42	Janeiro	8,64	Maio
Força (kW/m)	27,5	Janeiro	61,39	Maio

No Rio Grande do Sul (ponto 06) ondas maiores que 7 m só ocorreram nos meses de Outono (Abril e Junho), e as maiores que 6 m ocorreram de Abril a Outubro (Tabela 15). Este Estado foi caracterizado por ondas com altura

média de 2,3 m, período médio de 8,0 s, força de onda média de 50,1 kW/m e direção média 125,3°.

Tabela 15: Valores mínimos e máximos de altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio Grande do Sul.

	Valor Mínimo	Mês	Valor Máximo	Mês
Altura (m)	0,44	Março	7,22	Junho
Período (s)	2,99	Janeiro	17,28	Março
Força (kW/m)	0,86	Março	592,25	Julho

A média mensal (Tabela 16) do período de onda teve um pequeno aumento nos meses de Outono e Inverno. A força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno. A direção média na plataforma do Rio Grande do Sul variou entre Leste-Sudeste (106,8°) em Janeiro e Sudeste-Sul (147,1°) em Julho.

Tabela 16: Valores máximos e mínimos da média mensal da altura (m), período (s) e força (kW/m) de onda encontrados na plataforma do Rio Grande do Sul.

	Média Mínima	Mês	Média Máxima	Mês
Altura (m)	1,89	Janeiro	2,59	Setembro
Período (s)	7,41	Janeiro	8,53	Maio
Força (kW/m)	30,68	Janeiro	64,85	Setembro

Foi observado (Figura 7) que no Espírito Santo (ponto 01) foram mais frequentes ondas de 6 a 9 s e 1 a 2 m, e no Rio de Janeiro (ponto 02) ondas de 6 a 8 s e de 1 a 2 m. Em São Paulo (ponto 03) e no Paraná (ponto 04) foram mais ocorrentes ondas entre 1 e 2 m e 7 e 8 s. Em Santa Catarina (ponto 05) as ondas mais ocorrentes foram de 6 a 8 s e 1,5 a 2,0 m, e no Rio Grande do Sul (ponto 06) as mais frequentes foram aquelas que combinaram 6,5 a 7,5 s e 1,5 e 2,5 m.

Figura 6: Percentual de ocorrência da altura (m) e período (s) nos Estados de Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03), em sequência.

Figura 7: Percentual de ocorrência da altura (m) e período (s) nos Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06), em sequência.

A direção de onda predominante foi de Leste no Espírito Santo (ponto 01), seguida de Sul-Sudoeste e Sul, totalizando juntas mais de 50% das ondas ocorrentes (Figura 9). Foram mais frequentes ondas de 1,0 a 2,5 m de altura, aumentando a contribuição de classes maiores no quadrante Sul. Para período

foi predominante ondas de 4 a 6 s de Nordeste, de 6 a 10 s de Leste, e de 10 a 14 s de Sul. As ondas de Leste foram mais frequentes com força de até 50 kW/m, e as ondas de Sul com até 100 kW/m de força.

No Rio de Janeiro (ponto 02) predominaram ondas de Sul-Sudoeste, seguidas de ondas de Sul e Nordeste, correspondendo juntas a mais de 50% das ocorrências (Figura 9). As classes de altura de onda mais frequente foram de 1,5 a 2,5 m, sendo que as classes de menor altura diminuíram sua contribuição em direção ao quadrante Sul e as de maior altura aumentaram a contribuição no mesmo sentido. O período mais frequente foi de 4 a 8 s para ondas de Nordeste, de 6 a 10 s para ondas de Leste, e de 8 a 14 s para ondas de Sul. A força de onda mais frequente foi de até 50 kW/m para ondas de Leste e de até 100 kW/m para ondas de Sul.

A direção de onda mais frequente na plataforma de São Paulo (ponto 03) foi de Sul, seguida de ondas de Leste e Sul-Sudoeste e Nordeste-Leste, totalizando mais de 65% das ondas (Figura 9). A classe mais frequente de ondas foi de 1,0 a 2,5 m, no quadrante Sul diminuiu a representação das classes de menor altura e aumentou as de maior altura. O período mais representativo foi de 6 a 10 s para ondas do quadrante Leste e de 8 a 12 s para ondas do quadrante Sul. A força de onda mais frequente foi de até 50 kW/m nas ondas do quadrante Leste e de até 100 kW/m nas ondas do quadrante Sul.

Na plataforma do Paraná (ponto 04) a direção de onda predominante foi Sul, seguida de Nordeste-Leste e então Leste, totalizando juntas mais de 55% das ondas (Figura 9). A classe de altura mais frequente foi de 1 a 3 m e a de período foi de 6 a 12 s. A representação das classes de maior altura e período na rosa de onda aumentaram no sentido horário, e as de menor altura e período diminuíram neste sentido. A classe de força mais frequente foi de até 50 kW/m no quadrante Leste e até 100 kW/m no quadrante Sul.

Em Santa Catarina (ponto 05) as ondas de Sul foram as mais frequentes, seguidas de ondas de Nordeste-Leste e, por fim, de ondas de Sul-Sudoeste, compreendendo juntas a aproximadamente 45% das ondas (Figura 9). Foram mais frequentes as classes de ondas entre 1,0 e 3,0 m de altura e de 6 a 12 s de período. No sentido horário da rosa de onda, as classes de maior altura e período aumentaram. A classe mais representativa da força de onda foi de até 50 kW/m no quadrante Leste e até 100 kW/m no quadrante Sul.

No Rio Grande do Sul (ponto 06) a direção de onda mais frequente foi Sul, seguida de Nordeste e Sul-Sudoeste, totalizando juntas mais de 45% das ondas ocorrentes (Figura 9). A classe de altura de onda mais frequente foi de 3,0 a 4,0 m. Entre as ondas de Nordeste foram mais frequentes aquelas com período de 6 a 8 s, para as de Leste as de 6 a 10 s e para as ondas de Sul de 8 a 12 s. No quadrante Leste foram mais frequente ondas de até 50 kW/m e no quadrante Sul de até 100 kW/m.

Figura 8: Rosas de altura (esquerda) e período (direita) de onda para os Estados do Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03). Estas rosas apresentam o percentual de ocorrência de cada classe dos parâmetros de onda (altura e período) em cada direção.

Figura 9: Rosas de altura (esquerda) e período (direita) de onda para os Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06). Estas rosas apresentam o percentual de ocorrência de cada classe dos parâmetros de onda (altura e período) em cada direção.

A força de onda, média, máxima e mínima, (Figura 11) foi, de maneira geral, maior nos meses de Outono e Inverno em todos os anos e todos os pontos. Foi identificada uma variação interanual em todos os Estados, mas em nenhum deles foi determinado o padrão interanual.

Figura 10: Força de onda (kW/m) máxima, mínima e média apresentados ao longo dos 14 anos analisados para os Estados do Espírito Santo (ponto 01), Rio de Janeiro (ponto 02) e São Paulo (ponto 03), em sequência.

Figura 11: Força de onda (kW/m) máxima, mínima e média apresentados ao longo dos 14 anos analisados para os Estados do Paraná (ponto 04), Santa Catarina (ponto 05) e Rio Grande do Sul (ponto 06), em sequência.

6.1.1.1. Variação Espacial

Em todos os pontos a altura máxima ocorreu nos meses de Outono e a altura mínima ocorreu no mês de Março, exceto no Paraná (ponto 04) que ela

ocorreu no mês de Agosto junto com a altura máxima. A menor altura média ocorreu nos meses de Verão e a maior altura média ocorreu em Setembro para todos os seis pontos analisados. A ocorrência de ondas mais altas aumentou do Espírito Santo para o Rio Grande do Sul, assim como os valores de altura máxima, e da maior e menor altura média. Estes parâmetros tendem a ser mais ocorrentes, e maiores, nos meses de Outono e Inverno. Não foi definido um padrão espacial de aumento ou diminuição do período de onda, mas em todos os pontos o período médio foi maior nos meses de Outono e Inverno.

A direção média variou entre Leste no Espírito Santo (Dezembro) ou Leste-Sudeste do Rio de Janeiro ao Rio Grande do Sul (Janeiro) e Sudeste-Sul no Rio Grande do Sul (Julho) e do Espírito Santo a Santa Catarina (Maio). De maneira geral, em todos os pontos ocorreram ondas de Sudeste e Sudeste-Sul nos meses de Outono e Inverno.

A menor força de onda diminuiu do Espírito Santo para Rio Grande do Sul, mas a maior força e a menor e a maior força média aumentaram neste mesmo sentido. De maneira geral as menores medidas de força de onda ocorreram no verão e as maiores (máxima e média) no Outono e Inverno.

Nas rosas de onda foi observado um aumento no valor das classes de altura de onda mais frequente do Espírito Santo (ponto 01) para o Rio Grande do Sul (ponto 06). Não foi definido um padrão espacial para o período, nem para a força de onda, cuja as classes mais frequentes foram as mesmas em todos os pontos. Como padrão geral em todos os seis pontos analisados foi observado na rosa de onda um aumento no sentido horário da contribuição de classes de maior altura, maior período e maior força, e diminuição da contribuição das classes de menor altura, período e força. Isto aponta que ondas do quadrante Sul tendem a ser mais energéticas em todo o Sudeste e Sul brasileiro.

Foi observado um aumento (Figura 11) das médias e das máximas mensais da força de onda do Espírito Santo (ponto 01) para o Rio Grande do Sul (ponto 06), ficando mais evidente em Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

6.1.2. Tempestades

6.1.2.1. Espírito Santo (Ponto 01)

Na plataforma do Espírito Santo (ponto 01) foram consideradas de tempestade as ondas com alturas maiores que 2,36 m (Tabela 17). A altura média para as ondas de tempestade em todos os anos analisados foi de 2,8 m, o período médio foi de 10,2 s, a força de onda média foi de 80,2 kW/m e a direção média foi de 158° (Sudeste-Sul). Em relação ao espectro completo (analisado anteriormente) a média de todos os parâmetros aumentou.

Tabela 17: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência no Espírito Santo.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	2,36	Todos	4,8	1997 e 2010
Período (s)	5,28	2001	17,29	2010
Força (kW/m)	29,35	2009	303,57	2007

Os valores médios anuais (Tabela 18) foram menores em 2000 e 2001 (apenas altura) e maiores em 1997. A direção média anual variou entre Sudeste em 2000 (145,7°) e Sul em 1997 e 2003 (171,9°), e nos demais anos ela foi de Sudeste-Sul.

Tabela 18: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Espírito Santo.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	2,68	2001	2,94	1997
Período (s)	9,17	2000	10,99	1997
Força (kW/m)	69,69	2000	99,42	1997

As ondas de tempestade no Espírito Santo (Ponto 01) foram predominantes de Sul-Sudoeste, seguida de ondas de Sul, totalizando mais de 50% do espectro (Figura 12). A classe de altura predominante foi de 2,5 a 3,0 m e a força de onda predominante foi de 50 a 100 kW/m. Em sentido horário as classes com maiores alturas e força de onda aumentam a sua

representatividade. No quadrante Leste a classe de período predominante foi de 8 a 10 s e no quadrante Sul de 10 a 14 s.

Figura 12: Rosas das ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) no Espírito Santo (ponto 01).

Foi observada a variação interanual na direção, altura e força de onda na plataforma do Espírito Santo, no entanto não foi determinado um padrão (Figura 13). Exceto em 1997, todos os anos tiveram ondas do quadrante Leste (entre 45 e 135°). Foi observado que o período influenciou a força de onda, especialmente quando o período foi baixo. O pico máximo da direção e altura médias ocorreu em 1997 e a menor força média ocorreu em 2005.

Figura 13: Variação interanual do clima de ondas de tempestade, apresentando a direção média, altura média e força média em gráficos de linha no mês de Junho para a plataforma do Espírito Santo (ponto 01).

A força das ondas de tempestade no Espírito Santo, máxima, média e mínima, foi maior nos meses de Outono e Inverno, mostrando que em muitos anos não ocorreram ondas de tempestade na Primavera e/ou Verão (Figura 14). Foi observada a ocorrência de variação interanual, mas não foi definido o

padrão desta variação. Os anos de 1997, 1999, 2007 e 2010 foram os mais energéticos.

Figura 14: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo no Espírito Santo (ponto 01). Sendo apresentadas, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima.

6.1.2.2. Rio de Janeiro (Ponto 02)

Foram consideradas ondas de tempestade na região do Rio de Janeiro (ponto 02) as maiores que 2,51 m de altura (Tabela 19). A altura média em todos os anos das ondas de tempestade foi de 3,0 m, o período médio foi de 10,5 s, a força de onda média foi de 97,4 kW/m e a direção média foi de 170,9° (Sul). Em relação ao espectro completo (analisado anteriormente) todos os valores médios aumentaram.

Tabela 19: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos e o ano de ocorrência das ondas de tempestade no Rio de Janeiro.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	2,51	todos	5,73	2010
Período (s)	5,62	2010	16,45	2010
Força (kW/m)	35,86	2010	412,2	2010

Os menores valores médios (Tabela 20) ocorreram em 2000. A direção média anual das ondas de tempestade no Rio de Janeiro variou entre Sudeste-Sul (161,2°) em 2008 e Sul (186,2°) em 2003.

Tabela 20: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios e ano de ocorrência das ondas de tempestade no Rio de Janeiro.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	2,83	2000	3,20	1997
Período (s)	9,66	2000	11,11	2009
Força (kW/m)	77,89	2000	118,87	1997

As ondas de tempestade tiveram direção de onda predominante de Sul-Sudoeste e Sul no Rio de Janeiro, totalizando juntas mais de 60% (Figura 15). A classe de altura de onda mais frequente foi de 2,5 a 3,0 m. As maiores alturas aumentaram sua representatividade em sentido horário, sendo importante a classe de 3,0 a 3,5 m no quadrante Sul. No quadrante Leste predominaram ondas de 8 a 10 s e 50 a 100 kW/m, e no quadrante Sul de 10 a 14 s e 50 a 150 kW/m.

Figura 15: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Rio de Janeiro (ponto 02).

Foi observado que em alguns anos ocorreram poucas ou nenhuma onda de tempestade nos meses de Primavera e Verão (Figura 16). De maneira geral a força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno. De acordo com o comportamento das máximas e médias, os anos de 1997, 2006, 2007 e 2010 foram os mais energéticos.

Figura 16: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo para o Rio de Janeiro (ponto 02). Foi apresentada, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima.

Foi observada a variação interanual nas médias de direção, altura e força no Estado do Rio de Janeiro (ponto 02), mas não foi determinado um padrão (Figura 17). As ondas do quadrante Leste foram as mais frequentes, sendo apenas os anos de 1997, 2006 e 2007 do quadrante Sul. O pico máximo das médias da direção e altura ocorreu no ano de 1997.

Figura 17: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado do Rio de Janeiro (ponto 02), apresentando a direção, altura e força média no mês de Junho.

6.1.2.3. São Paulo (Ponto 03)

Foram consideradas ondas de tempestade na plataforma de São Paulo (ponto 03) aquelas com alturas de onda maiores de 2,41 m (Tabela 21). As

ondas de tempestade tiveram altura média de 2,9 m, período médio de 10,2 s, força de onda média de 88,5 kW/m e direção média de 170,3° (Sul).

Tabela 21: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência em São Paulo.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	2,41	todos	5,45	2010
Período (s)	4,86	2000	16,35	2010
Força (kW/m)	28,68	2000	363,26	2010

Os valores médios mínimos no Rio de Janeiro (ponto 03) ocorreram em 1998 (exceto para altura) e os máximos em 1997 (exceto para período) (Tabela 22). A direção média das ondas de tempestade variou entre Sudeste-Sul (155,2°) em 2008 e Sul (183,1°) em 2009.

Tabela 22: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência em São Paulo.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	2,75	2000	3,13	1997
Período (s)	9,61	1998	10,89	2009
Força (kW/m)	74,81	1998	107,82	1997

As direções de ondas de tempestade mais frequentes em São Paulo foram Sul-Sudoeste e Sul, totalizando mais de 60% (Figura 18). A classe de altura de ondas de tempestade mais frequente foi 2,5 a 3,0 m, aumentando a contribuição de classes de maior altura no sentido horário na rosa de onda. No quadrante Leste o período mais frequente foi de 8 a 10 s e a força de onda mais frequente de 50 a 100 kW/m, no quadrante Sul ondas de 10 a 14 s e de 50 a 150 kW/m.

Figura 18: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para São Paulo (ponto 03).

A força das ondas de tempestade foi maior nos meses de Outono e Inverno, e não ocorreu em alguns meses, geralmente de Verão (Figura 19). O padrão interanual não foi definido e os anos de 1997, 1999, 2006, 2007 e 2010 foram os mais energéticos.

Figura 19: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo no Estado de São Paulo (ponto 03). Foi apresentada, conforme a legenda da figura, a força máxima, a força média e a força mínima, todas em kW/m.

Não foi determinado um padrão na variação interanual da direção, altura e força de onda na plataforma de São Paulo (Figura 20). Exceto em 1997, todas as direções médias foram do quadrante Leste. O pico máximo da média da altura e direção ocorreu em 1997, o da média da força de onda em 2001 e o pico mínimo da direção média ocorreu em 2006.

Figura 20: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado de São Paulo (ponto 03), apresentando a direção (°), altura (m) e força médias (kW/m) no mês de Junho.

6.1.2.4. Paraná (Ponto 04)

Na plataforma do Paraná (ponto 04) foram consideradas ondas de tempestade aquelas com mais de 2,56 m de altura (Tabela 23). As características das ondas de tempestade foram altura média de 3,1 m, período de 9,6 s, força de onda de 92,6 kW/m e direção média de 158,5° (SES).

Tabela 23: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos e o ano de ocorrência das ondas de tempestade no Paraná.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	2,56	todos	5,51	1999
Período (s)	4,85	1998	16,19	2010
Força (kW/m)	33,30	2007	348,30	2010

As médias (Tabela 24) foram menores nos anos de 1998 e 2000 (apenas altura) e as maiores médias em 1997 e 2009 (apenas período). A direção média das ondas de tempestade variou entre Sudeste (145,4°) em 1998 e Sul (176,8°) em 2003, e exceto estes anos e 2007 e 2009, que tiveram direção média de Sul, todos os outros dez anos tiveram direção média de onda de Sudeste-Sul.

Tabela 24: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Paraná.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	2,92	2000	3,25	1997
Período (s)	8,78	1998	10,39	2009
Força (kW/m)	77,73	1998	106,63	1997

A direção de ondas de tempestade mais frequente na plataforma do Paraná (ponto 04) foi de Sul seguido das ondas de Sul-Sudoeste, totalizando mais de 55% das ondas (Figura 21). A classe de altura de onda mais frequente foi de 2,5 a 3,5 m, aumentando a contribuição das classes de maior altura no sentido horário. A contribuição das classes de maior período também aumentou no sentido horário, variando entre 6 a 8 s e 8 a 12 s. No quadrante Leste foram mais frequentes ondas de 50 a 100 kW/m e no quadrante Sul ondas de 50 a 150 kW/m.

Figura 21: Rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Estado do Paraná (ponto 04).

A força de onda (Figura 22) foi maior nos meses de Outono e Inverno e não ocorreu em alguns meses de Verão e Primavera. Houve variação interanual na força de onda, mas não foi definido o padrão. Os anos de 1997, 1999, 2001, 2005, 2006, 2007, 2009 e 2010 foram os mais energéticos.

Figura 22: Estatísticas de força de onda de tempestade apresentada ao longo do tempo para o Paraná (ponto 04). Sendo apresentadas a força máxima, a média e a mínima, todas em kW/m.

Foi observada variação interanual na direção, altura e força de onda média no Estado do Paraná, mas não foi determinado um padrão (Figura 23). Todas as direções médias foram do quadrante Leste. O pico máximo da direção média ocorreu em 2006 e da força média em 2001. O pico mínimo da direção média ocorreu em 2004, da altura média em 2000, e da força média em 1999.

Figura 23: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado do Paraná (ponto 04), apresentando a direção (°), altura (m) e força (kW/m) médios no mês de Junho.

6.1.2.5. Santa Catarina (Ponto 05)

Foram consideradas ondas de tempestade na plataforma de Santa Catarina (ponto 05) as ondas maiores que 2,86 m (Tabela 25). Estas ondas de tempestade tiveram altura média de 3,5 m, período médio de 9,6 s, força de onda média de 144,1 kW/m e direção média de 164,1°, todas as características maiores que no espectro completo.

Tabela 25: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência em Santa Catarina.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	2,86	todos	7,31	2008
Período (s)	4,93	2008	15,72	2004
Força (kW/m)	39,92	2008	555,29	2008

As características médias foram menores em 1998 e maiores em 2006 para altura, período e força (Tabela 26). A direção média das ondas de tempestade variou entre Sudeste-Sul (147,7°) em 2010 e Sul (187,2°) em 2003.

Tabela 26: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência em Santa Catarina.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	3,28	1998	3,62	2006
Período (s)	8,84	1998	10,05	2006
Força (kW/m)	96,92	1998	138,64	2006
Direção (°)	147,71	2010	187,21	2003

A direção de onda tempestade predominante em Santa Catarina (ponto 05) foi Sul-Sudoeste, seguida das ondas de Sul, totalizando juntas mais de 50% das ondas de tempestade (Figura 24). As ondas mais frequentes de Leste foram de 3,0 a 3,5 m, 8 a 10 s e 50 a 100 kW/m, e no quadrante Sul foram ondas de 3,0 a 4,0 m, 8 a 14 s e 50 a 200 kW/m as mais frequentes.

Figura 24: As rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para Santa Catarina (ponto 05).

A força das ondas de tempestade (Figura 25) foi maior nos meses de Outono e Inverno. Não ocorreram ondas de tempestade em alguns meses de Verão e Primavera. Considerando a força média apenas o ano de 1999 se destaca dos demais, mas considerando a força máxima os anos de 2000, 2001, 2006, 2007 e 2008 também se destacaram.

Figura 25: Estatísticas de força de onda de tempestade ao longo do tempo para Santa Catarina (ponto 05). Foi apresentada, a força máxima, a média e a mínima, todas em kW/m.

O padrão da variação interanual encontrado na direção, altura e força de onda no Estado de Santa Catarina não foi determinado (Figura 26). Os anos de 2001, 2006 e 2007 tiveram ondas do quadrante Sul, os demais anos tiveram a direção média do quadrante Leste. O pico máximo da direção e altura médias ocorreu em 2006 e o pico mínimo da direção e força média ocorreu em 2004.

Figura 26: Variação interanual do clima de ondas de tempestade no Estado de Santa Catarina (ponto 05), apresentadas direção (°), altura (m) e força (kW/m) média no mês de Junho.

6.1.2.6. Rio Grande do Sul (Ponto 06)

Foram consideradas ondas de tempestade no Rio Grande do Sul (ponto 06) as ondas com alturas maiores que 3,11 m (Tabela 27). Neste Estado as ondas de tempestade tiveram altura média de 3,8 m, período médio de 9,5 s, força de onda média de 144,1 kW/m e direção média de 152,5° (SES).

Tabela 27: Altura (m), período (s) e força (kW/m) máximos e mínimos das ondas de tempestade e o ano de ocorrência no Rio Grande do Sul.

	Mínimo	Ano	Máximo	Ano
Altura (m)	3,11	todos	7,22	2006
Período (s)	5,62	2005	15,05	2004
Força (kW/m)	56,25	2006	592,25	2007

Os valores médios mínimos e máximos das ondas de tempestade ocorreram em 2001 e 2006, respectivamente, exceto para o período (Tabela 28). A direção média no Rio Grande do Sul variou entre Sudeste (128,8°) em 1999 e Sul (180,2°) em 2003.

Tabela 28: Maior e menor altura (m), período (s) e força (kW/m) médios das ondas de tempestade e ano de ocorrência no Rio Grande do Sul.

	Menor Média	Ano	Maior Média	Ano
Altura (m)	3,66	2001	4,02	2006
Período (s)	8,89	1998	9,92	2009
Força (kW/m)	123,97	2001	168,05	2006
Direção (°)	128,76	1999	180,18	2003

A direção das ondas de tempestade (Figura 27) predominante no Rio Grande do Sul foi de Sul-Sudoeste seguida das ondas de Sul, totalizando juntas quase 45% das ondas ocorrentes. As classes mais representativas da altura, período e força de onda na rosa de onda aumentaram no sentido horário. A altura mais frequente foi de 3,0 a 3,5 m. As classes mais representativas do período variaram, no sentido horário, entre 6 a 8 s e 10 a 12 s, e as de força entre 50 a 100 kW/m e 100 a 200 kW/m.

Figura 27: Rosas de ondas de tempestade representando a direção predominante e a frequência das classes de altura (m), período (s) e força (kW/m) para o Rio Grande do Sul.

No Rio Grande do Sul a força de onda foi maior nos meses de Outono e Inverno, e em alguns meses do Verão e da Primavera não ocorreram ondas consideradas de tempestade (Figura 28). O padrão de variação interanual não foi definido. Os anos mais energético foram 1999, 2005, 2006, 2007 e 2009.

Figura 28: Estatísticas da força de onda de tempestade ao longo do tempo para o Rio Grande do Sul (ponto 06). Sendo, conforme a legenda da figura, a força máxima, a média e a mínima, em kW/m.

Foi observada uma variação interanual na direção, altura e força de onda médias na plataforma do Rio Grande do Sul, mas não foi determinado o padrão desta variação (Figura 29). A direção média foi do quadrante Sul na maioria dos meses, exceto nos anos de 1998, 2000 e 2004, quando foi do quadrante Leste. O pico máximo da direção, altura e força média ocorreu em 2007, o pico mínimo da direção e altura média ocorreu em 2004 e a menor força média ocorreu em 2005.

Figura 29: Variação interanual do clima de ondas de tempestade, sendo apresentada a direção (°), altura (m) e força (kW/m) médias para o Rio Grande do Sul (ponto 06).

6.1.2.7. Variação Espacial

O padrão de variação espacial geral encontrado na estatística das ondas de tempestade mostrou do Espírito Santo (ponto 01) para o Rio Grande do Sul (ponto 06) uma diminuição do período máximo e do maior período médio, e um aumento da altura e força de onda máxima, mínima e maior e menor média. Para as ondas de tempestade a direção média variou de Sudeste (pontos 01, 04 e 06) ou Sudeste-Sul (pontos 02, 03 e 05) até Sul (para todos os pontos). A direção mais frequente entre as médias foi Sudeste-Sul.

Os gráficos de rosa de ondas indicam dominância de ondas incidentes de Sul e Sul-Sudoeste, representando sempre mais de 40% em todos os pontos, chegando a quase 65% no Rio de Janeiro (ponto 02). Os pontos mais ao Sul tiveram maior influência de diversas direções de onda. Em todos os pontos foi observado nas rosas de onda um aumento no sentido horário da contribuição de classes de maior altura, período e força de onda. Também foi observado o aumento nas classes de altura e força que mais contribuíram do Espírito Santo (ponto 01) para o Rio Grande do Sul (ponto 06).

Em todos os pontos analisados foi verificada a ocorrência de variação interanual na força das ondas de tempestade, mas não foi definido o padrão desta variação. Foi verificado que a força máxima, média e mínima foi maior nos meses de Outono e Inverno, e que em alguns anos não ocorreram ondas de tempestade na Primavera e no Verão. Na representação da força de onda também foi observado o aumento da energia do Espírito Santo (ponto 01) para o Rio Grande do Sul (ponto 06), sendo evidenciado nos pontos 05 e 06.

Foi observado que a variação interanual do clima de ondas existe, mas não foi determinado o seu padrão em nenhum parâmetro (direção, altura e força) de nenhum ponto analisado. O padrão de aumento ou diminuição de Norte para Sul não foi claro para nenhum dos parâmetros.

O comportamento interanual da direção média das ondas nos pontos 01 (Espírito Santo) e 02 (Rio de Janeiro) foi o mesmo, sendo os valores da direção no ponto 02 sempre maiores, o ponto 03 (São Paulo) teve padrão semelhante a este, e junto com o ponto 04 (Paraná) formaram um grupo com maior frequência de ondas do quadrante Leste. Os pontos 05 (Santa Catarina) e 06 (Rio Grande do Sul) tiveram padrão interanual semelhante, com ângulos

de incidência maiores, aumentando o número de direções médias pertencentes ao quadrante Sul, especialmente no Rio Grande do Sul onde quase todas foram deste quadrante.

Analisando a variação interanual, novamente os pontos 01 (Espírito Santo) e 02 (Rio de Janeiro) tiveram comportamento muito semelhantes, e juntos com os pontos 03 (São Paulo) e 04 (Paraná) formam um grupo de menores alturas de onda. As ondas dos pontos 05 (Santa Catarina) e 06 (Rio Grande do Sul) foram maiores, deixando mais clara a diferença entre estes e os outros quatro pontos.

Na variação interanual da força de onda média, não foi possível associar os comportamentos entre os pontos. Sugerindo forte influência do período de onda, que não teve padrão espacial determinado.

6.2. Modelagem Numérica

6.2.1. Casos do Clima de Ondas Dominante – São Paulo

Foram analisados os casos com frequência maior ou igual a 10% das ocorrências em cada ano para a plataforma do Estado de São Paulo (Ponto 03 do NWW3). Não estiveram entre os casos analisados as ondas de Norte, Norte-Nordeste, Nordeste, Nordeste-Leste, Sudoeste, Sudoeste-Oeste, Oeste, Oeste-Noroeste, Noroeste, e Noroeste-Norte.

Ondas de Leste só estiveram entre as mais frequentes no ano de 2008 (10%), quando elas sofreram refração de 44% para atingir a Praia da Cocanha, de 21% para atingir a Praia de Massaguaçu e de 14% para atingir a Praia de Capricórnio (Figura 30).

Figura 30: Ondas de Leste (média no ano de 2008) aproximando-se da região de interesse no Estado de São Paulo. A altura significativa das ondas apresentada ao fundo (escala à direita) e os vetores indicam a direção e a intensidade deste movimento.

O transporte de sedimentos gerado pelas ondas de Leste foi maior na Praia de Capricórnio com 10,4 kg/s, e muito semelhante na Praia da Cocanha e de Massaguaçu, ambos com aproximadamente 4 kg/s. Nas três praias o transporte foi para esquerda.

Ondas de Leste-Sudeste estiveram entre as mais ocorrentes nos anos de 1997 (10%), 2001 (12%), 2005 (11%), 2008 (20%) e 2010 (13%). Na Praia da Cocanha em todos os anos avaliados a refração de onda foi maior que 20% (entre 22% em 1997 e 28% em 2005), em Massaguaçu a refração variou entre 5% em 1997 e 10% em 2005, e na Praia de Capricórnio a refração foi de aproximadamente 2% em 1997 e 2008 até 6% em 2005. O padrão de variação interanual foi o mesmo entre as praias. O padrão de variação espacial entre as praias foi o mesmo em todos os anos, com as ondas que atingem a Praia da Cocanha refratando mais, seguida das ondas que atingem a Praia de Massaguaçu e, por fim, as ondas que atingem a Praia de Capricórnio.

O transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Leste-Sudeste foi para esquerda em todas as praias em todos os anos. Na Praia da Cocanha ele variou de 0,8 kg/s em 2008 a 24,0 kg/s em 2010, na Praia de Massaguaçu de 7,3 kg/s em 2001 a 73,2 kg/s em 2010, e na Praia de Capricórnio de 26,0 kg/s em 1997 a 93,6 kg/s em 2005. Não foi observado o mesmo padrão de variação interanual de transporte de sedimentos entre as praias, nem a variação entre as praias foi a mesma em todos os anos.

Ondas de Sudeste estiveram entre as mais frequentes nos anos 1998 (14%), 1999 (11%), 2001 (15%), 2008 (13%) e 2010 (15%). Em todos os anos avaliados as ondas que atingiram a Praia da Cocanha refrataram entre 5% em 1998 e 8% em 1999, as que atingiram a Praia de Massaguaçu entre 5% em 1999 e 8% em 1998, e até a Praia de Capricórnio entre 8% em 1999 e 10%. As praias de Massaguaçu e Capricórnio tiveram o mesmo padrão de variação interanual, e a refração na Praia de Capricórnio foi maior que a de Massaguaçu em todos os anos avaliados.

O padrão interanual para o transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudeste não foi o mesmo para nenhuma das três praias. A Praia de Massaguaçu teve o maior transporte em todos os anos, e a Praia da Cocanha teve o menor transporte, exceto em 2008. Em todas as três

praias o transporte longitudinal de sedimentos foi para esquerda (Figura 31) das praias e variou entre 14,8 kg/s em 2010 e 44,5 kg/s em 2008 para Praia da Cocanha, entre 50,2 kg/s em 2008 e 133,1 kg/s em 2010 para Praia de Massaguaçu e entre 33,0 kg/s em 2008 e 72,8 kg/s em 1999 para Capricórnio.

Figura 31: Transporte de sedimentos gerados nas praias da Cocanha (14,8 kg/s), Massaguaçu (133,1 kg/s) e Capricórnio (68,0 kg/s) pelas ondas de Sudeste no ano de 2010, no fundo foi apresentada a altura significativa (legenda à direita).

Ondas de Sudeste-Sul só não estiveram entre as 10% mais ocorrentes nos anos de 1999, 2003, 2005 e 2007. A refração das ondas foi maior em todos os anos para a Praia de Capricórnio e menor para a Praia da Cocanha. O padrão de variação interanual foi o mesmo para as praias de Cocanha e Massaguaçu e da Praia de Capricórnio foi semelhante ao delas. A refração das ondas variou, nos anos de 1997 e 2000 respectivamente, entre 3% e 7% para Cocanha, 17% e 20% para Massaguaçu e entre 19% e 23% para Capricórnio.

Para ondas de Sudeste-Sul oceânicas o transporte de sedimentos gerado nas praias foi para esquerda (Figura 32 e Figura 33) para todos os casos avaliados, e o padrão interanual não foi coincidente para nenhuma das praias de São Paulo, nem o padrão entre as praias em nenhum dos anos analisados. O transporte variou entre 5,1 kg/s em 2010 e 64,3 kg/s em 2006 para Cocanha, 1,3 kg/s em 2010 e 55,7 kg/s em 2006 para Massaguaçu e entre 1,3 kg/s em 2000 e 316,5 kg/s em 1998 para Capricórnio.

Figura 32: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudeste-Sul em 1998 nas praias da Cocanha (7,5 kg/s), Massaguaçu (5,4 kg/s) e Capricórnio (316,5 kg/s), no fundo foi apresentada a altura significativa das ondas durante a aproximação da costa, legenda à direita.

Figura 33: Transporte longitudinal de sedimentos gerado nas praias da Cocanha (64,3 kg/s), Massaguaçu (55,7 kg/s) e Capricórnio (3,7 kg/s) pelas ondas de Sudeste-Sul no ano de 2006, ao fundo foi apresentada a altura significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita).

As ondas de Sul na plataforma continental estiveram entre as 10% mais ocorrentes em todos os 14 anos analisados. A refração variou entre 17% e 19% na Cocanha, 28% e 30% em Massaguaçu, e entre 30% e 32% em Capricórnio. O padrão interanual não foi semelhante entre as praias, mas o menor valor ocorreu em 2000 e o maior em 2009 em todas as praias. A variação entre as três praias foi a mesma em todos os anos, com a Praia da Cocanha sofrendo a menor refração e a Praia de Capricórnio a maior.

O padrão interanual do transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sul não foi o mesmo para as três praias, mas o transporte na Praia da Cocanha foi o maior em todos os anos, exceto em 2010 quando o transporte gerado em Capricórnio foi maior. Na Praia da Cocanha o transporte

variou entre 1,6 kg/s em 1998 e 4,6 kg/s em 2006, entre 0,1 kg/s em 2003 e 2,7 kg/s em 2007 em Massaguaçu e entre 0,2 kg/s em 1998 e 1,9 kg/s em 2010 em Capricórnio. O transporte de sedimentos foi para esquerda em todos os casos.

As ondas de Sul-Sudoeste (Figura 34) estiveram entre as mais ocorrentes (mais de 10% de frequência) em todos os anos. A refração das ondas variou entre 23% em 1998 e 24% em 2001 na Praia da Cocanha, entre 33% em 2000 e 34% em 2010 em Massaguaçu, e entre 34% em 2000 e 35% em 2010 em Capricórnio. As praias de Massaguaçu e Capricórnio tiveram a mesma variação interanual, e valores semelhantes de refração. Em todos os anos as ondas que atingiram a Praia de Capricórnio sofreram uma refração um pouco maior que a de Massaguaçu e ambas foram maiores que as ondas que atingiram a Praia da Cocanha.

Figura 34: Ondas de Sul-Sudoeste (caso de 2010) na plataforma atingindo a região de interesse, no qual a altura significativa (m) está apresentada ao fundo (legenda à direita) e os vetores indicam a direção e a intensidade das propagação destas ondas.

O transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sul-Sudoeste foi para esquerda para todos os casos, mas a variação interanual não foi semelhante entre as praias, nem o padrão entre as praias foi o mesmo em todos os anos. O transporte de sedimentos variou entre 0,1 kg/s em 2010 e 0,9 kg/s em 2007 na Praia da Cocanha, entre 0,02 kg/s em 2002 e 0,5 kg/s em 2007 em Massaguaçu, e entre 0,03 kg/s em 2008 e 0,3 kg/s em 2007 na Praia de Capricórnio.

6.2.2. Casos do Clima de Ondas Dominante – Santa Catarina

Na plataforma continental do Estado de Santa Catarina (ponto 05), as ondas de Sudoeste-Oeste, Oeste, Oeste-Noroeste, Noroeste, Noroeste-Norte, Norte, Norte-Nordeste, não estiveram entre as mais frequentes (10%) em nenhum dos 14 anos (1997 a 2010) analisados.

Ondas de Nordeste foram frequentes (10%) na plataforma de Santa Catarina apenas no ano de 2002, neste caso elas sofreram refração de 43% até chegar na Praia de Itapirubá, de 61% até chegar na Vila Nova e 82% até chegar na Praia da Vila (Figura 35). O transporte longitudinal de sedimentos gerado por estas ondas foi semelhante e para esquerda nas praias da Vila e Vila Nova, de 31,3 kg/s e 33,9 kg/s respectivamente, e o transporte foi para direita na Praia de Itapirubá, com 115,0 kg/s.

Figura 35: Ondas de Nordeste (2002) na plataforma atingindo a região de interesse no Estado de Santa Catarina. Altura significativa (legenda à direita) apresentada ao fundo e direção e intensidade das ondas representadas pelos vetores.

As ondas de Nordeste-Leste estiveram entre as mais frequentes nos anos de 1998 (11%), 2001 (16%), 2002 (10%) e 2008 (14%). As ondas que atingiram as praias da Vila Nova e Itapirubá tiveram a mesma variação interanual em relação a refração da onda, e nas três praias estudadas a refração foi maior no ano de 2002. Em todos os anos o comportamento entre as praias foi semelhante, com as maiores refrações ocorrendo na Praia da Vila (49% em 1998 a 68% em 2002), seguida da Praia da Vila Nova (28% em 2008 a 46% em 2002) e as menores na Praia de Itapirubá (18% em 2008 a 33% em 2002).

Quanto ao transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Nordeste-Leste, as praias da Vila e da Vila Nova transportaram para esquerda e tiveram variação interanual semelhante, com os menores valores em 2002, 12,1 kg/s e 90,4 kg/s respectivamente, e os maiores em 2008, com 89,9 kg/s e 258,7 kg/s. A Praia de Itapirubá teve transporte de sedimentos para direita em todos os anos analisados e variou entre 157,4 kg/s (em 1998) e 192,9 kg/s (em 2001). Em todos os anos o transporte foi menor na Praia da Vila e maior na Praia de Itapirubá, exceto no ano de 2008 que o transporte foi maior na Praia da Vila Nova.

Ondas de Leste só foram frequentes em 2010 (14%), neste caso a refração de onda foi menor na Praia de Itapirubá (1%), seguida da Praia da Vila Nova (7%) e maior na Praia da Vila (26%). O transporte de sedimentos foi para esquerda nas praias da Vila (421,8 kg/s) e Vila Nova (839,5 kg/s) e para direita na Praia de Itapirubá (392,5 kg/s).

Ondas de Leste-Sudeste foram frequentes em 2004 (13%) e 2010 (11%). As ondas que atingiram a Praia da Vila refrataram 12% nos dois casos, a Praia da Vila Nova refrataram entre 0,3% e 1%, e a Praia de Itapirubá entre 6% e 8%. O transporte longitudinal de sedimentos foi para esquerda nas praias da Vila e Vila Nova e foi maior em 2010 nos dois casos (com 500,3 kg/s e 1114,4 kg/s, respectivamente), na Praia de Itapirubá foi para direita e quase não ocorreu transporte de sedimentos no ano de 2010 (1,3 kg/s) e foi bem maior em 2004 (222,76 kg/s).

Ondas de Sudeste nos anos de 1997, 2000, 2001 e 2005 estiveram entre as mais frequentes, com 20%, 11%, 10% e 10%, respectivamente. As ondas que atingiram a Praia da Vila refrataram entre 1% em 2000 e 4% em 2005. As ondas que atingiram as praias da Vila Nova e Itapirubá tiveram o mesmo padrão interanual, menores em 2005 (6% e 11%) e maiores em 2000 (7% e 14%, respectivamente). O transporte de sedimentos foi para esquerda nas praias da Vila e Vila Nova, e para direita na Praia de Itapirubá (Figura 36). Variou entre 466,8 kg/s (2000) e 819,4 kg/s (2001) na Praia da Vila, entre 35,6 kg/s (2001) e 1363,5 kg/s (1997) na Praia da Vila Nova, e entre 212,2 kg/s e 1141,5 kg/s (1997) em Itapirubá.

Figura 36: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudeste no ano de 1997 nas praias da Vila (530,3 kg/s), Vila Nova (1363,5) e Itapirubá (1141,5 kg/s). Os vetores indicam a direção e intensidade de transporte e ao fundo a altura significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita).

As ondas de Sudeste-Sul na plataforma de Santa Catarina foram frequentes nos anos 2000 (11%) e 2002 (10%). A refração foi maior em 2002 para as três praias, de 5 a 8% na Vila, 10 a 13% na Vila Nova e 19 a 21% em Itapirubá. Nos dois anos analisados o transporte longitudinal de sedimentos foi para esquerda nas praias da Vila e Vila Nova, e para direita em Itapirubá. O transporte de sedimentos também foi maior no ano de 2002, e variou entre 140,8 e 529,4 kg/s na Vila, 448,4 e 619,3 kg/s na Vila Nova e 501,8 e 694,7 kg/s em Itapirubá. Para as ondas de Sudeste-Sul na plataforma de Santa

Catarina a refração e o transporte longitudinal de sedimentos gerado tiveram a mesma variação entre os anos e entre as praias em cada ano.

As ondas de Sul estiveram entre as mais ocorrentes na plataforma continental de Santa Catarina em todos os 14 anos analisados. A refração de onda teve variação interanual semelhante nas três praias, com a menor refração ocorrendo em 1998, 15% na Praia da Vila, 20% na Praia da Vila Nova e 28% na Praia de Itapirubá, e a maior em 2009, com 17% na Vila, 22% na Vila Nova e 30% em Itapirubá. A relação entre as três praias foi a mesma em todos os anos, com as ondas que atingem a Praia de Vila sofrendo menor refração, seguida das ondas que atingem a Vila Nova e, por fim, as ondas que atingem a Praia de Itapirubá.

O transporte de sedimentos gerado pelas ondas de Sul foi para esquerda na Praia da Vila e da Vila Nova e para direita na Praia de Itapirubá (Figura 37). O padrão interanual não foi o mesmo entre as praias, nem foi o mesmo padrão entre as praias em todos os anos. Na Praia da Vila o transporte variou entre 59,5 kg/s (2001) e 922,8 kg/s (2006), na Praia da Vila Nova entre 45,7 kg/s (1997) e 534,7 kg/s (2004), e na Praia de Itapirubá entre 57,6 kg/s (2003) e 459,0 kg/s (1999).

Figura 37: Transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sul no ano de 2006 nas praias da Vila (922,8 kg/s), Vila Nova (506,1 kg/s) e Itapirubá (369,6 kg/s) no Estado de Santa Catarina. No fundo foi apresentada a altura significativa das ondas se aproximando da costa (legenda à direita) e os vetores indicam a direção e intensidade do transporte de sedimentos em cada praia.

As ondas de Sul-Sudoeste foram frequentes em todos os anos analisados. O padrão interanual foi semelhante entre as praias, sendo 2005 o ano com menor refração em todas as praias. A refração das ondas que atingem a Praia da Vila variou entre 21% e 23% (2001), as que chegam a Praia da Vila Nova entre 26% e 27% (2007), e na Praia de Itapirubá entre 33% e 34% (2007). A variação da refração entre as três praias foi a mesma em todos os anos.

O padrão do transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sul-Sudoeste não foi o mesmo nas três praias, nem o padrão entre as três praias foi o mesmo em todos os anos. O transporte foi para esquerda na Praia da Vila e da Vila Nova, e variou entre 0,5 kg/s (1998) e 190,3 kg/s (2007) na Praia da Vila e entre 4,9 kg/s (2001) e 108,9 kg/s na Vila Nova, e o transporte foi para direita na Praia de Itapirubá, variando entre 23,5 kg/s (2005) e 91,5 kg/s (1997).

As ondas de Sudoeste na plataforma de Santa Catarina estavam entre as mais frequentes nos anos de 1998 a 2003, 2005, 2007 e 2008. Considerando a refração destas ondas (Figura 38), o padrão interanual foi semelhante entre as três praias, variando entre 27% (2001) e 29% (2008) na Praia da Vila, entre 30% (2005) e 32% (2008) na Praia da Vila Nova, e entre 37% (2005) e 39% (2008). A variação entre as praias foi a mesma em todos os anos, com a refração sofrida pelas ondas que chegam na Praia da Vila a menor, e a das ondas que atingem a Praia de Itapirubá a maior.

A variação interanual do transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas de Sudoeste foi semelhante entre as três praias, variando entre 4,2 kg/s (2005) e 14,8 kg/s (2003) na Praia da Vila, entre 0,03 kg/s (2000) e 6,7 kg/s (2003) na Praia da Vila Nova, e entre 0,5 kg/s (2005) e 5,3 kg/s (1999) na Praia de Itapirubá. Em todos os anos o transporte gerado nas praias da Vila e Vila Nova foi para esquerda e na Praia de Itapirubá para direita. O padrão de transporte de sedimentos entre as três praias não foi o mesmo, mas em todos os anos o transporte foi maior na Praia da Vila.

Figura 38: Aproximação das ondas de Sudoeste (2008) da região de interesse do Estado de Santa Catarina. Ao fundo apresenta a altura de onda significativa (m) com legenda à direita e vetores indicando a direção e a intensidade das ondas.

7. Discussão

7.1. Clima de Ondas

7.1.1. Geral (NWW3)

A altura e força de onda foram maiores nos meses de Outono e Inverno, condizendo com a variação sazonal esperada. O maior período médio também ocorreu nos meses de Outono e Inverno. A direção média variou de Leste (em Dezembro no Espírito Santo) e Leste-Sudeste (em Janeiro nos demais pontos) até Sudeste-Sul (nos meses de Outono em todos os Estados), e, de maneira geral, as médias foram maiores nos meses de Outono e Inverno.

Na rosa de onda, o aumento no sentido horário da contribuição das classes de maior altura, maior período e maior força de onda, a diminuição no sentido horário da contribuição das classes de menor altura, menor período, e menor força, e as ondas de quadrante Sul tendendo a ser mais energéticas, mostraram que as ondas mais intensas foram do quadrante Sul no litoral Sudeste e Sul brasileiro.

Do Espírito Santo para o Rio Grande do Sul aumentou a altura e a força de onda. PIANCA *et al.* (2010) associaram o aumento da força aos ventos fortes associados a passagem de frentes frias (que perdem energia ao se propagar para o Norte). Não foi encontrado padrão espacial para o período de onda.

Foram considerados três centros de ciclogênese para esta análise, em 25°S (próximo ao litoral brasileiro), em 30°S (próximo ao Uruguai) e em 45°S (próximo ao Sul da Argentina), chamados a seguir de C25, C30 e C45, respectivamente. Quanto mais próximo do centro de geração, a onda tende a ser mais energética; e quanto mais centros influenciarem a formação de uma direção de onda, mais frequente ela tende a ser.

As ondas de Sudoeste, Sul-Sudoeste e Sul no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul foram influenciadas principalmente pelo C45, a altura destas ondas diminuiu do Rio Grande do Sul para o Paraná devido ao aumento da distância da área de geração. O Paraná também foi influenciado pelo C30

gerando ondas de Sul, isto justificou o aumento da frequência das ondas dessa direção neste Estado. São Paulo sofreu as mesmas influências que o Paraná na formação das ondas destas direções. Os Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro foram influenciados por estes dois centros, o que explica a diminuição da altura de onda, e também pelo C25, que não causou grandes alterações nas características destas ondas por ser um centro mais fraco que os outros dois.

As ondas de Sudeste-Sul, Sudestes e Sudeste-Leste no Rio Grande do Sul foram influenciadas pelo C45, e em Santa Catarina também pelo C30 que justificou o aumento da frequência destas ondas. Os Estados de São Paulo e Paraná foram influenciados por estes dois centros, como estão mais distantes das áreas de geração a altura de onda diminuiu. O Espírito Santo e Rio de Janeiro foram influenciados por estes dois centros e também pelo C25, que justificou o pequeno aumento na altura destas ondas.

Ondas de Leste só sofreram influência dos centros de ciclogênese em São Paulo e no Paraná, locais onde a influência do C25 justificou a maior frequência destas ondas.

Ondas de Norte-Nordeste, Nordeste e Nordeste-Leste no Rio Grande do Sul foram influenciadas pelos C25 e C30. No Paraná e em Santa Catarina estas ondas foram influenciadas apenas pelo C25, o que explicou a alteração na distribuição das ondas destas direções.

Os sistemas frontais gerados pelo APM se movimentam para Nordeste e diminuem sua intensidade em direção ao Norte. Destes sistemas a fase pré-frontal gerou ondas de Sudoeste, Sul-Sudoeste, Sul, Sudeste-Sul, Sudeste e Leste-Sudeste em todos os pontos, mas elas exerceram menos influência que as ciclogêneses. A fase frontal gerou ondas de Leste ao longo da região estudada, sendo a única responsável por estas ondas no Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A fase pós-frontal gerou ondas de Norte (apenas no Espírito Santo), Norte-Nordeste, Nordeste e Nordeste-Leste em toda a região, mas foi a única responsável pela formação destas ondas no Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo, locais que a altura de onda variou pouco. PIANCA *et al.* (2010) consideraram que do Sul do Brasil até o Estado da Bahia ocorreu influência da passagem de frentes frias no Inverno.

Os maiores períodos associados às ondas Sul-Sudoeste a Leste-Sudeste sugerem forte influência de sistemas distantes. A ocorrência das

ondas de Sudoeste-Oeste, Oeste, Oeste-Noroeste, Noroeste, Noroeste-Norte e Norte (exceto no Espírito Santo) não foi explicada pelos fenômenos atmosféricos considerados, sugerindo que estas ondas foram geradas por eventos locais. Estes eventos foram mais presentes em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, e causou a maior variação na direção de onda nestes Estados.

7.1.2. Tempestades

ALVES *et al.* (2009) apresentaram três eventos de ondas geradas por tempestades severas, que formaram ondas maiores que 5 m, na Bacia de Campos (P-25) em Setembro de 1999 e Julho e Setembro de 2000. No presente trabalho foram encontradas 35 ondas maiores que 5 m na plataforma do Rio de Janeiro, sendo 19 em 1997, duas em 1999, cinco em 2007 e nove em 2010. A diferença encontrada entre estes trabalhos foi justificada pela posição dos pontos de análise, pois a Plataforma P-25 está mais ao Norte e em águas mais profundas.

MACHADO *et al.* (2010) encontraram 40 eventos de altura significativa maior que 6 m à 100 m de profundidade próximo a Cidade de Rio Grande (RS) entre 1979 e 2008, sendo o máximo encontrado de quatro eventos em 1999. No presente trabalho foram encontradas 51 medições de altura de onda maior que 6 m entre 1997 e 2010 na plataforma do Rio Grande do Sul, sendo 1999 e 2006 os anos de maior ocorrência, com 10 e 12 ondas respectivamente.

A direção média das ondas de tempestade variou entre Sudeste (Espírito Santo, Paraná e Rio Grande do Sul) ou Sudeste-Sul (Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina) e Sul (todos os Estados), a direção mais frequente entre as médias foi Sudeste-Sul, e a direção predominante nas rosas de onda foram Sul e Sul-Sudoeste em todos os pontos. Isto mostrou que as ondas de tempestade foram principalmente do quadrante Sul em toda a costa Sudeste e Sul do Brasil.

Assim como no clima de ondas completo, nos pontos localizados mais ao Sul, especialmente em Santa Catarina e Rio Grande do Sul, ocorreram ondas de tempestade de mais direções que nos demais pontos analisados. O que mostra que estas ondas foram geradas por tempestades originadas de

locais mais diversos no Sul do Brasil, incluindo nos pontos analisados (eventos locais). Isto concorda com a tendência das condições extremas de ondas serem geradas por tempestades locais encontrado por YOUNG *et al.* (2011).

O período das ondas de tempestade aumentou do Sul para o Norte da área de estudo, diferente dos dados completos nos quais não foi possível identificar nenhum padrão espacial. No entanto, a altura das ondas diminuiu neste sentido, compensando o efeito da variação do período e resultando na diminuição da força das ondas de tempestade do Rio Grande do Sul para o Espírito Santo. O mesmo padrão foi verificado no clima de ondas geral para a região.

Não foi possível encontrar um padrão de aumento ou diminuição na variação interanual em nenhum dos pontos analisados, isto ocorreu porque o período de 14 anos foi muito curto para compreender as variações climáticas e atmosféricas importantes, como o El Niño, e a influência delas no clima de ondas. YOUNG *et al.* (2011) já mostraram que oscilações de longo termo influenciaram o clima de ondas e que as tendências encontradas em duas décadas de dados não podem ser extrapoladas nem consideradas uma variação multidecadal.

A variação interanual da direção média foi a mesma no Espírito Santo e no Rio de Janeiro, e a variação encontrada em São Paulo foi semelhante ao deles. A variação interanual da altura média também foi semelhante entre o Espírito Santo e Rio de Janeiro. O comportamento interanual semelhante da altura e direção, especialmente no Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo sugeriu que quanto maior o ângulo de incidência das ondas (mais ao Sul), maior foi a altura de onda gerada. Estes resultados sugerem que estes três locais estão sujeitos a ondas formadas pelos mesmos eventos.

Foi observado que a variação interanual da direção e altura médias apresentou dois grupos, do Espírito Santo ao Paraná foram mais frequentes ondas do quadrante Leste e com menor altura, e em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul aumentou a frequência das ondas de quadrante Sul e as alturas foram maiores, bem separadas do outro grupo. Isto mostrou que eventos diferentes influenciaram estes dois grupos, e que os eventos que influenciaram o Sul foram mais intensos ou estiveram mais próximos, gerando maiores alturas de ondas.

O evento de El Niño de 1997-1998, considerado o mais intenso do século XX por HOUGHTON (2009), explicou o destaque no ano de 1997 no registro da altura e direção médias observado nos pontos referentes ao Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo. O segundo pico no valor médio de altura e direção nestes Estados ocorreu no ano de 2007 (Espírito Santo e Rio de Janeiro) e em 2006 (São Paulo), e nestes anos ocorreram duas das três maiores alturas e direções médias no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o que sugeriu que nestes anos aconteceram eventos mais intensos que influenciaram toda a costa Sul e Sudeste, e sugeriu também que estes eventos ocorreram ao Sul.

7.2. Efeito na Costa das Variações Interanuais do Clima de Ondas em Água Profunda

7.2.1. São Paulo

Entre todos os casos e praias analisados na região de interesse do Estado de São Paulo o transporte longitudinal de sedimentos sempre foi para esquerda. Como o transporte tem o mesmo sentido não deve ocorrer rotação praias na Enseada de Massaguaçu.

A partir da capacidade de gerar transporte longitudinal de sedimentos, as ondas incidentes na Enseada de Massaguaçu foram classificadas em três grupos. O primeiro grupo foi composto pelas ondas de Sul e de Sul-Sudoeste que foram frequentes em todos os anos na plataforma de São Paulo, mas não foram capazes de gerar transporte efetivo em nenhuma das três praias estudadas na Enseada de Massaguaçu, nunca maior que 5 kg/s e 1kg/s, respectivamente. Isto mostrou que as direções de ondas mais frequentes na plataforma de São Paulo não foram capazes de gerar transporte de sedimento em quantidade considerável.

O segundo grupo foi composto pela única onda de Leste que gerou pouco transporte nas três praias, cerca de 4 kg/s na Cocanha e Massaguaçu, e cerca de 10 kg/s em Capricórnio. O terceiro grupo de ondas para São Paulo foi formado pelas ondas de Leste-Sudeste (frequentes em cinco anos), Sudeste

(frequentes em cinco anos) e Sudeste-Sul (frequentes em dez anos) e gerou os maiores valores de transporte longitudinal de sedimentos nas praias de interesse do Estado de São Paulo, de até 320 kg/s.

O maior transporte longitudinal de sedimentos foi gerado pelas ondas de Sudeste na Praia de Massaguaçu (133,1 kg/s) e pelas ondas de Sudeste-Sul nas praias da Cocanha (64,3 kg/s) e Capricórnio (316,5 kg/s). O maior transporte longitudinal médio foi gerado na Praia da Cocanha pelas ondas de Sudeste (29,7 kg/s) e Sudeste-Sul (29,8 kg/s), na Praia de Massaguaçu pelas ondas de Sudeste (81,4 kg/s), e na Praia de Capricórnio pelas ondas de Leste-Sudeste (61,8 kg/s).

7.2.2. Santa Catarina

Em todos os casos analisados o transporte gerado nas praias da Vila e Vila Nova foi para esquerda, e o gerado na Praia de Itapirubá foi para direita. Isto mostrou que independente do ângulo de incidência das ondas na plataforma a refração neste trecho do litoral catarinense foi bem eficiente.

Quanto à capacidade de gerar transporte de sedimentos, independente da direção de transporte, as ondas foram separadas em quatro grupos. Ondas de Sudoeste (frequentes em nove anos) compreenderam o primeiro grupo e geraram o menor transporte de sedimentos, até 15 kg/s. No segundo grupo ocorreu transporte de até 260 kg/s, foi comparado aos maiores transportes gerados na Enseada de Massaguaçu (SP), e foi composto pelas ondas de Nordeste, Nordeste-Leste e Sul-Sudoeste.

No terceiro grupo ocorreu transporte de até 925 kg/s e foi composto pelas ondas de Leste, Sudeste-Sul e Sul, deste grupo as ondas de Sul geraram o maior transporte encontrado na Praia da Vila (922,8 kg/s). No quarto grupo ocorreu transporte de até 1400 kg/s e foi composto pelas ondas de Leste-Sudeste e Sudeste, deste grupo as ondas de Sudeste geraram o maior transporte de sedimentos longitudinal nas praias da Vila Nova (1363,5 kg/s) e Itapirubá (1141,5 kg/s).

A partir dos valores médios de transporte longitudinal de sedimentos gerado por cada uma das direções analisadas, as ondas de Leste-Sudeste geraram a maior movimentação sedimentos na Praia da Vila Nova (905,2 kg/s),

as ondas de Sudeste nas praias da Vila (645,8 kg/s) e Itapirubá (598,4 kg/s), e as ondas de Sudeste-Sul o segundo maior transporte médio de sedimentos na Praia de Itapirubá (598,2 kg/s). Entre as praias, o maior transporte longitudinal médio ocorreu na Vila Nova, seguida da Praia da Vila e, por fim, Praia de Itapirubá.

SIEGLE & ASP (2007) estimaram a deriva potencial no Sul de Santa Catarina e determinaram para o trecho entre o canal de Laguna e o Cabo de Santa Marta, logo abaixo do trecho analisado neste trabalho, uma forte deriva longitudinal para Nordeste. Isto foi considerado de acordo com o resultado do presente trabalho, onde foi encontrado um forte transporte de sedimentos longitudinal nas praias analisadas, que foi para esquerda na nas praias da Vila e Vila Nova.

8. Considerações Finais

O clima de ondas completo e de tempestade encontrado na plataforma Sudeste e Sul do Brasil foi, de maneira geral, condizente com o encontrado na literatura. As eventuais diferenças podem ser relacionadas a variações espaciais (posição geográfica e profundidade) e temporais da série analisada.

Os meses de Outono e Inverno correspondem aos períodos mais energéticos, principalmente para as ondas do quadrante Sul. Como esperado, devido às forçantes envolvidas, houve um decréscimo na altura e energia das ondas de Sul para Norte.

O clima de ondas encontrado foi explicado pelos três centros ciclogênicos atuantes no Oceano Atlântico Sul, pelos sistemas frontais gerados pelo Anticiclone Polar Migratório e, especialmente em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, por eventos locais.

As ondas de tempestade foram de Sudeste a Sul-Sudoeste em todo o litoral Sudeste e Sul do Brasil. Não foram encontradas tendências na variação interanual provavelmente devido ao curto período analisado (14 anos). O único fenômeno de El Niño evidente no clima de ondas foi o de 1997/1998 que elevou os valores de altura e direção médias no Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo. Foi possível determinar dois grupos a partir da variação interanual, um formado pelo Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná, e outro por Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Ondas de Sudoeste até Nordeste-Leste não foram frequentes no Estado de São Paulo, e no Estado de Santa Catarina não foram frequentes ondas de Sudoeste-Oeste até Norte-Nordeste. As ondas de direções extremas avaliadas na variação interanual para São Paulo e Santa Catarina foram as que mais refrataram à medida em que se propagam para a costa. Essas foram as ondas de Leste e Sul-Sudoeste para a Enseada de Massaguaçu (SP), e ondas de Nordeste e Sudoeste para a região de Imbituba (SC).

O transporte gerado nas praias da Enseada de Massaguaçu foi para a esquerda (Nordeste na Praia da Cocanha e Norte-Nordeste nas praias de Massaguaçu e Capricórnio) em todos os casos. Nesta enseada as ondas que foram frequentes em todos os anos (Sul e Sul-Sudoeste) não geraram

transporte efetivo em nenhuma das três praias analisadas, e as ondas que causaram maior transporte longitudinal de sedimentos foram de Leste-Sudeste, Sudeste e Sudeste-Sul.

Em Santa Catarina, o transporte longitudinal de sedimentos foi para esquerda nas praias da Vila (Nordeste) e Vila Nova (Norte-Nordeste) e para direita na Praia de Itapirubá (Sudeste-Sul). As ondas de Leste-Sudeste e Sudeste geraram os maiores valores de transporte de sedimentos na região de Imbituba, seguidas das ondas de Leste, Sudeste-Sul e Sul.

Os resultados analisados mostraram que todos os parâmetros de onda na plataforma (altura, período e direção) influenciaram o transporte de sedimentos gerado, que foi maior nas praias do Sul de Imbituba (SC) que nas praias da Enseada de Massaguaçu (SP).

A refração das ondas foi eficaz ao tornar o comportamento das mais diversas direções em oceano profundo muito semelhante ao atingir a costa. No entanto, a pequena variação gerada no ângulo de incidência, associada às variações de altura, causou grandes variações no transporte longitudinal de sedimentos, resultando em magnitudes de transporte de sedimentos muito diferentes.

9. Referências

ALVES, J. H. G. M.; RIBEIRO, E. O.; MATHESON, G. S. G.; LIMA, J. A. M.; RIBEIRO, C. E. P. 2009. Reconstituição do clima de ondas no Sul-Sudeste brasileiro entre 1997 e 2005. *Revista brasileira de geofísica*, v. 27 (3), p. 427-445.

ALVES, J. H. G. M.; MELO, E. 2001. Measurement and modeling of wind waves at the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Revista brasileira de Oceanografia*, v. 49 (1/2), p. 13-28.

ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. 2003. Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast. IN: International conference on Coastal and Port Engineering in Developing countries. Colombo, Sri Lanka. Proceedings... COPEDEC VI, v. 097, 15 p.

BAPTISTA NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. (Orgs). 2004. *Introdução à geologia marinha*. Rio de Janeiro: Interciência.

BIGG, G. 2003. *The oceans and climate*. 2 ed. New York: Cambridge, 2003. 246 p.

BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; MARTIN, L.; SILVA, I.R. 2005. Longshore transport on the northeastern brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: an overview. *Marine geology*, n. 219, p. 219-234.

CANDELLA, R. N.; GROSMANN, G. S.; QUENTAL, S. H. A. 1999. Reconstituição de condições de ondas no Oceano Atlântico Sul com a utilização de modelos de terceira geração. *Pesquisa naval*, n. 12, p. 123-134.

CASSIANO, G. F.; SIEGLE, E. 2010. Migração lateral da desembocadura do Rio Itapocú, SC. Brasil: evolução morfológica e condicionantes físicas. Revista Brasileira de Geofísica, 28 (4), p.537-549.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. 2009. Frentes Frias sobre o Brasil. Cap. 09, p. 135-147. IN: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (org.). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos. 463 p.

CRUZ, O. 1974. A serra do mar e o litoral na área de Caraguatatuba: contribuição à geomorfologia tropical litorânea. Série Teses e Monografias n. 11. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 181 p.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). 2006. Geomorfologia do Brasil. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

CUCHIARA, D. C.; FERNANDES, E. H.; STRAUCH, J. C.; WINTERWERP, J. C.; CALLIARI, L. J. 2009. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. Continental Shelf Research, 29, p. 545-555.

DAVIS JR, R. A.; FITZGERALD, D. M. 2004. Beaches and coasts. Blackwell.

DHI Water & Environment. 2007a. MIKE 21 SW: Spectral Waves FM Module: User Guide. MIKE 21 Flow Model FM. DHI Software.

DHI Water & Environment. 2007b. MIKE 21 Spectral Wave Module: Scientific Documentation. DHI Software.

DODET, G.; DERTIN, X.; TABORDA, R. 2010. Wave climate variability in the north-east Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean modelling, v. 31, p. 120-131.

FIGUEIREDO, A. G. Jr.; TESSLER, M. G. 2004. Topografia e composição do substrato marinho da região Sudeste-Sul do Brasil. Série documentos REVIZEE: Score Sul. São Paulo: Instituto Oceanográfico – USP.

GAN, M. A.; SELUCHI, M. E. 2009. Ciclones e ciclogênese. Cap. 7, p.111-125. IN: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (org.). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos. 463 p.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. 2012. Governo do Estado de Santa Catarina. Disponível em <<http://www.sc.gov.br/>>. Acesso em 05 de Julho de 2012.

HEGERL, G. C.; ZWIERS, F. W.; BRACONNOT, P.; GILLETT, N. P.; LUO, Y.; MARENGO ORSINI, J. A.; NICHOLLS, N.; PENNER, J. E.; STOTT, P. A. 2007. Understanding and attributing climate change. In: SOLOMON, Susan; QIN, D.; MANNING, M.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M. B.; MILLER, H. L. Jr.; CHEN, Z. (ed.). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. 996 p.

HOUGHTON, J. 2009. Global warming: the complete briefing. 4 ed. New York: Cambridge University. 438 p.

INMAN, D. L.; MASTERS, P. M. 1994. Status of research on the nearshore. Shore and beach. p. 11-20.

IBGE. 2012. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Censo 2010. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/censo2010/index.php>>. Acesso em 04 de Julho de 2012.

KOMAR, P. D. 1998. Beach processes and sedimentation. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall. 544 p.

KOMAR, P. D.; ALLAN, J. C. 2008. Increasing hurricane-generated wave heights along the U. S. coast and their climate controls. West Palm Beach: Journal of coastal research, v. 24 (2), p. 479-488.

MACHADO, A. A.; CALLIARI, L. J.; MELO, E.; KLEIN, A. H. F. 2010. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 5 (2), p. 105-114.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. 2007. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. Brazilian Journal of Oceanography, 58(1), p. 53-70.

PEREIRA, J.; CANDELLA, R. N.; CARVALHO, J. L. B. 2000. O clima de ondas na costa sul de Arraial do Cabo, RJ: distribuição de parâmetros de onda. Notas técnicas FACIMAR, n. 4, p. 1-9.

PREFEITURA DE CARAGUATATUBA. 2012. Prefeitura Municipal da Estância Balneária de Caraguatatuba. Disponível em <<http://www.caraguatatuba.sp.gov.br/>>. Acesso em 06 de Julho de 2012.

PREFEITURA DE IMBITUBA. 2012. Prefeitura de Imbituba. Disponível em <<http://www.imbituba.sc.gov.br/>>. Acesso em 05 de Julho de 2012.

ROCHA, R. P.; SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R. B. 2004. Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: hindcast and validation against altimeter data. Weather and forecasting, v. 19, p. 398-410.

SCHETTINI, C. A. F.; ALMEIDA, D. C.; SIEGLE, E.; ALENCAR, A. C. B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. Geo-Mar Lett., 30, p. 47-62.

SIGLE, E.; ASP, N. E. 2007. Wave refraction and longshore transport patterns along the Southern Santa Catarina coast. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55 (2), p. 109-120.

TESSLER, M. G.; CAZZOLI Y GOYA, S. 2005. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. *Revista do departamento de geografia*, n. 17, p. 11-23.

TESSLER, M. G.; CAZZOLI Y GOYA, S.; YOSHIKAWA, P. S.; HURTADO, S. N. 2006. São Paulo. p. 297-346. *IN: MUEHE, D. (Org.) Progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

TOLMAN, H. L.; BALASUBRAMANIYAN, B.; BURROUGHS, L. D.; CHALIKOV, D. V.; CHAO, Y. Y.; CHEN, H. S.; GERALD, V. M. 2002. Development and implementation of wing-generated ocean surface wave models at NCEP. *NCEP Notes: Weather and Forecasting*, v. 17, p. 311-333.

TRENBERTH, K. E.; JONES, P. D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; PARKER, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J. A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B.; ZHAI, P. 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M. B.; MILLER, H. L. Jr.; CHEN, Z. (ed.). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge. 996 p.

VAN RIJN, L. C. 2002. Longshore sand transport. 28th ICCO, Cardiff, UK, p. 2439-2451.

YOUNG, I. R.; ZIEGER, S. BABANIN, A. V. 2011. Global trends in wind speed and wave height. *Science*, v. 332, p. 451-455.

Apêndice A

Percentual de ocorrência das ondas em cada uma das dezesseis direções em cada ano analisado no Estado de São Paulo (ponto 03).

Ano	N	NNE	NE	NEE	E	ESE	SE	SES	S	SSW	SW	SWW	W	WNW	NW	NWN	TOTAL
1997	0%	0%	0%	1%	5%	10%	8%	22%	16%	33%	4%	1%	0%	0%	0%	0%	5,66%
1998	0%	0%	0%	1%	7%	8%	14%	18%	29%	21%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	5,90%
1999	0%	0%	0%	3%	7%	9%	11%	8%	32%	26%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	7,17%
2000	0%	0%	0%	2%	2%	2%	4%	10%	30%	45%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	5,39%
2001	0%	0%	0%	0%	8%	12%	15%	15%	21%	23%	3%	3%	0%	0%	0%	0%	6,82%
2002	0%	0%	0%	1%	9%	1%	4%	14%	42%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7,07%
2003	0%	0%	0%	4%	1%	1%	1%	7%	33%	49%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	6,95%
2004	0%	0%	0%	1%	3%	9%	7%	12%	40%	26%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	8,59%
2005	0%	0%	0%	4%	4%	11%	4%	4%	42%	29%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	5,30%
2006	0%	0%	0%	3%	3%	3%	4%	10%	48%	27%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	7,85%
2007	0%	0%	0%	5%	8%	2%	1%	9%	29%	46%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	8,05%
2008	0%	0%	0%	1%	10%	20%	13%	10%	18%	28%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	8,35%
2009	0%	0%	0%	0%	1%	3%	3%	15%	38%	38%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	7,46%
2010	0%	0%	0%	3%	1%	13%	15%	10%	24%	30%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	9,44%
TOTAL	0,00%	0,00%	0,00%	2,18%	4,89%	7,59%	7,59%	11,58%	31,48%	31,86%	2,07%	0,75%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Percentual de ocorrência das ondas em cada uma das dezesseis direções em cada ano analisado no Estado de Santa Catarina (ponto 05).

Ano	N	NNE	NE	NEE	E	ESE	SE	SES	S	SSW	SW	SWW	W	WNW	NW	NWN	TOTAL
1997	0%	2%	3%	5%	3%	9%	20%	6%	10%	31%	8%	4%	0%	0%	0%	0%	5,77%
1998	0%	2%	9%	11%	5%	8%	5%	9%	22%	17%	10%	3%	0%	0%	0%	0%	6,23%
1999	0%	0%	7%	9%	1%	7%	5%	6%	25%	26%	11%	2%	0%	0%	0%	0%	5,64%
2000	0%	1%	0%	2%	6%	3%	11%	11%	22%	26%	17%	2%	0%	0%	0%	0%	5,88%
2001	0%	1%	0%	16%	8%	4%	10%	6%	19%	17%	17%	2%	0%	0%	0%	0%	6,35%
2002	0%	0%	10%	10%	0%	0%	0%	10%	33%	26%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	6,20%
2003	0%	1%	2%	2%	0%	0%	1%	8%	28%	39%	16%	2%	0%	0%	0%	0%	6,43%
2004	0%	0%	5%	6%	7%	13%	7%	7%	26%	22%	6%	2%	0%	0%	0%	0%	7,90%
2005	0%	0%	6%	4%	7%	6%	10%	3%	24%	23%	16%	1%	0%	0%	0%	0%	6,51%
2006	0%	0%	4%	4%	3%	4%	8%	8%	35%	23%	7%	2%	0%	0%	0%	0%	7,60%
2007	1%	0%	6%	3%	1%	0%	1%	7%	25%	40%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	8,03%
2008	0%	0%	3%	14%	8%	4%	2%	7%	16%	29%	12%	4%	0%	0%	0%	0%	7,72%
2009	0%	1%	3%	4%	5%	8%	5%	8%	32%	23%	9%	2%	0%	0%	0%	0%	8,56%
2010	0%	4%	4%	4%	14%	11%	8%	6%	19%	24%	6%	1%	0%	0%	0%	0%	11,19%
TOTAL	0,13%	1,03%	4,31%	6,47%	5,19%	5,77%	6,46%	7,39%	24,07%	26,09%	11,25%	1,83%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%