

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

DOUGLAS DUARTE NEMES

**CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS DE SUPERFÍCIE NA
PLATAFORMA INTERNA DO ESTADO DO PARANÁ**

Pontal do Paraná

2011



Curso de Pós-Graduação em Sistemas
Costeiros e Oceânicos da UFPR
Centro de Estudos do Mar - Setor Ciências da Terra - UFPR
Avn. Beira-mar, s/n.º - Boin. Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - Brasil
Tel. (41) 3511 8544 - Fax (41) 3511 8544 - www.cem.ufpr.br/pgsisc - pgsisc@ufpr.br

TERMO DE APROVAÇÃO

Douglas Duarte Nemes

Caracterização das ondas de superfície em duas profundidades da plataforma interna do estado do Paraná

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

Dr. Eduardo Marone
Orientador e Presidente

Dr. Mauricio Almeida Noernberg
Membro Examinador

Dr. Ricardo de Camargo
Membro Examinador

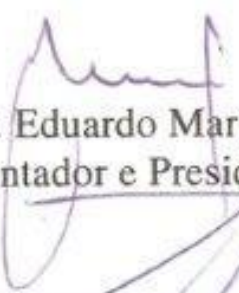
Pontal do Paraná, 31/03/2011.

“Caracterização das ondas de superfície em duas profundidades da plataforma interna do estado do Paraná”

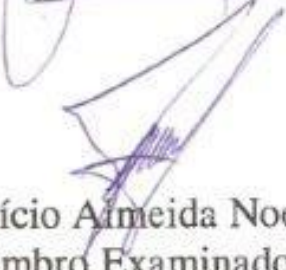
POR

Douglas Duarte Nemes

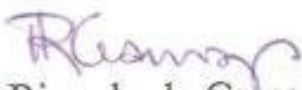
Dissertação nº 78 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Dr. Eduardo Marone
Orientador e Presidente



Dr. Maurício Almeida Noernberg
Membro Examinador



Dr. Ricardo de Camargo
Membro Examinador

Pontal do Paraná, 31/03/2011.

N433 Nemes, Douglas Duarte, 1982-
Caracterização das ondas de superfície em duas profundidades da
plataforma interna do estado do Paraná / Douglas Duarte Nemes. -
Pontal do Paraná, 2011.
131 f.: il. (algumas color.); 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Marone.

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

1. Oceanografia física. 2. Climatologia dinâmica. 3. Circulação
atmosférica. 4. Ondas oceânicas. I. Título. II. Eduardo Marone.
III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.47028162

DOUGLAS DUARTE NEMES

**CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS DE SUPERFÍCIE NA PLATAFORMA INTERNA
DO ESTADO DO PARANÁ**

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

Orientador: Dr. Eduardo Marone

Pontal do Paraná

2011

Dedico este estudo ao Grupo de Física Marinha do CEM e aos meus amigos do Grajaú, em especial aos que surfaram comigo o maior estado de mar que já foi registrado no Paraná (Balneário Grajaú): Celso Martins e Jean Sales.

AGRADECIMENTOS

A minha Família: Mãe Rita; Priscila; Gabriel; Jhessica - pelo apoio e incentivo em todas as fases da minha carreira de surfista e oceanógrafo.

Ao professor e Orientador Dr. Eduardo Marone, pela grande oportunidade de poder trabalhar e aprender com o Grupo de Física Marinha do Centro de Estudos do Mar, além das orientações nestes dois anos. Muito Obrigado professor.

Ao professor Dr. Maurício Noernberg, pela oportunidade de trabalhar com os dados gerados pelo projeto de sua coordenação e, por toda a estrutura oferecida no Grupo de Física Marinha.

Ao colegiado e coordenação do PGSISCO 2009 pela seleção de minha pessoa para ser bolsista (Reuni).

Agradeço aos alunos do Grupo de Física Marinha, como também, deixo minhas sinceras desculpas pela falta de companheirismo e presença nas atividades extra-acadêmicas.

Aos professores do Centro de Estudos do Mar em especial aos professores Dr. Paulo Lana e Dr. Carlos Roberto Soares.

Aos professores Dr. Ricardo de Camargo e Dr. Eduardo Siegle.

Aos colegas e equipe de mergulho: Felipe “Batata”, Glauco e Eduardo.

Ao grande amigo oceanógrafo doutorando Marcos Gandor Porto Lima que, desde a graduação (UNIVALI) até o presente, sempre me ofereceu oportunidade de aprendizagens com vossa pessoa.

Ao geógrafo e doutorando Clécio José Lopes de Quadros pela mega camaradagem e das muitas discussões sobre a dinâmica costeira paranaense.

Sobre tudo, aos meus protetores LÁ DE CIMA, que sempre abrem as portas dos grandes tubos e que me salvam quando as maiores da série quebram bem na minha frente, Uuuuffa.

“É preciso estudar o surfe, as ondas, os equipamentos. Como qualquer outra ciência, precisamos de especialistas do surfe (SLATER, 1999).”

Robert Kelly Slater, 10 vezes campeão mundial e considerado um dos melhores atletas que o planeta já teve (ASP, 2010), (ASP- *Association of Surfing Professionals*).

RESUMO

Através de fundeios oceanográficos (correntômetro/ondógrafo eletromagnético S4 ADW InterOcean) nas isóbatas dos 18 m e 30 m na plataforma interna rasa paranaense foram medidos quase dois anos de dados de ondas (Jul/2009 – Nov/2010). Simultaneamente, foram realizadas observações visuais das condições oceanográficas de uma praia oceânica da região e o monitoramento da meteorologia sobre o Atlântico Sul Ocidental. Um número suficiente de tempestades foi identificado na série de dados de ondas obtida para poder caracterizar o clima de ondas em escala sazonal e anual durante o período medido. A predominância direcional de incidência de ondas na plataforma interna rasa paranaense foi SSE com diminuição da altura significativa de ondas dos 30 m aos 18 m. O estado de vagas predomina sobre o estado de *swell* durante as temporadas registradas pelo presente estudo. Os sistemas meteorológicos mais importantes para a geração de eventos extremos e dos principais estados de *swell* ou eventos de alta energia de ondas foram os ciclones subtropicais. Os principais pontos de difração e refração de ondas, que determinam a direção e as classes de ondas que incidem no arco praiado estudado, pôde ser caracterizado através dos estados de mar simulados numericamente.

ABSTRACT

Through oceanographic moorings (Current gauges S4 electromagnetic ADW InterOcean) in the isobaths of 18 m and 30 m in the shallow inner shelf of Paraná were measured nearly two years of data wave (Jul/2009 - Nov/2010). Simultaneously, plus visual observations of the oceanographic conditions in an open ocean beach in the region and the monitoring the weather conditions over the South Atlantic in a time span of almost two years. A sufficient number of storms were identified in the data series of waves obtained in order to characterize the wave climate on seasonal and annual scale during the period measured. The predominance of directional wave incidence in the shallow inner shelf of Paraná was

SSE. The short period waves predominated over the swells with a significant loss of wave height at 18 m compared with the data at 30 m. The most important weather systems for the generation of wave events with high-energy, extreme events and swell were the subtropical cyclones. The main points of diffraction and refraction of waves could be characterized through the sea states numerically simulated on the bathymetry of the shoreface of Paraná.

Palavras chave: Clima de ondas, Pista de ventos, espectro de ondas.

Keywords: Climate of waves, Fetch, waves spectrum

LISTA DE ABREVIATURAS

N – norte

NNE – norte/nordeste

NE – nordeste

NEE – nordeste/leste

E – leste

ESE – leste/sudeste

SE – sudeste

SSE – sul/sudeste

S – sul

SSW – sul/sudoeste

SW – sudoeste

SWW – sul/sudoeste

W – oeste

WNW – oeste/noroeste

NW – noroeste

NNW – norte/noroeste

H_s – altura significativa de onda

H_b – altura de onda

H_q – altura de quebra de onda

$H_{m\acute{a}x}$ – altura máxima de onda

T_s – período significativo de onda

T_p – período de pico de onda

T_v – período de onda obtido com cronometro

Dir – direção de onda

S_p – espectro de onda (densidade espectral)

\emptyset – ngulo de propagação de onda

peel – caminho percorrido pela quebra da onda

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	Justificativa.....	12
1.2.	Objetivo	12
1.2.1.	<i>Objetivos específicos.....</i>	12
2.	ÁREA DE ESTUDO	14
3.	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1.1.	<i>Formação de ondas de gravidade</i>	20
3.1.2.	<i>Ciclogênese das ondulações.....</i>	21
3.1.2.1.	<i>Clima de ondas da Região Sul do Brasil.....</i>	23
3.1.3.	<i>Processos físicos gerado pela propagação de ondas</i>	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1.	Fundeios	30
4.2.	Processamento dos dados de ondas.....	33
4.3.	Identificação dos estados de mar	34
4.3.1.	<i>Identificação da origem dos estados de mar.....</i>	35
4.4.	Monitoramento visual da praia do Balneário Grajaú.....	36
4.5.	Modelagem numérica de ondas.....	38
4.5.1.	<i>Batimetria da área de estudo.....</i>	39
5.	RESULTADOS	42
5.1.	Características de ondas na plataforma interna rasa do Paraná (30 e 18m) ...	43
5.1.1.	<i>Características dos estados de mar.....</i>	47
5.2.	<i>Características sazonais de ondas na plataforma interna do Paraná.....</i>	51
5.2.1.	<i>Características sazonais dos estados de mar.....</i>	58
5.3.	Monitoramento visual da oceanografia costeira	72
5.4.	<i>Características dos eventos extremos.....</i>	76
5.4.1.	<i>Evento extremo de 2009.....</i>	78
5.4.3.	<i>Evento extremo de 2010.....</i>	78
5.5.	Simulação numérica de ondas - WWM.....	82
5.5.3.	<i>Grade numérica e definição do domínio.....</i>	82
5.5.4.	<i>Características da propagação de vagas na plataforma interna do Paraná.</i>	86
5.5.5.	<i>Características de propagação de swell na plataforma interna do Paraná..</i>	93
5.5.6.	<i>Características da propagação de ondas em um evento extremo (swell extremo).....</i>	100

6.	DISCUSSÃO.....	107
7.	CONCLUSÕES.....	122
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

1. INTRODUÇÃO

A física marinha tenta obter de forma clara e sistemática uma descrição dos oceanos e seus movimentos, suficientemente quantitativa para permitir uma previsão do seu comportamento no futuro com alguma confiança. Isto inclui desde as propriedades físicas às variações do nível do mar.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) mais da metade da população mundial vive em regiões costeiras. Diversos usos geram intensos e crescentes conflitos e problemas de degradação com conseqüências erosivas. A necessidade de dados climáticos de ondas, principalmente para as praias ditas oceânicas ou abertas, são extremamente importantes e usados para diversos fins (KLEIN *et al.*, 2003). Por exemplo, as informações obtidas com os dados de ondas na plataforma interna de uma região são extremamente úteis para compreender as variações da linha de costa (SHORT, 1999) como também para adotar modelos eficientes de proteção costeira (LIMA *et al.*, 2009).

Os trabalhos para buscar caracterizar o clima de ondas no Estado do Paraná iniciaram-se com Bandeira (1974), obtendo registros pontuais com um ondógrafo autônomo a ultra som, fundeado a 10 m de profundidade na plataforma continental interna rasa, no meio do arco praiado Pontal do Sul – Ponta de Matinhos. Duas outras campanhas de amostragens preferenciais de ondas foram realizadas pela Portobrás (1983) a 16,5 m e INHP (1985), próximo ao arquipélago de Currais. Marone *et al.* (1997) coletaram dados de ondas entre a ilha da Galheta e o Balneário Atami para a caracterização física do Complexo Estuarino de Paranaguá. Soares *et al.* (1997) caracterizaram a morfodinâmica a partir de parâmetros de ondas no Balneário Atami e, na mesma região, Martins (2002) realizou coletas de dados de ondas nas proximidades da zona de arrebenção. Mais recentemente, Porto Lima (2009) utilizou um correntômetro/ondógrafo S4 ADW para medir parâmetros de ondas a 10 m de profundidade, com o objetivo de alimentar um modelo numérico de ondas e desenvolver um método com recife artificial multifuncional para conter a erosão costeira no Município de Matinhos (PR). A principal direção de incidência de ondas é

SE com altura máxima de ondas de 5,44 m (Lima *et al.*, 2009). Contudo, como é muito difícil de instalar e manter sensores de medidas de ondas por longos períodos, a disponibilidade destes dados em escala climatológica é pequena.

A plataforma continental paranaense possui aproximadamente 160 km de largura, da costa ao talude, e é limitada pela profundidade de 200 m (REMAC, 1979). O principal controlador da dinâmica deposicional atual na plataforma interna paranaense é o regime de ondas (VEIGA, 2004). Na costa sul do Brasil o regime de ondas é dado pelo padrão de ventos no Atlântico Sul (ARAÚJO *et al.*, 2003). As perturbações meteorológicas em escala sinótica mais importantes sobre a plataforma continental sudeste são os sistemas frontais (OLIVEIRA, 1986). Há uma variação na frequência de ocorrências de sistemas frontais ao longo do ano, resultando em escalas de tempo entre 5 e 10 dias (OLIVEIRA, 1986) entre sistemas sucessivos.

Para que campos de ondas sejam gerados é necessário que a atuação do vento se mantenha por certo tempo, de modo a transferir energia suficiente para que este efeito seja importante ou até predominante. Esta transferência de energia cinética se dá pela tensão de cisalhamento (via o atrito) causando efeitos em várias escalas de espaço e tempo, como as ondas capilares, as ondas de gravidade superficial e as variações do nível médio do mar. Trata-se, portanto de um fenômeno não-linear, pois a energia é transferida para diferentes bandas do espectro das alturas do mar (MARONE, 1991).

O objetivo do presente trabalho é caracterizar o clima de ondas na região central da plataforma interna rasa do Estado do Paraná com parâmetros de ondas obtidos em duas profundidades diferentes e simultaneamente observações visuais na praia oceânica do Balneário Grajaú, Município de Pontal do Paraná.

1.1. Justificativa

A principal justificativa é somar os novos dados de ondas na compreensão dos processos dinâmicos da plataforma interna rasa e das praias oceânicas dos municípios paranaenses, bem como, apresentar a gênese e dinâmica característica dos eventos extremos incidentes no Estado.

Assim, investimentos de importantes setores da economia que são aplicados nas regiões costeiras e oceânicas, poderão ter mais sucesso com o conhecimento dos processos físicos que atuam nestas áreas, tendo assim inúmeros benefícios sociais, recreativos e estéticos.

Apresenta-se isto, tendo em vista as obra de engenharia costeira: no Município de Matinhos (PR), visando à recuperação das praias erodidas e; no Município de Pontal do Paraná, visando à reativação do terminal portuário.

1.2. Objetivo

Caracterizar o clima de ondas na região central da plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

1.2.1. Objetivos específicos

- Analisar e comparar o regime de onda obtido nas duas profundidades da plataforma interna rasa do Estado do Paraná;

- Identificar e comparar os estados de mar ocorrentes nas duas profundidades da plataforma interna rasa do Estado do Paraná e as condições oceanográficas experimentadas na praia do Balneário Grajaú;

- Identificar as possíveis origens e gênese do regime de ondas medido na plataforma interna rasa do Estado do Paraná;

- Simular os cenários de *swell*, vaga e evento extremo sobre a batimetria central da plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

2. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido na borda oeste do Oceano Atlântico, na plataforma interna rasa do Estado do Paraná, sul do Brasil. A linha de costa paranaense se estende por cerca de 100 km e sua continuidade é interrompida por duas importantes baías: as Baías que formam o Complexo estuarino de Paranaguá (25° 34' S e 48 ° 20' W) e; a Baía de Guaratuba (25° 41' S e 48° 19' W) (ANGULO, 1984). Portanto, a região oceânica central da costa paranaense (Figura 1) está inserida dentro do arco praial Pontal do Sul (25° 34`S e 48° 20`W) – Ponta de Caiobá (25° 50`S e 48° 31`W), possui comprimento em torno de 35 km com orientação aproximada NE-SW (ANGULO, 1984).

As praias oceânicas do Paraná são constituídas por areias finas a médias, bem selecionadas, principalmente de quartzo e com teores variáveis de fragmentos carbonáticos biodetríticos e minerais pesados (ANGULO e ARAÚJO, 1996). Baseando-se na morfologia e dinâmica costeira, Angulo e Araújo (1996) classificaram as praias da região em três tipos: estuarinas; com influência de desembocaduras e; oceânicas ou de mar aberto. A maioria das praias oceânicas é do tipo intermediária, podendo ocorrer os extremos dissipativo e refletivo de acordo com o regime de onda. Angulo (1984) descreve que as praias que formam o arco praial Ponta de Pontal do Sul (25° 34`S e 48° 20`W) – Ponta de Matinhos (25° 49`S e 48° 31`W) são do tipo intermediárias a dissipativas, com face praial larga, declividade entre 2° e 3° e geralmente com bermas e barras.

As praias ao sul do Balneário Atami, cuja extensão é de 29 km, podem ser consideradas sem influência direta da desembocadura sul do complexo estuarino de Paranaguá (ANGULO e ARAÚJO, 1996). Apresentam processos de sedimentação sazonais, sendo caracterizada por regime de micromaré com amplitude de 1,5 m (MARONE *et.al.*, 1995). As correntes de deriva litorânea atuantes no litoral paranaense, segundo Angulo (1992, 1993a), Angulo *et.al.*(1996), Soares *et.al.* (1994,1997) e Marone *et al.* (1995), possuem sentido predominante SW – NE.

O Balneário Grajaú, praia oceânica do Município de Pontal do Paraná, se localiza ao Sul do Balneário Atami citado, portanto, no centro norte do arco praiial Ponta de Pontal do Sul – Ponta de Caiobá (Figura 1) ($25^{\circ} 38' S$ e $48^{\circ} 26' W$). Possui tamanho médio de grão de sedimento no banco distal de 0,125 mm, cujos bancos submersos assumem formas dissipativas sob condições de ondas com alturas de quebra maiores que 1,5 m (NEMES, 2006). Segundo a classificação proposta por Short e Aagaard (1993), Nemes (2006) observou que o estágio morfodinâmico comumente observado na praia do Balneário Grajaú foi o de bancos e praia rítmicos (BPR).

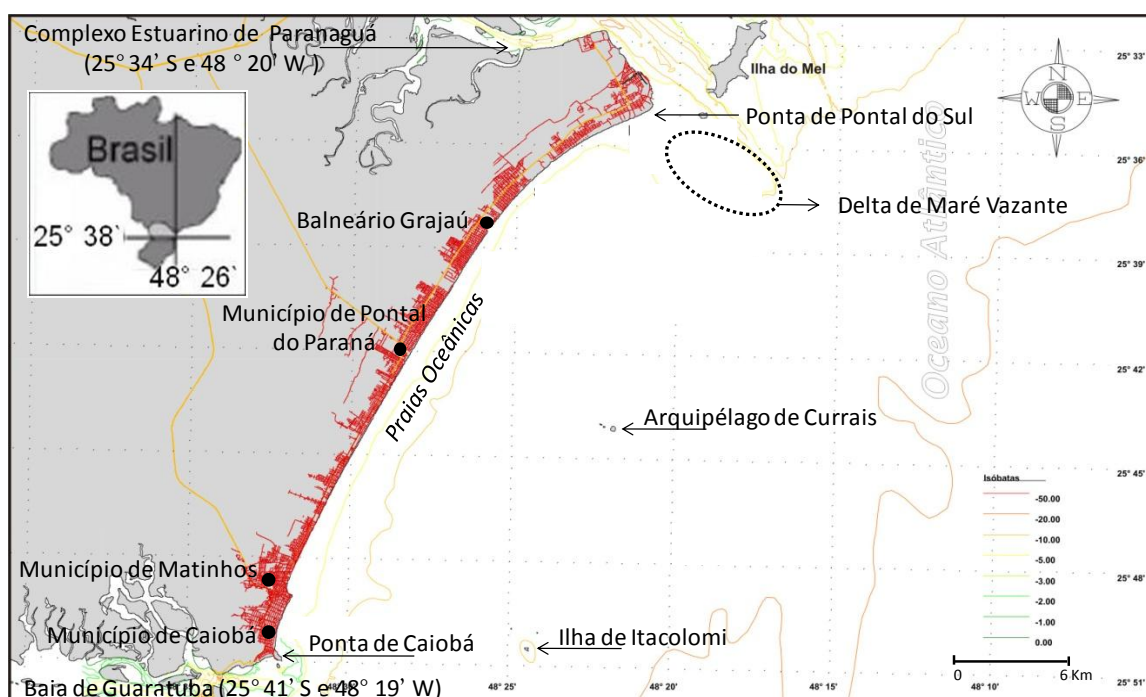


Figura 1 - Imagem da linha de costa e plataforma interna rasa central do Estado do Paraná.

Na plataforma interna rasa paranaense duas ilhas estão presentes: a Ilha de Itacolomi e; o Arquipélago de Currais (Figura 1). Ao norte existe uma feição morfológica correspondente ao delta de maré vazante associado à desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (VEIGA, 2004).

3. REVISÃO DA LITERATURA

Holthuijsen (2007) apresenta uma revisão completa sobre ondas oceânicas e costeiras, onde discute os principais trabalhos já realizados sobre o tema. Dessa forma, este se torna um importante embasamento teórico para o presente estudo.

As características estatísticas de ondas geradas por ventos são baseadas na hipótese da elevação da superfície do mar - como um processo estacionário Gaussiano. A descrição convencional de dados de ondas necessita de observações em condições estacionárias. O movimento da elevação da superfície é considerado a soma de um grande número de ondas harmônicas, cada um com uma amplitude constante e uma fase escolhida aleatoriamente em um tempo de registro

Um registro de ondas superficiais deve ser dividido em segmentos, considerando cada um deles, sendo que a duração de 15 a 30 min é comumente usada para registros de ondas obtidas no mar, cujos segmentos podem ser sobrepostos. Este tipo de registro mais utilizado fornece uma seqüência desses segmentos num longo prazo (um ano ou mais) com intervalos de tempo entre eles normalmente de 3 h.

Os sensores de medidas de ondas registram a variação da elevação da superfície do mar e com isso, as freqüências das componentes de ondas (que criam tais flutuações na superfície do oceano) são obtidas. O que leva a um espectro de ondas. A variação na densidade do espectro fornece uma descrição completa da elevação da superfície do mar. Isto implica que todas as características estatísticas do campo de onda possam ser expressas em termos desse espectro. O tratamento baseado no modelo de amplitude de fase aleatório é a forma mais importante em que as ondas do oceano são descritas.

Ao multiplicar o espectro de ondas pela densidade e gravidade se obtêm o espectro de densidade de energia. Isto mostra como a energia da onda é distribuída sobre as freqüências das componentes de ondas registradas.

A maior contribuição neste contexto foi o trabalho Joint North Sea Wave Project, descrito por Hasselmann *et al.* (JONSWAP, 1973, *apud* HOLTHUIJSEN, 2007). Os autores apresentaram, sobre as condições ideais de geração de ondas, a evolução do espectro de altas para baixas frequências (Figura 2). Uma característica marcante foi que o espectro mantém a sua forma ao longo da pista de ventos revelando a evolução da forma ao longo do espectro.

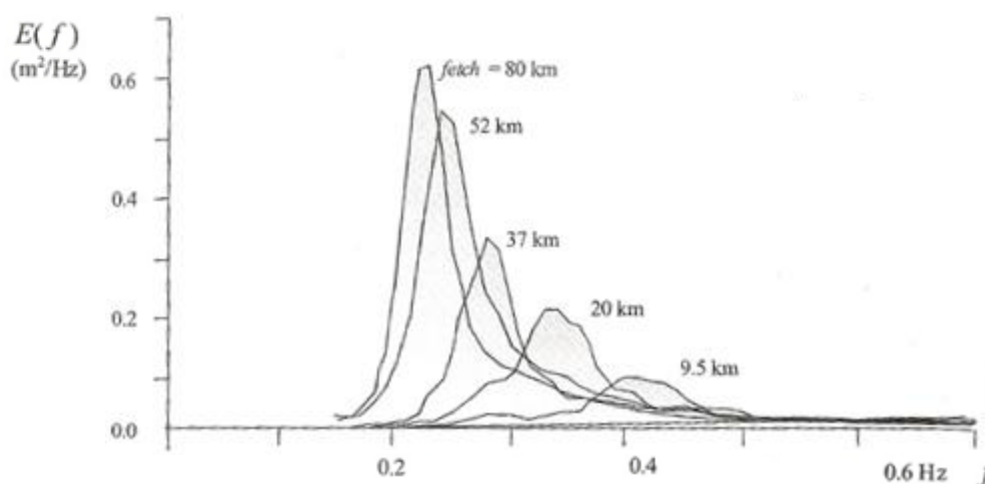


Figura 2 - Espectro observado durante o Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) em condições idealizadas. Modificado de Holthuijsen (2007).

A teoria linear de ondas superficiais de gravidade, desenvolvida por Airy (1845) e ainda válida em certas condições, mostra que em águas profundas a velocidade de propagação da energia de ondas depende da frequência da componente de onda considerada. A energia de ondas de baixa frequência viaja mais rápido do que a energia de ondas de alta frequência.

Holthuijsen (2007) explica que o campo de ondas, inicialmente aleatório, gerado por uma tempestade, fragmenta-se quando se move para fora dela (Figura 3). Cada componente de onda que é gerado deixa-a mais ou menos como um campo retangular de energia de ondas, resultantes da direção do vento na tempestade. A largura do campo de ondas é aproximadamente igual à tempestade e o comprimento é determinado pelo tamanho e duração dos ventos da tempestade.

Cada campo de onda se desloca na velocidade e direção de grupo do componente de onda correspondente. Isto é chamado de dispersão de direção.

Nestes campos de ondas, os grupos de ondas de baixa frequência conduzirão a propagação à frente e as frequências altas na retaguarda (Figura 3). À medida que este campo de onda se propaga pelo oceano, distanciando-se da tempestade, ele se fragmenta em um grande número de indivíduos regulares. As ondas irão mudar de comprimento de onda curta para longas. Este processo é chamado de dispersão de frequência.

Desse modo, um sensor de medida de ondas em um ponto P (Figura 3) escolhido arbitrariamente no oceano, a energia de onda está presente apenas das direções θ_1 e θ_2 , num ângulo de visão a partir do ponto P à tempestade. Este setor limitado pelas direções θ_1 e θ_2 faz com que as ondas tenham comprimento mais longo no ponto P do que na tempestade.

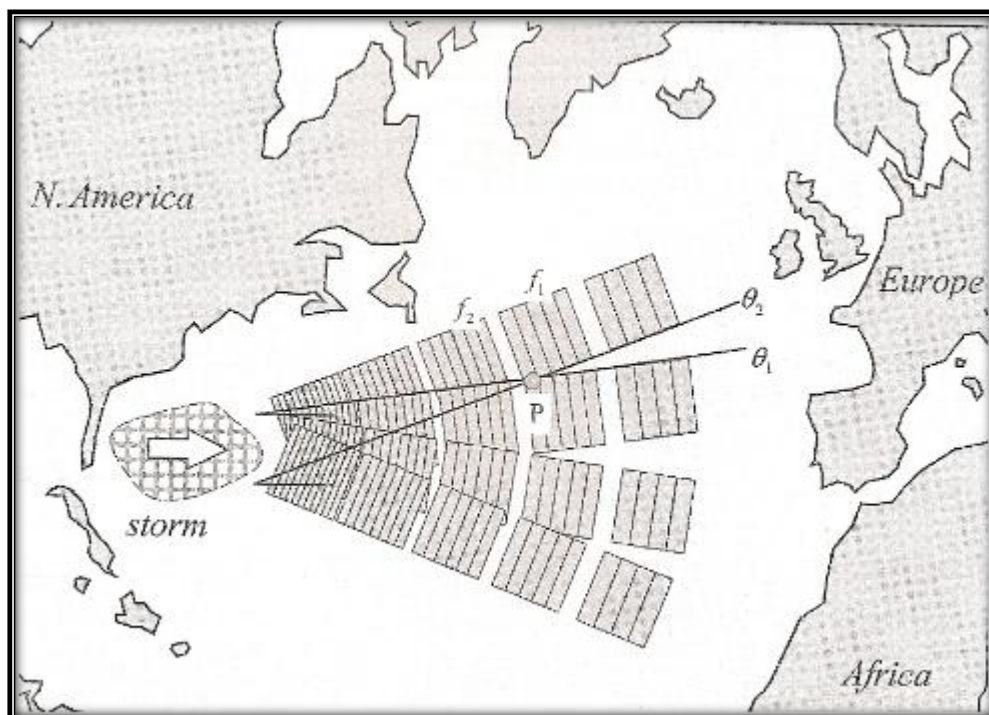


Figura 3 – A dispersão da frequência e da direção das ondas oceânicas transforma as ondas irregulares de alta frequência, originadas na tempestade, em ondas regulares formadas fora da tempestade, em ondulações de baixa frequência. Modificado de Holthuijsen (2007).

O espectro de ondas no ponto P contém energia apenas de uma estreita faixa de frequência e num setor de direção restrito. A energia deste espectro estreito é, portanto, apenas uma fração da energia inicial do espectro mais amplo da tempestade.

Portanto, a distância da tempestade em relação a uma área geográfica ou a um sensor de medida de ondas determinará a frequência e a regularidade de ondas que será medida ou observada. O termo em inglês *swell* é amplamente conhecido e utilizado na literatura como sendo ondas de frequência muito menor do que vagas (*Wind Sea*). Os *swells* são bastante regulares, com comprimento de onda longo e, portanto, seu espectro é estreito. Em contraste com isso, vagas formadas por ventos iniciais são irregulares e de curto comprimento de onda, e seu espectro é muito mais amplo do que de um *swell*. Estados de *swell* e vagas são bem distintos em frequência. Assim, compreende-se que estados de mar do tipo *swell* são gerados por ventos fortes (tempestades) registrados distantes de sua origem e vagas são geradas por ventos próximos à sua origem (tempestade).

Para muitas praias oceânicas o clima de ondas deve ser separado em: (a) um clima gerado por pistas de ventos oceânicos e (b) um clima gerado por pistas de ventos locais ou próximos à costa. Tal distinção (que também é muitas vezes ignorada) pode não ser suficiente: cada um destes climas pode ter de ser novamente dividido em dois ou mais climas. Isto porque *swell* pode ser proveniente de diferentes partes do oceano, cada qual com sua própria geração a partir de padrões climáticos.

Os parâmetros de ondas usualmente utilizados para caracterizar estatisticamente o espectro de ondas são: altura significativa, período pico e direção da onda. Onde, a altura significativa registrada é muito bem correlacionada com a altura visual de um observador experiente. Porém, com o período a relação não é válida (BATTJES, 1985).

A partir de uma série de dados de ondas, Holthuijsen (2007) explica que uma seqüência ininterrupta de valores de altura significativa superior a um valor, certamente bastante elevado, precedido e seguido por um valor inferior é definido como uma tempestade. Às vezes, pequenas lacunas entre tais tempestades são

ignorados, para evitar a quebra de um fenômeno que, obviamente, é uma tempestade, visto de um ponto de vista meteorológico.

3.1.1. Formação de ondas de gravidade

O vento não é linear, criando vórtices e fazendo fluxos de baixa e alta pressão que proporcionam distúrbios ondulatórios na superfície do oceano durante uma tempestade (Figura 4). Quanto mais forte o vento e quanto mais tempo ele atrita em grandes extensões do oceano, maiores são as ondas formadas (PHILLIPS, 1957).

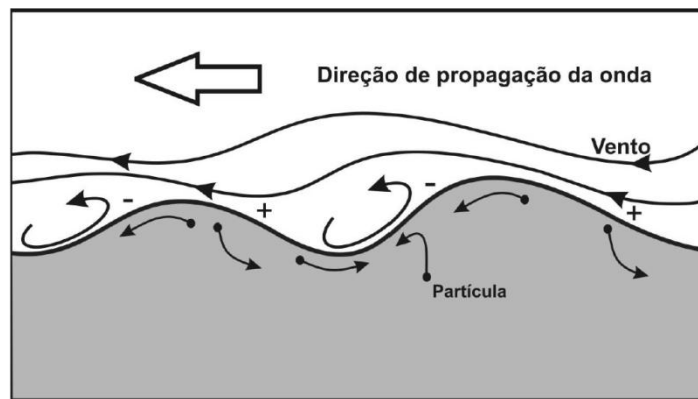


Figura 4 – Ilustração dos distúrbios ondulatórios provocados pela pressão induzidas dos ventos sobre a superfície do oceano.

Sabe-se que a transferência de energia para o campo de onda é ativada pelo atrito superficial aplicado pelo vento e é proporcional ao quadrado da velocidade do vento. Uma pequena falha na estimativa do vento para o campo de onda acarreta um grande erro nas estimativas de parâmetros de ondas. A distribuição da energia cinética para as diversas direções de vento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m U^2 * n$$

Equação 1

onde m é a massa (tomada como unitária), U a intensidade do vento (m/s) e n é o número de ocorrências para cada direção (KOMAR, 1998).

Komar (1998) explica que o fluxo de energia em ondas uniformes é proporcional ao período das ondas e ao quadrado de suas alturas. Por isso, ocorre maior transferência de energia do vento para ondas com a duplicação da altura de longos períodos, do que para ondas com o dobro da altura de curtos períodos (KOMAR, 1998). Formulações matemáticas bem aceitas para a determinação do fluxo de energia do vento para campos de ondas baseiam-se nos trabalhos de Phillips (1957) e Miles (1957). Nestes, os autores apresentam um mecanismo no qual o crescimento das ondas é proporcional ao próprio espectro de ondas, implicando em um desenvolvimento exponencial da ordem da razão entre as densidades do ar e da água.

Miles (1957) considera que esse efeito de modificar o fluxo de ar e, conseqüentemente, a pressão do vento induzida na superfície da água, reforça o seu próprio crescimento. Portanto, ondas são geradas pela pressão induzida pelo vento na superfície, e não por atrito do vento na superfície que apenas ativa o processo (MILES, 1957). Janssen (1991a, 1991b) estendendo a teoria de Miles, e em analogia com o modelo de amplitude de fase aleatório de ondas, observa que este campo de pressão pode ser visto como a sobreposição de muitas ondas harmônicas de pressão de ar, todas orientadas em várias direções diferentes, mas todas propagando na direção do vento.

3.1.2. Ciclogênese das ondulações

A zona de frontogênese de ondas situa-se mais ou menos entre os paralelos de 30° e 60° em ambos os hemisférios (AYOADE, 2004). Nessas zonas há fortes

gradientes térmicos na direção dos pólos durante todo o ano, mas esses gradientes são, aproximadamente, duas vezes mais fortes no inverno do que no verão. Por isso, a frontogênese de ondas é mais freqüente e intensa no inverno que no verão (AYOADE, 2004).

Em mapas sinóticos, as depressões aparecem como células de baixa pressão com isóbaras elípticas. Elas se movem de oeste para leste à razão de aproximadamente 50 km/h no inverno, e 30 km/h no verão. As frentes variam de 80 a 240 km de largura. Já os anticiclones, naquelas regiões, são células de alta pressão, o oposto dinâmico de uma depressão. São maiores que as depressões e caracterizam-se por uma região central de ventos leves e de subsidência. A variabilidade do tempo, e conseqüentemente da agitação marítima, nas áreas subtropicais deve-se basicamente ao efeito de seqüências de depressões frontais (baixa pressão) e de anticiclones (alta pressão) (AYOADE, 2004).

Vórtices ciclônicos extratropicais frios são ocasionalmente observados no Oceano Atlântico Sul, ao sul da latitude de 20°S (DINIZ e KOUSKY, 2004). Na maioria dos casos, Diniz e Kousky (2004) observaram que estes sistemas meteorológicos sempre estão associados com velocidade dos ventos acima de 60 km/h, quando atingem a costa da Região Sul do Brasil.

Os ciclones que se formam na costa sul/sudeste do Brasil deslocam-se para leste ou sudeste com velocidade média de 9 m/s percorrem distâncias de aproximadamente 2700 km e possuem tempo de vida médio de 3 dias (REBOITA, 2008).

A climatologia de frentes frias definida por Rodrigues *et al.*, (2004), com base em 10 anos de dados de reanálise do NCEP-NCAR de 1990 a 1999, mostra que a trajetória típica do deslocamento das frentes frias foi de sudoeste para nordeste, durante 3 dias em média, ao longo do litoral sul e sudeste do Brasil.

3.1.2.1. Clima de ondas da Região Sul do Brasil

A região sul do Brasil é influenciada pela interação entre massas de ar formadas por três anticiclones semipermanentes: do Atlântico Sul, do Pacífico e o Polar; e pelo centro de baixa pressão semipermanente do Chaco (NOBRE *et al.* 1986). A interação é determinada pela movimentação dos seguintes sistemas: centros de baixa pressão originados em altas latitudes e; anticiclones que se destacam da massa polar e migram através do continente ou do litoral.

Segundo IAPAR (1978) dependendo da trajetória destes centros de pressão, da ciclogênese associada e dos sistemas frontais induzidos pelos mesmos, a agitação marítima pode refletir-se na costa sul brasileira ou não, sendo que a intensidade de tal agitação está diretamente relacionada com a referida trajetória e a proporção de tal fenômeno.

Coli *et al.* (1996) observou que as maiores ondas que atingem a costa sul-sudeste brasileira são do tipo vagas e, no inverno, as alturas de ondas são maiores que no verão. No entanto, a maior amplitude de variação das ondas é no verão. O autor caracterizou os valores médios de alturas de ondas significativas para o verão de 1,4 m a 2,8 m e, no inverno, de 1,8 m a 3,8 m.

Alves (1996) mediu parâmetros de ondas na costa de São Francisco do Sul (SC) e observou que 25% das direções de ondas foram SE, padrão que foi associado a dois tipos de tempestades: umas no meio do oceano, localizadas entre os paralelos 20° S e 40° S e outras que migram dos oceanos austrais ao longo da costa da Argentina, desviando para leste, aproximadamente aos 40° S.

Araújo *et al.* (2003) fez uma descrição estatística das condições de onda do Sul do litoral brasileiro. A identificação dos distintos estados de mar e a variabilidade sazonal foram avaliadas usando uma série temporal de aproximadamente um ano (dez/2001 – jan/2003) com uma bóia de coleta de dados de ondas direcional DataWell, instalada a 35 km da Ilha de Santa Catarina, a cerca de 80 m de profundidade. Araújo *et al.* (2003) apresentam os resultados em histogramas sazonais, onde nas temporadas de primavera e verão possuem altura de vaga muito

semelhantes, com um valor de moda bem definido de 1,25 m. No outono, a forma de histograma é acentuada com um valor de moda de 1,5 m e no inverno a distribuição é plana, com valores mais elevados de ocorrência que variam de 1,25 m a 2,5 m. Eventos de ondas grandes ($H_b > 4.0$ m) estão presentes em todas as estações (ARAÚJO *et al.*, 2003). Na Primavera, a direção de Leste teve maior frequência. No verão, há um equilíbrio entre direção de Leste e de Sul. No outono, a direção Sul foi mais frequente, embora sejam espalhados por mares das direções Leste e Sul. No inverno, swells de Sul prevalecem sobre os de Leste. Os autores associam a passagem de frentes frias acompanhadas por migração dos centros de pressão atmosféricos que produzem ventos e ondas do quadrante Sul e Leste (ARAÚJO *et al.*, 2003).

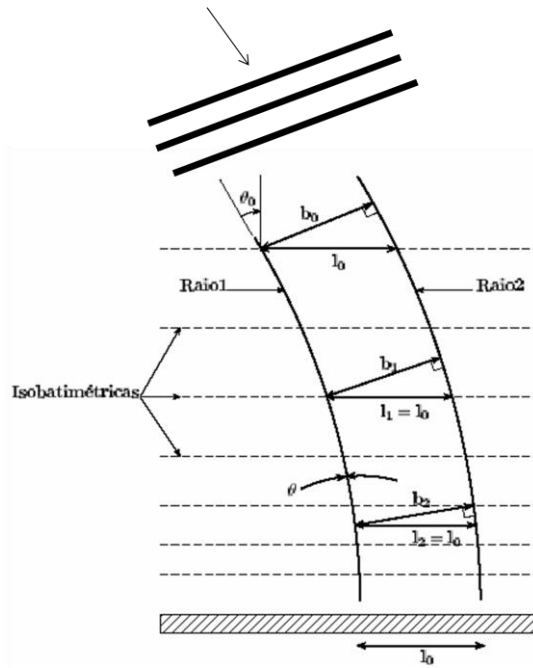
Branco (2005) analisou qualitativamente a importância da ocorrência de *swell* para o clima de ondas nas diferentes áreas geográficas do globo terrestre através de simulações numéricas. O autor pôde observar que ondas provenientes da área de geração extratropical do Atlântico Sul (ETSA) contribuíram com 90% das ocorrências para o clima de ondas de todo Atlântico Sul. Porém, pelo fato da costa brasileira estar na borda oeste do Atlântico Sul faz com que o litoral seja abrigado da energia proveniente da maioria de sistemas de *swell* com períodos mais longos que 10 s. Branco (2005) sugere que há um equilíbrio entre a ocorrência de sistemas de *wind sea* (vagas) e *swell* alcançando o litoral sul e sudeste brasileiro, possivelmente indicando uma predominância de eventos mais intensos dominados por mares locais. No litoral sul brasileiro o autor pôde observar campos de ondas com médias de período de pico abaixo de 8 s, no litoral sudeste e parte do nordeste a média do período de pico variou de 9 s a 10 s. Os valores mais elevados de período de pico foram nas temporadas de outono e inverno. A área extratropical do Atlântico Sul contribui com ondas variando entre 0,75 m a 4 m e período entre 4 s e 11 s, normalmente ocorrendo a sobreposição dos efeitos de sistemas locais e de *swell*, que obstrui a análise da influência de *swell* isoladamente (BRANCO, 2005). Os sistemas de ondas com maiores valores de altura significativa e período de pico apresentam direção do quadrante SSW e foram predominantes sobre os demais durante os anos de experimento (BRANCO, 2005).

3.1.3. Processos físicos gerado pela propagação de ondas

Em águas profundas, um grupo de ondas apresenta um perfil estrutural vertical na forma senoidal, com cristas e cavas longas e curtas. À medida que estas começam a se propagar em águas progressivamente mais rasas, as ondas passam a sofrer transformações no padrão orbital de propagação (KOMAR, 1998). O momento em que as ondas começam a interagir com o fundo ocorre quando a profundidade atinge, aproximadamente, a metade do comprimento da onda em águas profundas e se torna significativa para profundidades correspondentes a um quarto do comprimento da onda em águas profundas (KOMAR, *op.cit.*) ou seja, em águas rasas, a profundidade (h) sobre o comprimento de onda (L) é menor que 1/2 e maior que 1/20, $\frac{1}{2} > \frac{h}{L} > \frac{1}{20}$ (CARTER, 1989).

A velocidade e o comprimento das ondas vão progressivamente diminuindo, e a altura aumenta conforme o grupo de ondas se propaga para águas rasas (apenas o período vai permanecer constante). As variações nas alturas das ondas podem ser obtidas segundo o fluxo de energia, desprezando as perdas energéticas da fricção com o fundo e da reflexão, exceto em casos de ondas em regiões muito próximas à costa, quando então se obtém um fluxo de energia constante (KOMAR, 1998).

A razão entre o seno do ângulo de incidência (1) e o seno do ângulo de refração (2) é constante (Lei de Snell), igual ao índice de refração relativo n_{21} , para um dado comprimento de onda (Figura 5).



$$\frac{\text{Sen } \alpha_1}{C_1} = \frac{\text{Sen } \alpha_2}{C_2} = \text{constante}$$

Figura 5 - Esquema detalhado da Lei de Snell para a refração de ondas.

Segundo Komar (1998), a refração das ondas pode também causar espalhamento ou convergência da energia da onda. Este efeito é mais bem observado examinando os raios das ondas que se encontram sempre perpendiculares às cristas das ondas. Estas alterações na velocidade de grupo geralmente aumentam a amplitude das ondas que se propagam em águas rasas. A propagação da energia de ondas desacelera, resultando num acúmulo de energia potencial (i.e., aumento da altura) (HOLTHUIJSEN, 2007).

Topografias irregulares do fundo podem causar refrações complexas nas ondas, produzindo alterações em sua altura e energia ao longo da costa (KOMAR, 1998). A ocorrência de canais, provocados pelas correntes, promove uma redução na altura da onda devida ao aumento da profundidade (h) (Figura 6), neste caso irá ocorrer uma divergência nos raios das ondas no centro do canal e uma convergência dos raios nos bancos submersos marginais, onde as profundidades são menores (KOMAR, 1998). Dependendo do período das ondas, uma ondulação pode se

direcionar a diferentes pontos de quebra na costa (WALKER, 1974, MEAD e BLACK, 2001).



Figura 6 – Ilustração esquemática da convergência do trem de ondas sobre os bancos e canais submersos de uma região.

A difração de ondas ocorre geralmente quando as ondas atingem um obstáculo natural ou artificial. O processo de difração é o da transferência da energia ao longo da crista da onda, e vai ocorrer em duas situações predominantes: (a) quando duas ondas se cruzarem; (b) regiões de sombra da ação das ondas (CARTER, 1989). A energia da onda será espalhada lateralmente em forma perpendicular à direção predominante de propagação da onda.

Devido à propriedade dispersiva das ondas, componentes com frequências similares tendem a formar grupos. A velocidade pela qual os grupos de ondas se propagam no oceano é conhecida como velocidade de grupo C_g . As ondas são dispersivas em águas profundas e não dispersivas em águas rasas. De maneira resumida, a velocidade de ondas (C) em águas profundas (Equação 2) só depende do comprimento de onda (L) e o comprimento de onda para o mesmo ambiente é proporcional ao quadrado do período (T) (Equação 3) :

$$C = \sqrt{\frac{g L}{2\pi}}$$

Equação 2

$$L_{oo} = \frac{g T^2}{2\pi}$$

Equação 3

onde g é a gravidade, L_{oo} comprimento de onda para águas profundas.

Já para a velocidade e comprimento de ondas em águas rasas (Equação 4 e 5, respectivamente) a profundidade (h) é determinante:

$$C_s = \sqrt{g h}$$

Equação 4

$$L_s = T \sqrt{g h}$$

Equação 5

onde C_s é a velocidade de ondas em águas rasas, L_s é o comprimento de ondas para águas rasas e g é a gravidade.

Quando as ondas propagam-se de águas profundas para águas rasas estas interagem com o fundo e sofrem refração, isto é, mudança no sentido de propagação das ondas em águas rasas, acomodando-se à topografia de fundo (SUGUIO, 1992). Este fenômeno também é responsável pelo alinhamento da zona de arrebentação, de tal modo que ela tende a ser paralela à praia, independentemente do sentido de aproximação das ondas nas águas mais profundas (SUGUIO, 1992).

Dependendo da declividade da praia, da altura e do comprimento de onda podemos ter basicamente quatro modos de quebra de ondas, sendo dois comumente observados em praias dissipativas (GALVIN, 1968);

- Progressiva ou deslizante (*spilling breaker*): ocorre em praias de baixa declividade, nas quais a onda gradualmente empina-se para então deslizar pelo perfil, dissipando sua energia através de uma larga faixa;
- Mergulhante (*plunging breaker*): Ocorrem em praias de declividade intermediária a alta. A onda ao aproximar-se da praia tem uma desaceleração forçada pelo fundo mais raso e empina-se abruptamente projetando sua crista até a base, formando um tubo.

Short e Aagaard (1993) explicam que para eventos de alta energia de ondas ($H_b = 2m$) o empilhamento de água sobre à costa geraria um fluxo hidrodinâmico horizontal junto ao fundo em direção ao mar, por sua vez, a assimetria das ondas incidentes, antes de quebrarem, gera fluxos em direção à praia. Com o fenômeno da arrebentação, os dois fluxos convergiram, concentrando sedimentos na forma de bancos arenosos. O banco distal é a barra arenosa submersa mais afastada e o banco proximal a barra mais próxima a face praial.

Genericamente, os bancos assumiriam formas lineares sob condições de alta energia de ondas (condições de tempestade). Com a diminuição da energia de ondas, o tipo de banco tende a ser mais rítmico e os bancos proximais tenderão a fundir-se à praia na forma de cristas e canais (HOEFEL e ELGAR, 2003).

Parte da energia dissipada pelas ondas incidentes na zona de surfe é transferida para a geração de correntes costeiras tanto longitudinais como transversais (correntes de retorno), as quais necessariamente têm sua ocorrência limitada à zona de surfe (HOEFEL e ELGAR, 2003).

As correntes de retorno se estabelecem nos locais onde as alturas de ondas são menores, normalmente em função de padrões de interferência e de refração das ondas, ou devido às irregularidades batimétricas do fundo. As correntes longitudinais são geradas principalmente pela chegada oblíqua de ondas à costa (CARTER, 1988).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo faz parte do trabalho do Grupo de Física Marinha “Características hidrográficas da plataforma rasa paranaense”, financiado pelo CNPq (480428/2007-7), que tem a coordenação do Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg. A infra-estrutura disponível no Centro de Estudos do Mar/UFPR e equipamentos e instrumentos do laboratório do Grupo de Física Marinha (GFM) foram utilizados para o desenvolvimento e conclusão do estudo.

4.1. Fundeios

Para caracterizar as ondas de superfície em duas profundidades diferentes da plataforma interna central paranaense foram realizados fundeios oceanográficos. Estes compreendem a instalação de um instrumento com sensores de medidas de ondas, através de mergulho autônomo, em cada ponto determinado na plataforma (Figura 7).

Foram utilizados 2 correntômetro/ondógrafos eletromagnético S4 ADW InterOcean para medir os parâmetros de ondas. O S4 é desenhado para medir a magnitude real e direção horizontal de corrente em qualquer ambiente aquático (INTEROCEAN, 1994). O instrumento possui 25 cm de diâmetro e sua orientação é realizada por uma bússola interna com referência ao norte magnético.

O registro de ondas é realizado pelo S4 através das equações da atenuação das correntes orbitais geradas pelas ondas de superfície em função da profundidade (INTEROCEAN, 1994). A altura da onda é obtida através do cálculo da atenuação da onda pela média da profundidade do S4, registrada pelos sensores de pressão. Estas variações de pressão, conjuntamente com as medidas das correntes horizontais, permitem ao instrumento reconstruir a órbitas das moléculas de água e,

a partir delas, os parâmetros de ondas. Estas medidas são baseadas no modelo de amplitude da onda (K) (ou atenuação da pressão no fundo) como função da profundidade e período de ondas intermediárias, de acordo com as seguintes equações:

$$K = \left[\cosh\left(\frac{2\pi D}{L}\right) \right]^{-1}$$

Equação 6

$$L = \left(\frac{gT^2}{2\pi} \right) \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$$

Equação 7

Onde L é o comprimento de onda, T o período e D a profundidade (INTEROCEAN, 1994). Entre outros, os principais parâmetros de ondas que são registrados após o processamento interno no S4 são: altura significativa das ondas, altura máxima, período de pico e direção (INTEROCEAN, 1994).

A frequência de obtenção dos dados foi programada neste estudo para fornecer um registro com 18 min de duração, a taxas amostrais de 2Hz, em intervalos de 4 h. Com isso, a autonomia do equipamento fundeado é de 3 a 5 meses.

Os pontos dos fundeios oceanográficos na plataforma rasa do Paraná foram (Figura 7):

- Ponto 18 m (25° 44`S e 48° 20`W) – localizado na isóbata de 18 m a aproximadamente 20 km ao sul da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). O S4 foi posicionado a 2,3 km a SE da ilha do Arquipélago de Currais. A distância deste ponto até a costa é de aproximadamente 14 km (em relação ao Balneário Grajaú, Pontal do Paraná);
- Ponto 30 m (25° 41`S e 48° 21`W) – localizado na isóbata de 30 m, a aproximadamente 30 km a SE da desembocadura do CEP.

A distância entre este ponto e a costa é de aproximadamente 41 km, considerando o mesmo balneário acima descrito.

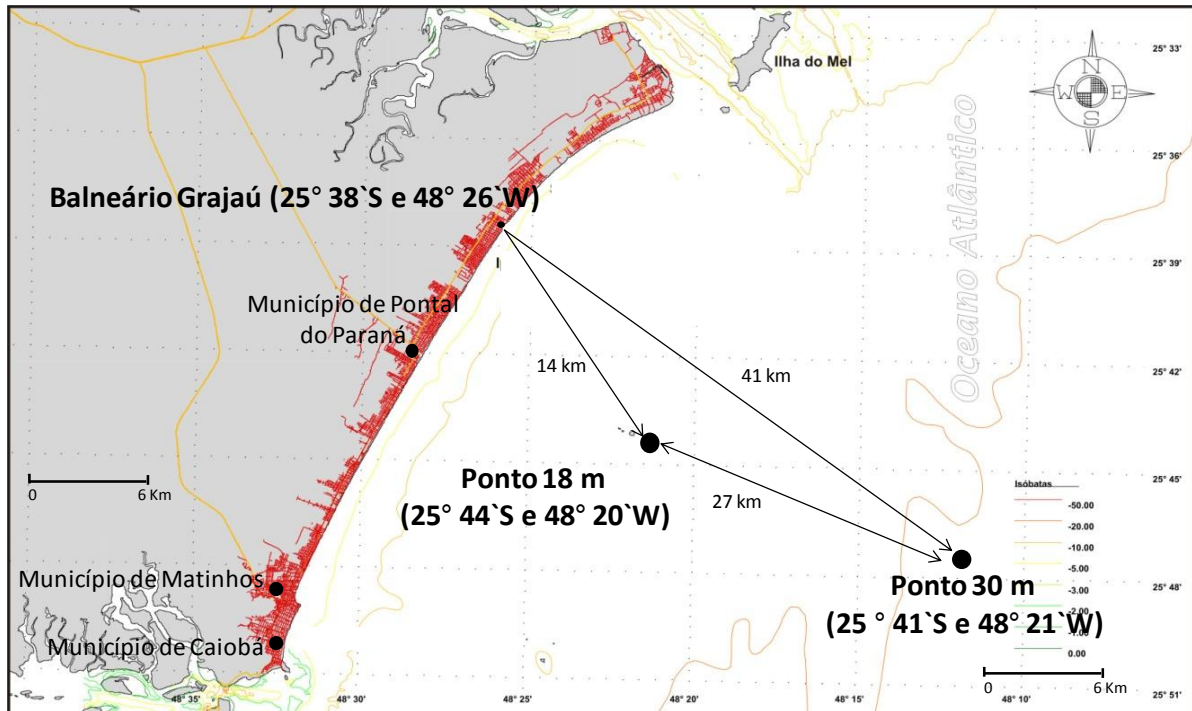


Figura 7 – Mapa dos pontos de fundeio oceanográfico na plataforma interna rasa paranaense e da praia oceânica da região que foi o ponto de observação visual.

As instalações e recuperações dos S4 nos fundeios foram realizadas de acordo com a seguinte dinâmica:

- Fundeio a 30 m:

Instalação 1 = 15/07/2009

Recuperação 1 = 20/12/2009

Instalação 2 = 27/01/2010

Recuperação 2 = 28/06/2010

Instalação 3 = 03/07/2010

Recuperação 3 = 03/11/2010

- Fundeio a 18 m:

Instalação 1 = 09/07/2009

Recuperação 1 = 20/10/2009

Instalação 2 = 23/10/2009

Recuperação 2 = 02/02/2010

Instalação 3 = 12/03/2010

Recuperação 3 08/06/2010

Instalação 4 = 06/07/2010

Recuperação 4 = 10/10/2010

A simultaneidade das coletadas de dados de ondas entre os dois pontos na plataforma interna, portanto, não foram exatas. O esforço amostral entre os pontos foi diferente devido às condições meteorológicas na instalação e recuperação do instrumento, além da logística envolvida na disponibilidade: da equipe de mergulho (composta por alunos de graduação e pós-graduação, inclusive o presente autor); do transporte aquático (Lancha Naurú) até os pontos de fundeio; na manutenção dos equipamentos (descarregamento dos dados em laboratório, limpeza do instrumento, troca de baterias e reprogramação).

4.2. Processamento dos dados de ondas

O *software* InterOcean Systems S4APP foi utilizado tanto para programar quanto para recuperar os dados registrados pelo ondógrafo. Para obter os parâmetros de ondas foi utilizada a série de tempo de pressão e duas componentes das velocidades cinemáticas das partículas (V_n e V_e).

No programa WaveWin de pós-processamento de dados de ondas obtidos pelo S4 foram tabeladas as informações, separadas por parâmetros e frequência amostral, assim como realizadas as análises dos gráficos de densidade espectral calculadas pelo *software*.

No *software* Matlab foram elaborados gráficos polares de direção de onda versus altura significativa e período de pico. As direções de ondas foram agrupadas em um intervalo de 22,5° correspondendo aos intervalos entre os pontos cardeais (N, S, E, W), colaterais (NE, SE, SW, NW) e subcolaterais (NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, NNW).

4.3. Identificação dos estados de mar

A identificação e descrição dos estados de mar para o conjunto de dados original foram baseadas na hipótese de espectro direcional de um único pico, adotada por Araújo *et al.* (2003). Os autores separam os estados de vagas, com valores inferiores a 10 s de período de pico da onda, de estados de *swell*, com valores maior/igual a 10 s.

Os parâmetros característicos para cada estado de mar foram obtidos através de 3 análises bivariadas: a) período de pico (eixo y) versus direção de pico (eixo x); 2) altura significativa (eixo y) versus direção de pico (eixo x) e; 3) altura significativa (eixo y) versus período de pico (eixo x) (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Para determinar a característica dos dados de ondas medidos na plataforma e poder descrever sobre o clima de ondas um número suficiente de tempestades deve ser obtido segundo Holthuijsen, 2007 (duas dezenas ou mais). Para isso, na série temporal obtida aos 30 m foram contabilizados os picos determinados por valores de H_s superior a 2 m antecédidos e precedidos de um valor baixo do mesmo parâmetro.

Os eventos extremos foram identificados com valores de $H_{máx}$ maior/igual a 4 m (Araújo *et al.*, 2003) no conjunto de parâmetros do segmento obtido a 30 m.

4.3.1. Identificação da origem dos estados de mar

As cartas sinóticas e cartas de ventos disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia, no endereço eletrônico www.inmet.gov.br, foram utilizadas para identificar as tempestades que originaram os principais campos de ondas e as pistas de ventos que deram origem àqueles estados de mar. Através da análise destas cartas foram identificadas, em escala de centenas de quilômetros: a formação de depressões (centro de baixa pressão); o gradiente entre centros de alta e baixa pressão; a origem da pista de ventos; o deslocamento do sistema para o Oceano Atlântico Sul Ocidental; a direção, tamanho, duração, posição e deslocamento da pista de ventos; o tamanho da não pista de ventos; e a distância da pista em relação à costa do Estado do Paraná.

O tamanho da pista de ventos foi estimado pelo maior comprimento paralelo do gradiente de pressão, formado pelos centros de pressão atmosféricos. As medidas foram estimadas com referência às coordenadas de latitudes, onde a distância entre um grau de latitude varia (devido a forma ligeiramente elipsóide da Terra) de 110,567 km no equador a 111,699 km nos pólos. Com isso, e identificando os limites de cada pista de ventos, foram obtidas as medidas correspondentes de cada pista de ventos.

A direção da pista de ventos foi obtida com o auxílio de uma rosa dos ventos posicionada acima das isóbaras do gradiente de pressão que formam a pista de ventos já identificada. A variação da pressão entre os centros foi calculada pela diferença de pressão, dada em hPa, entre os centros que formam o gradiente de pressão sobre o oceano Atlântico Sul Ocidental.

Estas informações foram transferidas para o mapa batimétrico da margem continental sul do Brasil (REMAC, 1979), cuja escala é de 1:3.500.000 e a base cartográfica: Carta nº 19.300 INT. 201 DHN. O método de transferência utilizado foi o mesmo usado em navegação, utilizando régua, compasso e transferidor. Com isso, foi possível monitorar os principais sistemas meteorológicos e as pistas de ventos formadas e comparadas através de maquetes simples.

4.4. Monitoramento visual da praia do Balneário Grajaú

Para realizar o monitoramento visual da dinâmica de incidência de ondas no Balneário Grajaú foi utilizado um diário de bordo para descrever as principais características relevantes para o estudo, como: a) altura de quebra de ondas (H_q); b) período de onda (T_v); e c) intensidade e direção da corrente longitudinal; d) tipo de quebra de ondas; e) características das correntes de retorno.

De janeiro de 2009 até dezembro de 2010 as características oceanográficas visuais foram realizadas através dos seguintes métodos ou parâmetros:

a) Altura de quebra da onda: deve ser obtida por um observador experiente (WALKER, 1974; HUTT *et al.*, 2001; DALLY, 2001; MELO, 2002; NEMES, 2006; HOLTHUIJESSEN, 2007). O método utilizado foi da relação entre a altura do surfista e a altura da onda (NEMES, 2006). Isto necessita que um surfista experiente se posicione-se além da zona de arrebentação, auxiliado por uma prancha de surfe, e realize a descida nas ondas de diferentes séries. Na base da onda o surfista compara sua altura com a da onda. Este surfista foi o próprio autor, cuja experiência é de nível 7 (de acordo com Hutt *et al.* (2001), numa escala proposta que vai de 1, para surfistas aprendizes, até 10, para surfistas de ondas extremas) que foi conferida pela Confederação Brasileira de Surf ao vencer etapas e circuitos de surfe realizado pelas federações associadas aquela. A altura deste autor é de 1,75 m e o tipo de prancha de surfe utilizada foi uma *boardshort* de 1,90 m de altura cuja composição é de poliuretano e fibra de vidro. Este método foi utilizado porque possui boa relação custo benefício, sendo uma medida real no ponto de maior dinâmica da zona de surfe na qual é quase impossível o acesso de outra maneira (NEMES, 2006);

b) Período da onda: o período de onda foi obtido com um cronômetro simples que permite armazenar intervalos entre as medições realizadas para posterior análise. A medida foi obtida antes do ponto de arrebatamento das ondas no banco distal, através do registro do tempo da passagem consecutiva de ondas de diferentes séries por minha pessoa.

c) Corrente longitudinal: para observar a direção e intensidade (qualitativa) da corrente longitudinal, uma referência na costa (edifício, casa ou postes de iluminação) foi identificada em um tempo inicial t_1 . Após um minuto, a referência na costa é reobservada, com isso, foi estimado o deslocamento (norte ou sul) e a intensidade de afastamento (forte, moderada ou fraca) conforme a distância percorrida, em num intervalo de tempo (um minuto);

d) Tipo de quebra de ondas: a quebra das ondas foi identificada utilizando a classificação proposta por Galvin (1968), observando esta no ponto de arrebatamento mais afastado da praia. Além das formas Mergulhante e Deslizante, uma terceira classificação também foi adotada, o tipo Mergulhante/Deslizante, utilizada para os estudos em praias de alta dinâmica de ondas (MEAD e BLACK, 2001; NEMES, 2006).

e) Características das correntes de retorno: para descrever esta característica foi utilizado uma prancha de surfe e um referencial fixo na linha de costa (poste, edifício e/ou casa). Assim, foi possível percorrer toda a extensão da corrente de retorno (zona de surfe) e observar novamente o referencial inicial determinado. Com isso, foi possível identificar o trajeto percorrido com um referencial fixo na linha de costa, sendo observado a inclinação da corrente (para norte ou para sul), determinada pelo campo de ondas incidente.

4.5. Modelagem numérica de ondas

A modelagem numérica de ondas foi utilizada como uma ferramenta para as análises, discussões e conclusões dos dados registrados e observados, inferindo sobre os principais fenômenos físicos de ondas na região central da plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

A partir dos dados do clima de ondas obtidos aos 30 m (portanto, determinado o domínio externo) foram selecionados três cenários para serem simulados a partir dos estados de mar previamente identificados.

O modelo utilizado para verificação do comportamento do trem de ondas próximas à costa foi o WWM (*Wind Wave Model*). Este foi desenvolvido pela Universidade Nacional de Cheng Kung na China. O WWM utiliza malha de elementos finitos (triângulos). Este método usado em modelos espectrais de ondas, desenvolvido por Hsu *et al.* (2005) possui a vantagem de exibir com maior precisão os resultados em regiões com relevo de fundo complexas e com limites irregulares em áreas de águas rasas. Este tipo de malha não estruturada pode resolver simulações onde são combinadas ondas oceânicas de larga escala e ondas costeiras de pequena escala no mesmo domínio discreto. A técnica de elementos finitos supera a de diferenças finitas, pois a medida local da malha e respectivo número de nós podem ser aperfeiçoados nas várias partes do domínio computacional em função da sua complexidade. As áreas das águas costeiras são discretizadas com elementos triangulares, cujos tamanhos são variados de acordo com a resolução desejada. Esta característica permite a flexibilidade de refinar a malha em uma área de pequena escala cujas respostas das características físicas geradas por ondas sejam importantes e necessitem de respostas com mais qualidade.

O modelo WWM simula o espectro resultante de ondas, isto é, as ondas são descritas no modelo como a densidade do espectro bidimensional da ação de ondas, simulando seu comportamento mesmo quando os fenômenos não-lineares dominarem (na zona de surfe). A razão de se usar o espectro em condições

altamente não lineares é que, em tais condições, o espectro parece predizer com precisão razoável a distribuição espectral de ondas de até segunda ordem.

4.5.1. Batimetria da área de estudo

As batimetrias foram realizadas com ecobatímetro acoplado a uma embarcação de pequeno porte (lança Naurú, GFM/CEM). Os aparelhos utilizados para medir a profundidade dos oceanos, consistem em um sensor que emite sinais acústicos e um relógio interno que mede o intervalo entre a emissão do sinal e seu retorno ao sensor, utilizando o cálculo:

$$P = \frac{V \cdot \Delta t}{2}$$

Equação 8

Onde:

P = profundidade calculada;

V = velocidade do som na água (~1500m/s);

Δt = diferença entre a emissão e a recepção do sinal.

Os dados de batimetria foram calculados a partir dos valores obtidos pela leitura do aparelho ecobatímetro GARMIM 178C. Outros dados registrados pelo aparelho foram as coordenadas geográficas, junto à profundidade no ponto respectivo. A partir destes foi subtraída a oscilação da superfície livre para correção da maré, obtida com um CTD instalado nas proximidades do local em uma área fixa (dados de pressão). A batimetria foi processada no *software* SURFER 8.0, utilizando a interpolação por triangulação linear.

A referência para a batimetria, o nível de redução, foi estabelecido através de um marégrafo registrando o nível instantâneo relativo do mar instalado em um píer próximo à ponta de Caiobá e à ponta de Pontal do Sul.

Foi realizado o levantamento batimétrico do arco praial formado pela Ponta de Pontal do Sul, município de Pontal do Paraná (25° 34`S e 48° 20`W) a Ponta de Caiobá, no município Caiobá (25° 50`S e 48° 31`W), cujo limite externo foi a isobatimétrica de 10 m (Figura 8). Os transectos foram perpendiculares a linha de costa com espaçamentos de 200 m.

Como o domínio do modelo foi determinado aos 30 m de profundidade, os dados batimétricos de uma carta náutica da região (Brasil Costa – Sul, Marinha do Brasil, 1975, nº 1820) foram interpolados aos dados batimétricos medidos. Desta forma, se aumenta a fronteira aberta e a simulação da propagação de ondas com parâmetros obtidos nos registros do S4 fundeado aos 30 m torna-se coerente.

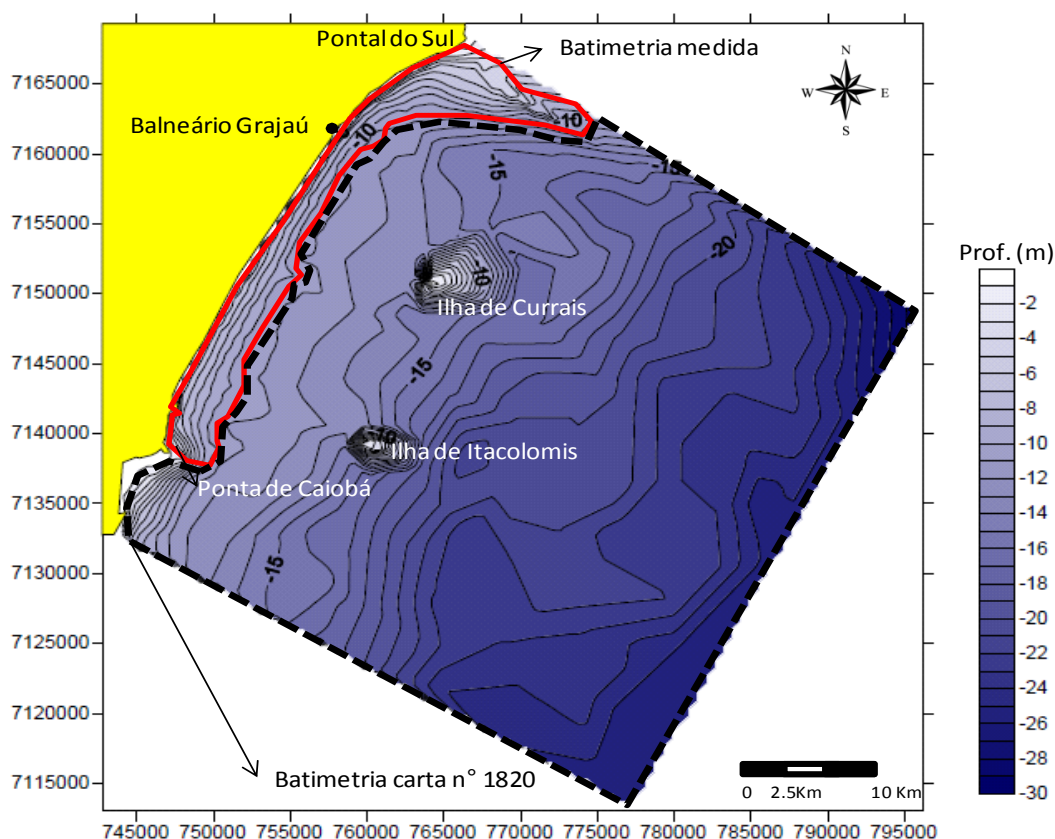


Figura 8 – Mapa batimétrico resultante do esforço medido (destacado pela linha contínua próximo a linha de costa) e do obtido pela carta náutica nº 1820 (destacado pela linha tracejada).

Um maior detalhamento batimétrico foi realizado na área da zona de surfe e a ante-praia do Balneário Grajaú. Neste, foram realizados 10 transectos, perpendiculares à linha de costa, com 100 m de espaçamento um do outro, totalizando 2 km² de batimetria. O *software* SURFER foi utilizado para interpolar a batimetria (método de triangulação) e elaborar uma figura ilustrativa das principais feições morfológicas da região com suas respectivas classes de ondas dissipadas.

4.5.2. Análises com o *Wind Wave Model* (WWM)

O WWM permite analisar os resultados obtidos através de diagramas representativos de altura significativa de ondas e propagação vetorial do trem de ondas. Nestes, as cores representam às classes das alturas de ondas e as linhas paralelas à costa representam as isóbatas. Os vetores de ondas são segmentos representativos da direção resultante dos processos físicos gerados pela propagação das ondas em águas rasas.

A partir dos diagramas é possível obter perfis determinados na área de domínio simulado. Isto possibilita analisar a relação da altura significativa da onda na propagação ao longo da batimetria da plataforma. Foram adotados 2 perfis perpendiculares à linha de costa até a fronteira aberta: 1) Balneário Grajaú e; Ilha de Currais. Estes foram selecionados por haver informações de medidas eletrônicas e visuais simultaneamente com os registros de ondas obtidos aos 30 m de profundidade.

No diagrama vetorial, os processos relacionados à propagação de ondas mostram como a reorientação do trem de ondas incidentes responde aos contornos batimétricos e aos obstáculos naturais presentes ao longo da propagação na plataforma até a linha de costa. A partir daí, foram caracterizados os principais processos físicos gerados nesta propagação.

5. RESULTADOS

A escala temporal de coletas de dados de ondas na plataforma interna rasa do Paraná foi de 408 dias (2842 registros) medidas no ponto a 30 m de profundidade, e de 488 dias (2389) medidos a 18 m. Esta base de dados cobriu um intervalo geral de quase dois anos, sendo que houve pontos de descontinuidade e falta de sobreposição entre os dados dos fundeios (Figura 9).

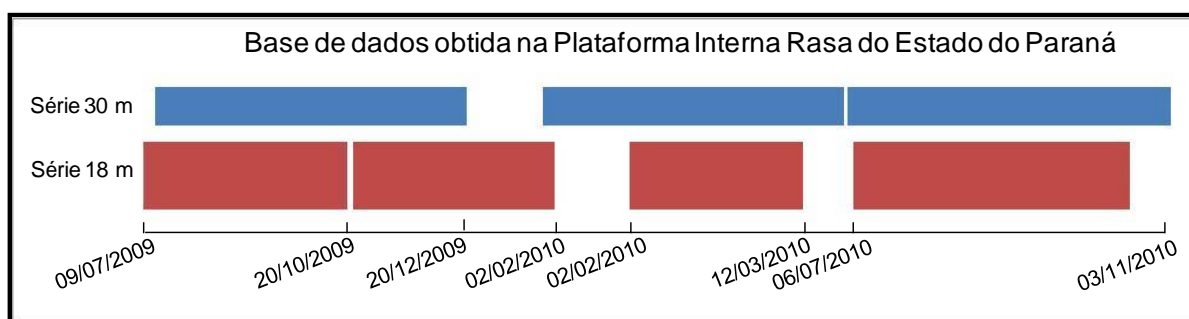


Figura 9 – Continuidade e sobreposição das séries temporais obtidas (de 09/07/2009 a 03/11/2010) aos 18 m e 30 m de profundidade na plataforma interna rasa do Paraná.

No geral os valores de H_s medidos a 18 m foram menores que aos 30 m, não houve diferenças significativas entre os valores médios de período (T_p) e direção média (θ) de propagação de ondas. A Tabela 1 apresenta os valores médios dos dados de ondas medidos neste estudo, na plataforma interna rasa do Paraná.

Tabela 1 – Média anual dos parâmetros de ondas H_s , T_p e direção de pico medidas na plataforma interna do Paraná de 15/07/2009 a 03/11/2010.

Ponto	H_s (m)	DesPad (m)	T_p (s)	DesPad (s)	Dir (°)	DesPad (s)
S4 30m	1,57	0,60	8,42	2,81	142,63	39,69
S4 18m	1,15	0,45	8,34	2,17	144,26	32,91

Ao longo de quase dois anos foram registrados 87 dias com ondulações cujos valores de altura máxima de onda foram maior/igual a 4 m ($H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m), sendo que

as maiores durações destes eventos foram ocasionadas por ciclones subtropicais. Dentro da escala temporal amostrada, foram identificadas 42 tempestades que deram origem aos valores de H_s superiores a 2 m antecedidos e sucedidos de valores menores. Ou seja, o conjunto de dados de ondas obtidos foi suficiente para apresentar as características do clima de ondas incidente na plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

O atrito do orbital estrutural da onda calculado para os menores valores de período de pico foi em aproximadamente 34 m de profundidade (68 m de comprimento de onda). A maior profundidade calculada correspondente à passagem da onda de oceano profundo para a zona de transição foi de aproximadamente 152 m. O comprimento de onda calculado para esta foi de 305 m.

5.1. Características de ondas na plataforma interna rasa do Paraná (30 e 18m)

Nas Figura 10 e Figura 11 estão apresentados os gráficos polares anuais dos dados de ondas medidos a 30 m e 18 m, respectivamente. Nestas figuras, as direções de ondas incidentes estão associadas aos valores de classes de altura significativa (H_s) e período de pico (T_p), onde o tamanho dos segmentos nos gráficos é proporcional a frequência (%) da direção de propagação medida e os intervalos dentro deste segmento são proporcionais às classes dos parâmetros acima descritos.

As propagações de ondas com frequência maior que 10 % a 30 m foram: SSE (27,14%); ESE (21,26%); SE (20,80%) e; S (12,81%) (Figura 10). Na Tabela 2 é apresentado um resumo das frequências (%) direcionais desta propagação.

As direções de propagação de ondas com frequência maior que 10 % aos 18 m foram: SSE (28,22%); SE (25,17%); S (21,15%) e; ESE (15,54%) (Figura 11). Um

resumo das freqüências (%) direcionais desta propagação é apresentado na Tabela 3.

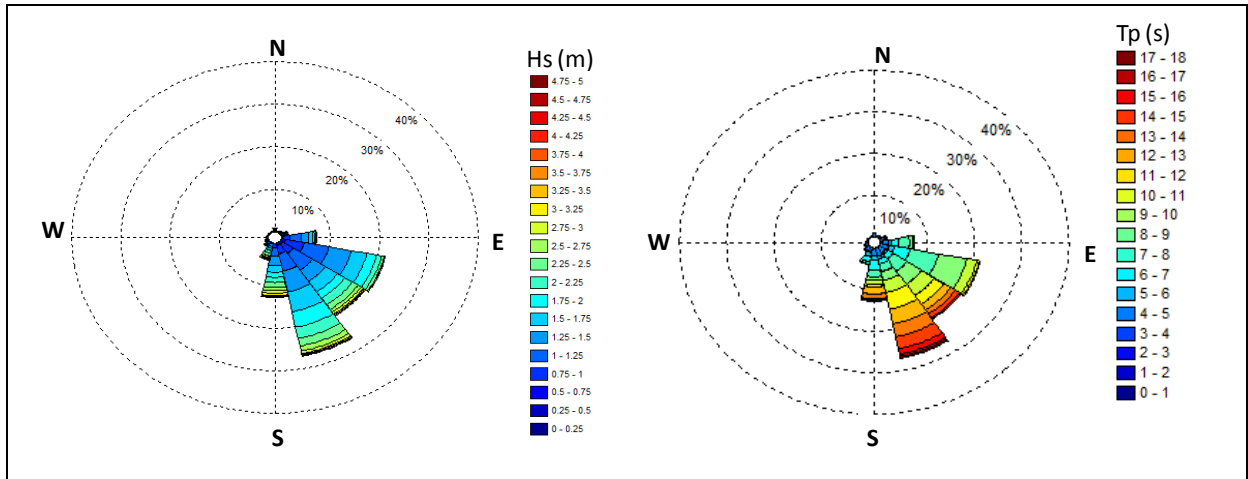


Figura 10 – Características dos parâmetros de Ondas (H_s , T_p e $Dir \varnothing$) registrados a 30 m de profundidade ($25^\circ 41'S$ e $48^\circ 21'W$). As classes de H_s e T_p são proporcionais aos sombreamentos e a espessura plotado no gráfico, correspondendo às freqüências do parâmetro medido pelo S4. A direção é representada pelo segmento formado a cada $22,5^\circ$. Quanto maior o segmento maior a freqüência da direção de onda. Gráficos de porcentagem de ocorrência para altura significativa e período de pico associados à direção de ondas (S4 a 30m) no período de 15/07/2009 a 03/11/2010.

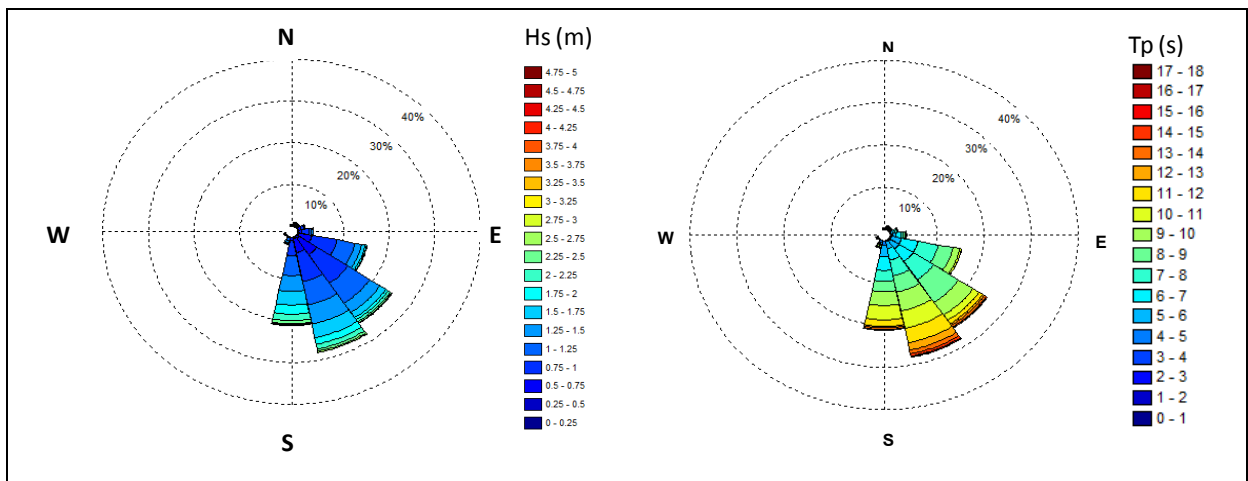


Figura 11 – Características dos parâmetros de Ondas (H_s , T_p e $Dir \varnothing$) registrados a 18m de profundidade ($25^\circ 44'S$ e $48^\circ 20'W$). As classes de H_s e T_p são proporcionais aos sombreamentos e a espessura plotado no gráfico, correspondendo às freqüências do parâmetro medido pelo S4. A direção é representada pelo segmento formado a cada $22,5^\circ$. Quanto maior o segmento maior a

freqüência da direção de onda. Gráficos de porcentagem de ocorrência para altura significativa e período de pico associados à direção de ondas (S4 a 18 m) no período de 09/07/2009 a 19/10/2010.

Tabela 2 - Estatística da freqüência da direção de propagação de ondas medida a 30 m na plataforma interna rasa do Paraná no período entre 15/07/2009 e 03/11/2010.

Direção	Freqüência (%)
N	0,88
NNE	0,25
NE	0,56
ENE	1,55
E	7,18
ESE	21,61
SE	20,80
SSE	27,14
S	12,71
SSW	4,05
SW	1,37
WSW	0,81
W	0,46
WNW	0,25
NW	0,14
NNW	0,25

Tabela 3 - Estatística da frequência da direção de propagação de ondas medida a 18 m na plataforma interna rasa do Paraná no período entre 09/07/2009 e 19/10/2010.

Direção	Freqüência(%)
N	0,34
NNE	1,01
NE	0,84
NEE	1,80
E	3,48
ESE	15,54
SE	25,17
SSE	28,22
S	21,15
SSW	1,84
SW	0,17
WSW	0,46
W	0
WNW	0
NW	0
NNW	0

Para o período medido a 30 m as classes de H_s mais freqüentes foram 1-1,25 m (19,57%) e 1,25-1,5 m (18,41%). O maior valor de H_s medido a 30 m foi de 4,27 m com direção de onda de $138,88^\circ$ (SE) e T_p de 13,56 s. O maior valor de H_s medido aos 18 m foi de 3,19 m com T_p de 7,67 s e direção de $180,95^\circ$ (S). Na Figura 12 estão apresentadas as freqüências (%) das classes de H_s medidas aos 30 m e aos 18 m de profundidade.

Duas classes de T_p foram as mais freqüentes no período amostrado aos 30 m: 4,01-5 s (15,98%) e; 7,01-8 s (16,23%). O maior valor medido de T_p foi de 17,81s com direção de onda de $161,46^\circ$ (SSE) e H_s de 0,98 m. A maior medida de T_p a 18 m foi de 16,13 s com H_s de 1,43 m e direção de onda de $166,15^\circ$ (SSE). Duas classes de T_p , 7,01-8 s (17,8%) e 8,01-9 s (17,09%) foram as mais freqüentes a 18 m. Um resumo de todas as classes de T_p medidos a 30 m e aos 18 m de profundidade está apresentado na Figura 13.

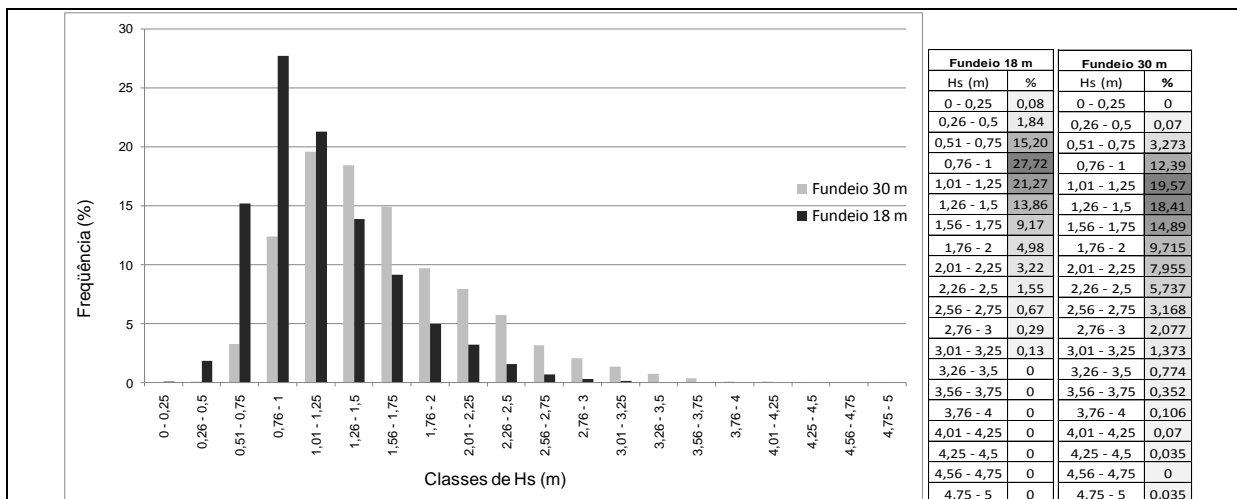


Figura 12 - Estatística das classes de altura significativa (H_s) medidos aos 30 m e 18 m na plataforma interna rasa do Paraná.

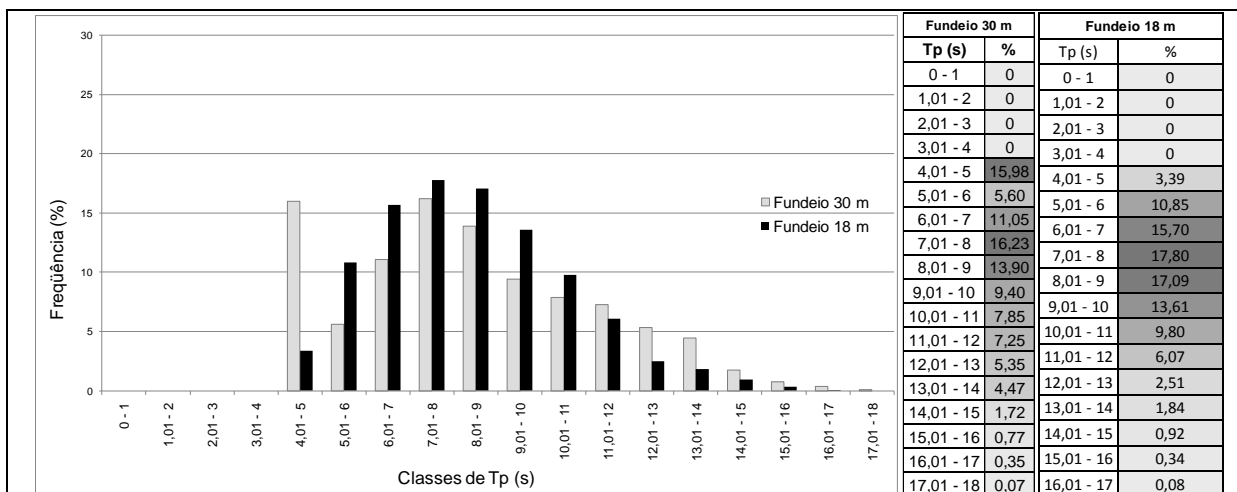


Figura 13 - Estatística das classes de período de pico (T_p) das ondas medidas aos 30m e 18 m.

5.1.1. Características dos estados de mar

As Figura 14 e Figura 15 representam diagramas das distribuições bivariadas anuais de dados de ondas medidos a 30 m e 18 m de profundidade, respectivamente. Analisando estas figuras, foi possível identificar as características dos estados de mar em ambas profundidades na plataforma interna paranaense.

Na plataforma interna rasa do Paraná o estado de mar do tipo vagas ocupou 62,76% do espaço temporal medido a 30 m e de 64,82% das medidas de ondas aos 18 m. Em geral a 30 m, estados de vagas apresentaram parâmetros de ondas de 1,25-1,5 m (H_s), 8-9 s (T_p) e ESE (\varnothing_p) (Tabela 4). A 18 m os valores modais dos parâmetros correlacionados foram de 1 m (H_s), 8-9 s (T_p) e SE (\varnothing_p) (Tabela 5). Em toda a série temporal de dados de ondas obtidas neste estudo foram medidos valores de H_s menores aos 18 m do que aos 30 m.

Tabela 4- Estados de mar identificados a 30m a partir das correlações bivariadas, baseados na hipótese de espectro de ondas de um único pico.

S4 30m	Vagas (SEA)			SWELL		
	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)
Parâmetros	ESE	1,25 - 1,5	8 - 9	SSE	1,5 - 1,75	11

Tabela 5 - Estados de mar identificados a 18m a partir das correlações bivariadas, baseados na hipótese de espectro de ondas de um único pico.

S4 18m	Vagas (SEA)			SWELL		
	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)
Parâmetros	SE	1	8 - 9	SSE	1 - 1,25	10 - 11

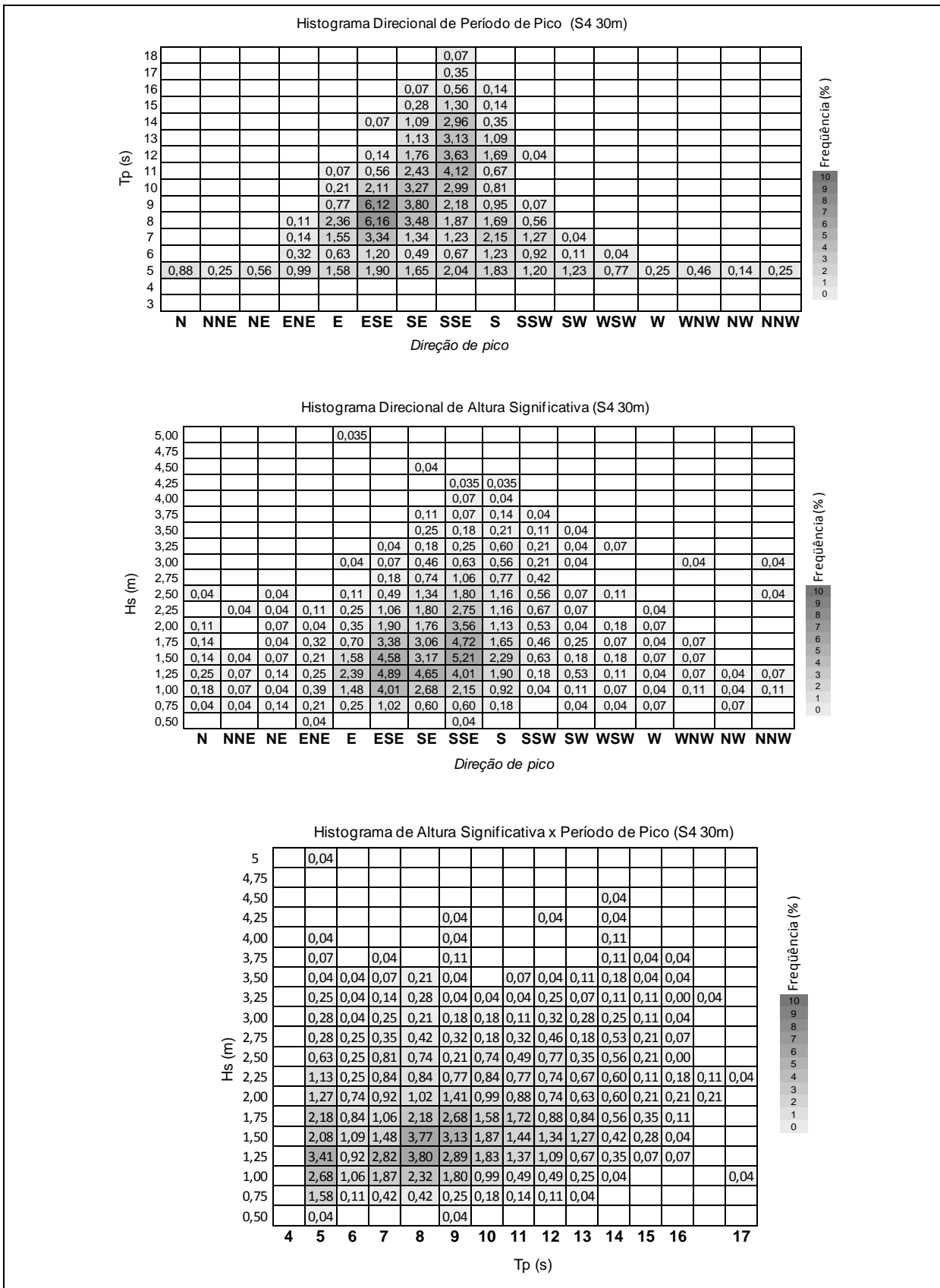


Figura 14 – Histogramas bivariados anual de $T_p(s)$ x Direção de pico, $H_s(m)$ x Direção de pico e $H_s(m)$ x $T_p(s)$, correspondentes aos dados originais medidos a 30m, baseados na hipótese de espectro de ondas de um único pico.

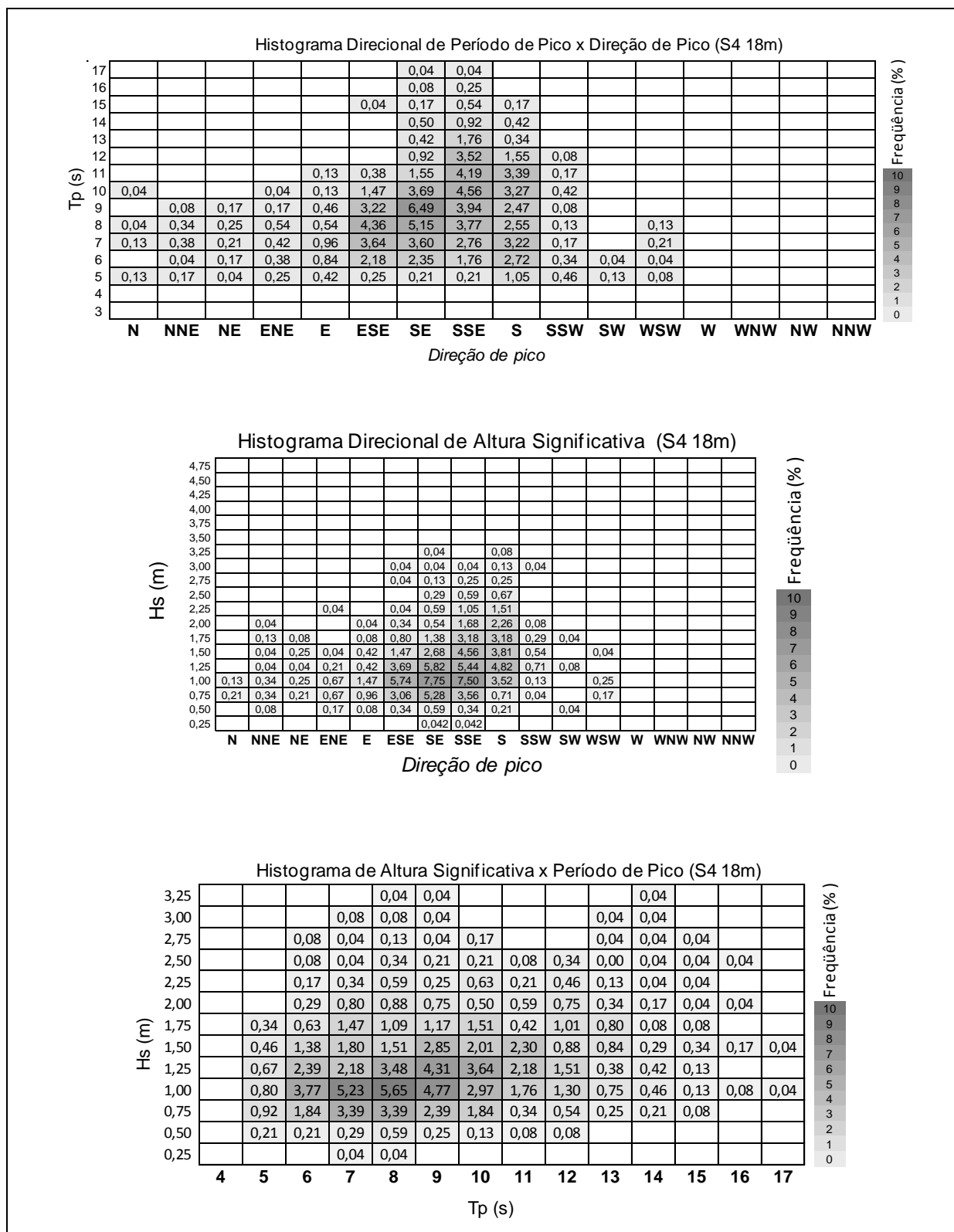


Figura 15 - Histogramas bivariados anual de $T_p(s)$ x Direção de pico, $H_s(m)$ x Direção de pico e $H_s(m)$ x $T_p(s)$, correspondentes aos dados originais medidos a 18m, baseados na hipótese de espectro de ondas de um único pico.

5.2. Características sazonais de ondas na plataforma interna do Paraná

Dos dados anuais obtidos a 30 m, o esforço amostral entre as temporadas foi de 30,27% na primavera, 11,02% no verão, 19,57% no outono e 39,14% no inverno. Para os dados medidos a 18 m o esforço amostral sazonal corresponde a 28,47 % na primavera, 12,85 % no verão, 20,06 % no outono e, 38,61% no inverno. Nas Figura 16 e Figura 17 estão apresentados os gráficos polares específicos para cada temporada dos fundeios a 30 m e 18 m, respectivamente. Os histogramas de altura significativa de ondas sazonal para os dados medidos a 30 m estão apresentados na Figura 18 e para os medidos a 18 m na Figura 19.

Em ambos fundeios a direção de ondas predominante na primavera foi SSE (31,28% a 30 m e, 34,41% a 18 m). Nesta mesma temporada, as classes de H_s mais freqüentes foram de 1,01-1,25 m (20,93%) e 1,26-1,5 m (20,23%) a 30 m, e de 0,75-1 m (28,53%) a 18 m. Os valores mais altos de H_s na primavera estão associados à direção SSE e S a 30 m, sendo que o maior valor do parâmetro foi de 3,79 m, com T_p de 8,16 s e direção S. Para os dados medidos a 18 m na primavera, o maior valor de H_s foi de 2,77 m, com T_p de 7,04 s e direção ESE. As classes de T_p com maiores freqüências foram 4,01-5 s (15,47%) e 7,01-8 s (15%) a 30 m, e de 6,01-7 s (16,76%) e 7,01-8 s (16,18%) aos 18 m. As maiores energias de ondas (valores mais altos de T_p) estão associadas à direção SSE, tanto a 30 m como aos 18 m. Na temporada de primavera o valor extremo de T_p foi de 16,13 s com 3,22 m e direção SSE a 30 m, e de 15,17 m, com H_s de 1,89 m e direção SSE aos 18 m.

No verão a direção predominante de propagação de ondas foi ESE (32,27%) a 30 m e SE (39,09%) a 18 m. As classes de H_s mais freqüentes foram 1,01-1,25 m (29,71%) a 30 m, e de 0,51-0,75 m (28,01%) e 0,76-1 m (30,94%) a 18 m. O valor mais elevado de H_s para a temporada foi de 4,04 m, com T_p de 8,03s e direção S a 30 m, e H_s de 2,76 m, com T_p de 6,67 s e direção SSW a 18 m. Na temporada de verão a propagação de ondas com valores de T_p mais altos a 30 m foi com direção SSE, já aos 18 m foram SSE e S. As classes de T_p mais freqüentes nesta temporada foram 7,01-8 s (23,32%) a 30 m, e de 6,01-7 s (23,45%) e 7,01-8 s (24,10%) aos 18

m. O valor extremo de T_p medido no verão foi de 16,65 s com valor de H_s de 1,88 m e direção SSE a 30 m e, de 14,32 s com H_s de 0,63 m e direção S aos 18 m.

As direções de propagação de ondas mais freqüentes no outono foram SE (32,73%) e SSE (25,72%) a 30 m, e S (28,60%) e SSE (26,51%) aos 18 m. Os maiores valores de H_s estão espalhado entre as direções ESE a SSW para os dados de ondas medidos a 30 m, e nas direções SE a S aos 18 m. As classes de H_s 0,76-1 m (14,75%) e 1,01-1,25 m (13,49%) foram as mais freqüentes no outono a 30 m, já aos 18 m, as freqüências mais altas de H_s foram medidas nas classes de 0,56-0,75 m (18,79%) e 0,76-1 m (20,04%). O valor extremo de H_s no outono a 30 m foi de 4,27 m, com T_p de 13,56 s e direção S, e aos 18m foi de 3,19 m, com T_p de 7,67 s e direção S. As classes de T_p mais freqüentes na temporada de outono foram 4,01-5 s (17,63%) e 8,01-9 s (14,21%) a 30 m e, aos 18 m foram as de 7,01-8 s (17,54%), 8,01-9 s (17,12%) e 9,01-10 s (16,49%). A direção de propagação de ondas SE e SSE estão associadas aos maiores valores de T_p medidos a 30 m no outono, e ESE a S medidas aos 18 m. O valor extremo de T_p para a temporada de outono foi de 17,81 s, com H_s de 0,98 m e direção SSE a 30 m e nos dados de ondas medidos a 18 m foi 15,17 s, com H_s de 2,27 m e direção SE.

A propagação direcional de ondas SSE (28,77%) e ESE (25%) a 30 m tiveram as maiores freqüências medidas na temporada de inverno. As direções mais freqüentes de propagação de ondas medidas na mesma temporada a 18 m foi SE (28,74%), SSE (25,49%) e ESE (21,15%). Os maiores valores de H_s medidos a 30m estão espalhados entre as direções SSE a SW, já aos 18 m nas direções SE e S. O valor extremo de H_s medido a 30 m no inverno foi de 3,61 m com T_p de 4,54 s e direção SSE, e aos 18 m foi de 2,83 m com T_p de 8,16 s com direção S. As classes de H_s mais freqüentes foram 1,01-1,25 m (18,71%) e 1,26-1,5 m (21,31%) a 30 m e, de 0,76-1 m (30,03%) e 1,01-1,25 m (25,70%) aos 18 m. Os maiores valores de T_p medidos no inverno foram registradas na direção SE a S, tanto a 30 m quanto aos 18 m. As classes de T_p mais freqüentes na temporada de inverno foram 4,01-5 s (15,65%) e 7,01-8 s (16,73%) a 30 m e, de 7,01-8 s (17,03%), 8,01-9 s (19,96%) e 9,01-10 s (17,57%) aos 18 m. O valor extremo medido de T_p no inverno foi de 16,65 s com H_s de 2,18 m e direção SSE a 30 m e, de 16,13 s com H_s de 0,88 m e direção SSE aos 18 m.

Os eventos extremos ocorreram no outono ($H_{\text{máx}}$ 6,78 m, 08/04/2010), verão ($H_{\text{máx}}$ 6,47 m, 25/02/2010) e na primavera ($H_{\text{máx}}$ 6,07 m, 29/09/2009), valores medidos a 30 m. A única temporada onde não houve registros de valores de $H_{\text{máx}}$ superior a 6 m foi no inverno.

As frequências dos valores de H_s maior/igual a 3 m ($H_s \geq 3$ m) obtidos a 30 m estão distribuídos da seguinte maneira entre as temporadas: 3,84% na primavera; 1,27% no verão; 5,38% no outono; e 1,08% no inverno.

O resultado estatístico apresentado nesse item tem caráter não-climatológico devido à cobertura amostral heterogênea entre os fundeios e as temporadas. Mesmo que na série temporal de dados de ondas obtidas nas duas profundidades contenha um número suficiente de tempestades para poder caracterizar o clima de ondas não foi possível obter um resultado com absoluta simultaneidade de medidas de ondas entre as duas profundidades. Desse modo, o resultado obtido nos histogramas polares refletiu, com mais evidência, na variação direcional de ondas entre os fundeios.

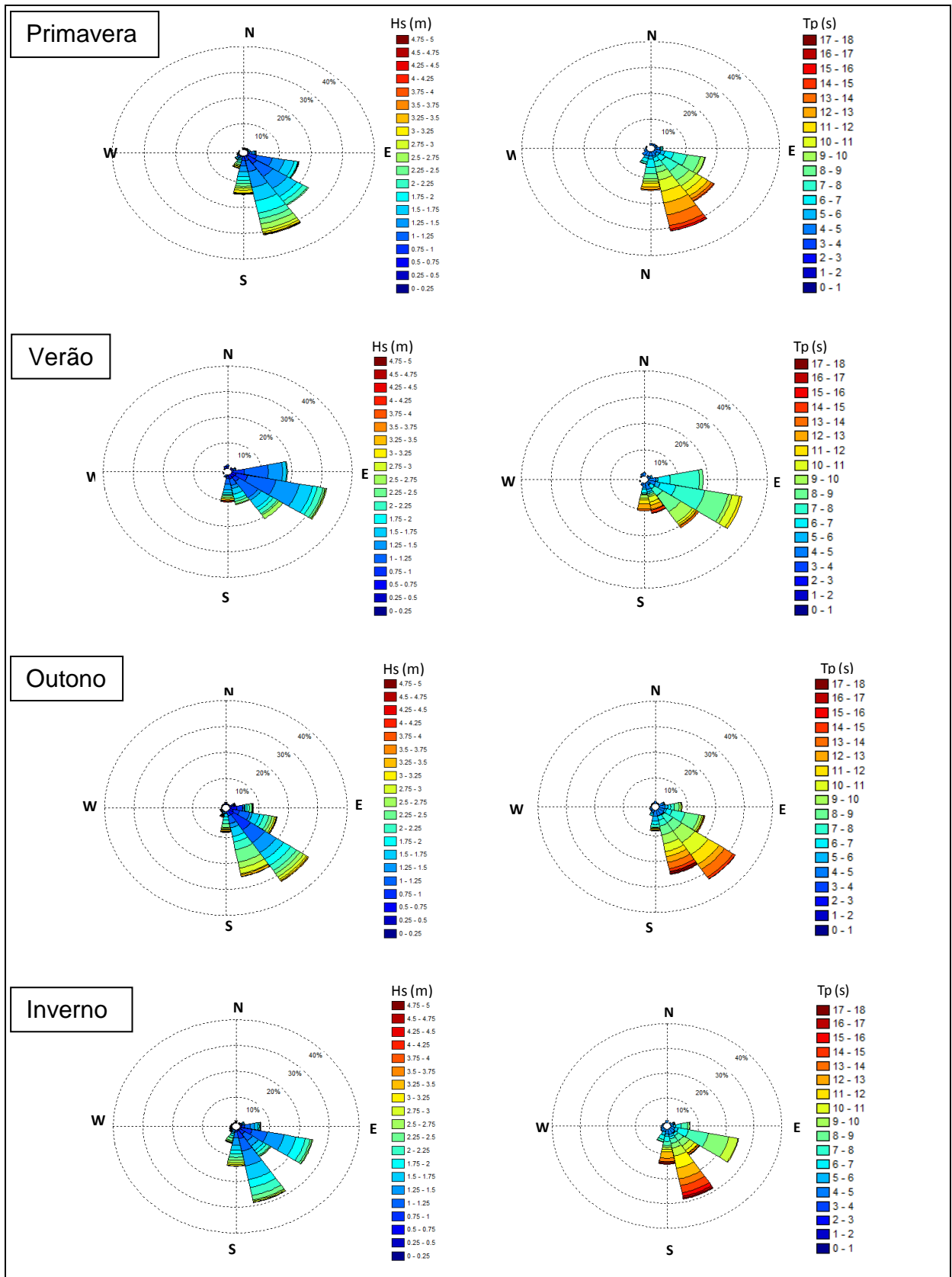


Figura 16 - Características dos parâmetros de ondas (Hs, Tp e Dir \varnothing) registrados a 30 m.

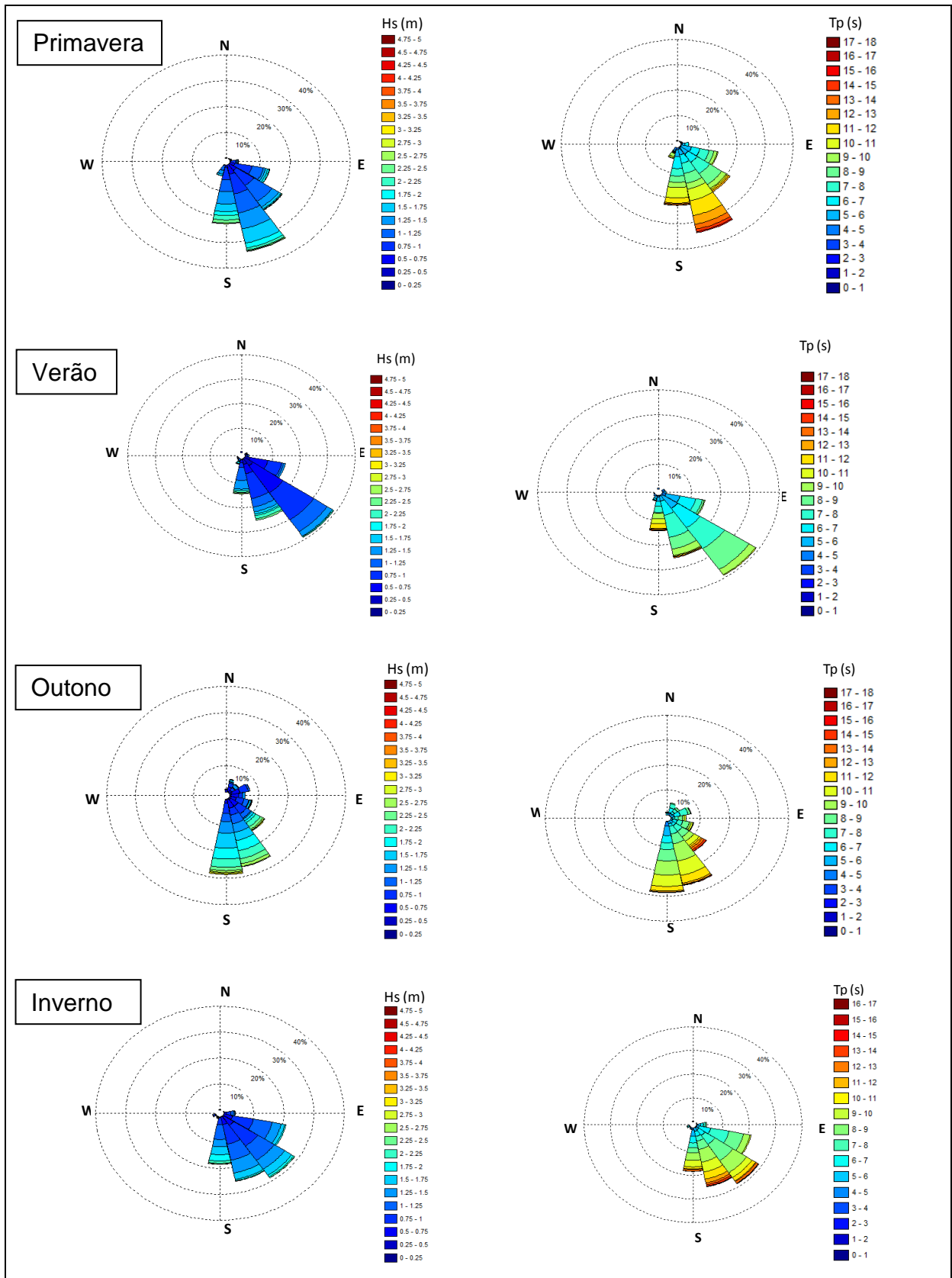


Figura 17 - Características dos parâmetros de Ondas (H_s , T_p e $Dir \varnothing$) registrados a 18 m.

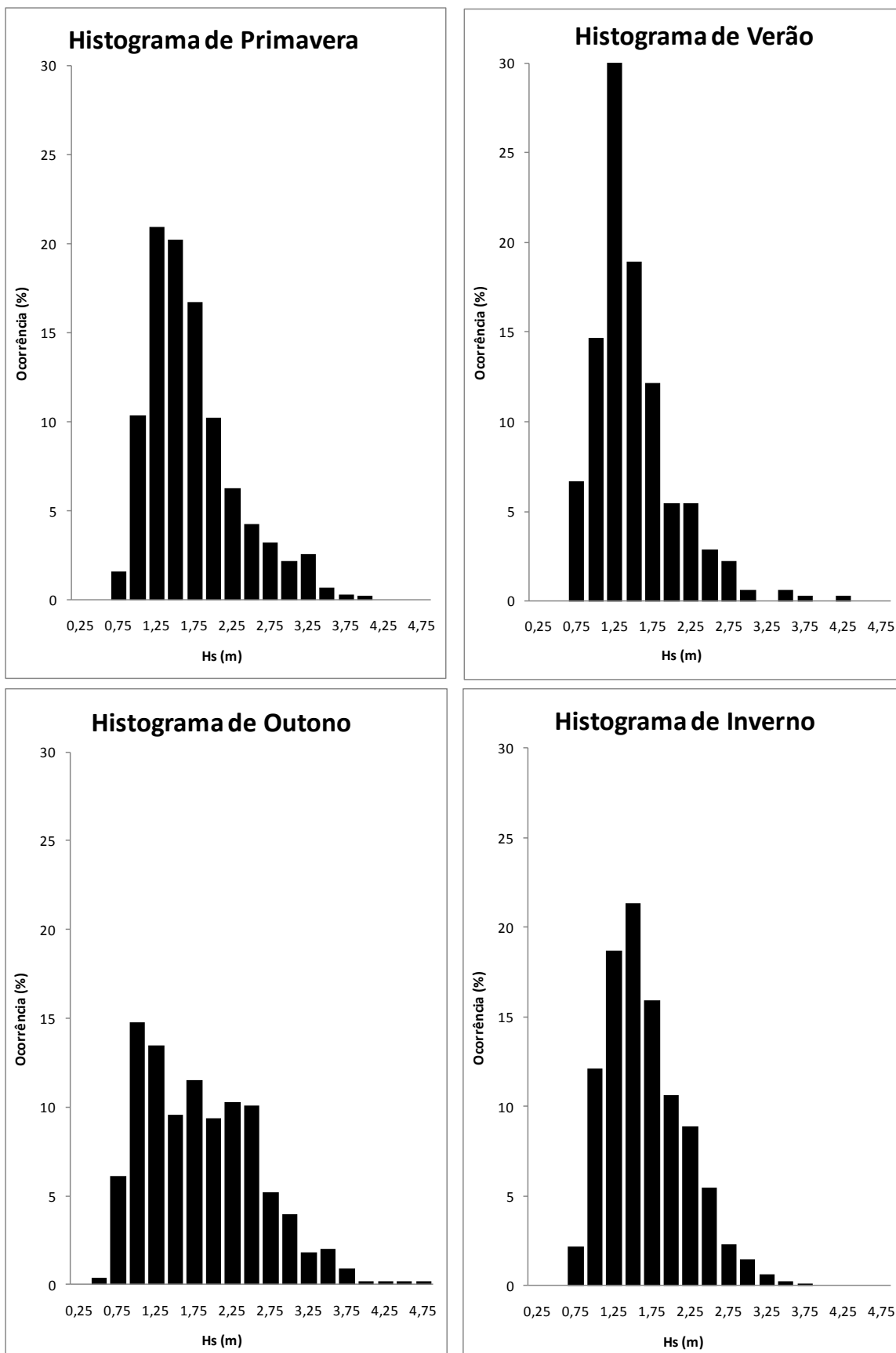


Figura 18 - Histogramas sazonal de altura significativa distribuído em classes de H_s de acordo com a frequência registrada a 30 m de profundidade.

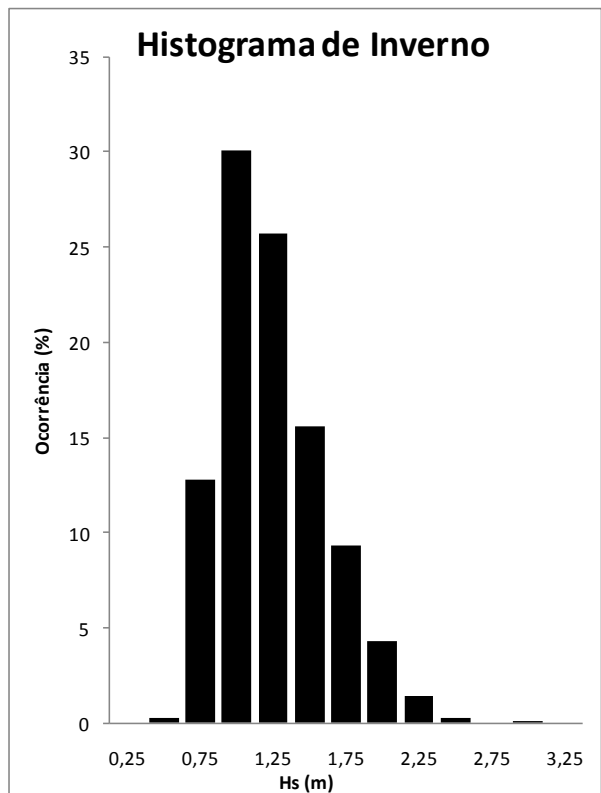
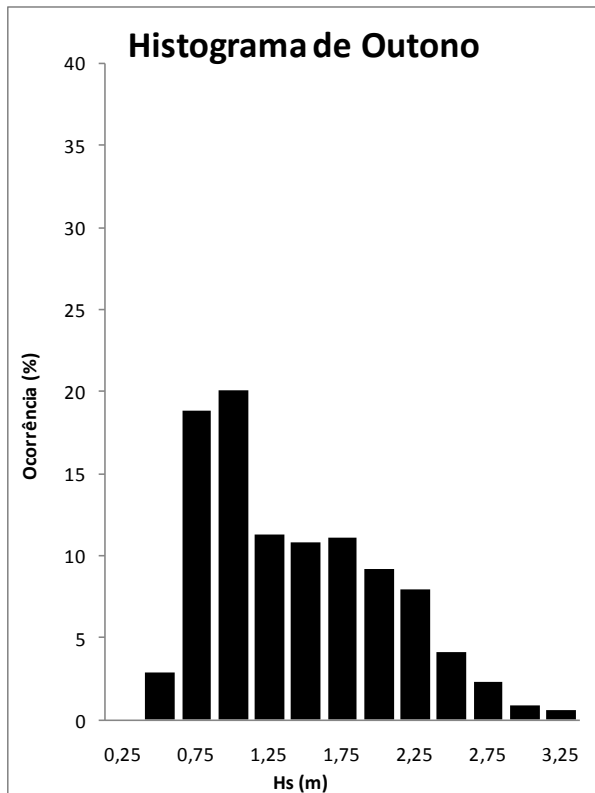
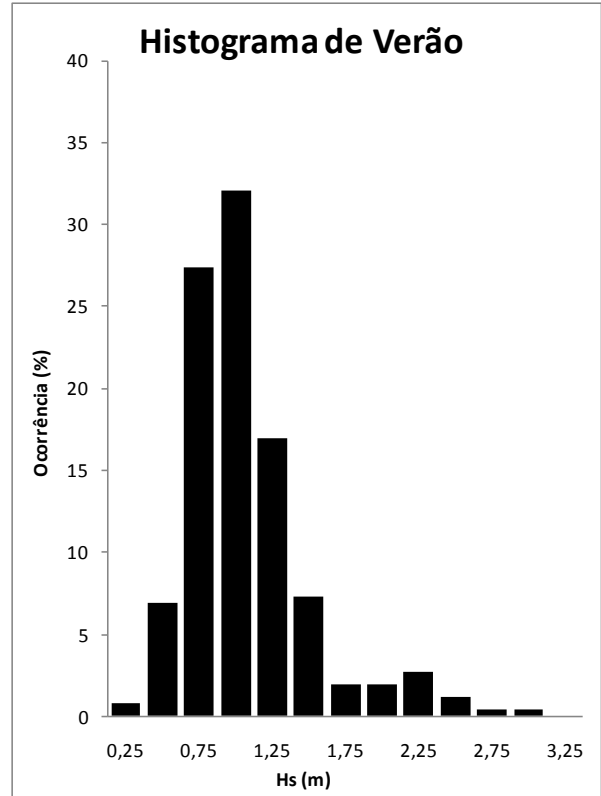
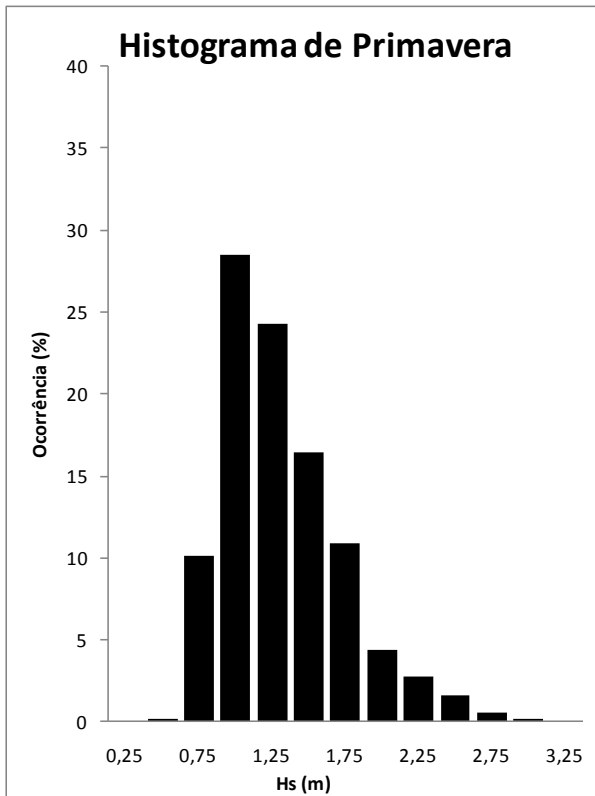


Figura 19 - Histogramas sazonal de altura significativa distribuído em classes de H_s de acordo com a frequência registrada a 18 m de profundidade.

5.2.1. Características sazonais dos estados de mar

Os estados de mar do tipo vagas corresponderam a 62,76% a 30 m, e de 64,82% aos 18 m. A frequência medida dos estados de *swell* ($T_p \geq 10s$) foi de 37,24% e 35,18% a 30 m e 18 m, respectivamente. A temporada com a maior frequência de *swell* foi o outono. Nas Tabela 6 e Tabela 7 estão apresentadas as frequências dos estados de vagas e *swell* por temporadas medidos aos 30 m e aos 18 m, respectivamente.

Tabela 6 - Características dos estados de mar sazonais identificados a 30 m na plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

Estados de Mar a 30 m	Primavera	Verão	Outono	Inverno
<i>Swell</i>	39,19 %	25,24 %	43,17%	36,03%
Vagas	60,81%	74,76%	56,83%	63,97%

Tabela 7 - Características dos estados de mar sazonais identificados a 18 m na plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

Estados de Mar a 18 m	Primavera	Verão	Outono	Inverno
<i>Swell</i>	36,03%	14,33%	40,08%	38,94%
Vagas	63,97%	85,67%	59,92%	61,06%

Dos parâmetros de ondas (T_p , H_s e ϕ_p) correlacionados através das tabelas bivariadas, apresentadas nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22 (para os dados de ondas a 30 m) e nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25 (para os dados a 18 m) a seguir, foram identificados e caracterizados os estados de mar nas duas profundidades estudadas. As características de estados de mar com os valores modais identificados estão resumidas na Tabela 8 (para os dados medidos a 30 m) e Tabela 9 (para os dados medidos a 18 m).

Tabela 8 - Características dos estados de mar identificados com dados de ondas medidos a 30m na plataforma interna rasa do Paraná.

S4 30m Temporada	Vagas (SEA)			SWELL		
	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)
Primavera	ESE-SE	1,25 - 1,75	8 - 9	SSE	1,5 - 2	11 - 13
Verão	ESE	1,25 - 1,5	8
Outono	ESE	1	8	SE	1,75 - 2,25	10 - 12
Inverno	ESE	1,5	7 - 8	SSE	1,25 - 1,75	11 - 12

Tabela 9 - Características dos estados de mar identificados com os dados medidos a 18m na plataforma interna rasa do Paraná.

S4 18m Temporada	Vagas (SEA)			SWELL		
	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)	\varnothing_p	Hs (m)	Tp (s)
Primavera	SE	1 - 1,25	8 - 9	SSE	1 - 1,75	11 - 12
Verão	SE - SSE	0,75 - 1	7 - 8
Outono	SSE	0,75 - 1,5	8 - 9	SSE - S	1,75 - 2,25	10 - 11
Inverno	ESE - S	1 - 1,5	7 - 9	SSE	1 - 1,25	10

Em geral, a 30 m, a direção de vagas mais freqüente foi ESE e de *swell* SSE e SE (Tabela 8). Os valores de H_s para vagas são menores no outono que em outras temporadas, porém, foi nesta temporada onde foram medidos os maiores valores de H_s para os estados de *swell*. A primavera foi a temporada que apresentou os estados de *swell* com os maiores valores de T_p medidos a 30 m. No verão, apesar de serem medidos estados de *swell*, estes não apresentaram freqüências significativas para haver uma caracterização adequada.

Nos estados de vagas, identificados a 18 m, houve uma significativa variação modal na direção de propagação de ondas e classes de H_s entre as temporadas (Tabela 9). A direção de propagação de *swell* foi significativamente semelhante entre as temporadas, porém com valores de H_s maiores na temporada de outono.

Na temporada de verão houve a incidência de baixa freqüência de estados de *swell* em comparação com as outras temporadas. Com isso, a partir dos histogramas bivariados, não foi possível encontrar valores que puderam caracterizar os estados

de *swell* na temporada de verão. Cabe ressaltar que há incidência de estados de *swell* (alta energia de ondas) e ondas extremas no verão (Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19), porém sem um padrão característico que pudesse ser identificado.

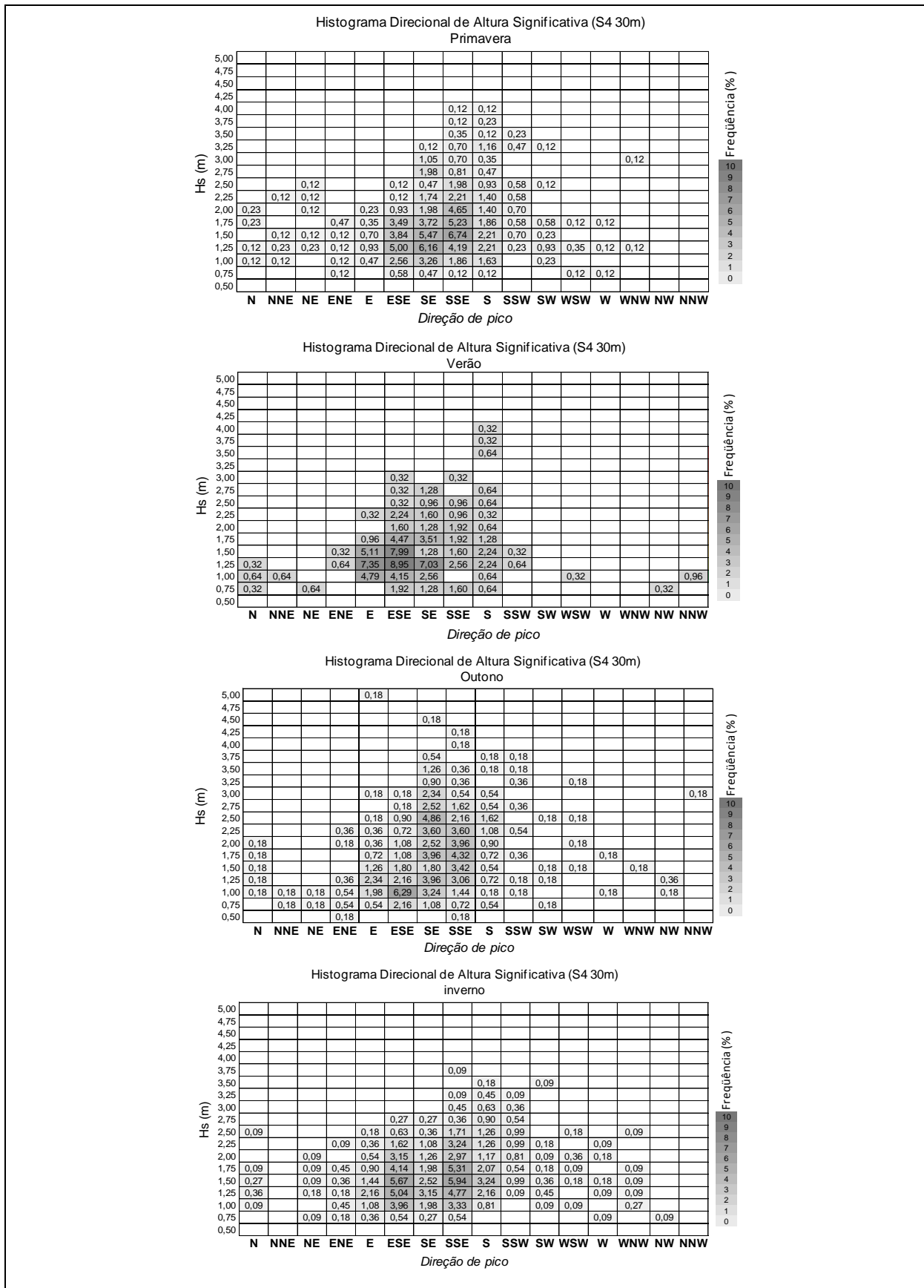


Figura 21 - Histogramas sazonal bivariados de H_s x Direção de pico de onda a 30 m de profundidade, com base na hipótese de espectro direcional de um único pico.

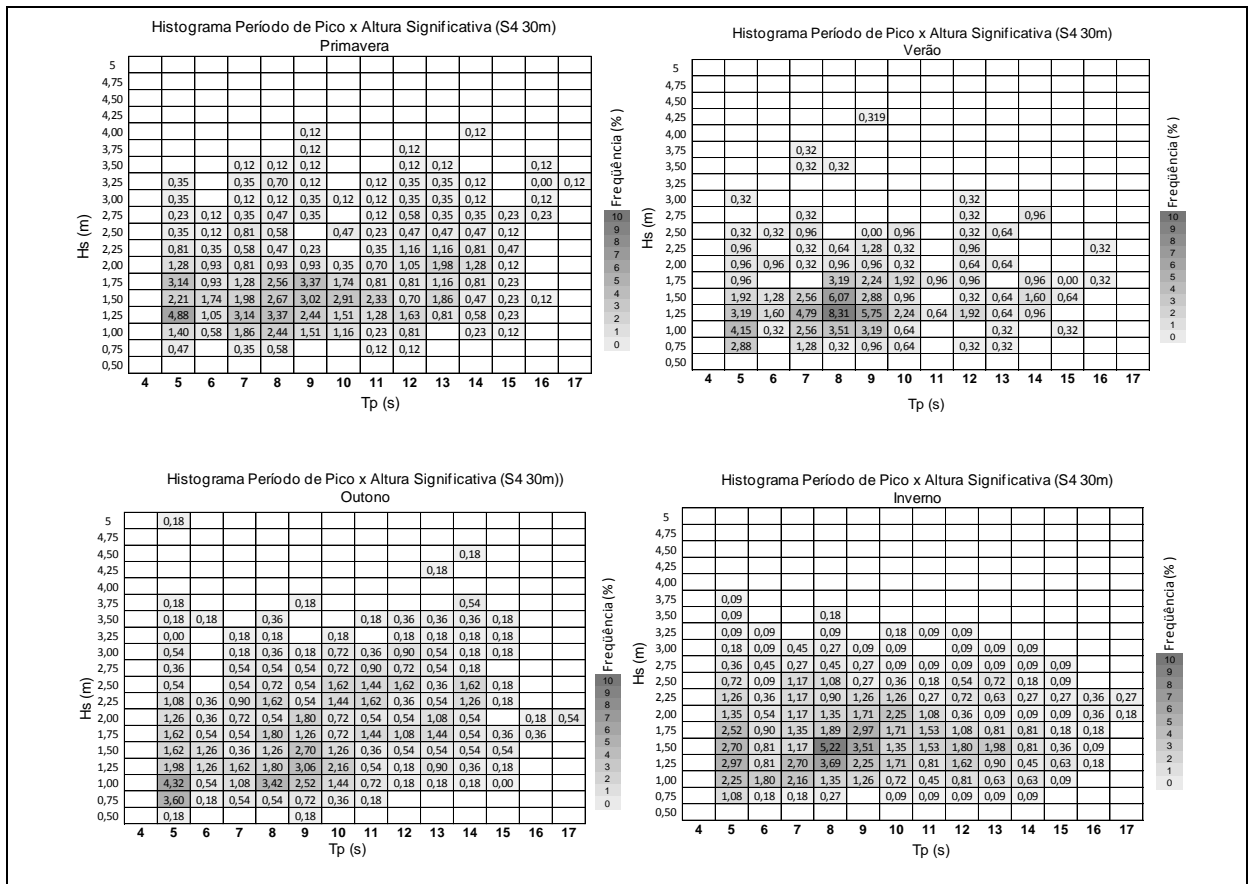


Figura 22 - Histogramas sazonal bivariados de H_s x T_p de onda a 30 m de profundidade, com base na hipótese de espectro direcional de um único pico.

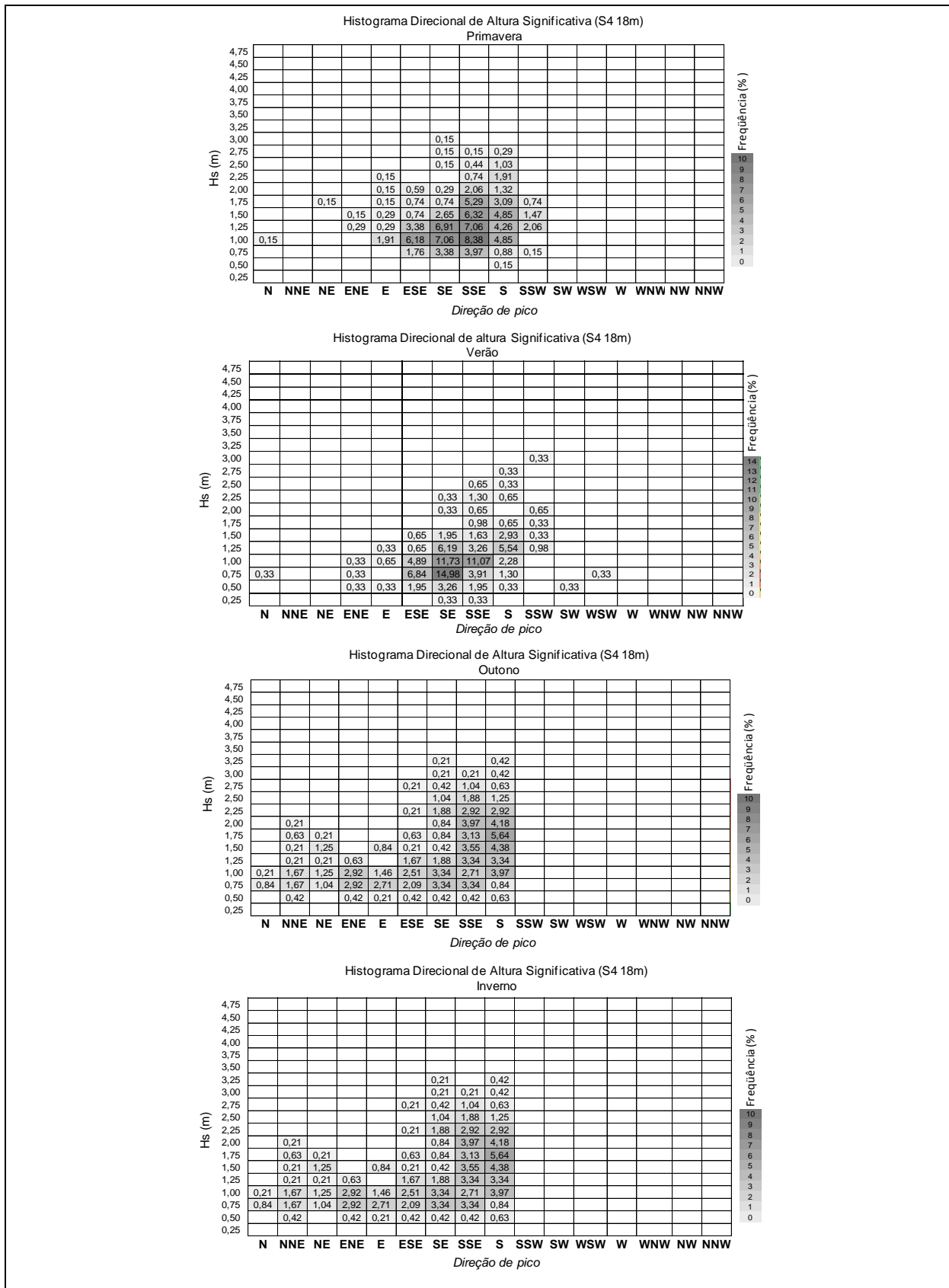


Figura 24 - Histogramas sazonal bivariados de H_s x Direção de pico de onda a 18 m de profundidade, com base na hipótese de espectro direcional de um único pico.

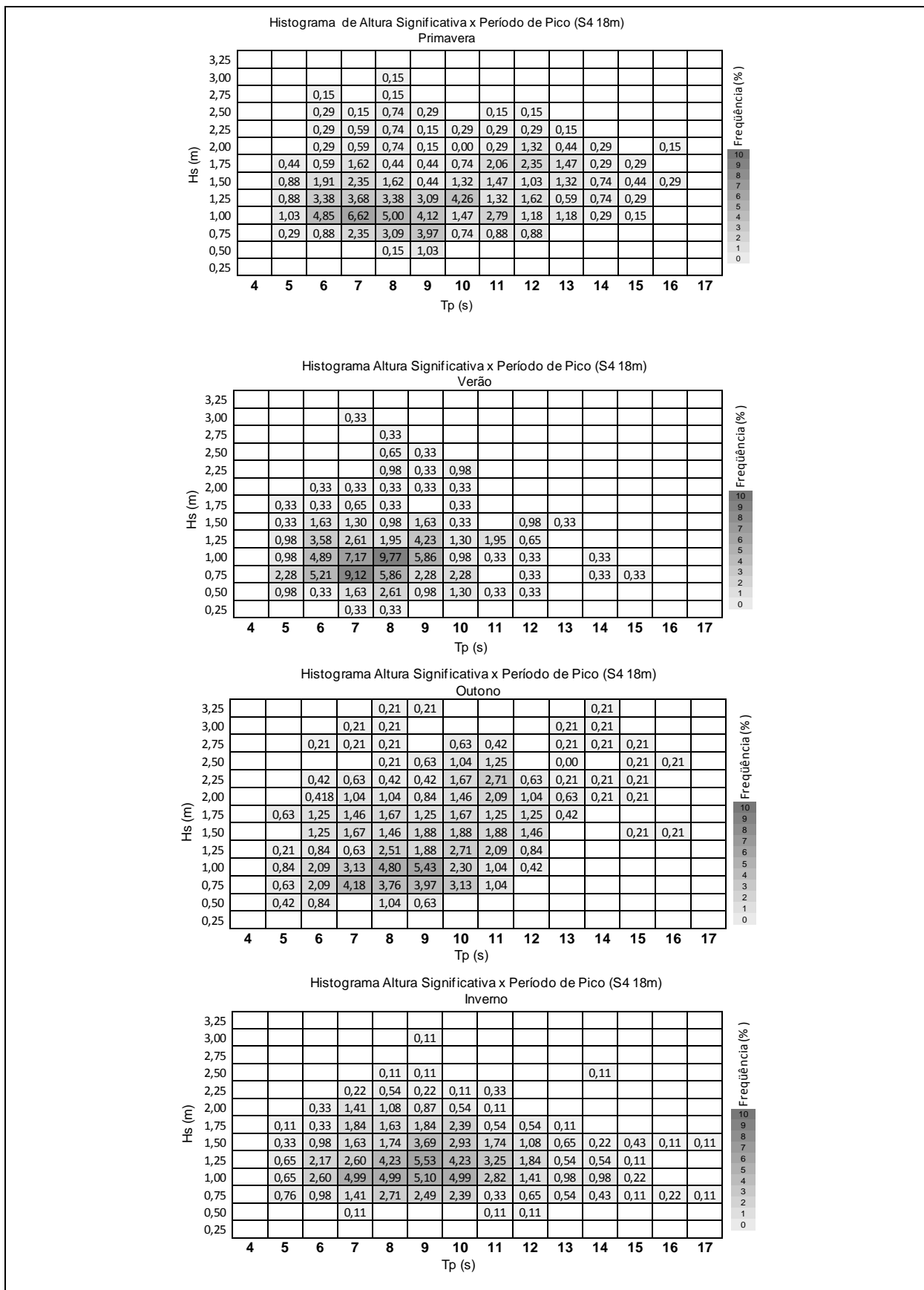


Figura 25 – Histogramas sazonal bivariados de H_s x T_p de onda a 18 m de profundidade, com base na hipótese de espectro direcional de um único pico.

5.2.2. Origem dos principais estados de mar

As origens de estados de mar do tipo vagas ocorreram nas zonas de instabilidade meteorológica entre os paralelos 23°S e 31°S até o meridiano 42° W. As pistas de ventos foram formadas por ciclones subtropicais, frente fria e alta (anticiclone) pós-frontal, sendo que a predominância foi variável sazonalmente. As características da gênese das pistas de ventos de cada fenômeno foram:

a) Frente fria: o posicionamento do gradiente de pressão gerou eventos extremos de ondas (11,82%, direção S) quando as isóbaras permaneceram aproximadamente paralelas ao meridiano 49°W a 46°W e, acima do paralelo de 31° S, sobre a região da plataforma continental e o talude sul do Brasil. Esta característica identificada de frente fria favoreceu a formação dos estados de mar do tipo vagas (referente aos dados originais medidos) com direções de ondas SSW, S, SSE e SE, registradas a 30 m e 18 m;

b) Ciclones subtropicais: ao se deslocar de 55°W/30°S ou 50°W/25°S em direção ao oceano profundo, as pistas de ventos formadas estavam a menos de 1000 km da área de registro de ondas, o que foi favorável aos registros de ondas do tipo vagas (para os dados originais) e eventos extremos do tipo vagas;

c) Anticiclones pós frontais: quando estacionários a sudeste do Paraná (aproximadamente 40°W e 35°S) (Figura 26) foram importantes para a formação de pistas de ventos entre 24°S e 29°S. As pistas de ventos foram geralmente com baixa intensidade de velocidade dos ventos, e localizaram-se sobre a plataforma e talude do arco Cabo Frio-RJ e Cabo de Santa Marta-SC, portanto a E e ENE da linha de costa paranaense. As direções dos ventos destas pistas foram de direção NEE dependendo da velocidade de deslocamento e tamanho do centro de alta pressão;

d) Ciclones extratropicais ao sul de 40° S: a passagem destes sistemas abaixo do paralelo 40° S (Figura 27), com deslocamentos W para E e SW para NE associados em sotavento com um anticiclone migratório, contribuíram de maneira pouco significativa (7,73%) para a formação de estados de *swell* possíveis de serem registrados no Estado do Paraná, em relação aos outros fenômenos meteorológicos descritos (Tabela 10).

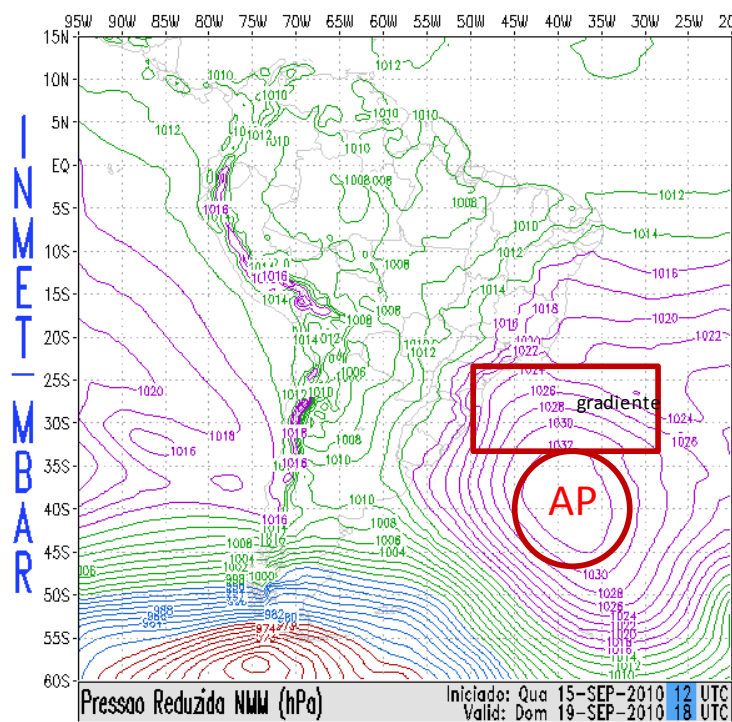


Figura 26 - Carta sinótica para o dia 19/09/2010, exemplificando anticiclones pós-frentes estacionários em 40°W e 35°S, formando gradientes próximo à costa, ao norte de seu centro.

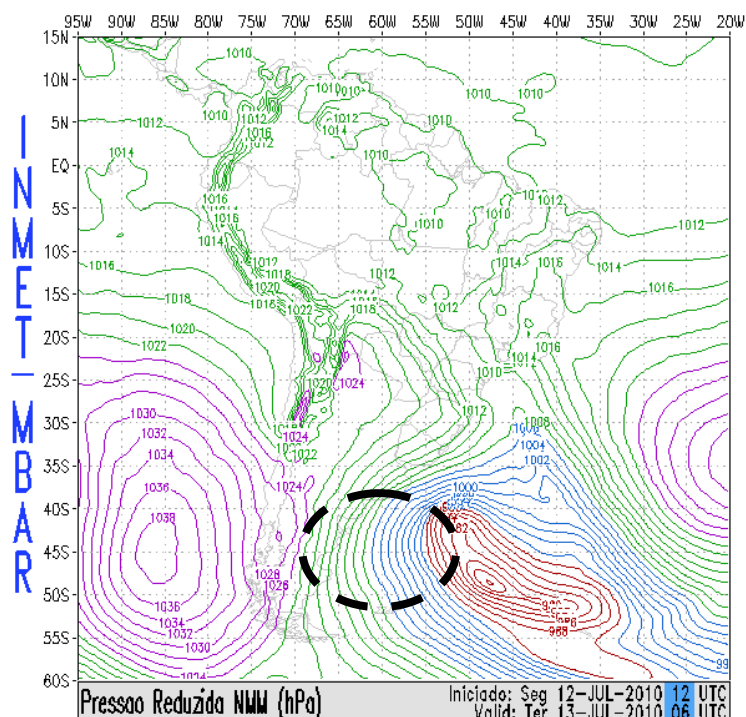


Figura 27 - Carta sinótica para o dia 13/06/2010, exemplificando o deslocamento W-E de ciclones subtropicais abaixo da latitude 40°S e, em detalhe com círculo tracejado, o gradiente do ciclone extratropical monitorado no estudo.

A gênese dos ciclones subtropicais, identificada na escala temporal do presente estudo, possuiu as seguintes características:

- a) Depressões (baixas pressões) atmosféricas formadas em torno de 30°S / 55°W e em 25°S / 50°W (Figura 28);
- b) Deslocamento ESE e SE do ponto de origem acima descrito, acompanhadas por um anticiclone na região da Patagônia (Argentina), que se deslocou para E do continente, estacionando sempre sobre o oceano, ao S, SSE ou SE das depressões descritas acima;
- c) O gradiente de pressão, formado pelas depressões e anticiclones caracterizados acima, formaram pistas de ventos, a princípio, próximas à costa, justamente sobre a área da plataforma e talude do arco costeiro Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta (SC). Isto definiu 32,27% dos registros extremos com períodos inferiores a 10 s (vagas). Quando o gradiente de pressão se deslocou a mais de

1200 km do ponto de registro de ondas (a 30 m), em direção ao oceano profundo, as ondas medidas a 30 m foram caracterizadas com $T_p \geq 10$ s, correspondendo a 41% dos eventos extremos ($H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m).

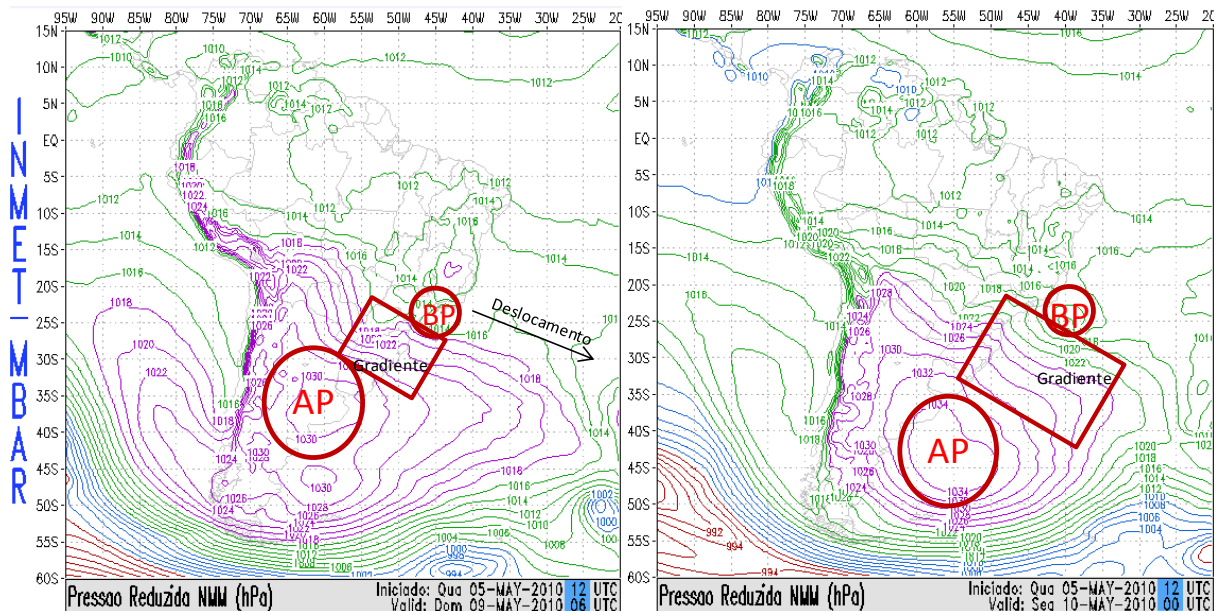


Figura 28 - Carta sinótica para os dias 09 e 10/05/2010, exemplificando as formações de baixas pressões atmosféricas em 45°W e 25°S, que se deslocaram para ESE e/ou SE do continente, acompanhadas por um anticiclone posicionado a sul ou sudoeste deste.

Foram medidos 221 dados de ondas cujos valores de altura máxima obtidos foram maiores ou iguais a 4 m ($H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m). Na escala temporal estudada, isto significou 84 dias (20,6 %) com eventos considerados (arbitrariamente por este estudo) extremos na plataforma interna rasa do Paraná, originados por ciclones subtropicais (73,63%) e na passagem se frente fria (18,18%); destes, os ciclones subtropicais corresponderam aos registros de ondas com valores mais elevados de densidade espectral em relação às frentes frias.

Entre os dois fenômenos descritos acima, os registros de propagação de ondas com valores de $H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m com direções SE (20%) e SSE (27,27%) foram originadas por ciclones subtropicais (Tabela 10). Para os registros extremos com propagação de ondas medida na direção S foi observado que 16,82% se originaram por ciclones subtropicais e 11,82% por frente fria.

Os eventos extremos registrados com T_p inferior a 10 s (dos dados com $H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m) corresponderam a 32,27% com origem em ciclones subtropicais, e de 21,36% originados por frente fria (Tabela 11). Já para os eventos extremos com T_p maior/igual a 10 s (*swell*) foram 100% originados por pistas de ventos formadas por ciclones subtropicais (Tabela 11).

Tabela 10 - Estatística da origem das direções de propagação de ondas medidas a 30 m na plataforma interna rasa do Paraná.

Fenômeno Meteorológico	Direção de pico														Frequência (%)			
	N	NNE	NE	NE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	SWW	W	WNW		NW	NWN	
Ciclone subtropical (25°S ou 35°S)					0,91	2,27	20,00	27,27	16,82	6,36								50
Frente fria							0,91	1,36	11,82	1,82	0,45	0,45					40	
Ciclone extratropical (>40°S)								0,45	1,82	5,00	0,45						30	
Alta pós frente																	20	
																	10	

Tabela 11 - Características de origem dos estados de mar a partir dos fenômenos meteorológicos monitorados sobre o Oceano Atlântico Sul ocidental.

Fenômeno Meteorológico	Período de pico (s)												Frequência (%)	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16
Ciclone Subtropical (25°S ou 35°S)	6,36	2,73	4,09	8,18	5,45	5,45	5,91	11,4	10	8,64	3,18	1,82	0,45	11
Frente fria	5,45	1,82	5,91	4,55	2,73	0,91								9
Ciclone extratropical (>40°S)	0,91	0,45	0,91	0,91	1,36									8
Alta pós frente	0,45													7
														6
														5
														4
														3
														2
														1

5.3. Monitoramento visual da oceanografia costeira

Desde janeiro de 2009 até dezembro de 2010 (2 anos) foram monitoradas as condições da oceanografia costeira do Balneário Grajaú. Foram identificados 8 dias com caráter extremo na praia do Balneário Grajaú (Tabela 12), de acordo com os valores propostos ($H_q \geq 4$ m). Nos principais eventos extremos, de 2009 (01/10/2009) e de 2010 (08/04/2010), o ponto de arrebentação foi identificado a cerca de 800 m distante da face praial.

Tabela 12 - Eventos com altura de quebra de ondas igual ou maior que 4 m registrados na praia do Balneário Grajaú entre janeiro de 2009 até o final dos trabalhos.

Data do evento	Altura de quebra (m)	Período (s)
01/10/2009	5	12,5
14/12/2009	4,5	14,1
15/12/2009	4	12,2
08/03/2010	4	13,8
08/04/2010	5	9,71
09/04/2010	4	13,21
13/05/2010	4	12,2
14/07/2010	4	13,3

Para compreender este fenômeno foram analisados a batimetria da ante-praia e zona de surfe do Balneário Grajaú (Figura 29). Isto possibilitou identificar as feições morfológicas e as características de quebra de ondas em cada local no Balneário Grajaú (Figura 30). As medidas das feições morfológicas e seus formatos apresentadas na Figura 30 são altamente variáveis com o clima de ondas incidentes, porém o padrão ilustrado pôde ser observado em todas as temporadas.

Na isóbata dos 8 m aos 6 m a ligeira diminuição da profundidade condicionou a quebra de ondas superiores a 4,5 m com características de quebra do tipo deslizante. Desta forma, uma terceira barra pode ser identificada e caracterizada na região centro norte do arco praial apresentado.

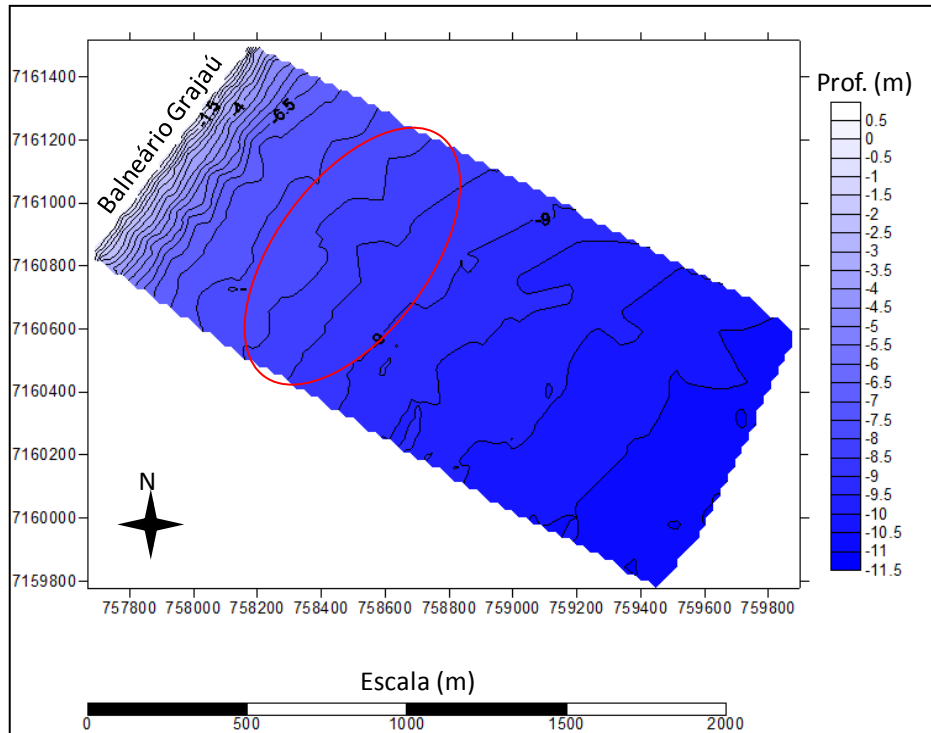


Figura 29 - Características batimétricas medidas na zona de surfe e ante-praia do Balneário Grajaú, com destaque circular às isóbatas onde foi identificado o ponto de arrebatção das ondas acima de 4,5 m, a aproximadamente 800 m da praia.

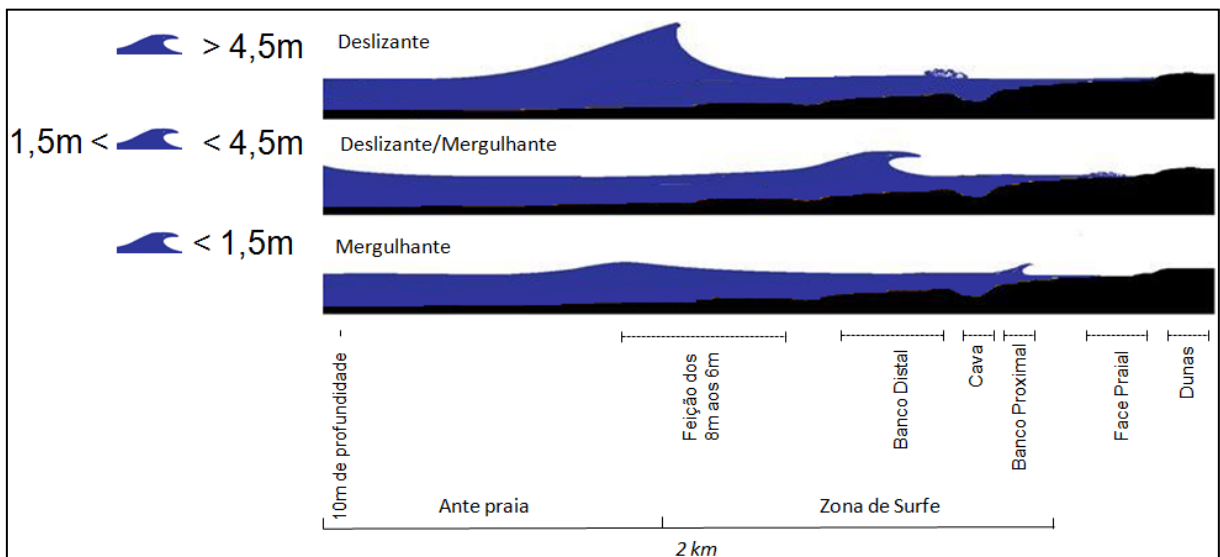


Figura 30 - Ilustração das feições morfológicas encontradas no Balneário Grajaú com as classes de alturas e tipo de quebra de ondas comumente observadas.

A direção da corrente longitudinal foi identificada com sentido de Norte para o Sul de intensidade fraca/moderada nos 8 dias extremos apresentado na Tabela 12. Como também, a corrente longitudinal de Norte para Sul foi observada com ondulações de direção: ESE, SE e SSE, sem a atuação de ventos fortes das direções SW, S e SSE. Porém, qualquer ondulação incidente com a ação de ventos moderados ou fortes de direção SW, SSW, S e/ou SSE próximo à costa (dentro da plataforma interna rasa do Paraná), a corrente longitudinal resultante foi de sentido de Sul para o Norte, com intensidade proporcional a velocidade do vento atuante. Tal corrente longitudinal (S para N) sempre foi observada na passagem de frente fria, cuja pista de ventos foram identificadas sobre a plataforma interna rasa paranaense.

A Figura 31 apresenta uma ilustração dos resultados médios obtidos das observações visuais do comportamento das correntes de retorno, no Balneário Grajaú, de acordo com a ondulação incidente. A orientação da linha de costa da Figura 31 é NE-SW. As setas maiores acima representam a incidência de ondas, que foi dividida em: a) incidência paralela à linha de costa, representado por ondulações com direção SSE e SE; b) incidência oblíqua a linha de costa, representado pelas ondulações ESE, E e ENE; c) incidência oblíqua a linha de costa, representada pelas ondulações do quadrante S. A inclinação do trem de ondas observado no Balneário Grajaú foi comparada a obtida dos dados do S4 a 18 m. Com isso, na Figura 31 está apresentado um resultado ilustrativo da chegada oblíqua do trem de ondas na costa (a inclinação do trem de ondas próximo à costa é ilustrativo) e as correntes geradas.

Ondulações registradas a 18m com direção SSE, SE, ESE, E e ENE resultaram em correntes de retorno levemente e/ou inclinadas para sul (Figura 31, a e b) no Balneário Grajaú. Já com a incidência das ondas com frente fria sobre a plataforma interna e/ou com ondulações com direção S as correntes de retorno responderam com inclinação para norte (Figura 31 c).

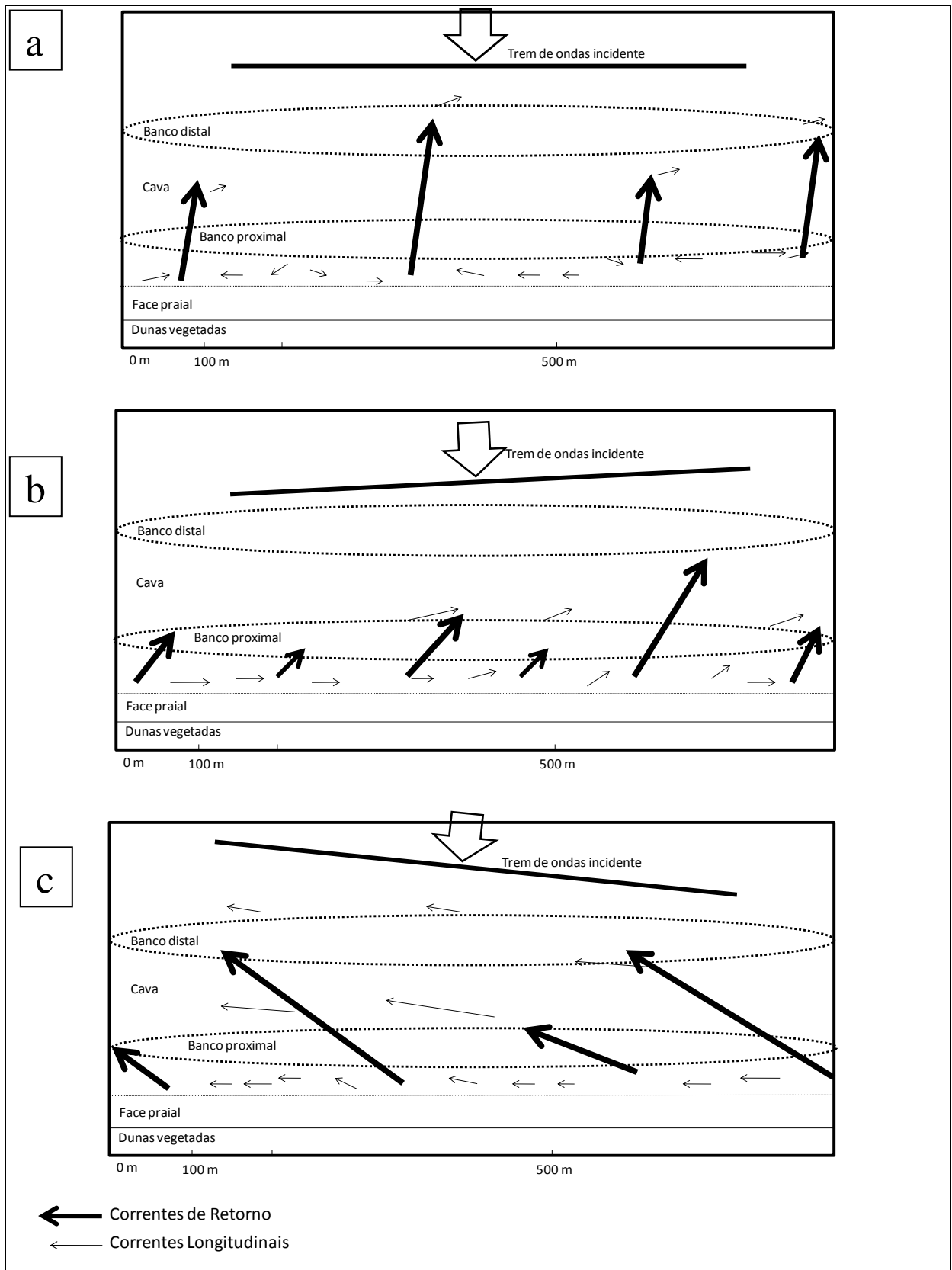


Figura 31 – Ilustração detalhada das correntes de retorno observadas no Balneário Grajaú de acordo com a incidência de ondas: a) paralela à linha de costa, as correntes foram levemente inclinadas para

sul; b) oblíqua E à linha de costa, as correntes foram inclinadas para sul; e c) oblíqua S à linha de costa, as correntes foram inclinadas para norte.

5.4. Características dos eventos extremos

A média de H_s dos eventos extremos medidos a 30 m (2,94 m) é significativamente maior em relação aos mesmos eventos medidos a 18 m (1,37 m) e observados na praia do Balneário Grajaú (2,28 m). Foi possível identificar duas características entre os eventos extremos (Figura 32): a) Direção SSE e SE apresentam maiores freqüências de valores de T_p acima de 10 s e estas ondulações foram identificadas com origens em ciclones subtropicais (*swell* extremo); b) As direções de ondulação S e SSW para os eventos extremos foram identificados com origens na passagem de frente fria sobre a plataforma continental sul brasileira e plataforma interna paranense, tendo características predominantes de formação próximos à costa (vagas).

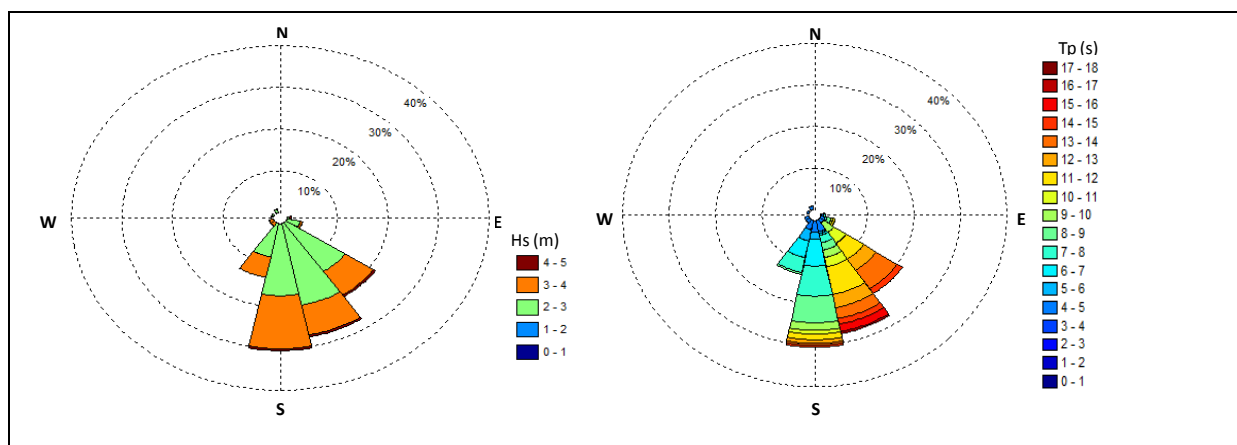


Figura 32 – Gráfico polar referente aos eventos extremos, de acordo com os valores propostos por Araújo *et al.* (2003), registrados a 30 m na plataforma interna rasa do Estado do Paraná.

Os espectros de ondas analisados são individuais, apresentados por cada segmento medido (18 min) aos 30 m e 18 m. Desta forma, os maiores valores observados de densidade do espectro de ondas medido pelo instrumento a 30 m e associados aos maiores valores de altura de quebra de ondas observados durante o estudo na praia do Balneário Grajaú foram os eventos do dia 01/10/2009 (Figura 33)

e do dia 08/04/2010 (Figura 34). Nestes momentos, os espectros no ponto de registro das ondas continham energia apenas em uma estreita faixa de frequência e de um setor de direção restrito, sendo determinados pelo fenômeno de dispersão direção e de frequências da pista de ventos. A energia observada nas Figuras Figura 33 e Figura 34 com o formato estreito do espectro de ondas é apenas uma fração da energia inicial do espectro mais amplo da tempestade.

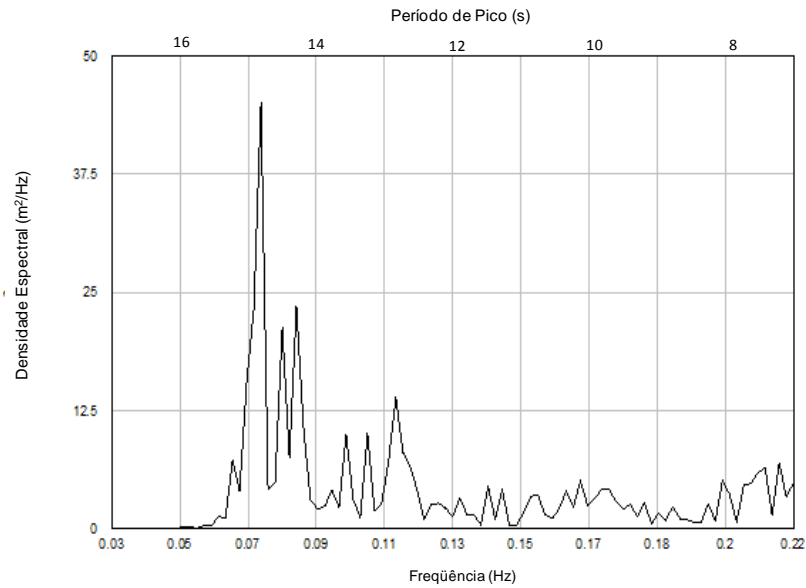


Figura 33 - Espectro de ondas medido a 30m durante o evento extremo de 2009.

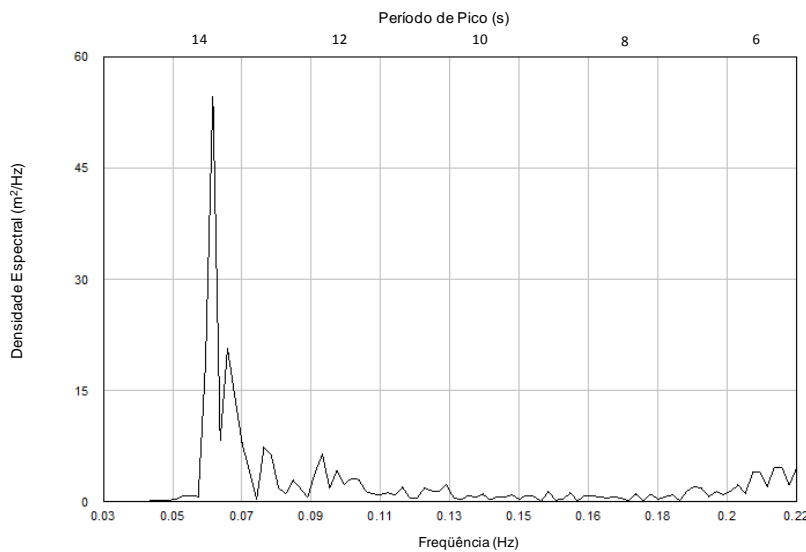


Figura 34 - Espectro de ondas medido a 30 m durante o evento extremo de 2010.

5.4.1. Evento extremo de 2009

No conjunto de gráficos da Figura 35 estão apresentados, ao longo de 5 dias, a evolução estatística das variáveis da pista de ventos, altura máxima de ondas, período de pico, a altura de quebra de ondas e período de onda referentes aos dados medidos a 30 m, as interpretações dos dados meteorológicos e aqueles observados no Balneário Grajaú.

Uma depressão formada em 30°S/50°W se deslocou a SE deste ponto chegando a 2000 km da costa em 3 dias. Durante o evento, a direção da pista de ventos variou de 130° a 180°, o gradiente de pressão atmosférico variou de 30 hPa a 24 hPa, o tamanho estimado da pista de ventos foi de 200 km a 170 km, a distância do ponto dos registros de ondas até a pista de ventos, chamada de não pista, foi de 0 a 2000 km em 4 dias. As alturas máximas de ondas registradas durante o evento nos fundeios a 30 m e 18 m foram, respectivamente, 6,07 m e 4,19 m. O período de pico máximo foi de 15,17 s em ambos fundeios. A quebra de ondas observada na praia do Balneário Grajaú foi de 4,5 m com período de 12,5 s no dia 01/10.

5.4.3. Evento extremo de 2010

No conjunto de gráficos da Figura 36 estão apresentados as variáveis da pista de ventos, altura máxima e período de pico dos fundeios, altura de quebra e período de onda numa evolução ao longo de 5 dias.

Uma depressão atmosférica formou-se em 25°S/45°W no dia 04/04 com pressão de 1012hPa, acoplado a um sistema frontal. O sistema de baixa pressão teve deslocamento SE, aumentando o gradiente de pressão com o anticiclone. No dia 05/04 a pista de ventos foi formada. A direção da pista de ventos variou de 145°, durante a formação, a 165°, quando perdeu energia. A variação do gradiente de pressão atmosférico foi de 25 hPa até 34hPa. O tamanho estimado da pista de

ventos chegou a 250 km. Não houve significativa distância entre os ventos da pista ao ponto de registro de ondas durante o evento. A maior altura de ondas já registrada na plataforma interna rasa do Estado do Paraná foi observada neste evento, com 7,72 m e 11,98 s de período de pico, no fundeio a 30 m e no dia 08/04. Para a mesma data, o registro de ondas obtido a 18m foi de 4,24 m e 9,71 s de período de pico. A altura de quebra de ondas observada na praia do Balneário Grajaú foi de 5 m e 10,4 s de período.

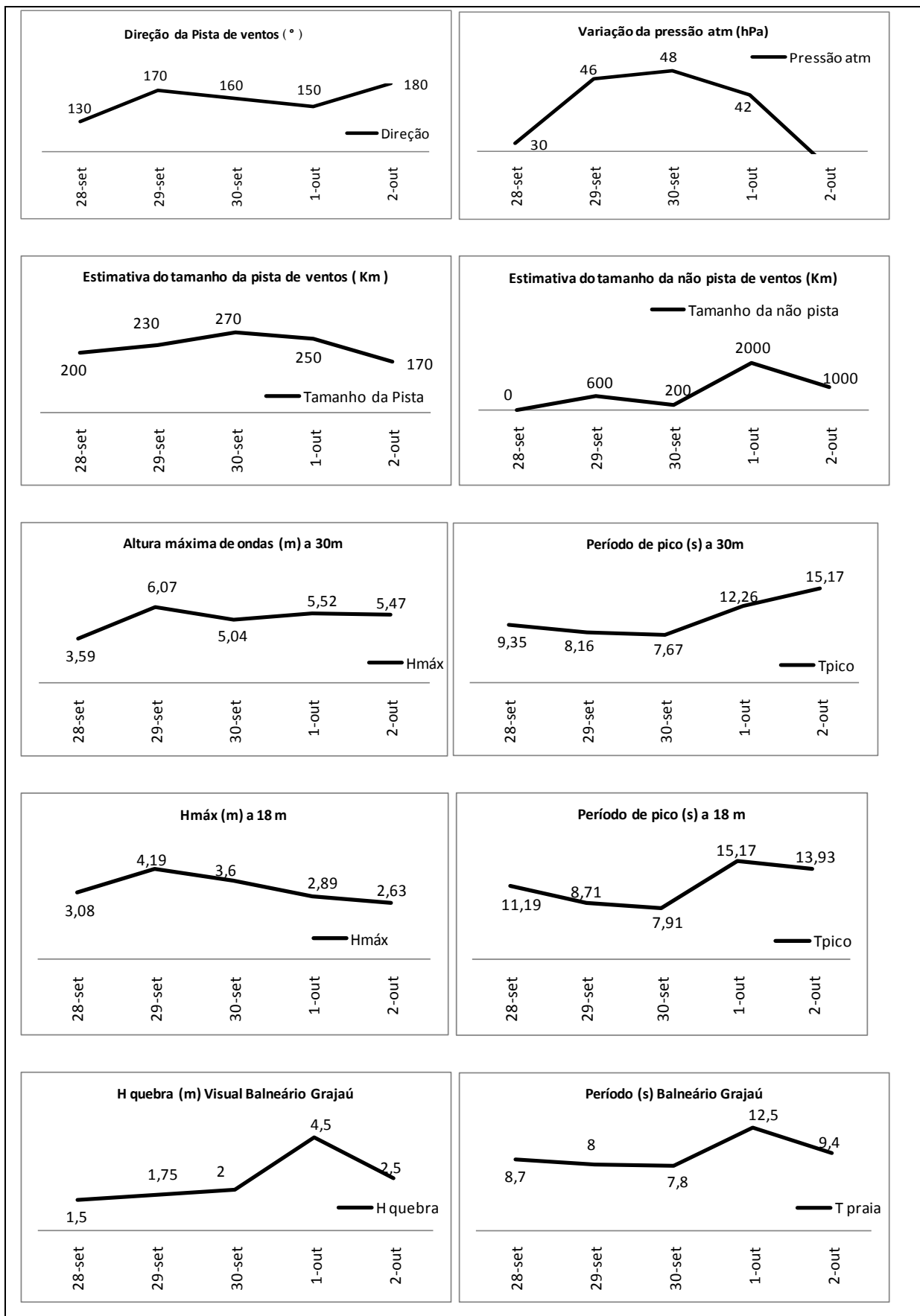


Figura 35 - Estatística do evento ocorrido entre 28/09 e 02/10/2009.

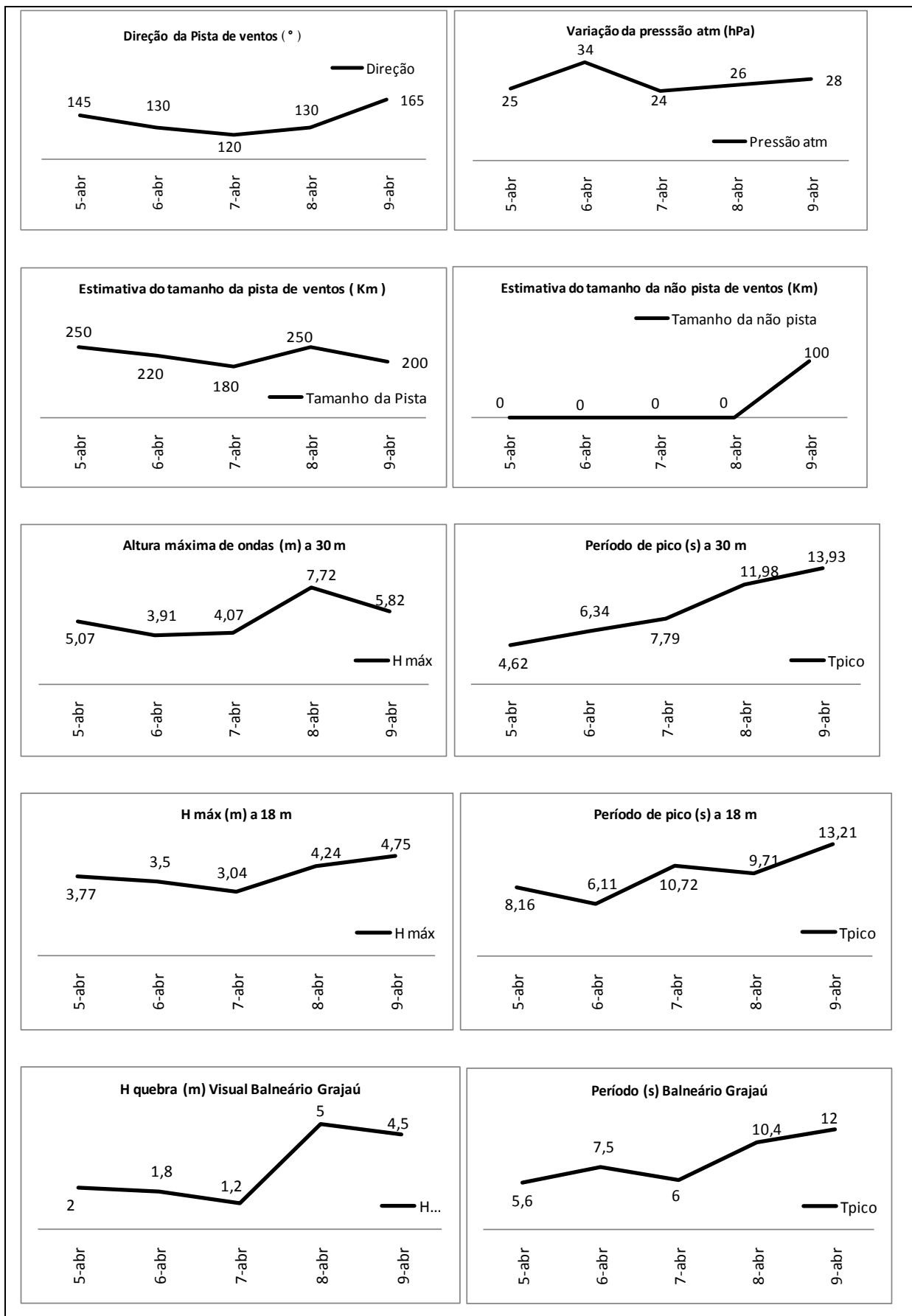


Figura 36 - Estatística do evento ocorrido entre 05 e 09/04/2010.

5.5. Simulação numérica de ondas - WWM

5.5.3. *Grade numérica e definição do domínio*

Para as simulações numéricas alguns procedimentos de pré-processamento são fundamentais. A geração da grade numérica (malha) sobre um determinado domínio e a interpolação dos dados batimétricos são de grande importância e determinantes para a qualidade dos resultados.

5.5.3.1. Definição do domínio

O primeiro procedimento adotado para construção da grade computacional é a definição dos limites externos do domínio a ser modelado. A área do domínio deve ter a dimensão suficiente para satisfazer os processos oceanográficos relacionados à área de interesse. Portanto, foi utilizado para a definição o levantamento batimétrico realizado pelo Grupo de Física Marinha e também a profundidade onde foram coletados os dados de onda (30 m). Este último foi determinante para a escolha do limite externo em direção ao mar aberto. A área do domínio possui comprimento de 35 km (paralelo à costa) e largura de 40 km (em direção a mar aberto) (Figura 37). Esta região foi definida com área de aproximadamente 1400 km². A área de interesse no domínio se localiza no arco praiado limitado pela Ponta de Pontal do Sul e a Ponta de Caiobá até a profundidade de 10 m (Figura 37). As duas elevações batimétricas que podem ser identificadas na Figura 37 no meio da plataforma interna rasa correspondem a Ilha de Currais (ao norte) e Itacolomis (ao Sul).

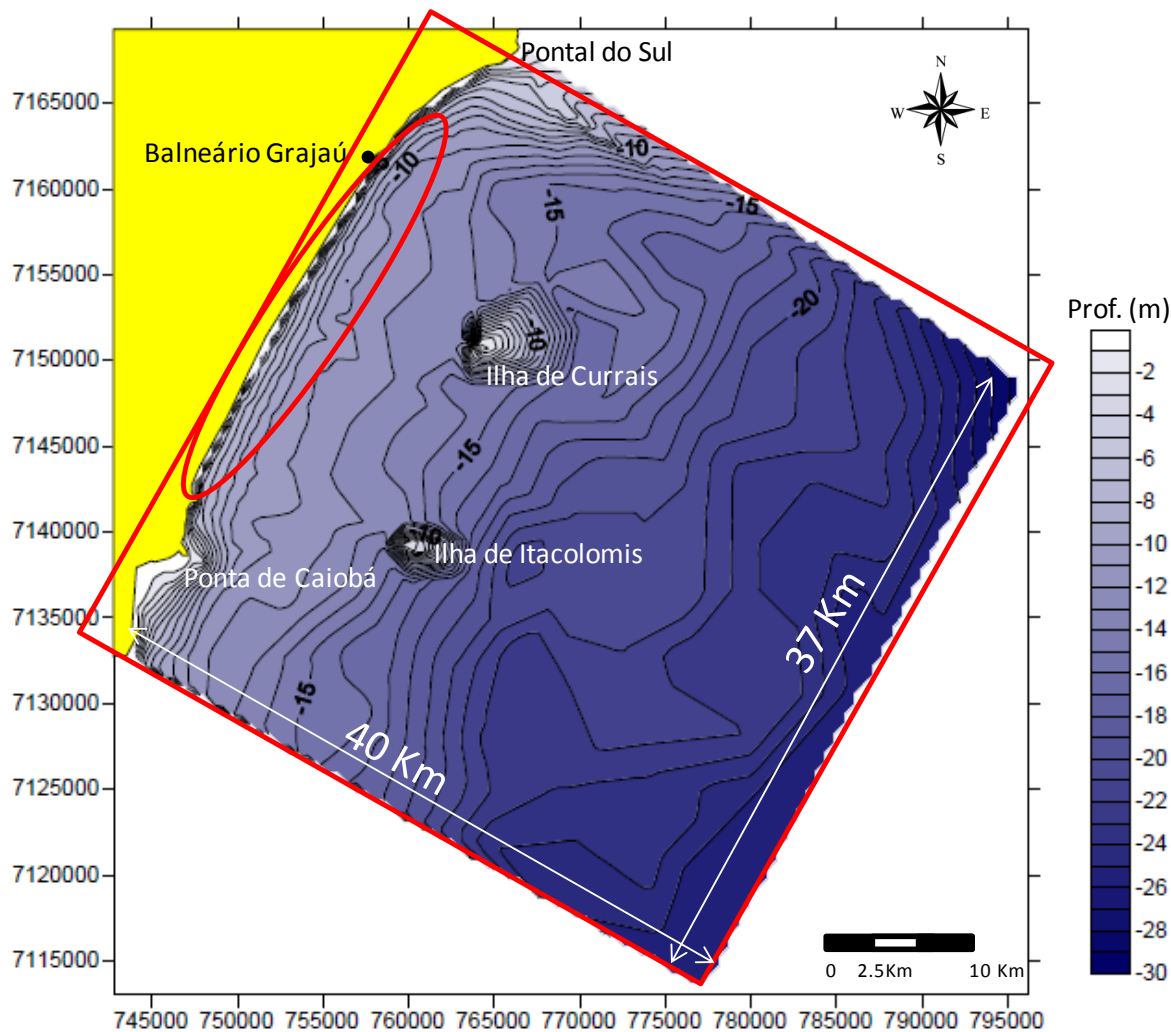


Figura 37 - Área do domínio extraída do levantamento batimétrico realizado pelo Grupo de Física Marinha. A área de interesse está representada pelo círculo próximo a costa.

5.5.3.2. Grade numérica

Após a grade numérica ser construída foram aplicadas técnicas de refinamento da malha na área de interesse. Isto é, obter melhor representatividade dos dados do modelo na área de interesse. O WWM utiliza grade de elementos finitos e a malha desestruturada foi construída com 20015 elementos e 10298 nós (Figura 38), onde o maior refinamento foi ao redor das ilhas e sobre os bancos submersos da zona de surfe.

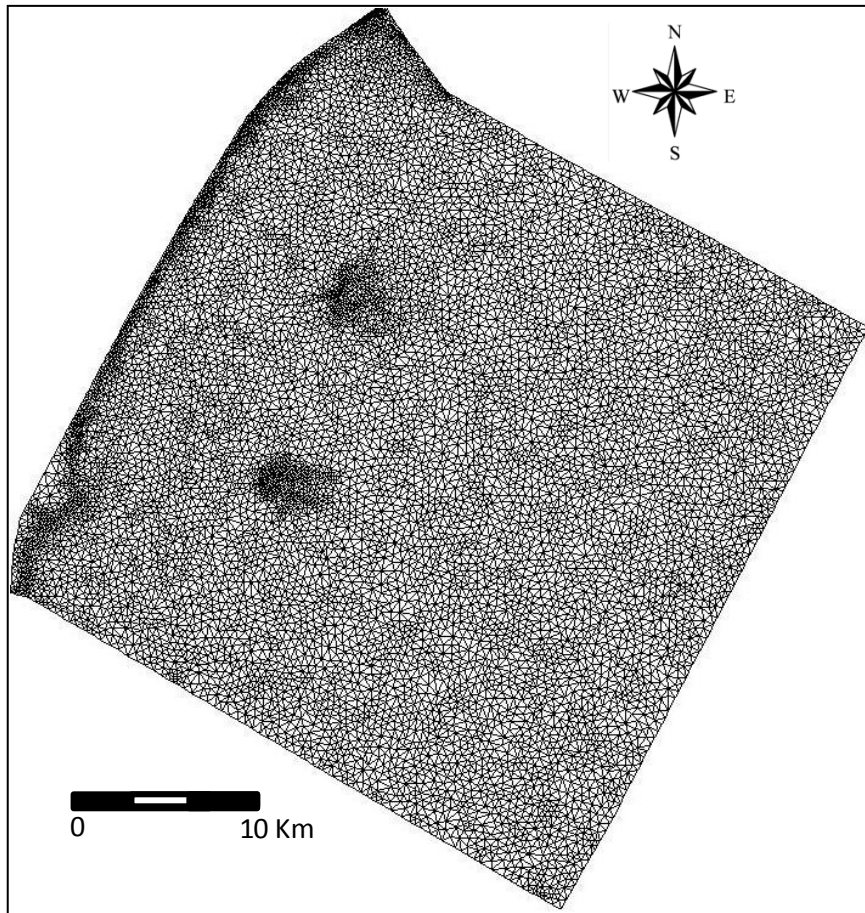


Figura 38 – Grade numérica elaborada para a área de estudo.

5.5.3.3. Interpolação com a batimetria

Finalmente, após os processos de refinamento da malha e correção das linhas da grade, a batimetria foi interpolada. O processo de interpolação foi realizado através do método de triangulação, com a definição de um polígono englobando todo o domínio. A Figura 39 apresenta a batimetria final na área de interesse após interpolação com a grade numérica.

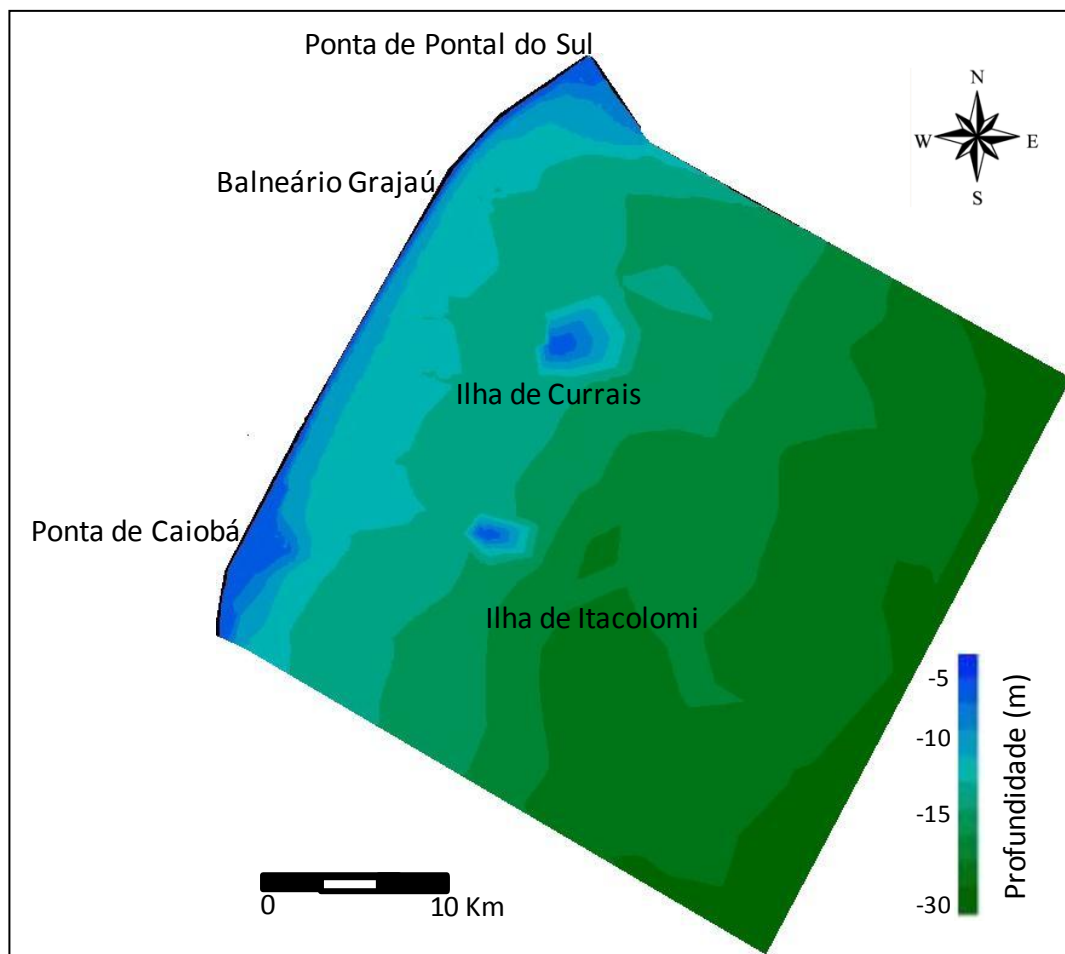


Figura 39 - Batimetria da área de estudo.

5.5.3.4. Condições de contorno

A qualidade dos resultados do modelo depende dos valores utilizados como condição de contorno e iniciais quando corresponder, sendo que, quanto mais corretamente estes valores representarem o fenômeno real, melhores serão os resultados produzidos. As condições de contorno são as forças geradoras do movimento dentro do modelo. A definição das condições de contorno no limite aberto determina a influência das condições hidrodinâmicas da área adjacente nos processos regentes dentro do domínio modelado.

A região central do litoral paranaense, Ponta de Pontal do Sul – Ponta de Caiobá (área de interesse) é uma praia aberta, desprotegida de ondulações de alta

energia provenientes das direções que formam um ângulo de aproximadamente 90° (entre ESE a S), identificadas no presente estudo. Como a questão a ser abordada não é geração de ondas pelo vento local, não foi utilizada nas simulações a forçante vento. Assim, o cenário utilizado nas simulações numéricas foi definido a partir das análises dos dados de ondas coletados pelo ondógrafo S4 fundeado a 30 m de profundidade. O limite aberto do domínio foi determinado na isóbata de 30 m, profundidade na qual foram coletados os dados de ondas. As simulações foram realizadas considerando o tempo total de 20 min, com um intervalo de discretização (*time step*) de 119 s. As correntes de maré foram negligenciadas neste caso, e o nível de água foi assumido constante em todo o domínio.

Desse modo, e a partir de testes e ajustes nas equações de propagação de ondas em águas rasas e dissipação pela quebra o modelo numérico de ondas foi calibrado para que apresente resultados apenas referentes à altura significativa de ondas e direção, juntamente com os processos físicos gerados por ondas em águas rasas.

As respostas obtidas para o período de onda (T_p) simulado com o WWM ainda não são representativas. Porém, novos testes e outras evoluções no esforço continuado do uso da ferramenta de modelagem numérica estão sendo realizadas. Equações das interações das ondas com o fundo marinho e processos físicos gerados por ondas na propagação em direção à costa estão sendo ajustados e validados para que permitam, de forma suficientemente quantitativas, representar a realidade.

5.5.4. Características da propagação de vagas na plataforma interna do Paraná

Os parâmetros de ondas selecionados para simular a propagação de vagas correspondem ao dia 05/03/2010, cujos valores foram: H_s 1,49 m; T_p 8,43 s e; \varnothing 119,77°. O espectro de ondas medido no momento selecionado está apresentado na

Figura 40, onde há a coexistência de campos de ondas de alta freqüência, dominadas por ventos próximos a costa.

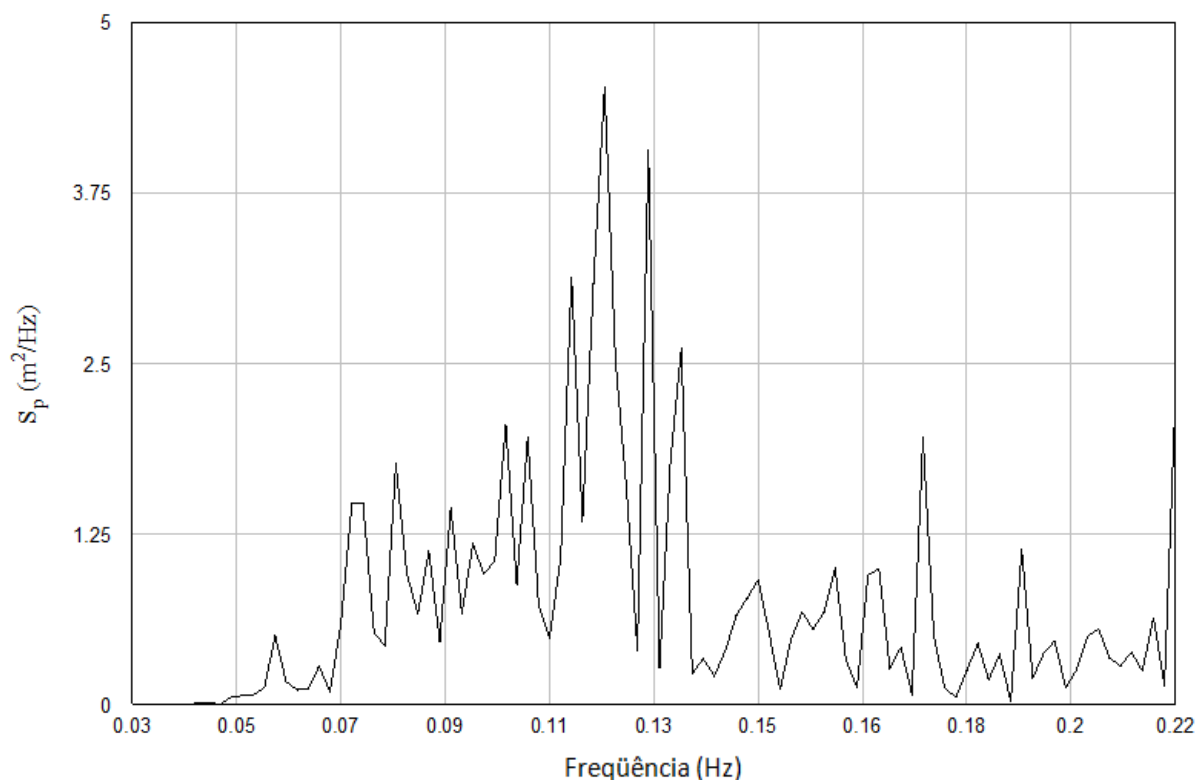


Figura 40 - Espectro de onda (S_p) medido a 30 m correspondente ao dia 05/03/201 e utilizado para simular a propagação de vagas na plataforma interna rasa do Paraná.

As análises dos gráficos representativos de altura de ondas na situação batimétrica da plataforma interna rasa do Paraná demonstraram que de acordo com que avançamos em direção à costa, os valores de altura de ondas diminuem (Figura 41). Proporção similar nos resultados medidos de propagação de ondas de 30 m aos 18 m.

No perfil Balneário Grajaú houve o decréscimo do valor de altura de ondas até 400 m da praia, onde o valor encontrado foi de 0,75 m (Figura 42). A partir daí, o valor aumentou para 0,95 m a 95 m da praia. Observando a profundidade do perfil 1, a uma distância de 95 m, se pode interpretar que o decréscimo da altura é devido à quebra de ondas sobre o banco proximal.

Na Figura 43 está apresentado o gráfico do perfil Ilha de Currais. A uma distância de 11,5 km há uma quebra acentuada na altura de ondas (Figura 43) e diminuição da profundidade determinado pelas isóbatas da ilha de Currais. Observando o gráfico do perfil 2, na Figura 43, a uma distância de 1800 m da Ilha de Currais há o aumento do valor de altura da onda até a distância de 400 m da Ilha, onde apresenta um valor de 1,35 m, e o decréscimo acentuado. Ao observar o gráfico de profundidade foi possível interpretar que aquele decréscimo da altura da onda foi provocado pela diminuição da profundidade ao redor da Ilha de Currais, caracterizando a quebra da onda (Figura 43).

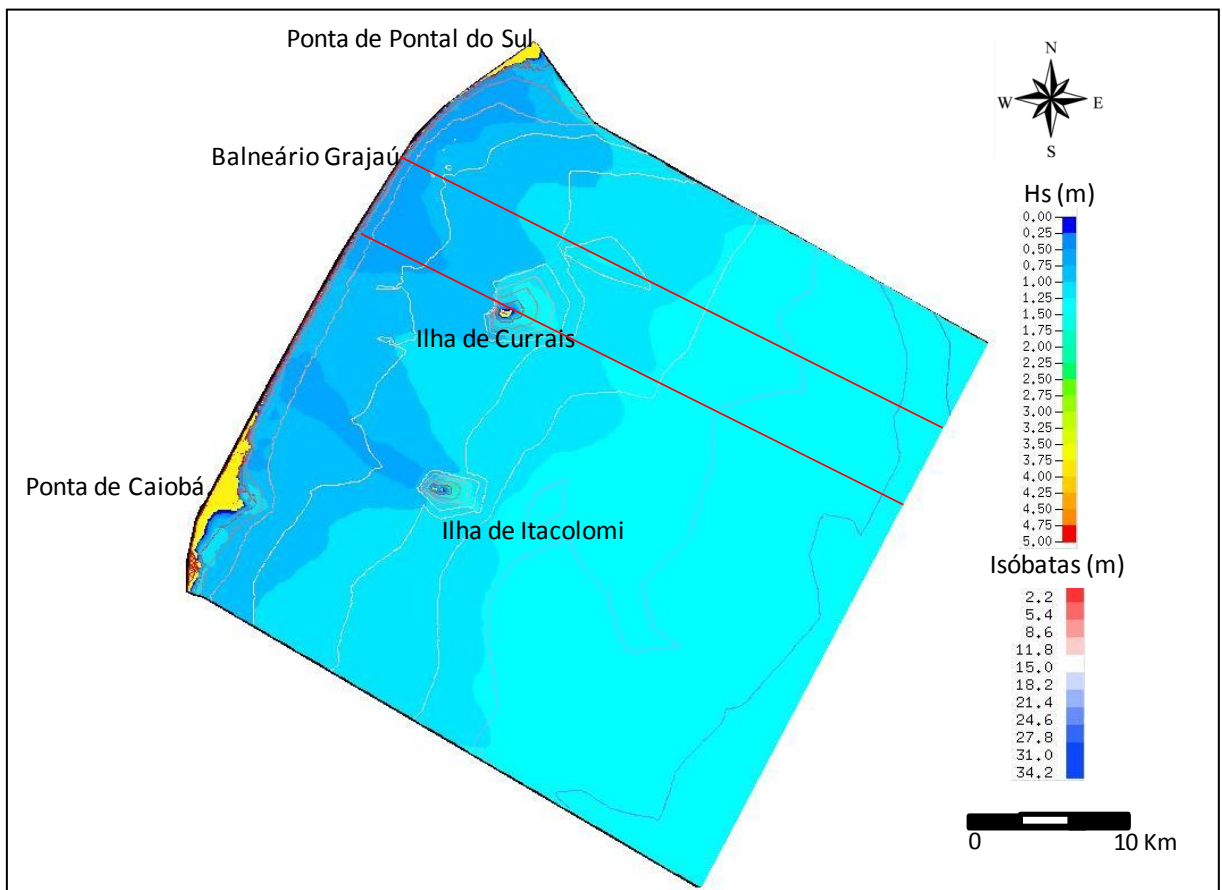


Figura 41 – Diagrama da propagação de um estado de mar do tipo vaga na região central o litoral do Estado do Paraná, representado pelo modelo de ondas WWM.

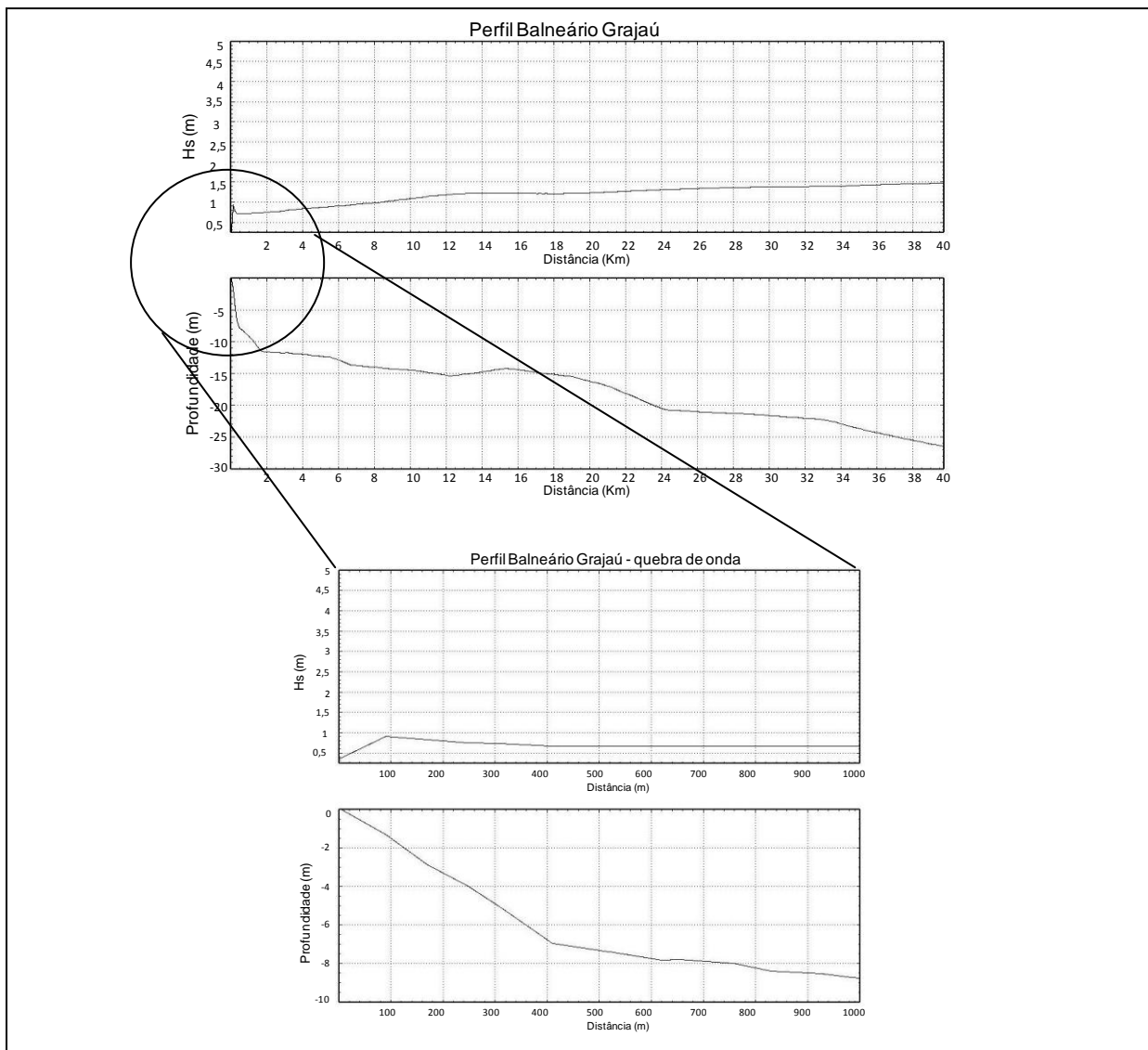


Figura 42 - Perfil correspondente ao transecto realizado do Balneário Grajaú até a condição de contorno externo, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 1000 m da praia.

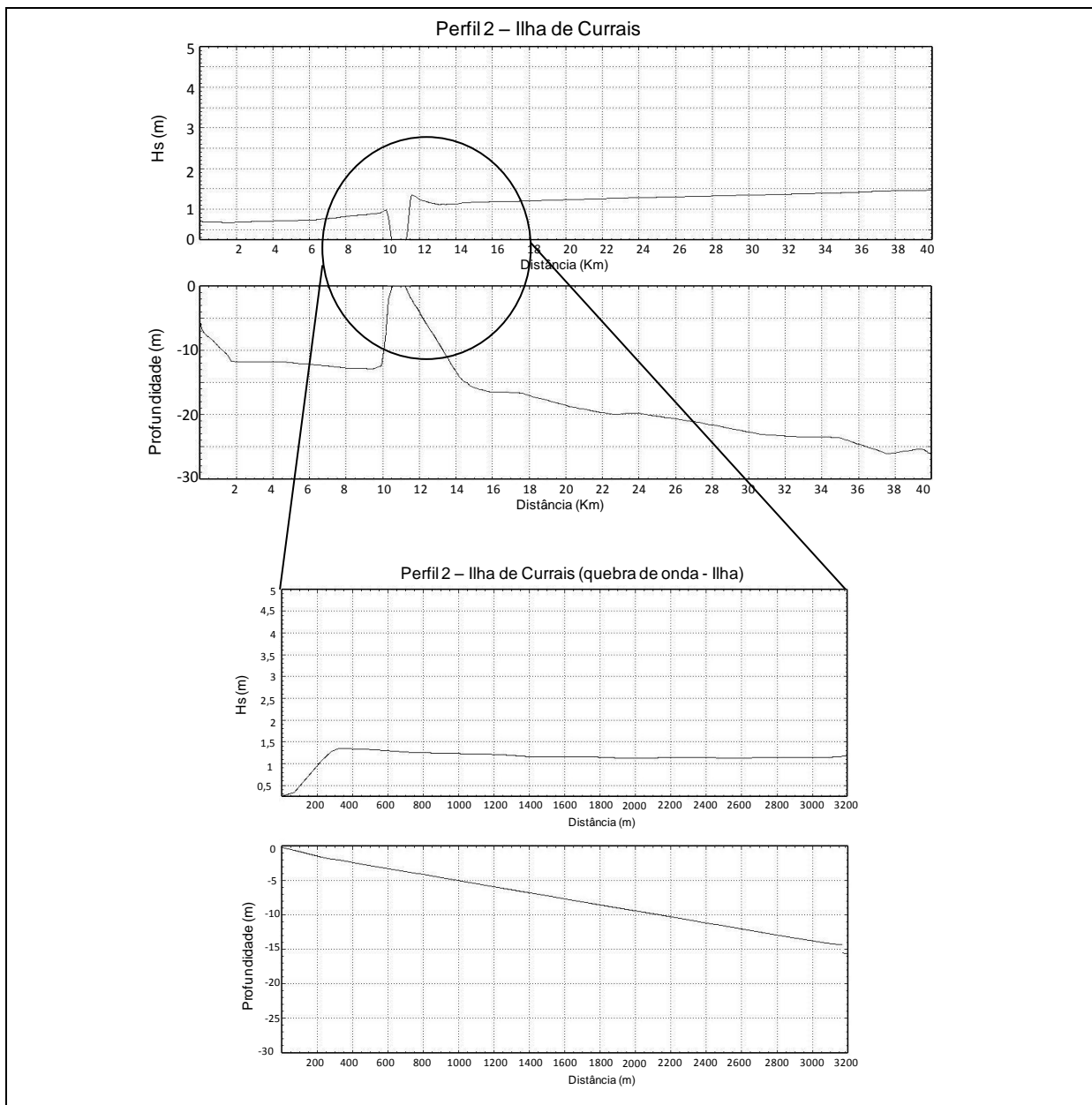


Figura 43 – Perfil correspondente ao transecto realizado da linha de costa até a condição de contorno externo, passando sobre a Ilha de Currais, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 3200 m da Ilha de Currais.

5.5.4.1. Propagação do trem de ondas do estado de vaga

Analisando o diagrama vetorial (Figura 44) é possível identificar que há convergência dos vetores de direção de ondas nas isóbatas da Ilha de Currais e da

Ilha de Itacolomi. Nestas duas ilhas o trem de ondas sofre o processo de difração e a batimetria é reorientada em função destes processos. Desse modo, o trem de ondas converge nos contornos batimétricos da Ilha de Currais (ao sul) e sobre os deltas de maré (ao norte). Entre estas duas feições, região mais profunda (ver Figura 37), ocorre divergência do trem de ondas, o que leva a incidência mais próxima á costa de classes de ondas com valores ligeiramente maiores que os adjacentes.

Em detalhe (Figura 44) é possível identificar que sobre os deltas de maré (região norte da área do domínio) os vetores direcionais das ondas incidentes são oblíquos à batimetria. Não foi identificada a diminuição das classes de alturas de ondas sobre esta feição morfológica, o que permite interpretar que para estados de vagas a dissipação pela quebra pode ou não estar presente sobre os deltas.

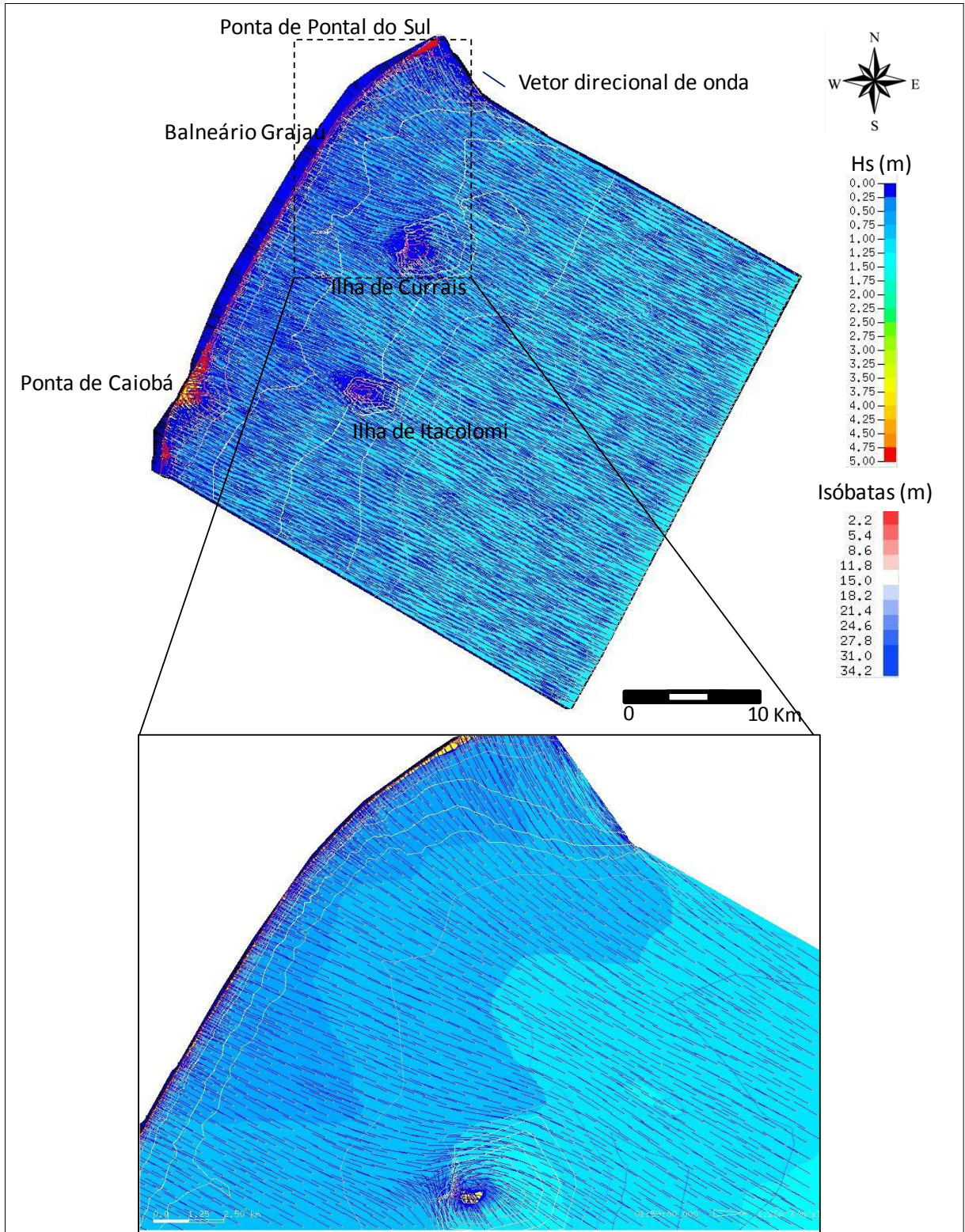


Figura 44 - Diagrama da propagação de ondas na Plataforma Interna rasa do Paraná representado pelo modelo WWM com vetores sobre a batimetria da área.

5.5.5. Características de propagação de *swell* na plataforma interna do Paraná

Para simular o estado de *swell* foram selecionados os parâmetros de ondas do dia 16/12/2009, cujos valores medidos a 30 m foram: H_s 1,55 m; T_p 10,95 s e; θ 157,39°. O espectro de ondas medido durante o evento está apresentado na Figura 45, onde é possível identificar um pico estreito de frequência e densidade relativamente baixa e alta, respectivamente. Isto significa o domínio de um estado de *swell* sobre o estado de mar originado por ventos próximo a costa.

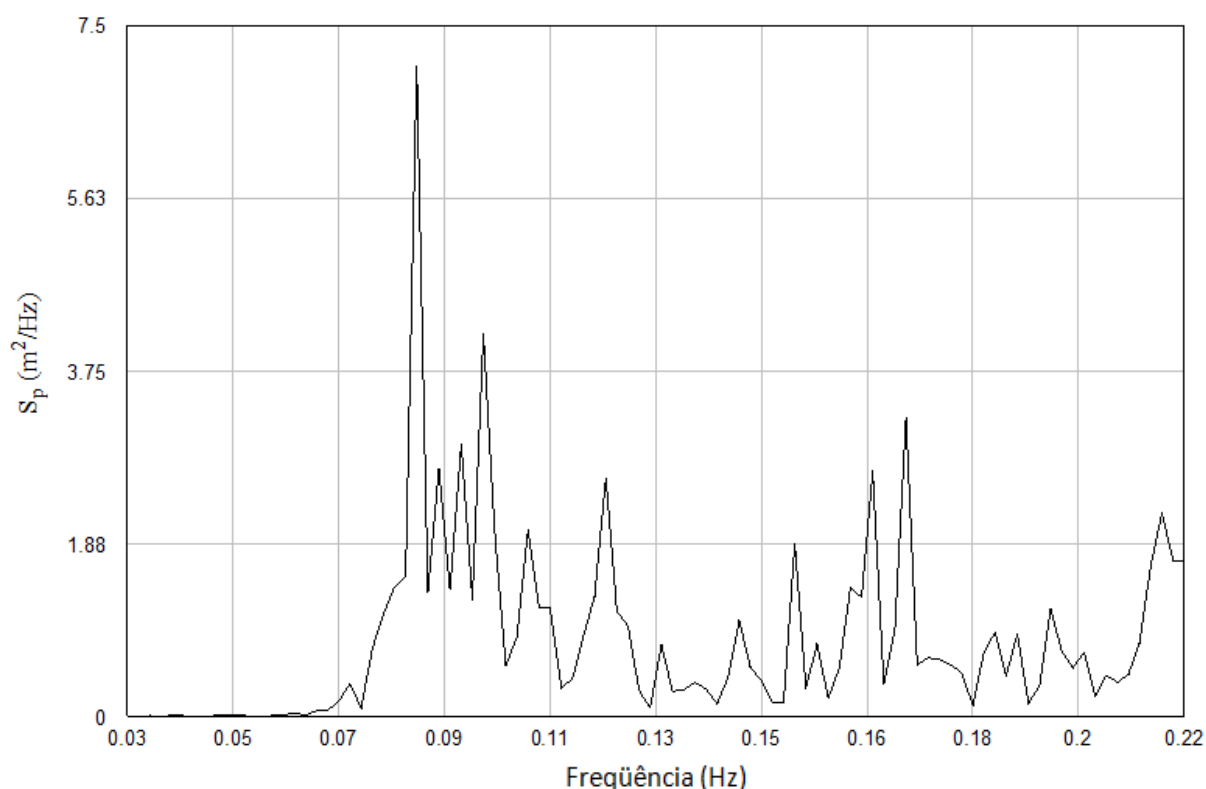


Figura 45 - Espectro de ondas do *swell* selecionado para a simulação numérica de propagação de ondas na plataforma do Paraná.

Os gráficos demonstraram que de acordo com que avançamos em direção à costa os valores de altura de ondas diminuí (Figura 46). No perfil Balneário Grajaú houve o decréscimo do valor de altura de ondas até 480 m da praia, onde o valor encontrado foi de 0,6 m (Figura 47). O valor da altura da onda aumentou para 0,75

m a uma distância de 150 m. Observando a profundidade do perfil 1, a uma distância de 150 m, se pode interpretar que o ligeiro aumento no valor da altura da onda corresponde ao empinamento, e o decréscimo da altura é devido à quebra de ondas sobre o banco distal, proporcional ao observado no Balneário Grajaú.

Na Figura 48 está apresentado o gráfico do perfil Ilha de Currais, onde a uma distância de 11,5 km há uma quebra acentuada na altura de onda e diminuição da profundidade determinado pelas isóbatas da ilha de Currais, provocando a quebra da onda simulada. Observando o gráfico do perfil 2, na Figura 48, correspondente a quebra da onda na Ilha de Currais, a uma distância de 3,5 km há o aumento do valor de altura da onda até a distância de 1 km da Ilha, onde o valor de altura da onda encontrado foi de 1,30 m. Ao observar o gráfico de profundidade, do mesmo perfil, foi possível observar que o decréscimo da altura da onda foi provocado pela diminuição da profundidade ao redor da Ilha de Currais, caracterizando a quebra da onda a uma distância de 650 m. Os valores dos parâmetros de ondas medidos pelo S4, posicionado a 2,3 km da Ilha de Currais, foi de: H_s 0,95 m; T_p 10,29 s; θ 179,54°. O valor de altura de onda encontrado na simulação foi de 1,25 m.

Como nos dados obtidos de propagação de ondas dos 30 m aos 18 m, na simulação também foi identificada a diminuição do valor da altura significativa de ondas à medida que as ondas se propagam em direção à costa.

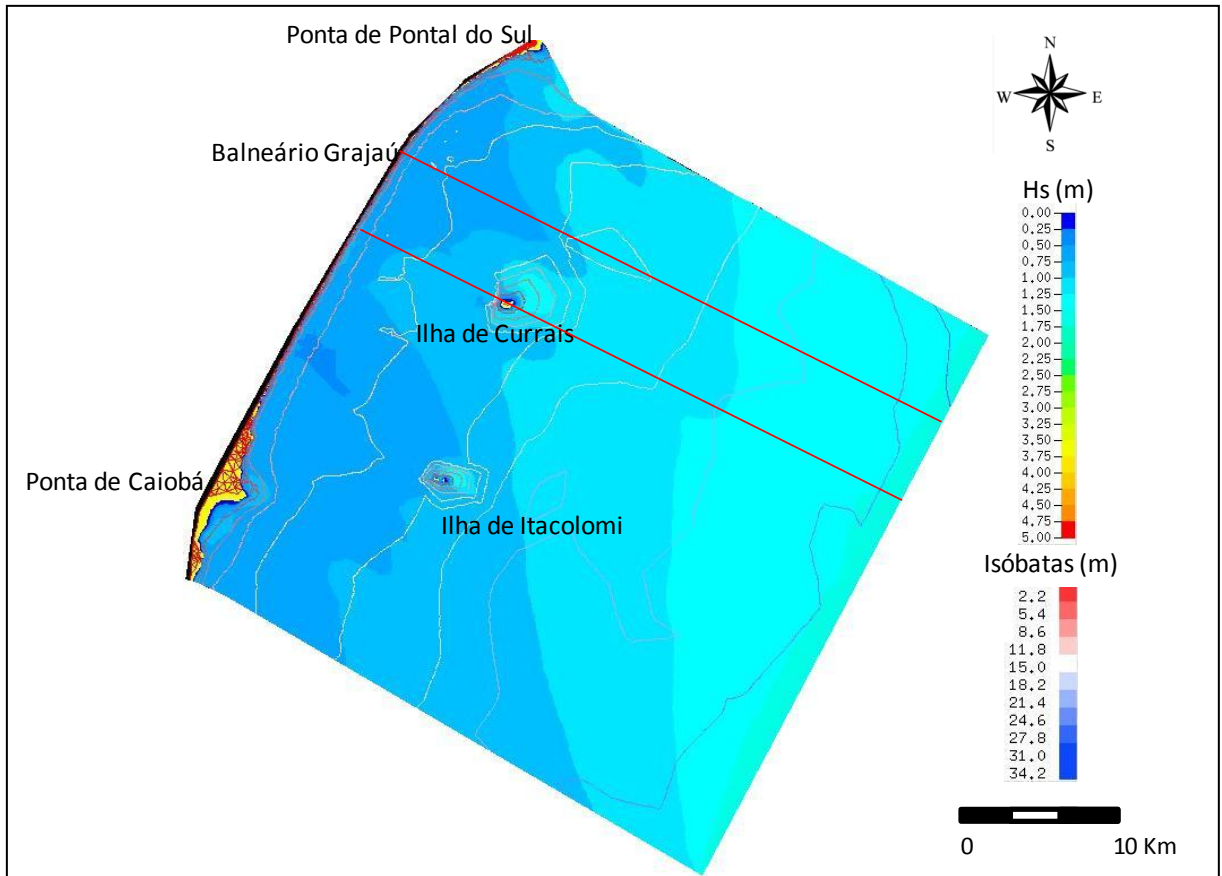


Figura 46 – Diagrama da propagação de um estado de mar do tipo *swell* na região central o litoral do Estado do Paraná, representado pelo modelo de ondas WWM.

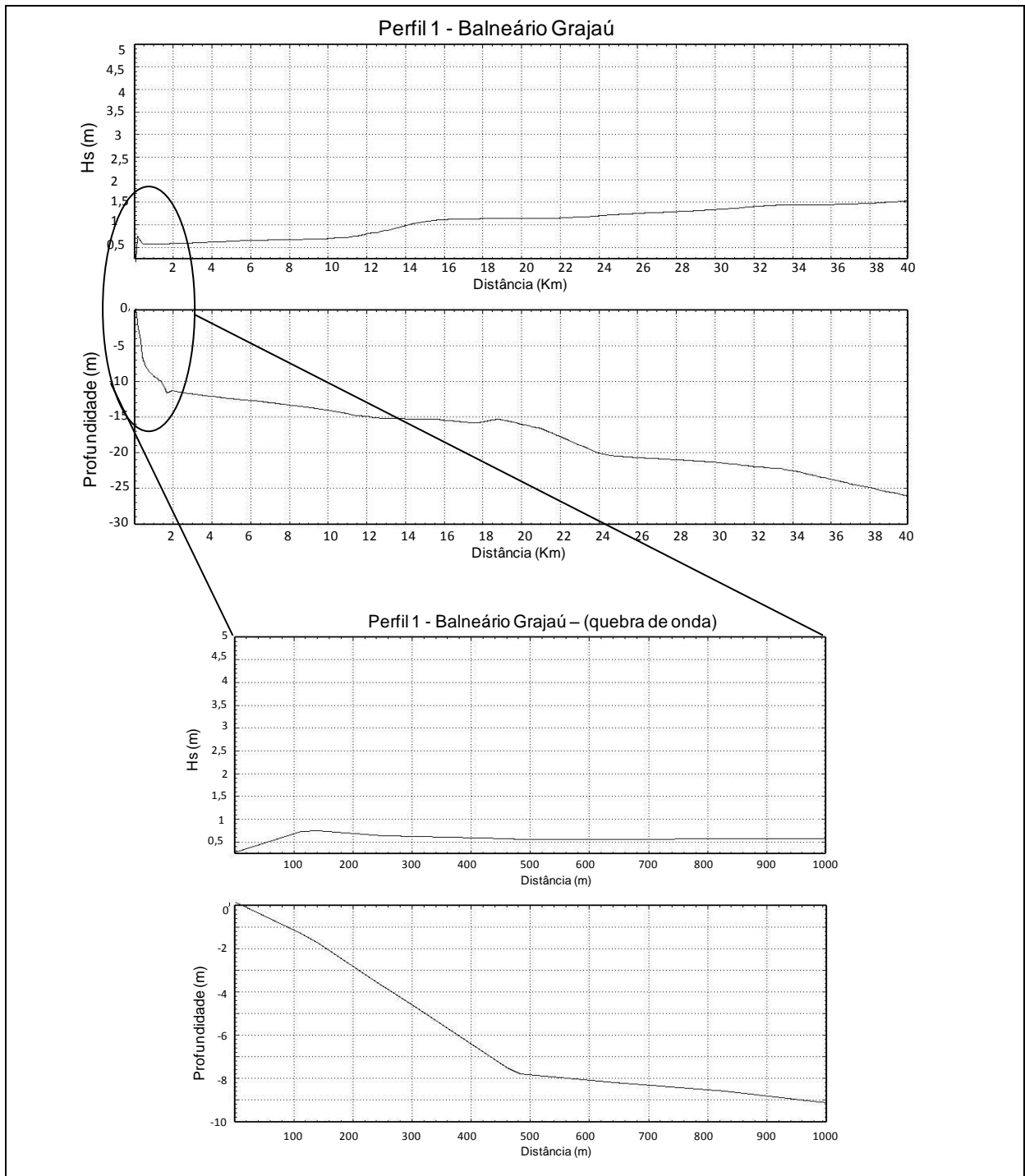


Figura 47 – Perfil correspondente ao transecto realizado do Balneário Grajaú até a condição de contorno externo, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 1000 m da praia.

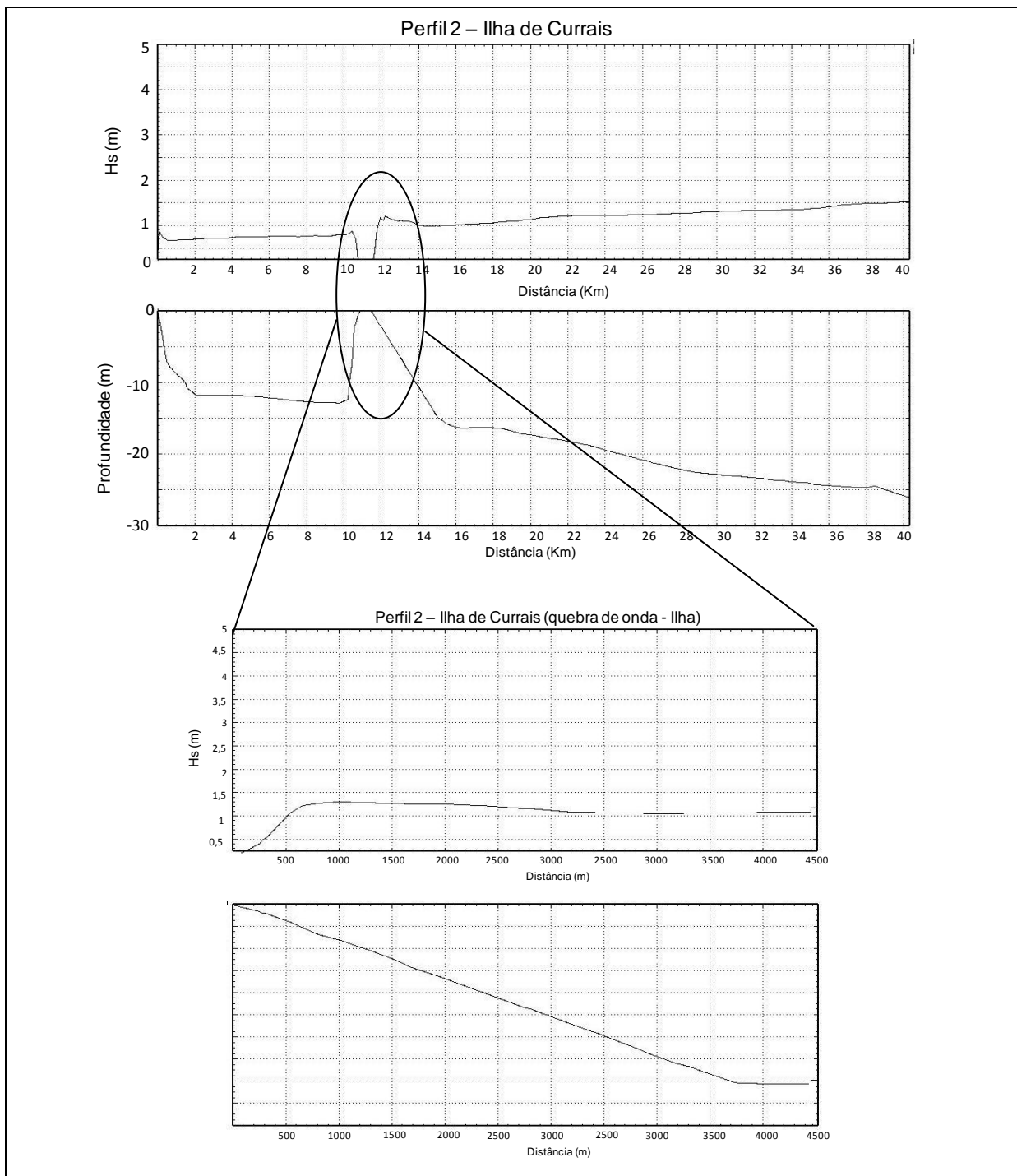


Figura 48 - Perfil correspondente ao transecto realizado da linha de costa até a condição de contorno externo, passando sobre a Ilha de Currais, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 4500 m da Ilha de Currais.

5.5.5.1. Características da propagação do trem de ondas

Analisando o diagrama vetorial de propagação de ondas é possível observar a convergência do trem de ondas sobre às isóbatas das Ilhas na plataforma e a difração que ocorre após a passagem do trem de ondas sobre aquelas. No estado de *swell* simulado a reorientação do trem de ondas após a passagem pelas ilhas foi mais pronunciado que no estado de vagas. A presença do canal batimétrico entre a Ilha e o Delta resulta na reorientação do trem de ondas e a característica que este chegará à linha de costa na porção norte da área de estudo.

Os vetores direcionais de ondas próximo a ilha de Currais estão ligeiramente distintos em relação aos vetores iniciais (isóbata de 30 m). O que pode também ser observado na diferença entre os valores direcionais obtidos no espectro de ondas a 30 m (157,39°) e 18 m (179,54°) para o mesmo campo de ondas registrado.

Em detalhe na Figura 49, é possível observar que os vetores incidentes nos deltas estão inclinados em relação às isóbatas. Existem evidências de empinamento e logo a quebra destas ondas na região (Figura 49, círculo destacado), representado pelo aumento num determinado setor da altura significativa de onda simulada e uma posterior diminuição acentuada.

Com o resultado simulado para estado de *swell* leva a interpretar que o caminho percorrido pela quebra das ondas na região do delta de maré do CEP é de leste para oeste, em direção à linha de costa. Com isso, a corrente longitudinal na região dos deltas deverá ter sentido similar ao do caminho percorrido pela quebra das ondas no local.

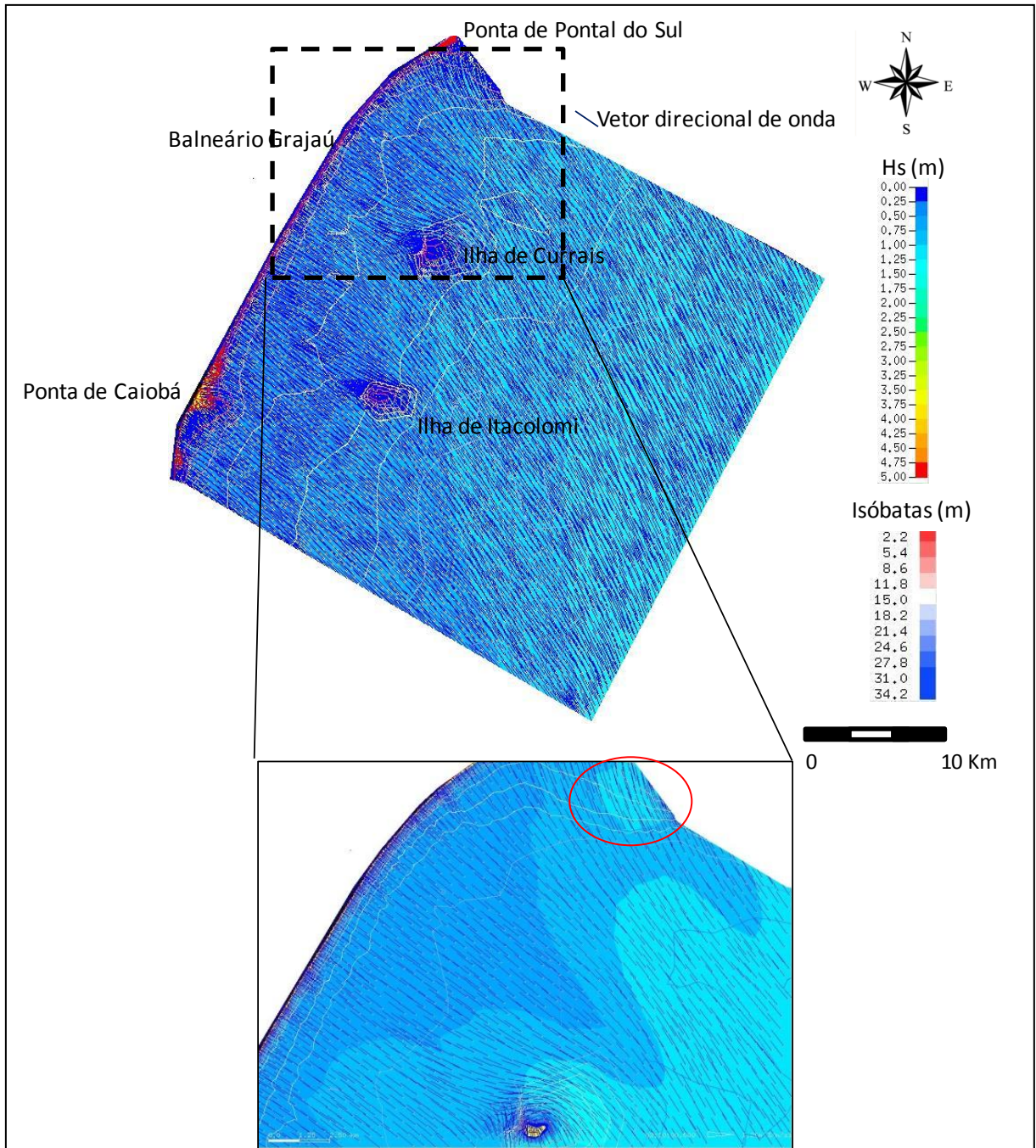


Figura 49 - Diagrama da propagação de ondas de estado de swell na Plataforma Interna rasa do Paraná, representado pelo modelo WWM com vetores sobre a batimetria realizada na área de estudo. No detalhe em destaque (círculo), região onde foi interpretado o empinamento e posterior quebra das ondas.

5.5.6. Características da propagação de ondas em um evento extremo (*swell* extremo)

O evento extremo simulado foi selecionado a partir dos valores mais altos de período de pico e altura significativa que coexistiram ao mesmo tempo. Desta forma, portanto, este evento trata-se de um *swell* extremo. Este foi medido no dia 09/04/2010, cujos valores de parâmetros de ondas foram H_s 4,27 m, T_p 13,56 s e θ 138,88°. O espectro de ondas medido neste momento está apresentado na Figura 50, onde é possível observar dois picos “verdadeiros” com baixa frequência e alta densidade espectral, e dois outros secundários que correspondem às flutuações aleatórias das medidas espectrais. Os picos de alta frequência correspondem às ondas geradas por ventos próximo ao registro que coexistem ao campo de ondas de alta frequência originado por pistas de ventos distante da costa, por um ciclone subtropical.

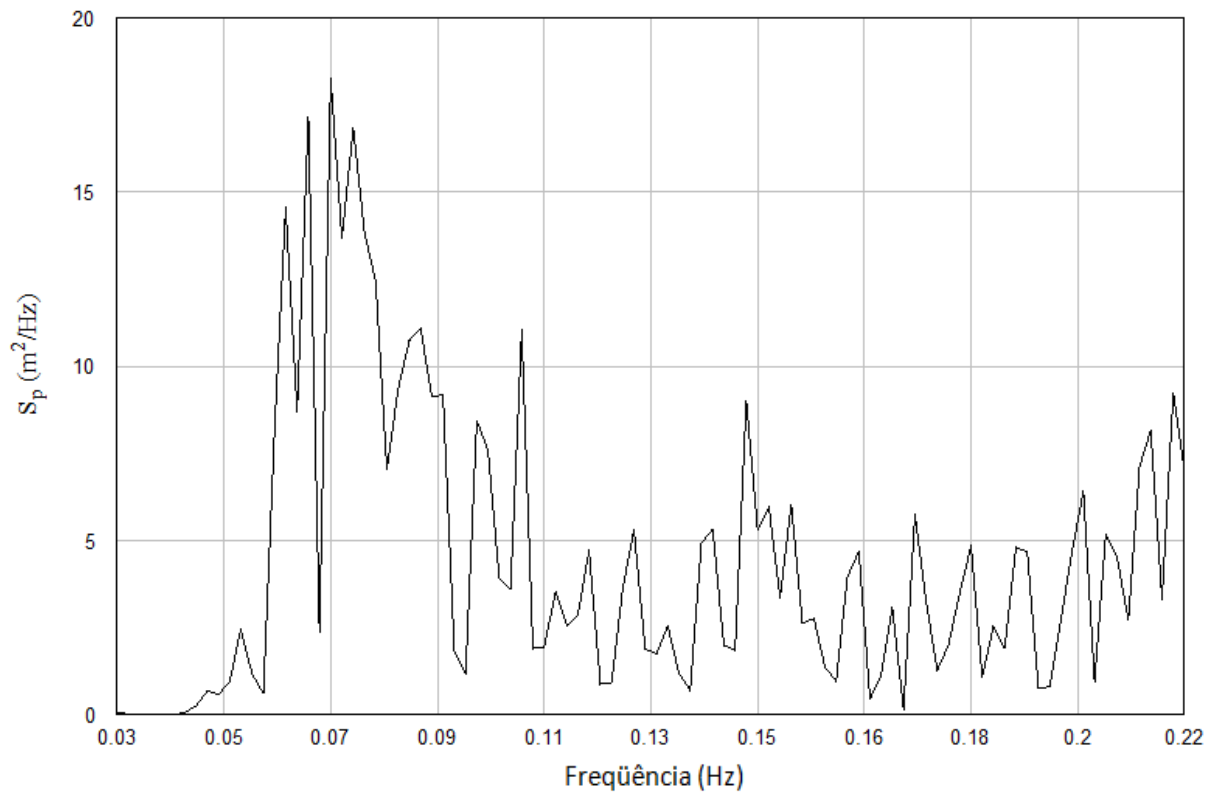


Figura 50 - Espectro de ondas medido durante o evento extremo, medido no dia 09/04/2010.

Com o diagrama representativo de altura significativa de ondas (Figura 51) foi identificado a diminuição do parâmetro ao longo da propagação em direção à costa. Existem 3 regiões no arco praias estudado que recebem as maiores classes do parâmetro analisado determinadas pelo posicionamento das Ilhas de Itacolomi e Currais.

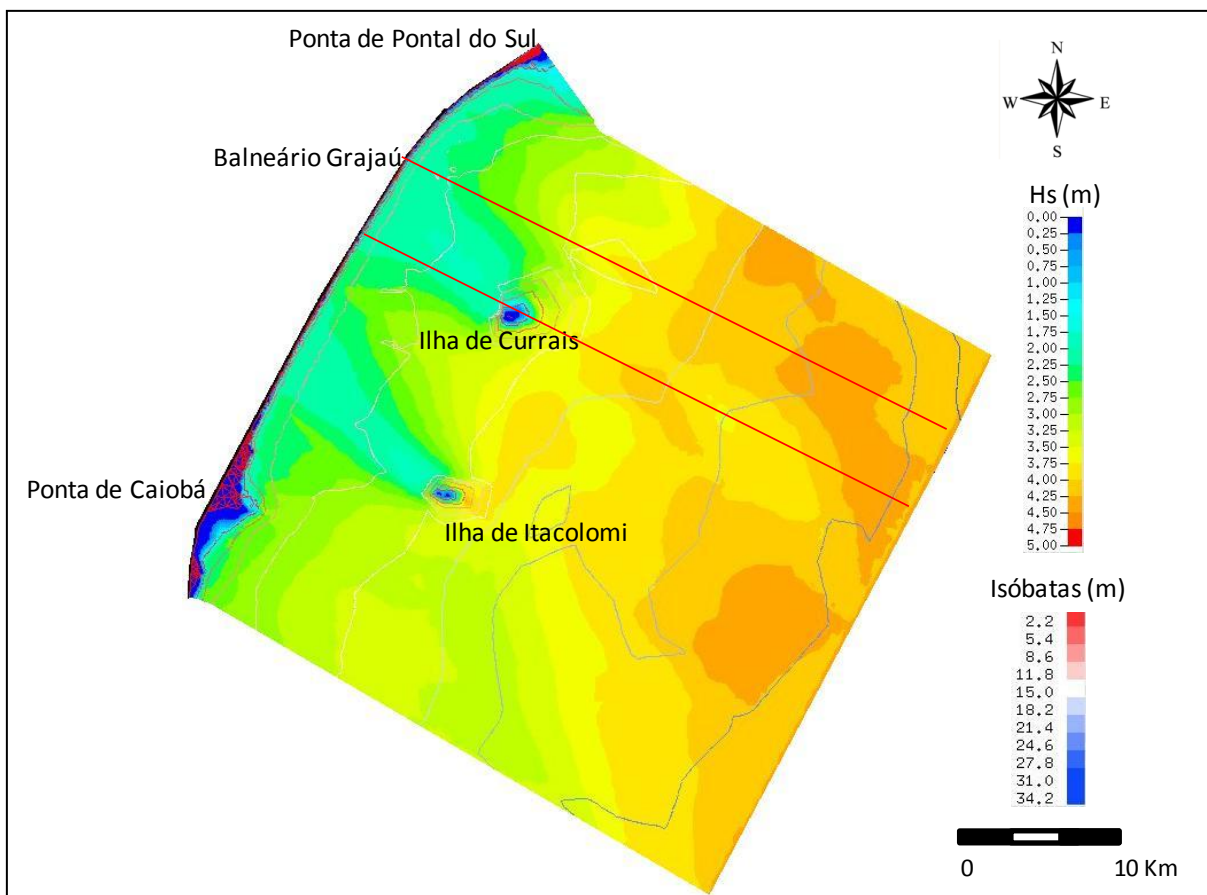


Figura 51 - Diagrama da propagação de um evento extremo na região central o litoral do Estado do Paraná, representado pelo modelo de ondas WWM.

No perfil Balneário Grajaú (Figura 52) é possível observar uma flutuação da altura da onda até a uma distância de 14 km e profundidade de 15 m. Após isto uma suave perda no valor da altura da é observada uma distância de 325 m (perfil quebra de onda, (Figura 52)). O valor da altura da onda encontrado a uma distância de 230 m foi de 2,35 m, observado a uma profundidade de 4 m.

Já no perfil 2 (Figura 53) há uma diminuição acentuada da altura da onda a uma distância de 11,5 km, ocasionada pela íngreme diminuição da profundidade que caracteriza a Ilha de Currais. Observando o detalhe do perfil apresentado, foi possível interpretar que a perda da altura ocorreu a 1,5 km da Ilha de Currais, provocada pelos contornos batimétricos da ilha que induziram a quebra da onda nesta região. O valor medido de H_s com o S4 a 2,3 km da Ilha de Currais foi de 2,79 m, significativamente menor do que foi obtido com a simulação, com 3,5 m.

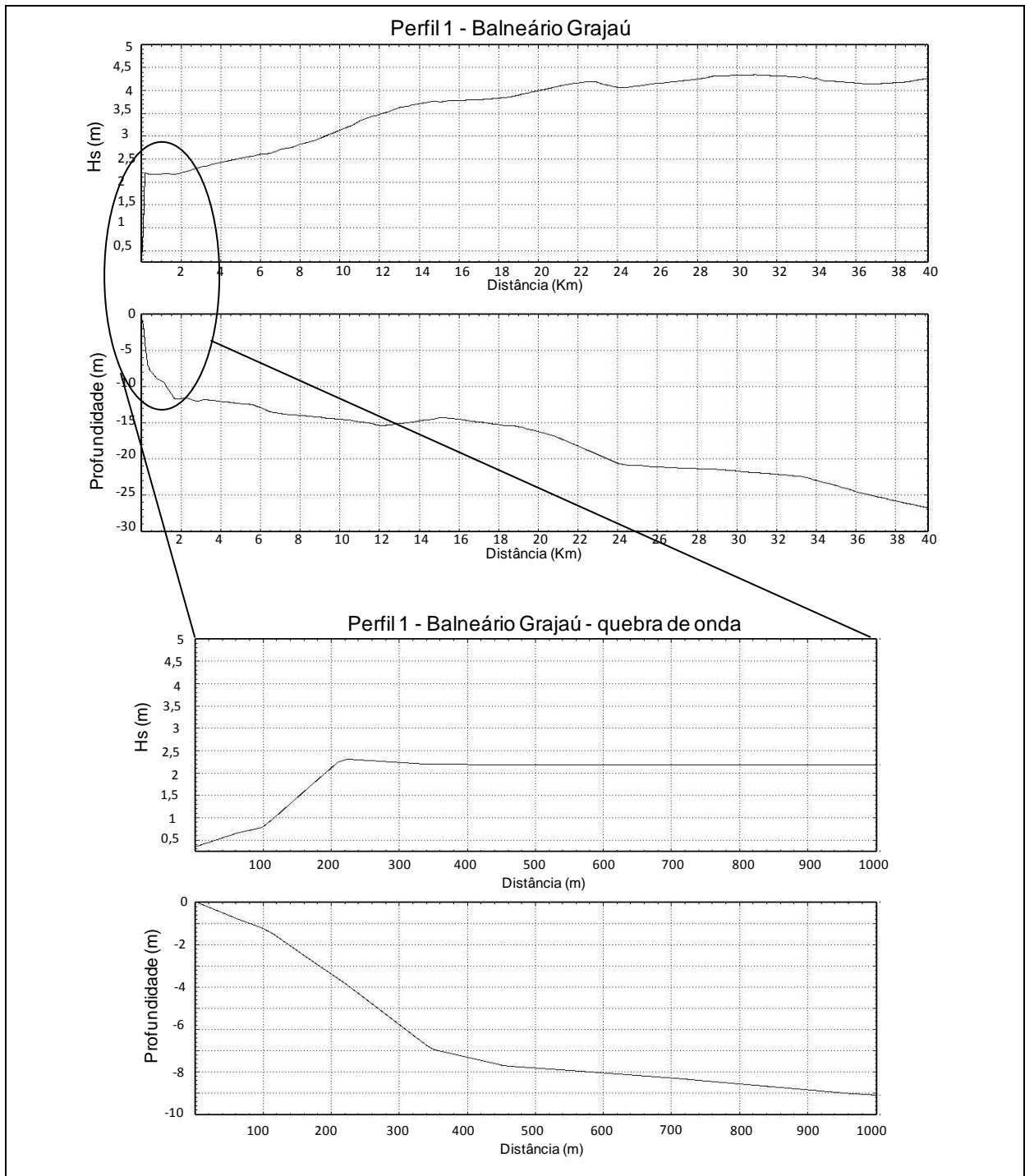


Figura 52 - Perfil correspondente ao transecto realizado do Balneário Grajaú até a condição de contorno externo, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 1000 m da praia.

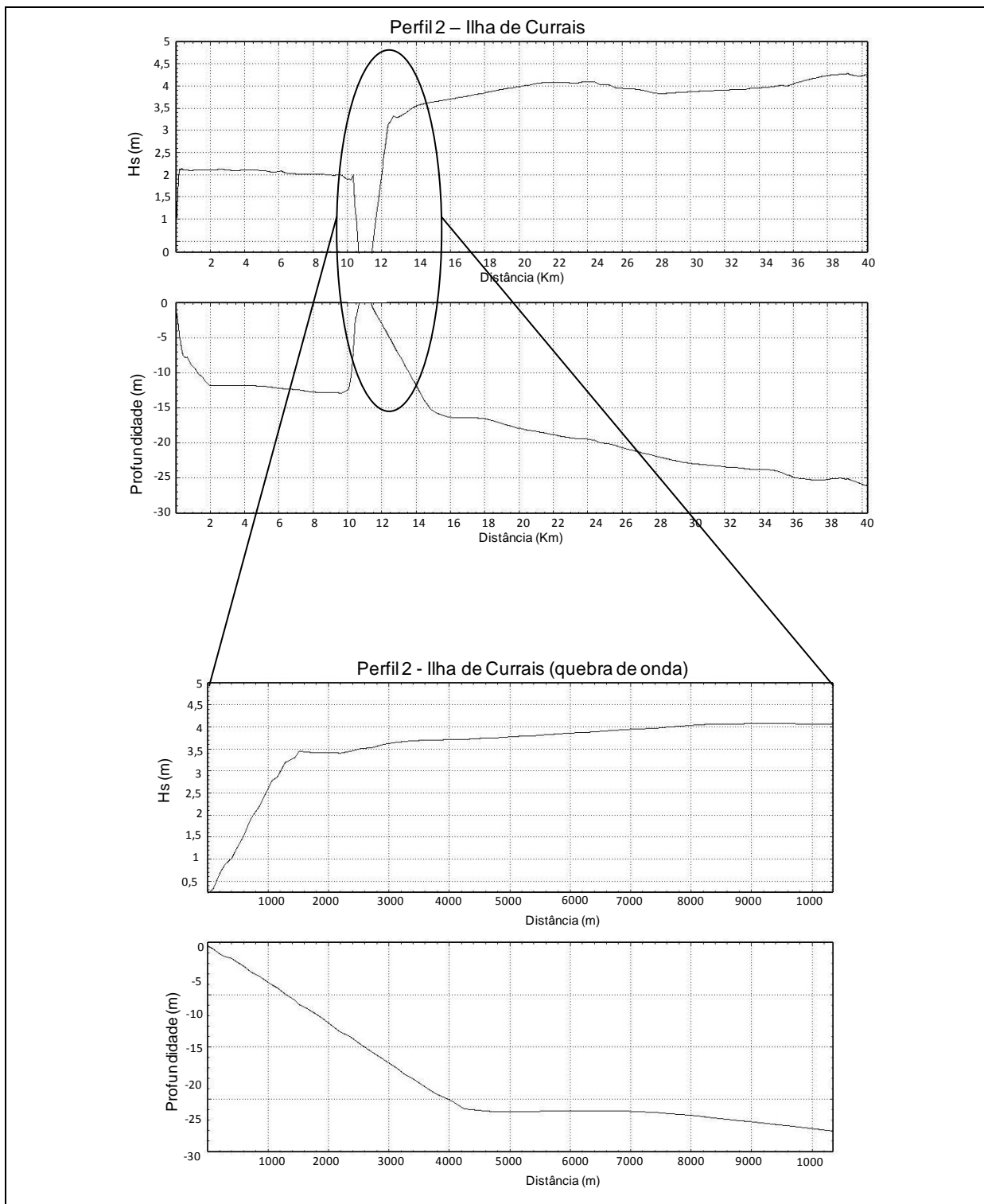


Figura 53 – Perfil correspondente ao transecto realizado da linha de costa até a condição de contorno externo, passando sobre a Ilha de Currais, detalhando a diminuição da altura da onda (quebra de onda) em um perfil até 1000 m da Ilha de Currais.

5.5.6.1. Características de propagação do trem de ondas

As respostas obtidas na simulação vetorial de um *swell* extremo (Figura 54) mostram que os processos de difração que ocorre nas Ilhas da plataforma determinam a reorientação do trem de ondas e a direção de incidência destas na linha de costa. Os processos resultantes da difração (divergência sobre zonas profundas) determinam as regiões onde há incidência de altura significativa de ondas superior que as adjacentes. As regiões que recebem as maiores classes de altura de ondas foram identificadas pelos Balneários: Grajaú/Ipanema (no centro-norte); Praia de Leste/Gaivotas (no centro) e; Pico de Matinhos (ao sul).

Em detalhe na Figura 54, é possível observar que ao norte há uma acentuada convergência dos vetores sobre os deltas de maré. Sobre esta região, a resposta obtida foi à incidência oblíqua dos vetores em relação às isóbatas dos deltas e a diminuição do valor da altura significativa das ondas. Com isso, pôde-se interpretar que existe a quebra de ondas na região e que o caminho percorrido por esta pode ser referenciada como ocorrendo de leste para oeste.

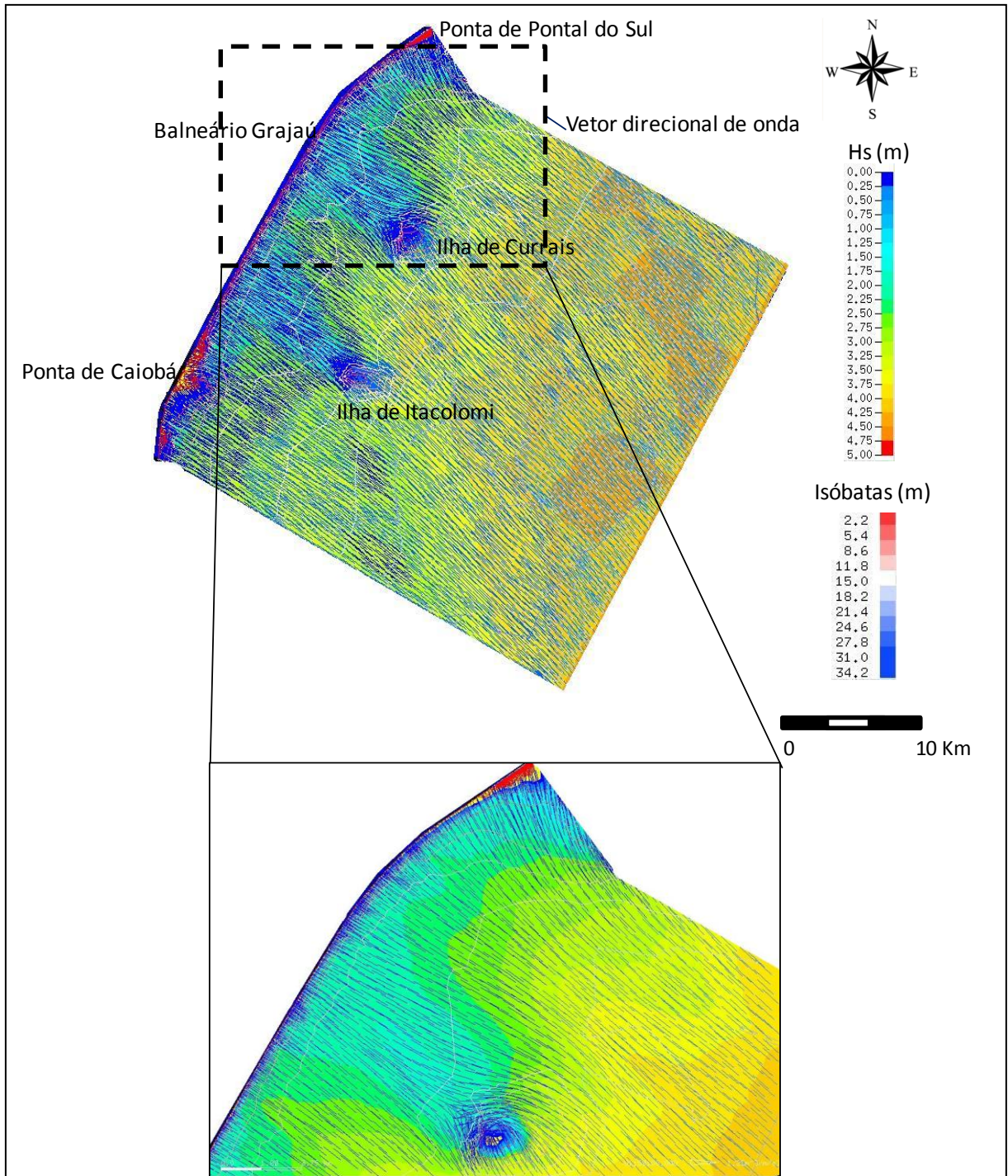


Figura 54 - Diagrama da propagação de ondas do evento extremo na Plataforma Interna rasa do Paraná, representado pelo modelo WWM com vetores sobre a batimetria realizada na área de estudo.

6. DISCUSSÃO

As séries temporais de dados de ondas obtidas neste estudo na plataforma interna rasa do Paraná são as mais longas já amostradas na região. Houve a identificação de um número suficiente de tempestades para poder caracterizar o clima de ondas em escala anual e sazonal, conforme proposto por Holthuijsen (2007). Contudo, existe um caráter não climatológico nestas características definido pela desigualdade na cobertura amostral entre os fundeios.

A região Extratropical do Atlântico Sul Ocidental gerou as ondas superficiais registradas na plataforma interna paranaense, tendo variações de valores de altura significativa de onda semelhante aos simulado por Branco (2005), quando identificou que a mesma região contribui com 90% das ondas incidentes no sul do Brasil, com variações de altura significativa entre 0,75 m a 4 m.

Existem marcadas variações sazonais nas características do clima de ondas que podem ser observados nos resultados estatísticos dos parâmetros de ondas obtidos na plataforma interna rasa do Paraná (30 m e 18 m). Um clima de ondas gerado por ventos próximo a costa ou locais e um clima de ondas gerados por pistas de ventos distantes da costa foram identificados. Tais fatos foram diretamente associados aos principais sistemas meteorológicos sobre o Atlântico Sul Ocidental: ciclones subtropicais e frentes frias. O posicionamento e a direção da pista de ventos resultante da força do gradiente de pressão associados àqueles sistemas meteorológicos determinaram as variações encontradas no clima de ondas da área de estudo.

Os dados de ondas medidos a 30 m e 18 m de profundidade, com relação a classificação de Carter (1989), já foram refratados antes dos pontos de registros. Isto porque a interação das ondas de menores energias inicia aos 34 m de profundidade. A interação das ondas com o fundo aumenta na razão inversa da profundidade, sendo que, a densidade de energia é maior nas ondas de baixa frequência (HOLTHUIJSEN, 2007) e o orbital destas alcançam maiores profundidades. O início do atrito estrutural da onda com o fundo é muito mais distante dos pontos de registros para os estados de *swell* do que para vagas. Na plataforma paranaense, a

refração de ondas de alta energia começa a mais de 150 km do ponto de registro a 30 m de profundidade. Nesta região (a 150 km) é onde a profundidade passa de 120 m para 60 m de profundidade em uma escala de 10 km, com orientação aproximada SW/NE, identificado no mapa batimétrico da margem continental sul brasileira (REMAC, 1979). O padrão das isóbatas da plataforma interna paranaense possui baixa declividade, com grandes espaçamentos entre as isóbatas e gradientes suaves de até 1/700 (VEIGA, 2006). Desta forma, além da direção do trem de ondas incidentes ser registrado apenas no ângulo de visão a partir do ponto de registro à tempestade (HOLTHUIJSEN, 2007) o trem de ondas será reorientado para um ângulo restrito de incidência de acordo com as características da plataforma.

Desta forma foi possível identificar que na plataforma interna rasa paranaense a energia de onda de baixa frequência e alta densidade espectral esteve presente apenas das direções entre ESE a S no ponto a 30 m de profundidade, na direção entre SE a S no ponto a 18 m e na direção entre SE e SSE a 10 m. O ângulo restrito de incidência diminui à medida que avança em direção à costa.

Porém, a direção S de incidência de estados de *swell* proposto acima terá apenas um restrito ângulo que caracterizam ondas de estados de *swell* (168,76° a 178°), ou seja, não é todo o quadrante S capaz de ser registrado com valores de períodos de pico acima de 10 s. Devido à geografia do Sul do Brasil o Estado do Paraná é abrigado da maioria dos sistemas de *swell* (BRANCO, 2005), que comumente foram identificados com direções de pistas de ventos entre S a SW.

No estudo de Lima *et al.* (2009) (a 10 m de profundidade) os autores identificaram uma variação direcional, para o mesmo tipo de ondas, de apenas 45° (entre SE e SSE), porém o ponto de registro de ondas estava mais próximo à linha de costa do que no presente estudo (Figura 55, elabora pelo presente autor a partir dos dados obtidos pelos autores). Komar (1998) explica que as ondas são dispersivas em águas profundas e não dispersivas em águas rasas, a velocidade de ondas em águas profundas só depende do comprimento de onda, já para águas rasas depende da profundidade. Assim, na plataforma interna paranaense ondulações de baixa frequência serão direcionadas pela batimetria local e registradas com um restrito ângulo de incidência, aproximadamente paralelo à linha de costa (SW/NE), independentemente da direção de origem.

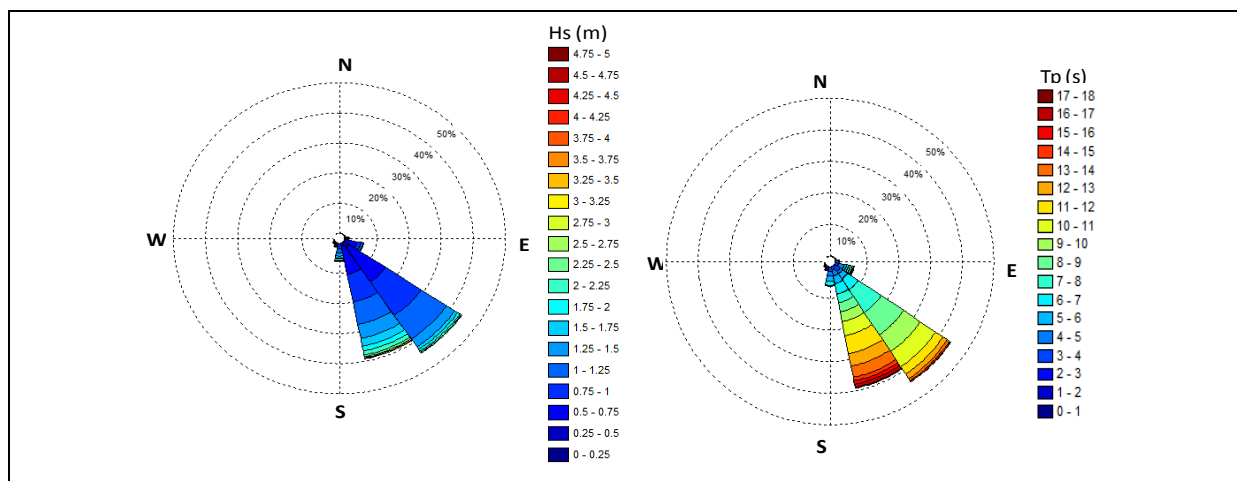


Figura 55 - Gráficos polares de dados e ondas de Lima *et al* (2009), registrados a 10m de profundidade, a 7 km E do Balneário Grajaú, num período não contínuo entre 11/10/2006 e 21/01/2008.

Através dos estudos pretéritos de ondas foi possível comparar e observar as diferenças nas direções de incidência de ondas apresentadas. Pôde-se identificar que nestes estudos os autores apresentaram características de ondas pontuais que representam apenas o conjunto de estados de mar que foram possíveis de serem medidos na escala temporal que cada autor dispôs. Bandeira (1974) obteve como direção mais freqüente ESE (14,48%), direção predominante somente na temporada de verão registrada a 30 m pelo presente estudo. Portobrás (1983) obteve direções de ondas preferenciais de SSE e SE a 16,5m de profundidade, que está de acordo com as encontradas por Lima *et al.* (2009) e o presente estudo. Marone *et al.* (1997), em curtos registros de parâmetros de ondas entre a ilha da Galheta e o Balneário Atami, encontraram no verão direção predominante de SE e no inverno SSE, o que é similar ao que foi medido a 18 m e a 30 m, respectivamente, pelo presente trabalho nas mesmas temporadas apresentadas. No trabalho de Martins (2002) as maiores freqüências de incidência de ondas medidas no Balneário Atami foram S e SE, direções que foram medidas com mais freqüência somente na temporada de outono pelo presente estudo.

O padrão dos vetores direcionais de ondas apresentados nas simulações numéricas, para ambos os cenários simulados, mostram diferenças na propagação dos vetores ao longo da plataforma estudada. Uma mesma ondulação pode se

propagar a diferentes pontos na costa (WALKER, 1974, MEAD e BLACK, 2001) e, portanto, as diferenças direcionais de ondas apresentadas pelos estudos pretéritos podem ser compreendidas pela diferença do posicionamento dos sensores de medidas de ondas na plataforma.

Devido à diferença na energia de ondas incidente no arco praiado estudado (identificado nas simulações numéricas) cada região deverá apresentar suas próprias características e estágios morfonômicos particulares. Isto porquê todo sistema praiado é altamente variável em função das ondas incidentes e, apresentarão padrões morfológicos diferentes (SHORT, 1999). Esta diferença morfológica, principalmente na declividade da face praiado e em relações de erosão e acreção pode ser comprovada em vários estudos já realizados nas praias que formam o arco praiado estudado (ANGULO, 1992; AGULO 1993a; 1993b; ANGULO; 1996; SOARES, 1997; MARTINS, 2002; QUADROS, 2002; QUADROS *et al.*, 2007).

Em toda a série temporal amostrada o valor da altura significativa das ondas diminui dos 30 m para os 18 m de profundidade. Porém, quando as ondas incidentes passam de áreas profundas para áreas rasas, a propagação da energia de ondas desacelera e o resultado é um potencial de acúmulo de energia (CARTER, 1989, HOLTHUIJSEN, 2007), sendo possível observar o ganho em altura provocado pelo empinamento de onda. Mas, a irregularidade do fundo da plataforma pode estar causando refrações complexas nas ondas, produzindo alterações em sua altura e energia ao longo da costa, fato descrito por Komar (1998) e que também pôde ser observado na simulação da propagação de ondas sobre a batimetria medida.

As maiores variações na direção de propagação das ondas entre os pontos de registros foram medidas nos estados de mar do tipo vagas. Esta diferença foi associada aos registros de ondas cujas pistas de ventos estavam sobre os pontos de registros de ondas na área de estudo ou ainda, quando um ou mais campos de ondas formados próximo à costa (< 1000 km) incidiram na plataforma interna paranaense. Nos dados obtidos aos 30 m houve maior variação direcional que aos 18 m (Figura 10), tendo inclusive registros de ondas da direção aproximada terra-mar (W, WNW, NW, NNW) com período de pico de até 5 s (Figura 13). Holthuijsen (2007) explica que o campo de ondas dentro de uma tempestade ou na área de geração é inicialmente aleatório. E isto, pode explicar as diferenças direcionais

encontradas em 27 km (distância entre os fundeios) principalmente com a passagem de frentes frias sobre a plataforma interna rasa paranaense.

Na plataforma interna rasa do Estado do Paraná há predominância de estados de vagas sobre os estados de *swell*. Entre os estados de vagas houve a reorientação do trem de ondas dos 30 m aos 18 m, de ESE para SE, respectivamente. Como também há diminuição da moda significativa da altura de ondas de 1,5 m, a 30 m de profundidade, para 1 m aos 18 m de profundidade. Já para os estados de *swell* houve significativa diferença somente na moda de altura de ondas, passando de 1,75 m (a 30 m) para 1,25 m (a 18 m).

No geral, os histogramas sazonais de altura significativa entre os fundeios nas temporadas de primavera, verão e inverno são semelhantes. No outono, temporada que apresentou as maiores amplitudes de classes de altura significativa, houve um ligeiro equilíbrio entre a frequência das classes de H_s entre 1 m a 2,5 m. Nos histogramas sazonais obtidos por Araújo *et. al* (2003) foi a temporada de inverno que foi identificada com as maiores amplitudes em relação as outras temporadas, também se observando semelhanças nas formas dos histogramas. Coli *et al.* (1996) observaram que houve maior amplitude de ondas no verão que no inverno, o que pôde ser identificado nos dados do presente estudo somente a 30 m. Porém, isto pode estar relacionado com as diferenças amostrais entre as temporadas realizadas pelo presente estudo.

Já para os valores médios de T_p , não houve diferenças significativas entre as duas profundidades estudadas; porém, com os gráficos polares direcionais de período de pico é possível identificar que as classes de T_p possuem maiores valores a 30 m do que aos 18 m. Uma clara perda da energia da onda se dá em direção à costa na plataforma interna rasa do Paraná.

Na relação entre a propagação de ondas dos 30 m aos 18 m de profundidade as principais diferenças entre as temporadas foram:

- Primavera: diminuição da altura significativa de ondas.

- Verão: reorientação do trem de ondas ESE para SE; diminuição da altura significativa de ondas; maior altura de ondas na direção S, a 30 m, e SSW aos 18 m.

- Outono: maiores variações direcionais de propagação de ondas; refração de ondas de *swell* de SSE (a 30m) para SE (a 18m); diminuição da altura significativa de ondas.

- Inverno: maior freqüência direcional de ondas na direção SE aos 18 m que aos 30 m; diminuição da altura significativa de ondas.

Cabe ressaltar que existe falta de sobreposição amostral entre os dados de ondas medidos aos 30 m e aos 18 m.

Os ciclones subtropicais foram os sistemas meteorológicos mais importantes na formação de pistas de ventos capazes de gerar eventos extremos e os principais estados de *swell* que incidiram na plataforma interna paranaense durante a escala temporal deste estudo. As pistas de ventos de ciclones subtropicais identificadas a mais de 1200 km da costa paranaense formaram ondas com período de pico acima de 9 s e com características espectrais de baixa freqüência e significativa densidade. Assim, considerando *swells* com períodos maiores do que 9 s foi possível identificar que a única temporada em que ocorre equilíbrio entre os estados de *swell* e vagas foi o outono. Ou seja, esta foi a temporada com as maiores energias de ondas incidentes na plataforma interna paranaense.

As ocorrências de cristas de marcas de ondulações nas estruturas sedimentares orientadas para SE, identificadas por Veiga (2006), coincidem com a direção de ondas dos dois eventos extremos registrados no presente estudo. A origem destas ondas são de ciclones subtropicais e não da passagem de frente fria como sugeriu o autor. No período estudado pelo presente, a principal entrada de energia para a região da plataforma interna paranaense teve origem em ciclones subtropicais com pistas de ventos além de 1000 km da costa paranaense.

As frentes frias foram geralmente identificadas com pistas de ventos sobre a plataforma continental e talude sul brasileiro, fazendo com que os campos de ondas gerados não tenham tempo para dispersar freqüências características de estado de

swell para a costa paranaense. Geralmente as pistas de ventos de frentes frias estiveram muito próximas a área de estudo ou ainda dentro da área de geração, recebendo energia do vento. Com isso, houve significativa diferença direcional de ondas entre os pontos de registros na plataforma interna paranaense sobre a ação deste sistema meteorológico. Prova disso, foram os registros com valores de frequência relativamente altos de T_p de 4 s a 5 s com direção S nas temporadas de outono, inverno e primavera. Os campos de ondas registrados se caracterizaram por um espectro com alta frequência e de baixa densidade, formadas pelas frentes frias sobre a plataforma continental do Paraná. As ondas originadas pela passagem de frentes frias podem ter valores relativamente altos de altura significativa, porém baixa energia associada, pois a energia é proporcional ao período de onda.

As trajetórias de frentes frias e as resultantes da direção do vento dadas pela força do gradiente de pressão destes sistemas fazem com que as pistas de ventos fossem caracterizadas entre as direções SW e SSE. A direção de dispersão e a dispersão de frequências de uma pista de ventos com origem em uma frente fria foi muito restrito para à costa paranaense, visto tal geografia do sul do Brasil e os principais sistemas de *swell*, detalhado por Branco (2005).

Nem todas as frentes têm o posicionamento da pista de ventos sobre o oceano dentro da área que possibilita a dispersão de campos de ondas capazes de incidir na costa paranaense. Calliari e Klein (1993) afirmam que a dinâmica praias na costa sul brasileira é regulada, principalmente, pelos fenômenos associados à passagem de frentes meteorológicas ou frentes polares. Ao correlacionar o levantamento da incidência de frentes frias com os dias em que houve agitação marítima acentuada na região da costa paranaense, Quadros (2002) observou que poucos sistemas frontais originaram tais agitações nas praias estudadas. A maior intensificação de incidência de frente fria é no inverno (AYOADE, 2004) e nas temporadas (2009 e 2010) registradas e observadas durante o presente estudo, o inverno foi a única temporada que não foram registrados eventos extremos, de acordo com os valores propostos neste estudo, e a temporada com as menores frequências de eventos extremos segundo os valores propostos por Araújo *et al.* (2003).

Em todos os trabalhos pretéritos de ondas dentro da área do presente estudo, os autores apenas sugerem que as passagens de frentes foram às geradoras das maiores energias de ondas registradas por eles, o que não foi identificado no presente estudo. Por outro lado, as frentes frias, associadas a uma conjunção de fatores, tendem a acumular água contra a costa e, através de um efeito localizado, principalmente pela inclinação e forma do fundo, as ondas que acompanham o fenômeno podem ou não ser amplificadas (MARONE e CAMARGO, 1994), dando a falsa impressão que estes momentos estão relacionados com eventos extremos ou de alta energia de ondas, tendo um caráter destrutivo para as obras costeiras, e caracterizadas como ressacas.

Tessler (1988) concluiu que os sistemas de propagação de ondas no litoral sul paulista estão vinculados exclusivamente a seus centros de geração em áreas oceânicas distantes, independente das direções dos ventos locais. No presente estudo, as áreas locais, arbitrariamente proposto com distâncias inferiores a 1000 km da área de estudo, contribuíram para a incidência de ondas do tipo vagas. Já ondas do tipo *swell* foram formadas em áreas distantes da costa, identificados e proposto pelo presente estudo, como tendo distâncias maiores que 1200 km da área de estudos.

Alves e Melo (2001) identificaram que os estados de *swell* na costa de São Francisco do Sul (SC) estão associados às tempestades que se propagam ao longo da costa da América do Sul e derivaram para o oceano ao longo dos paralelos 20°S e 40°S. Alves e Melo (2001) observaram que as pistas de ventos foram formadas a uma distância superior a 1000 km do local de estudo. Os autores observaram que quando estas tempestades se tornaram um lento sistema em movimento a direção persistente da pista de ventos foi SE, associadas com forte gradiente de pressão à medida que migram em áreas dominadas por sistemas de massa de ar quente, resultando em campos de ventos fortes. Esta característica de geração de ondas está de acordo com o que foi identificado no presente estudo, onde a pista de ventos de ciclones subtropicais atingem distâncias superiores a 1000 km da área de estudo e, pela dispersão de frequências, ondas regulares de períodos altos (≥ 10 s) incidem no Estado do Paraná. Tais pistas de ventos puderam ser identificadas com distância de até 2500 km da área de estudo, com intensidade de ventos de até 100 km/h e

duração de aproximadamente 72 hs. Esta característica de ciclones próximo à costa é similar as detalhadas por Reboita (2008).

Soares *et al.* (1997) observaram que no inverno ocorreram incipientes processos construtivos em setores do Balneário Pontal do Sul e processos erosivos mais intensos no outono. Isto é compatível com o sugerido no presente estudo, onde a tempoda de outono foi identificada com as mais altas energias de ondas. Os estados de *swell* foram mais freqüentes no outono, tendo maiores valores de densidade espectral registrados no outono e primavera, ratificando o histórico das ressacas mais intensas registradas nestas temporadas (SUDERHSA, 2007). Isto implicaria que os processos erosivos na primavera e no outono são mais acentuados que no inverno e no verão. As maiores variações volumétricas identificadas por Quadros (2002) também coincidem com os padrões de energia de ondas apresentados neste estudo. No estudo de dinâmica praial no Balneário de Pontal do Sul, Dezinho (2005) registrou os maiores valores de altura significativa de ondas no litoral paranaense nos meses de maio e outubro, o que ratifica ainda mais que as temporadas de outono e primavera caracterizam-se pelas maiores energia de ondas incidentes na região central da costa paranaense.

Devido à irregularidade entre estados de *swell* e vagas, somadas aos valores modais de altura significativa de onda é possível supor que haja um processo maior de acreção do que de erosão nas praias do arco praial estudado.

Os espectros de ondas relativos aos estados de *swell* medidos a 30 m coexistem com mar de ventos locais, ou seja, há picos de alta e baixa freqüência coexistindo. Houve também consideráveis pontos de inflexão nos picos estreitos identificados como *swell*, porém Rodrigues e Guedes Soares (1999) explicam que este fato se deve às flutuações aleatórias das estimativas espectrais. Nas temporadas de primavera, outono e inverno foi possível detectar às vezes três ou mais picos em um mesmo espectro de ondas de baixa freqüência, fato que poderia ser explicado pelas observações de Rodrigues e Guedes Soares (1999) de que muitas vezes as ondas de ventos próximas a costa se desenvolvem na presença de algumas baixas freqüências espectrais (*swell*), provindas do oceano aberto. Assim, torna-se mais difícil a separação precisa de estados de *swell* de vagas, pois os dados de T_p , registrados aleatoriamente pelos instrumentos, podem subestimar os

valores do parâmetro real do campo de ondas incidente. Porém, a associação realizada entre as variáveis da pista de ventos, os registros de ondas na área de estudo e observações efetuadas diretamente na praia foram fundamentais para separar os estados de mar apresentados neste estudo. Com isso, foi possível identificar que o tamanho da não pista de ventos (área entre a pista de ventos e à costa) é fundamental para que possa ser registrado espectro de ondas de pico único. Na região da plataforma interna paranaense foram raros tais espectros de ondas predominantemente com pico único (relacionados ao outono e primavera), já que a costa sul brasileira está muito próxima das áreas de geração destes tipos de ondas.

Um dado relevante para melhor caracterizar os estados de mar seria obter dados meteorológicos sobre os pontos de registros de ondas na plataforma interna paranaense. Isto porque, segundo Miles (1957) o efeito da pressão do vento induzida na superfície da água, reforça o crescimento das ondas na área de geração e com isso seria possível melhor distinguir as diferenças direcionais dos campos de ondas e pistas de ventos registrados.

Outro importante sistema gerador de *swell*, identificado por Alves e Melo (2001), foi a passagem de tempestades ao longo da costa da Patagonia (Argentina) que desviam para E aos 40°S. Estes sistemas provocaram os estados de *swell* dispersivos registrados na costa de São Francisco do Sul (SC) (ALVES e MELO, 2001). No presente estudo, entretanto, tal fenômeno não teve significativa importância com relação às frentes frias e ciclones subtropicais.

Aos 10 m de profundidade Porto Lima (2009) mediu valores de $H_{m\acute{a}x}$ de até 5,44 m, e o presente autor observou e identificou dois eventos com este tipo de ondas, cuja zona de arrebentação foi sobre o banco submerso da isóbata dos 8 m. Em dois anos de observações visuais da oceanografia costeira no Balneário Grajaú foi possível identificar que ondas geradas por ciclones subtropicais foram capazes de aumentar a zona de surfe em até três vezes do que comumente é observado. O resultado batimétrico do local mostrou que um terceiro banco submerso (barra) a aproximadamente 800 m da face praial condicionou as alturas de quebra de ondas superiores a 4,5 m. Até o presente momento, segundo Angulo (1992), as praias do

arco praiado estudado eram caracterizados por pelo menos duas barras na zona de surfe.

Analisando os resultados obtidos por Nemes (2005) quando qualificou a quebra de ondas no Balneário Grajaú a partir de parâmetros de ondas e de surfabilidade foi possível concluir que as qualificações ótimas para a prática do surfe foram dadas para ondas com origem em ciclones subtropicais em estado de mar do tipo *swell*. Já qualificações inferiores ou ruins para a prática do esporte foram geralmente atribuídas às ondas incidentes associadas a frentes frias, cujos ventos e irregularidade das ondas foram determinantes para tal classificação.

A direção da corrente longitudinal referente aos estados de mar com alta energia de ondas se deu de Norte para Sul, diferentemente do proposto por Veiga (2006), quando sugere que as mais altas energias de ondas são observadas com direção de Sul para Norte originado pela passagem de sistemas frontais. Mesmo que os registros geológicos indiquem que a predominância da deriva litorânea é para norte na plataforma paranaense e, sabendo que a corrente longitudinal é o resultado da incidência oblíqua à costa (CHRISTOFOLLETTI, 1980), Marone *et al.*, (1997) já observaram que a deriva pode ocorrer em ambos sentidos em escalas de tempo menores (horas, dias, semanas).

As ondulações de direção SE, E e ESE incidentes sem a ação de um sistema frontal sobre a área de estudo, a deriva litorânea com sentido de Norte para Sul foi predominante. As simulações realizadas com o modelo de ondas WWM mostram que os vetores de ondas tanto para os estados de *swell*, vagas e evento extremo são representados com incidência distinta da inicial no setor centro e norte, região identificada pelos Balneários de Pontal do Sul, Leblon a Ipanema, determinados pela Ilha de Currais (difração). Existe uma complexa refração de ondas na plataforma interna rasa paranaense dando origem a uma importante corrente longitudinal (N para S) na região do Balneário Grajaú. Carter (1988) afirma que a principal forçante da origem de correntes longitudinais é a chegada oblíqua do trem de ondas à costa.

Albertini (2010) encontrou grande variabilidade de direção nas correntes costeiras na isóbata de 10 m no Balneário Shangrilá, distante a aproximadamente 7 km a ENE do ponto de observação visual no Balneário Grajaú realizado no presente

estudo. O autor caracteriza que o sentido de Sul para Norte das correntes costeiras está associado à passagem de frentes frias, o que também foi observado no presente estudo. Porém, no sentido das correntes de Norte para Sul, Albertini (2010) não encontrou uma boa correlação entre os ventos e correntes, mesmo assim, sugeriu que a ação de ventos NE é que estaria originando tais correntes. Mas, Angulo (1993) e mais recentemente Christófaró (2010) apresentaram resultados de ventos locais, que levam a inferir que os ventos de direção E (oblíquos a costa paranaense) são mais importantes e mais constantes que os de NE na origem das correntes longitudinais de sentido de Norte para Sul. Porém, a reorientação do trem de ondas causado pela Ilha de Currais e o “canal” entre o delta e a Ilha (apresentado pelo WWM) foram mais importantes para a observação da corrente longitudinal de Norte para Sul do que os ventos observados durante o evento.

As correntes de retorno na praia do Balneário Grajaú também tiveram um padrão associado às incidências de ondas apresentadas. Com a passagem de frente fria e ondulações do quadrante S as correntes de retorno foram observadas inclinadas para Norte. Com qualquer outro tipo de ondulação incidente, inclusive SSE, as correntes de retorno foram observadas inclinadas ou levemente inclinadas para Sul. A partir das observações realizadas no presente estudo e as realizadas por Nemes (2005) na mesma área de estudo foi elaborado um modelo esquemático da forma das correntes geradas por ondas no Balneário Grajaú (Figura 31).

As simulações realizadas com o modelo numérico de ondas WWM apresentaram resultados proporcionais aos observados na praia do Balneário Grajaú, visto que somente os parâmetros de ondas foram utilizados sobre a batimetria medida. Porto Lima (2008) obteve resultados aceitáveis ao utilizar o mesmo modelo numérico para simular a quebra de ondas sobre um recife artificial e, assim, propor uma contenção da erosão praial no Município de Matinhos (PR). O método desenvolvido por Hsu *et al.* (2005) possui a vantagem de exibir com maior precisão os resultados em batimetrias complicadas com limites irregulares em áreas de águas rasas. Para produzir três respostas com resultados proporcionais aos observados na praia, foram realizados vários testes e ajustes em funções específicas na configuração do modelo utilizado (equações de quebra e propagação de onda e de interações) e uma significativa contribuição do presente estudo foi

efetivamente aplicada no exaustivo processo de validação do modelo numérico de ondas para águas rasas. Todavia, para que o modelo forneça respostas fiéis ao observado nas praias paranaenses (validado), ainda se faz necessário regular e validar cálculos específicos dos fenômenos físicos gerados por ondas em águas rasas, associados às observações visuais por uma pessoa experiente e com conhecimentos específicos de quebra de ondas nas praias do Paraná.

Para simular um evento extremo buscou-se o cenário com maior densidade espectral na região estudada, cujos valores dos parâmetros de ondas H_s e T_p que fossem relativamente altos, entre os dados obtidos a 30 m e que o momento observado no Balneário Grajaú fosse correspondente. O cenário selecionado apresentou espectro de ondas com dois picos verdadeiros de baixa frequência e outros 2 representados pela aleatoriedade nas medidas espectrais, assim como múltiplos picos representados pela coexistência de ondas de ventos locais. Rodrigues e Guedes Soares (1999) observaram que a percentagem global de espectros de pico duplo, com estrutura bimodal é cerca de 20-25% em áreas costeiras e oceânicas.

Os diagramas para o evento extremo definido e simulado caracterizaram os principais pontos nas praias, do arco praias Ponta de Pontal do Sul - Ponta de Caiobá, capazes de receber classes de alturas de ondas superiores que as adjacentes, através da convergência e divergência do trem de ondas sobre a batimetria medida. Os pontos parecem ser definidos pela difração que ocorre na ilha de Itacolomi e Currais, sendo reorientado pela topografia da plataforma e incidindo com maiores classes de altura de ondas nas regiões próximas aos deltas de maré vazante (ao norte), Balneário Grajaú/Ipanema (no centro norte), Balneário Praia de Leste e Gaivotas (no centro) e Pico de Matinhos (ao sul). Tais regiões foram reconhecidas pelo presente autor como as que comumente recebem relativamente as maiores alturas de quebra de ondas da região paranaense. Cabe ressaltar que para o modelo numérico de ondas forneça respostas fiéis às observadas nas praias paranaenses (validado), ainda se faz necessário regular e validar cálculos específicos dos fenômenos físicos gerados por ondas em águas rasas.

Para simular o estado de *swell* e de vagas foram utilizados os parâmetros de ondas mais representativos, dentro do conjunto original de dados de ondas a 30 m,

que fossem proporcionais aos parâmetros modais identificados na caracterização dos estados de mar naquela profundidade. O cenário de estado de vaga simulado foi selecionado com os parâmetros de ondas do verão, cujo momento do espectro de ondas medido representou um mar multimodal. Já o estado de *swell* foi selecionado pelo cenário espectral com um pico único e estreito de frequência baixa e densidade relativamente alta.

Em ambas as simulações os valores de H_s foram menores que os obtidos e observados pelo presente estudo. Porém, todas as simulações realizadas caracterizaram a perda da altura de ondas ao longo da batimetria medida e o tamanho da zona de surfe (95 m para vagas, 150 m para *swell* e 230 m para evento extremo), sendo proporcionais às observações visuais encontradas nestes eventos na praia do Balneário Grajaú.

Os padrões morfológicos que ocorrem entre o delta de maré e a Ilha de Currais, já identificado por Souza (2005), causam o padrão de refração das ondas incidentes na porção centro-norte da área de estudo (Balneários). Na crista da isóbata de 15 m, centro do canal (em direção à costa), há divergência dos vetores de ondas e isso, causado pela maior profundidade deste local, se propagam classes de altura de ondas maiores em pontos mais próximos da linha de costa (Balneário Grajaú a Ipanema). Veiga (2006) identificou a ocorrência de ondulações de areia (*sand waves*) causada pelos movimentos oscilatórios das ondas, evidenciando assim a incidência de maior energia de ondas neste local. É provável que devido a esta topografia e a complexa refração existente fosse possível ter observado ondas maiores que 4,5 m de altura de quebra incidentes no Balneário Grajaú.

Isto sugere que há, em primeiro momento, um aprisionamento dos sedimentos que chegam à região do delta do Canal da Galheta pela quebra das ondas (visto a diminuição da altura das ondas no diagrama WWM), formando extensos bancos de areia na região (delta). O caminho percorrido resultante da quebra das ondas na região do delta faz com que as correntes naturalmente fluam de leste para oeste (direção da quebra de ondas no local). Como logo ao sul do delta há aquele “canal”, surgem evidências que alguma porcentagem do sedimento estaria sendo levado pela corrente de deriva de Norte para Sul e estariam alimentando os bancos submersos das áreas adjacentes. Isto pode ser plausível

pelo fato de um banco submerso estar condicionando a quebra das ondas a mais de 600 m da face praial no Balneário Grajaú e, segundo, nos dados sedimentares apresentados por Veiga (2006) é possível identificar que os sedimentos do perfil amostrado sobre o delta é basicamente o mesmo amostrado em um perfil aproximadamente na zona de surfe e ante-praia (10m de profundidade) do Balneário Grajaú. Hoefel e Elgar (2003) explicam que correntes longitudinais à costa transportam sedimentos, colocados em suspensão pelas ondas, podendo movê-los potencialmente ao longo de vários quilômetros através de processos de meso escala temporal conhecido como deriva litorânea.

Já na porção centro Sul da área de estudo os vetores direcionais de ondas, apresentados pelo WWM para ambos cenários, convergem aproximadamente nos Balneário Praia de Leste e Gaivotas. Região onde é possível identificar visualmente um acúmulo de sedimentos na face praial superior às de áreas adjacentes a este balneário, reforçando a importância da corrente longitudinal de Norte para Sul identificado no presente estudo.

O objetivo de caracterizar o clima de ondas na área de estudo foi atingido com o conjunto de dados obtidos sistematicamente de acordo com a metodologia aplicada. Com os dados de ondas obtidos e observações visuais dos processos experimentados na praia foram fundamentais para que os resultados obtidos com simulações numéricas de ondas pudessem ser uma importante ferramenta para a descrição dos processos físicos gerados por ondas na plataforma interna rasa paranaense.

À medida que novos testes e outras evoluções na complexa física das interações das ondas, de atrito e processos de refração de ondas sejam conquistadas, suficientemente quantitativas, a validação do modelo WWM para ambientes de águas rasas permitirá uma previsão com confiança na dinâmica da plataforma interna rasa do Estado do Paraná. Juntas, estas análises contribuem para o manejo costeiro integrado e nas diretrizes da ocupação e recuperação da orla litorânea paranaense, apresentada por Angulo e Araújo (1996).

7. CONCLUSÕES

Esta é a primeira vez que a climatologia de ondas foi descrita com alto nível de detalhamento na costa paranaense. Desta maneira, este estudo torna-se altamente descritivo das principais características associadas a ondas geradas pelos ventos que se propagam na plataforma interna rasa do Paraná. O simultâneo registro de dados de ondas em duas profundidades, o detalhamento das condições oceanográficas numa praia oceânica da região e o monitoramento das tempestades no setor ocidental do Atlântico Sul são de grande importância para caracterizar os processos físicos que ocorrem na região.

O regime de ondas na plataforma interna rasa do Estado do Paraná é dominado por ondas de alta frequência (vagas) formadas por ventos próximos à costa (< 1000 km da linha de costa do Estado do Paraná) originados por frentes frias e ciclones subtropicais, estes em fase inicial. A direção predominante de propagação de ondas na plataforma interna é SSE.

Os principais estados de mar incidentes na costa paranaense são mais determinados pelo posicionamento das pistas de ventos do que à passagem de frente fria. As frentes frias são os potenciais formadores de marés meteorológicas. Porém, não é este sistema meteorológico que origina ondas de maior energia na costa paranaense. Os ciclones subtropicais são os sistemas meteorológicos mais importantes para a incidência de alta energia de ondas na costa paranaense. Os estados de *swell* na costa do Paraná são predominantemente originados por ciclones subtropicais. Em caráter de manejo costeiro e conseqüências erosivas na costa, as temporadas de primavera e outono são importantes para caracterizar os fenômenos de caráter destrutivo.

Devido à extensão da profundidade e a baixa declividade da plataforma interna rasa do Estado do Paraná, as ondas perdem altura na sua propagação em direção à costa. Ao incidirem na plataforma interna, as ondulações perdem altura entre os 30 m e 18 m de profundidade. O consumo de energia pelo atrito estrutural da onda com o fundo foi maior do que o fenômeno de acúmulo e empinamento.

A contribuição do modelo numérico de ondas foi fundamental para inferir sobre a propagação de ondas sobre a batimetria da plataforma interna. As respostas obtidas foram fundamentais para que pudessem ser compreendidas as observações visuais na praia oceânica da região e explicar os registros de incidência de ondas a mais de 800 m da face praial e a importante corrente longitudinal (N para S) identificada.

Existe uma acentuada variação sazonal como também evidências de variações inter-anuais dos principais parâmetros incidentes de ondas, que somente serão claramente identificadas com a continuidade do monitoramento e registro de ondas na região central da plataforma interna do Estado do Paraná.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. D. Climate Change. In.____Meteorology Today. San Francisco: Thomson Brooks/Cole, 2007. Cap. 16, p.430-484.

ALBERTINI, A. L. 2008. **Caracterização das correntes da plataforma rasa no Balneário de Shangrilá, PR, Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

ALVES, J. H. F. M. **Refração do espectro de ondas oceânicas em águas rasas: aplicações à região costeira de São Francisco do Sul, SC.** Florianópolis, 1996. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental) – CPGEA, UFSC.

ALVES, J. H. G. M., MELO, E. 2001. Measurement and modeling of wind waves at the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 49 (1/2): 13-28.

ANGULO R. J. 1984. As Praias do Paraná - Problemas Decorrentes de Uma Ocupação Inadequada. *Análise Conjuntural*, Ipardes, Curitiba, 6(1):1-4. Curitiba.

ANGULO,R.J. 1992. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná.** Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 334p.

ANGULO,R.J. 1993a. **Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas.** *Boletim Paranaense Geociências*. Curitiba. **41**:52-72.

ANGULO, R. J. 1996. **Problemas na terminologia de ambientes e subambientes litorâneos clásticos dominados por ondas.** *Boletim Paranaense Geociências*. Curitiba. **44**:51-57.

ANGULO R. J. & ARAÚJO A. D. 1996. Classificação da costa paranaense com base na sua dinâmica, como subsídio à ocupação da orla litorânea. *Bol. Par. Geoc.* Curitiba. 44:7-17.

ARAÚJO, R. N. and ALFREDINI, P., 2003. Longshore Sediment Transport rate along Suarão and Cibratel Beaches, Itanhaém, SP, Brazil. *Jornal of Coast Reseach*, SI 35

(Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management), 232-243. Itajai, SC – Brazil, ISSN 0749-0208.

ARAÚJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave Regime Characteristics of The Southern Brazilian Coast. Proceedings of the sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper n° 097; pp 15, 2003.

AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos; revisão de Suely Bastos; coordenação editorial de Antonio Christofolletti. – 10ª ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

BANDEIRA, J. V. (1974). **Estudo estatístico das ondas ao largo da Baía de Pranguá**. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BATTJES, J. A., STIVE, M. J. F. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. Journal Geophysical Research, 90, No. C5, 9159-9167, 1985.

BLACK, K., MEAD, S. **Design of the Gold Coast Reef for Surfing, Public Amenity and Coastal Protection: Surfing Aspects**. Journal of Coastal Research, SI29, 115-130, 2001.

BRANCO, F. V. (2005). **Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas da costa brasileira**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo.

CALLIARI, L. J. & A. H. KLEIN 1993. **Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS**. *Pesquisas*, **20**(1): 48-56.

CARTER, R. W. G. Coastal Environments an Introduction to The Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines. St Edmunds, St Edmundsbury Press Limited, 1989.

COLI, A. B., MATA, M. M. **Caracterização das Alturas de Ondas no Atlântico Sul Ocidental Através da Altimetria**. Anais, VIII Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 1996, Salvador. Furg: Rio Grande, 1996. P. 755-780.

CHRISTÓFARO, B. R. Estudo do potencial eólico em *offshore* para a geração de energia elétrica no litoral do Paraná. 2010. 99f. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Paraná. 2010.

DALLY, W.R. **The Maximum Speed of Surfers**. Journal of Coastal Research, SI29, 33-40, 2001.

DEZINHO, H. **Estudo da dinâmica praias como subsídio à gestão costeira do Balneário de Pontal do Sul, Pr.** 2004. 56f. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Paraná. 2004.

DINIZ, F. A. e KOUSKY, V. E. Ciclone no Atlântico Sul: análise sinótica e observação. 2004. Trabalho apresentado no 13. Congresso Brasileiro de Meteorologia: **Meteorologia e o desenvolvimento sustentável**. Fortaleza, 2004.

FEDEROVA, N., CARVALHO, M. H. e SILVA, R. S. Processos sinóticos em anos de La Niña/Niño: Vórtices Ciclônicos. **Anais** do n 11. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000.

GALVIN, C. J. Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches. Journal of geophysical reseach, v 73, p3651-3659. 1968.

HOEFEL, F. G. ELGAR, S. Wave-Induced sediment transport and sandbar migration. **Science**, v. 299, p. 1885-1887, mar 2003.

HOLTHUIJSEN, L. H. Description of ocean waves. In____. Waves in Oceanic and Coastal Waters. New York: Cambridge University Press, 2007. Cap. 3, p. 24-52.

HOLTHUIJSEN, L. H. Statistics. In____. Waves in Oceanic and Coastal Waters. New York: Cambridge University Press, 2007. Cap. 4, p. 56-105.

HOLTHUIJSEN, L. H. Linear wave theory. In____. Waves in Oceanic and Coastal Waters. New York: Cambridge University Press, 2007. Cap. 7, p. 197-242.

HOLTHUIJSEN, L. H. Waves in coastal waters. In____. Waves in Oceanic and Coastal Waters. New York: Cambridge University Press, 2007. Cap. 8, p. 244-284.

HSU, T-W., OU S-H., LIAU J-M., ZANKE, U., ROLAND, A., MEWIS, P. **Development and Implement of a Spectral Finite Element Wave Model.** ASCE/COPRI, The fifth International Symposium on Wave Measurement and analysis. Ed. Billy Edge, Madrid, Spain, 2005.

HUTT, J. A., BLACK, K.P., MEAD, S. T. Classification of Surf Breaks in Relation to Surfing Skill. Journal of Coastal Research, SI29, 66-81, 2001.

IAPAR. 1978. Manual agropecuário para o Paraná. IAPAR – Fundação Instituto Agrônômico do Paraná.

INPH. (1985). **Medições de ondas em Paranaguá/PR – 01/09/1982 a 31/08/1983.**

INTEROCEAN, S. S4 Current Meter: Users`Manual. San Diego: InterOcean Systems, 1994, 180p.

KLEIN, A. H. F.; SANTANA, G. G.; DIEHL, F. L. and MENEZES, J. T. 2003. **Analysis of Hazards Associated with Sea Bathing: Results of Five Years Work in Oceanic Beaches of Santa Catarina State, Southern Brazil.** Journal of Coast Research, SI 35 (Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management), 107-116. Itajaí, SC – Brazil, ISSN 0749-0208.

KRUGUER, C. P. Integração do GPS e da ecobatimetria. Boletim de Ciências Geodesica, Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. 1999, V. 5, p.55-68.

KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation.** 2nd ed. Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA, 1998.

MARONE, E. 1991. **Processamento e análise de dados de maré: Discurso dos métodos.** Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 264p.

MARONE, E; GUIMARÃES, M. R.; CAMARGO; R.; PRATA JUNIOR, V. P.; KLINGEFUSS, M. S. (1995). Caracterização física das condições oceanográficas,

meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da Baía de Paranaguá. In: **CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR**, 6., Mar del Plata, Argentina. Resumos. P. 129.

MARONE, E., CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. *Nerítica*, Curitiba, v.8 (1-2), 73-85, 1994.

MARONE, E; MANTOVANELLI, A; NOERNBERG, M. A.; KLINGENFUSS, M. S.; LAUTERT, L. F. C.; PRATA JUNIOR, V. P. (1997). **Caracterização física do complexo estuarino da Baía de Paranaguá**. Pontal do Sul: UFPR. v.2. Relatório consolidado do convênio APPA/CEM.

MARTINS, G. J. **Dinâmica da zona de arrebentação e suas potenciais conseqüências no transporte de sedimentos na costa adjacente à desembocadura sul do completo extuarino de Paranaguá-Pr.** 2002. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Setor de ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

MEAD, S., BLACK, K. Field Studies Leading to The Bathymetric Classification of World-Class Surfing Breaks. *Journal of coastal research*, SI29, 5-20, 2001.

MELO, E. F. **Projeto sentinelas do mar: Instruções para efetuar as observações**. Relatório Interno do Laboratório de hidráulica marítima, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002, n.001, p.1-12.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal Fluid Mech.*, v 3, 185-204, 1957.

NEMES, D. D. **Relação entre bancos ondas e surfabilidade: Exemplos de praias do sul do Brasil**. 2006. 85f. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Centro Tecnológico da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina. 2006.

NOBRE, C. A.; CAVALCANTI, M. A. G.; NOBRE, P.; KAYANO, M. T.; RAO, V. B.; BONATTI, J. P.; SATYAMURTI, P.; UVO, C.B.; COHEN, J. C. Aspectos da Climatologia Dinâmica do Brasil. *Climanálise*. Número especial, 1986.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção da Amazônia.** 1986. Dissertação (Mestrado) - São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais.

PHILLIPS, O. M. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal Fluid Mech.*, V 2, 417-445, 1957.

PORTOBRAS. (1983). **Campanha de medições de ondas em Paranaguá – PR, período 21.08.1982 a 21.01.1993.** Rio de Janeiro, Inst. Psq. Hidrog. (INPH), Div. Lev. (DIDELE), 23p.

PORTO LIMA, M. G. **Controle da erosão em praias arenosas pelo método de recifes submersos: praia brava de matinhos – PR.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

QUADROS, C. J. L. **Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense.** 2002. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Setor de ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

QUADROS, C. J. L.; MARONE, E.; ÂNGULO, R. J.; MARITINS, G. J.; NETTO JR, J. P. B. **Dinâmica morfosedimentar associada à incidência de sistemas frontais em duas praias do litoral paranaense.** *Boletim Paranaense de Geociências, UFPR*, n. 60-61, p. 65-74, 2007.

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade.** 2008. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

REMAC. Projeto de reconhecimento global da margem continental brasileira. Mapa batimétrico da margem continental brasileira. ZEMBRUSCKI, S. G.; FRANÇA, A. M. C. PETROBRAS-CENPES/Projeto REMAC. Rio de Janeiro, 1976.

RODRÍGUES, G., GUEDES SOARES, C. A criterion for the automatic identification of multimodal sea wave spectra. *Elsevier Science, Applied Ocean Research* 21, 329-333, 1999.

SHORT, A. D.; AAGAARD, T. **Single and Multi-Bar Beach Change Models.** Journal Coastal Research, SI 15, p. 141-157, 1993.

SHORT, A. D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics.** Book Ed. John Wiley 7 Sons Ltd, England, 1999.

SOARES, C. R. *et. al.* 1994 **Variações na linha de costa no Balneário de Pontal do Sul (PR) no período de 1953 – 1993 : um balanço sedimentar.** *Boletim Paranaense de Geo-Ciências.* **42:** 161 – 171. Referências Bibliográficas 123

SOARES, C. R.; C. A. BORZONE & J. R. B. SOUZA 1997. **Variações morfológicas e sedimentológicas ao longo de um ciclo anual numa praia arenosa no sul do Brasil.** *Ecologia de Praias Arenosas do Litoral Brasileiro.* **03:** 245-258.

SUDERHSA. Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos. **Avaliação das disponibilidades hídricas, eventos críticos e monitoramento do uso de recursos hídricos,** 1.2, Paraná, Cobrape, 2007.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Marinha.** Ed. T. A. Queiroz, LTDA, Vol 15, São Paulo, 1992.

TESSLER, M 1988. **Dinâmica sedimentar quaternária no litoral sul paulista.** São Paulo. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo.

VEIGA, F. A. 2004. **Processos Morfodinamicos e sedimentológicos na plataforma interna rasa paranaense.** Tese (Doutorado em geologia ambiental) - Setor de ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

WRIGHT, T. D.; SHORT, A. D. Morfodynamics Variability of Surf Zones and Beach: A Synthesis. *Marine Geology,* 56, p. 93-118, 1984.

WALKER, J.R. Recreational Surf Parameters. Technical report, University of Hawaii, Laboratory of oceanographic engineering, 73-30, 311p.