



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.27.19.33-TDI

## SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS AO LARGO DO LITORAL BRASILEIRO

Jonas Takeo Carvalho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pelo Dr. Valdir Innocentini, aprovada em 04 de outubro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38B693L>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

**PUBLISHED BY:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.27.19.33-TDI

## SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS AO LARGO DO LITORAL BRASILEIRO

Jonas Takeo Carvalho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pelo Dr. Valdir Innocentini, aprovada em 04 de outubro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38B693L>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

C253s Carvalho, Jonas Takeo.  
Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro / Jonas Takeo Carvalho. – São José dos Campos : INPE, 2010.  
xxiv+ 143 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.27.19.33-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientador : Dr. Valdir Innocentini.

1. Ondas oceânicas de gravidade. 2. Energia de ondas . 3. Particionamento de espectro. 4. Modelagem numérica. I.Título.

CDU 551.46.072

---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Meteorologia**

**Dra. Maria Paulete Pereira Martins**



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

**Dr. Valdir Innocentini**



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

**Dr. Audálio Rebelo Torres Junior**



Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

**Aluno (a): Jonas Takeo Carvalho**

**São José dos Campos, 04 de outubro de 2010.**



*“Procure ser um homem de valor em vez de procurar ser um homem de sucesso”.*

ALBERT EINSTEIN



Dedico esta dissertação a meus pais, que me proporcionaram todas as condições emocionais e financeiras ao longo de minha vida para hoje realizar com imenso prazer todos os meus estudos e o trabalho que faço.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os meus colegas de mestrado, pelos estudos e pela amizade durante estes 2 anos. Aos amigos Franklin (peruano doido), Vinicius (bichão), Marília Shimizu, pelo incentivo ao trabalho, cafezinhos, risadas, e principalmente nas tristezas do time de futsal da Meteoro e alegrias proporcionadas pelo nosso tricolor.

Jeferson, Marília Gregório, Samantha e Iury, nem sei como agradecer por tudo ! Foram muitos momentos de amizade, sacanagem, comilança.... são grandes amigos !

Ao meu orientador, Valdir Innocentini, meus sinceros agradecimentos por sua compreensão e paciência, me ajudaram muito na evolução do meu trabalho, no meu crescimento profissional, científico e pessoal.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro durante a realização desta dissertação.



## RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma climatologia da energia de ondas para o litoral brasileiro através de modelagem numérica. Os dados de vento para a simulação da agitação marítima foram provenientes da previsão global do NCEP, entre os anos de 1997 e 2009. O modelo de ondas utilizado foi o WAVEWATCH III (WW3), com resolução espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$  para um domínio global. Foi desenvolvido um algoritmo de particionamento do espectro, com a finalidade de separar a energia pertencente a sistemas de ondas distintos. Foram obtidas médias mensais de altura significativa, período de pico e fluxo de energia, distribuídas pelas direções de pico dos sistemas computados e nos meses de 1997 a 2009. Os resultados mostram que os sistemas de onda provenientes das direções sul são frequentes desde a região oceânica sul do Brasil até o litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte e são mais intensos entre o litoral do Estado de Santa Catarina e sul do Estado do Espírito Santo. Os sistemas de onda das direções de nordeste estão presentes em todo litoral brasileiro, sendo mais frequentes e intensos do Estado do Espírito Santo ao Estado do Amapá, com sistemas de norte bastante presentes a partir do Estado de Rio Grande do Norte. Os sistemas de ondas provenientes de sudeste também estão presentes em todo litoral brasileiro, porém de forma menos frequente na região sul, com porcentagem de casos aumentando em direção ao nordeste, apresentando médias elevadas de altura significativa na região norte do Brasil. As médias de fluxo de energia foram maiores entre as regiões oceânicas do Estado do Rio Grande do Sul e sul do Estado de Santa Catarina (na latitude de Florianópolis-SC). Entre o Estado de Sergipe e leste do Estado do Rio Grande do Norte, os valores de médias de fluxo de energia também são elevados e acima de  $10 \text{ kW/m}$  durante todo ano. Levando-se em conta a proximidade do litoral desta região do nordeste com a quebra da plataforma continental (área com profundidades elevadas), esta região do nordeste pode ser considerada a mais indicada para instalação de conversores de energia de ondas do tipo *offshore*.



# SIMULATION OF THE SEA SURFACE WAVE ENERGY CLIMATE ALONG THE BRAZILIAN COAST

## ABSTRACT

In this work a wave energy climatology was performed through numerical modelling in order to investigate the potential of wave power along the Brazilian coast. The wind data utilized to simulate the waves systems were provided by the NCEP global atmospheric model from 1997 to 2009, each 3 hours. It was utilized the WAVEWATCH III (WW3) ocean wave model, with  $1^\circ \times 1^\circ$  spatial resolution for a global domain. It was developed an algorithm of spectral separation to compute the energy from distinct wave systems. The significant wave height, peak period and monthly average wave energy flux for each wave system were computed. The results showed that southerly wave systems are more frequent along the Brazilian coast from Rio Grande do Sul State to the Rio Grande do Norte State. These systems are more intense from Santa Catarina State to the south of Espírito Santo State. The wave systems from northeast are present in the whole Brazilian coast, with more frequency and intensity from Espírito Santo State to Amapá State. Northerly wave systems were observed at the northeast and north Brazilian coast mainly due to developing extratropical cyclones over North Atlantic. The wave systems from east and southeast are also present in the whole Brazilian coast, but less frequent in the south of Brazil, with occurrences increasing at the northeast and north of Brazil, where the mean significant wave height was higher. The average wave power computed was highest from Rio Grande do Sul State to south of Santa Catarina State (at Florianópolis's latitude). From the Sergipe State to the east oceanic area of Rio Grande do Norte State, the wave power mean values are also high, upon 10 kW/m during all year. Considering the proximity of this area to the continental shelf break (high deep region), it could be considered the most feasible region to the installation of offshore wave energy converter.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Distribuição do fluxo de energia aproximada (kW/m). . . . .	3
1.2 Região de estudo com os 58 pontos da saída do modelo . . . . .	4
2.1 Características de uma onda. . . . .	5
2.2 Forma do espectro de Pierson-Moskowitz e JONSWAP. . . . .	9
2.3 Variação de energia do espectro em relação ao tamanho da pista . . . . .	10
4.1 Coluna de água oscilante (OWC) . . . . .	16
4.2 Point absorber ou Corpos flutuantes . . . . .	17
4.3 Dispositivo de Galgamento . . . . .	17
4.4 Principais componentes do Wave Dragon . . . . .	18
4.5 Ilustração do Pelamis . . . . .	19
5.1 Representação de uma pequena coluna de fluido . . . . .	22
6.1 <i>Médias da intensidade dos ventos (m/s) na região de estudo no período de 1997 a 2009 apresentadas por estações do ano.</i> . . . . .	30
7.1 <i>Processo de particionamento em uma matriz <math>E(i, j)</math> fictícia</i> . . . . .	37
7.2 Desempenho dos fatores de <i>wave age</i> sobre um espectro . . . . .	38
8.1 Região de estudo . . . . .	41
8.2 <i>Área 1 -Norte da Argentina e Uruguai, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i> . . . . .	43
8.3 Número de casos acima do Percentil 90 % . . . . .	45
8.4 <i>Percentil 90% da altura significativa - Área 1</i> . . . . .	46
8.5 Número de casos acima do Percentil 99 % . . . . .	47
8.6 <i>Percentil 99% da altura significativa - Área 1</i> . . . . .	48
8.7 <i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 1</i> . . . . .	49
8.8 Média de fluxo de energia por direção - Área 1 . . . . .	50
8.9 <i>Área 2, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i> . . . . .	51
8.10 Número de casos acima do Percentil 90 % . . . . .	52
8.11 <i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 2</i> . . . . .	54
8.12 Número de casos acima do Percentil 99 % . . . . .	55

8.13	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 2</i>	56
8.14	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 2</i>	57
8.15	<i>Média de fluxo de energia por direção - Área 2</i>	57
8.16	<i>Área 3, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	59
8.17	<i>Número de casos acima do Percentil 90 %</i>	60
8.18	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 3</i>	61
8.19	<i>Número de casos acima do Percentil 99 %</i>	62
8.20	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 3</i>	63
8.21	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 3</i>	64
8.22	<i>Média de fluxo de energia por direção - Área 3</i>	65
8.23	<i>Área 4, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	66
8.24	<i>Número de casos acima do Percentil 90 %</i>	67
8.25	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 4</i>	68
8.26	<i>Número de casos acima do Percentil 99 %</i>	69
8.27	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 4</i>	70
8.28	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 4</i>	71
8.29	<i>Média de fluxo de energia por direção - Área 4</i>	72
8.30	<i>Área 5, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	73
8.31	<i>Número de casos acima do Percentil 90 %</i>	75
8.32	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 5</i>	76
8.33	<i>Número de casos acima do Percentil 99 %</i>	77
8.34	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 5</i>	78
8.35	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 5</i>	79
8.36	<i>Média de fluxo de energia por direção - Área 5</i>	79
8.37	<i>Área 6, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	81
8.38	<i>Número de casos acima do Percentil 90 %</i>	82
8.39	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 6</i>	83
8.40	<i>Número de casos acima do Percentil 99 %</i>	84
8.41	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 6</i>	85

8.42	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 6</i>	86
8.43	Média de fluxo de energia por direção - Área 6	87
8.44	<i>Área 7, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	88
8.45	Número de casos acima do Percentil 90 %	90
8.46	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 7</i>	91
8.47	Número de casos acima do Percentil 99 %	92
8.48	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 7</i>	93
8.49	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 7</i>	94
8.50	Média de fluxo de energia por direção - Área 7	94
8.51	<i>Área 8, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	96
8.52	Número de casos acima do Percentil 90 %	97
8.53	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 8</i>	98
8.54	Número de casos acima do Percentil 99 %	99
8.55	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 8</i>	100
8.56	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 8</i>	101
8.57	Média de fluxo de energia por direção - Área 8	101
8.58	<i>Área 9, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	103
8.59	Número de casos acima do Percentil 90 %	104
8.60	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 9</i>	105
8.61	Número de casos acima do Percentil 99 %	106
8.62	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 9</i>	107
8.63	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 9</i>	108
8.64	Média de fluxo de energia por direção - Área 9	109
8.65	<i>Área 10, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa</i>	110
8.66	Número de casos acima do Percentil 90 %	111
8.67	<i>Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 10</i>	112
8.68	Número de casos acima do Percentil 99 %	113
8.69	<i>Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 10</i>	114

8.70	<i>Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 10</i> . . . . .	115
8.71	Média de fluxo de energia por direção - Área 10 . . . . .	115
9.1	Média anual de energia (kW/m) . . . . .	121
A.1	Representação de uma pequena coluna de fluido . . . . .	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OPEP	–	Organização dos Países Produtores de Petróleo
IEA	–	International Energy Agency
JONSWAP	–	Joint North Sea Wave Project
WMO	–	World Meteorological Organization
ZCIT	–	Zona de Convergência Intertropical
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
NCEP	–	National Centers for Environmental Prediction
OWC	–	Oscilating Water Column
WW3	–	Wave Watch III Model
SWAN	–	Simulating Waves Nearshore
WAM	–	Wave Analysis Model
ADCP	–	Acoustic Doppler Current Profiler
DWR	–	Directional Wave Rider
P90	–	Percentil 90 %
P99	–	Percentil 99 %



## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	–	Velocidade de fase ( $ms^{-1}$ )
$c_g$	–	Velocidade de grupo ( $ms^{-1}$ )
$g$	–	Aceleração gravitacional ( $ms^2$ )
$a$	–	Amplitude de onda (m)
$k$	–	Número de onda
$u_{10}$	–	Velocidade do vento a 10 metros de superfície ( $ms^{-1}$ )
$f$	–	Frequência de onda ( $s^{-1}$ )
$f_p$	–	Frequência de pico ( $s^{-1}$ )
$H$	–	Altura de onda (m)
$H_s$	–	Altura significativa de onda (m)
$E(f, \theta)$	–	Espectro bidimensional de onda
$E(f)$	–	Espectro unidimensional de onda em função da frequência
$E_p$	–	Energia potencial
$E_c$	–	Energia cinética
$E_L$	–	Energia total por unidade de comprimento
$L$	–	Comprimento de onda (m)
$S_{in}$	–	Termo que representa o processo de geração de ondas pelo vento
$S_{nl}$	–	Processos não lineares (interação onda-onda)
$S_{ds}$	–	Dissipação por quebra ( <i>whitecapping</i> )
$\rho$	–	Densidade da água do mar em superfície ( $kgm^{-3}$ )
$\omega$	–	Frequência angular de onda ( $Rads^{-1}$ )
$\gamma$	–	Fator de pico no espectro JONSWAP
$\sigma$	–	Parâmetro de largura do espectro JONSWAP
$\eta$	–	Elevação da superfície do mar (m)



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Procedimentos para o clima de ondas . . . . .	3
<b>2 FUNDAMENTOS DA FÍSICA DE ONDAS</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Formação e dissipação do espectro de ondas . . . . .	5
<b>3 MODELOS DE ONDAS OCEÂNICAS</b> . . . . .	<b>11</b>
3.1 WAVEWATCH III (WW3) . . . . .	12
<b>4 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDA</b> . . . . .	<b>15</b>
4.1 Dispositivos costeiros . . . . .	15
4.2 Dispositivos próximos à Costa . . . . .	15
4.3 Dispositivos afastados da costa . . . . .	16
<b>5 ENERGIA DE ONDA</b> . . . . .	<b>21</b>
5.1 Energia potencial . . . . .	21
5.2 Energia cinética . . . . .	23
5.3 Fluxo de energia . . . . .	25
<b>6 SISTEMAS METEOROLÓGICOS FORMADORES DE ONDA</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>7 PARTICIONAMENTO DA ENERGIA DO ESPECTRO</b> . . . . .	<b>33</b>
7.1 Algoritmo de particionamento . . . . .	34
7.2 Separação do <i>wind-sea</i> e <i>swell</i> . . . . .	37
<b>8 RESULTADOS</b> . . . . .	<b>41</b>
8.1 Área 1 . . . . .	42
8.2 Área 2 . . . . .	50
8.3 Área 3 . . . . .	58
8.4 Área 4 . . . . .	65
8.5 Área 5 . . . . .	72
8.6 Área 6 . . . . .	79

8.7	Área 7 . . . . .	87
8.8	Área 8 . . . . .	95
8.9	Área 9 . . . . .	101
8.10	Área 10 . . . . .	109
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>117</b>
9.1	Sistemas da banda sul . . . . .	117
9.2	Sistemas da banda nordeste . . . . .	118
9.3	Sistemas da banda sudeste . . . . .	119
9.4	Fluxo de energia . . . . .	121
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>123</b>
	<b>DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ENERGIA POTENCIAL . . . . .</b>	<b>129</b>
	<b>DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA . . . . .</b>	<b>135</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia aumenta a cada ano, principalmente nos países em crescimento industrial como China, Índia e Brasil. Esta demanda aumenta a uma taxa de crescimento de 1,7 % ao ano, entre 2000 a 2030, segundo IEA (2006). Atualmente, 85 % da emissão de gases componentes do efeito estufa no mundo são originados do setor energético (IEA, 2004). Como o uso da energia ainda se baseia principalmente nos combustíveis fósseis, que contribuem para o aumento de gases na atmosfera, cada vez mais é preciso conciliar o desenvolvimento com o uso racional dos recursos naturais.

O embargo à exportação do petróleo imposto por países da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) na década de 1970, impulsionou o investimento de entidades governamentais e a iniciativa privada em fontes de energias renováveis. Uma vez que a poluição ambiental aumenta com o crescimento do consumo e geração de energia, deve-se buscar uma alternativa que resolva ambas situações. Os recursos energéticos renováveis são uma alternativa crescente tanto para países desenvolvidos quanto para países em desenvolvimento, pois representam uma fonte inesgotável de energia, não poluentes e com pouco ou nenhum impacto ao ambiente.

Dentre as fontes de energia renovável, as mais tradicionais são a energia solar, eólica e hidrelétrica. Possuem nível tecnológico avançado e são utilizados em larga escala. Há também o uso da biomassa, produzindo energia em aterros sanitários, onde se aproveita o gás metano emitido pela decomposição do lixo, e o biocombustível, comum no Brasil há mais de 30 anos, cuja idéia está sendo disseminada para os países desenvolvidos.

O enorme potencial energético dos oceanos recebe cada vez mais destaque na busca por fontes energéticas renováveis e não poluentes. A energia proveniente dos oceanos pode ser representada por fontes hidrotermais, localizadas em grandes profundidades e que liberam uma grande quantidade de calor juntamente com minérios de interesse comercial. Outra fonte de energia é extraída das marés, que são geradas pela interação gravitacional entre o Sol, a Terra e a Lua. Há também a energia extraída das ondas de gravidade, geradas pelo vento, que representam um potencial de  $10^{12}$  a  $10^{13}$  Watts (PANICKER, 1976); cerca de 10% da necessidade atual de energia elétrica mundial (IEA, 1994).

O interesse pela energia de ondas não é recente, o primeiro protótipo foi patenteado em 1799 em Paris (FALNES, 2007). Yoshio Masuda foi um dos pioneiros a utilizar, em larga escala, energia de onda para bóias de navegação na década de 1960. O trabalho de Salter (1974), impulsionou a pesquisa no desenvolvimento de mecanismos em larga escala patrocinados por governos, principalmente no Reino Unido. Atualmente há mais de 1000 protótipos patenteados ao redor do mundo (BROOKE, 2003), e programas bem sucedidos na geração de energia elétrica a partir da energia das ondas, como em Portugal, Japão, EUA, Reino Unido, Países Baixos, Austrália e África do Sul.

As ondas de gravidade são consequência da energia solar, uma vez que parte da energia recebida do sol pelo planeta é convertida em energia eólica pela diferença de aquecimento entre os polos e o equador, e parte desta energia é transferida para o oceano. A quantidade de energia produzida pelas ondas depende de como ocorre esta transferência, ou seja, a intensidade dos ventos incidentes, a dimensão da área sobre a qual os ventos estão incidindo (pista) e a duração desta transferência. Alguns fenômenos meteorológicos são responsáveis por esta transferência, principalmente através dos ventos alísios na região equatorial, e pelas tempestades tropicais e extratropicais em médias e altas latitudes.

Na figura 1.1, são apresentados valores de média anual (em kW/m) de energia de onda ao redor de alguns países, porém, pouco se conhece sobre esta variação no litoral brasileiro. Deve-se portanto, estimar a intensidade desta energia e sua variação temporal, através de uma climatologia da energia de ondas, da mesma forma como foi realizada por demais países como Portugal (RUSU; SOARES, 2009) e Suécia (WATERS et al., 2009), por exemplo.

Desta maneira, pode-se identificar quais as regiões com maior potencial para a conversão de energia de ondas em energia elétrica em nossa região costeira. Além disso, quantificar a contribuição individual dos diversos sistemas meteorológicos atuantes desde a região costeira sul até a região costeira norte do Brasil.

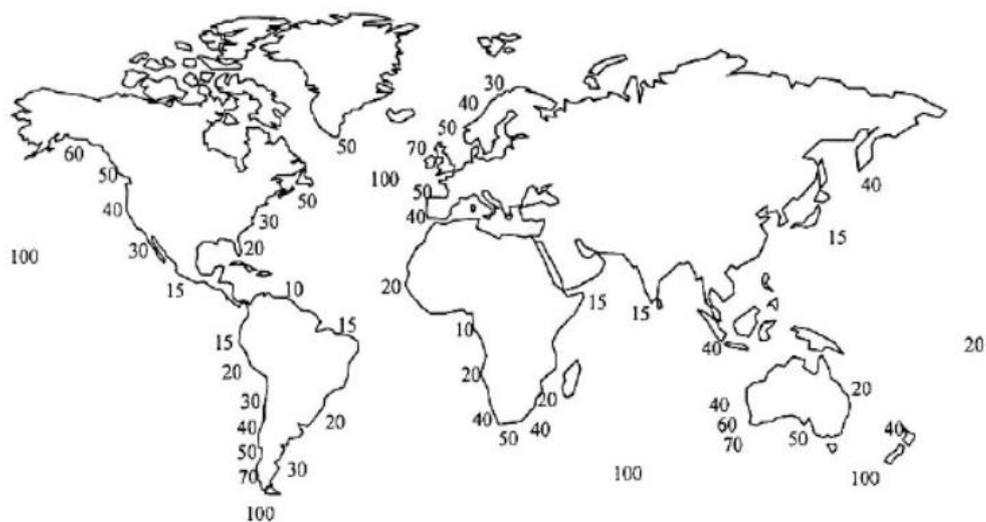


Figura 1.1 - Distribuição do fluxo de energia aproximada (kW/m).  
 Fonte: Vinning (2005)

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo é conhecer a variabilidade anual de energia proveniente das ondas oceânicas de gravidade, quantificando a intensidade e direção predominante dos sistemas de onda, ressaltando as características destes sistemas de acordo com os fenômenos meteorológicos atuantes em cada região. Esta variabilidade de energia de onda será obtida através de uma climatologia de onda utilizando o modelo numérico WAVEWATCH III (WW3), para o período de 1997 a 2009.

## 1.2 Procedimentos para o clima de ondas

Para a obtenção da variabilidade anual da energia de ondas, será realizada uma climatologia dos sistemas de ondas, na qual serão utilizados dados de campo de vento provenientes da previsão global do NCEP, com resolução horizontal de  $0,5^\circ$  em latitude e longitude, entre os anos de 1997 e 2009, período em que há disponível a atualização destes dados a cada 3 horas. Para simulação do campo de ondas será utilizado o modelo numérico WAVEWATCH III (WW3), versão 2.22 (TOLMAN, 2002), com resolução espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$  para uma grade global.

A região de estudo (figura 1.2) abrange a região costeira ao norte da Argentina até a região costeira do Suriname, enfatizando o litoral brasileiro. Foram escolhidos 58

pontos da saída do modelo ao longo desta região, em uma profundidade acima de 100 metros, nos quais foram calculados os parâmetros de onda tais como a altura significativa, o período e direção de pico e o fluxo de energia.

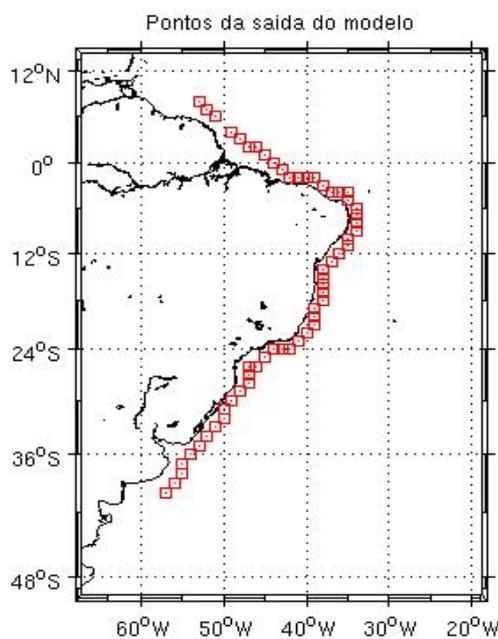


Figura 1.2 - Região de estudo com os 58 pontos da saída do modelo

Após a realização da climatologia, a região de estudo foi dividida em áreas que apresentaram semelhanças em relação aos sistemas de onda separados pela direção de pico. A identificação desses sistemas pela direção de pico foi realizada através de um algoritmo que particiona a energia total do espectro em sistemas individuais que foram formados por diferentes sistemas meteorológicos. Este algoritmo foi desenvolvido neste trabalho, e será descrito em detalhes no capítulo 7.

Nessas áreas caracterizadas pela semelhança em relação aos sistemas de onda, foram calculados os números de casos por direção, as médias do período de pico e da altura significativa, a distribuição dos sistemas mais intensos, separados pelo percentil 90% e 99% e a média mensal e anual da energia de onda. As médias obtidas foram calculadas com a soma dos valores dos parâmetros analisados, dividindo-os pelo número total de casos.

## 2 FUNDAMENTOS DA FÍSICA DE ONDAS

Neste capítulo serão apresentados conceitos básicos da formação de um campo de ondas, a evolução de um espectro de ondas, levando-se em consideração a energia que compõe um espectro, a transformação das ondas próximo à zona costeira e os sistemas meteorológicos responsáveis pela sua formação.

### 2.1 Formação e dissipação do espectro de ondas

Alguns parâmetros de onda, observados na figura 2.1 abaixo, são importantes na formulação dos conceitos discutidos ao longo deste capítulo, portanto são descritos aqui brevemente.

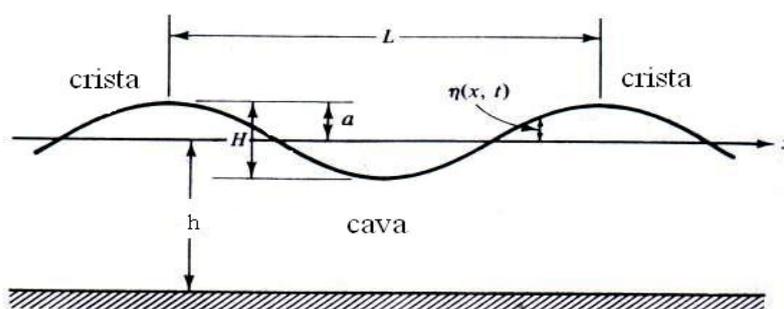


Figura 2.1 - Características de uma onda.

O comprimento de onda  $L$ , é a distância horizontal entre duas cristas de ondas sucessivas, e o período  $P$  é o tempo decorrente da passagem destas cristas ou mesmo das cavas. A frequência  $f$  é o inverso do período ( $f = \frac{1}{P}$ ), e a altura de onda  $H$  é a distância vertical entre uma crista e uma cava, sendo a amplitude, metade da altura ( $a = \frac{H}{2}$ ). A profundidade local é representada por  $h$ , e  $n$  representa a elevação do nível do mar.

A formação e evolução de um campo de ondas de gravidade no oceano ocorre pela transferência de energia da atmosfera para as camadas superficiais do oceano através dos ventos. Dependem de 3 fatores essenciais: (I) a área de atuação do vento sobre o oceano que é denominada de pista ou *fetch*, (II) a intensidade e direção do vento que incide sobre esta pista e (III) a duração que ocorre esta transferência.

A transferência de energia ocorre em dois estágios. No primeiro estágio ocorre uma pequena flutuação de pressão acima da água, suficiente para formar pequenas perturbações, chamadas de ondas capilares, cujo período é da ordem de  $10^{-1}$  segundos e a força restauradora é a tensão superficial da água do mar. Se o vento incidente cessa, as perturbações logo se extinguirão, porém se o vento se mantém, a pequena variação de pressão acima da superfície da água favorece o subsequente crescimento linear das ondas, que se movem em ressonância com as flutuações de pressão. Este mecanismo é chamado de Ressonância de Philips, expresso pela equação (HOLTHUIJSEN, 2007), (??):

$$\frac{dE(f)}{dt} = C(u, f)$$

onde  $C$  é uma taxa dependente da velocidade do vento ( $u$ ) e da frequência ( $f$ ).

As ondas continuam a se desenvolver até que se inicia a interação com o fluxo de ar acima destas. A partir deste instante, a força restauradora passa a ser a força da gravidade. Este processo chama-se Instabilidade do Fluxo de Crescimento. O fluxo de ar "suga" as cristas enquanto "empurra" as cavas. Este crescimento é exponencial, formulada por Miles (1957), expresso pela equação (HOLTHUIJSEN, 2007) :

$$\frac{dE(f)}{dt} = \beta E(f)$$

onde o coeficiente  $\beta$  é dependente da velocidade do vento, e da velocidade de fase da componente de onda com frequência  $f$ . É também conhecido como Mecanismo de Feed Back de Miles (WMO, 1989) .

Quando o registro de um ondógrafo é analisado, observa-se uma variação da altura das ondas por um período de tempo. Porém, as ondas aparecem misturadas com diferentes alturas, períodos, comprimentos e direções ( $\theta$ ). Para uma representação

mais detalhada das condições de onda deste registro, a elevação da superfície do mar é representada por uma Série de Fourier, ou seja, um somatório das componentes harmônicas das ondas registradas. Este somatório representa um espectro de onda e seu formato mais simples pode ser descrito como:

$$E(f) \approx g^2 f^{-5} \quad (m^2/Hz)$$

onde  $g$  é a força da gravidade.

No espectro de onda visualiza-se como a energia é distribuída ao longo das frequências, deste modo é possível identificar qual a frequência que possui a maior energia associada (frequência de pico).

Além das frequências, a direção de propagação das ondas é mais um fator que caracteriza a propagação de energia, representando a direção principal de propagação da onda. Este espectro pode ser chamado de espectro bidimensional que representa a frequência principal e a direção de propagação da onda que está no mesmo sentido da direção do vento. A distribuição direcional é:

$$E(f, \theta) = E(f)D(\theta)$$

onde  $D(\theta)$  é dado por (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta) & \text{para } \theta \leq 90^\circ \\ 0 & \text{para } \theta \geq 90^\circ \end{cases}$$

Em 1947, Sverdrup e Munk compilaram dados de diversas fontes, tanto de campo quanto de laboratório, numa primeira tentativa de estimar o crescimento de um campo de onda, apresentando o conceito de altura significativa da onda ( $H_s$ ), parâmetro extraído do espectro que representa a média de altura de  $\frac{1}{3}$  das ondas mais altas. Bretschneider em 1952 aprimorou os dados de Sverdrup e Munk (YANG, 1999), que resultaram em curvas de crescimento conhecidos como curvas SMB (Sverdrup - Munk - Bretschneider). Estas curvas relacionam a altura e período de onda com o tamanho da pista. Para uma pista com dimensões muito grandes, estas curvas

alcançam um limite, cessando o desenvolvimento do campo de ondas. Desses trabalhos obteve-se o espectro de Bretschneider (SORENSEN, 1993), representado pela equação:

$$E(f) = \frac{1,25 w_m^4}{4(2\pi)^5 (f)^5} H_s^2 e^{-\frac{5}{4}(w_m/f)^4 (2\pi)^{-4}} \quad (m^2/Hz)$$

onde  $w_m = 0,4 \sqrt{g/H_s}$ .

A limitação apresentada pelas curvas SMB foi resolvida por Pierson e Moskowitz (1964), que examinaram espectros obtidos de navios meteorológicos no Atlântico Norte e propuseram uma forma limite do crescimento do espectro. A correlação de dados de vento com altura de onda obtidos in situ resultou no espectro de Pierson-Moskowitz, que representa um mar totalmente desenvolvido, dado pela equação :

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 (f)^5} e^{-\frac{5}{4}(f_p/f)^4} \quad (m^2/Hz)$$

onde  $\alpha$  é o fator de normalização (0,0081),  $f$  a frequência e  $f_p$  a frequência de pico.

Hasselmann et al. (1973), através do programa Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), considerado o maior esforço internacional para a investigação da evolução do campo de ondas, analisaram aproximadamente 2.000 espectros a fim de obter uma representação das condições reais da agitação marítima. O espectro JONSWAP representa um oceano em desenvolvimento, representado pela equação:

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 (f)^5} e^{-\frac{5}{4}(f_p/f)^4} \gamma^{\exp(-\frac{1}{2}) \left( \frac{f_p - f}{\sigma} \right)^2} \quad (m^2/Hz)$$

onde  $\gamma$  é o fator de pico (com o valor de 3,3) e  $\sigma$  é o parâmetro de largura do espectro (com o valor de 0,07 para  $f \leq f_p$  e 0,09 para  $f \geq f_p$ ). Na figura 2.2 podemos observar a forma do espectro de Pierson-Moskowitz comparado ao espectro de JONSWAP. O espectro observado pelos cientistas durante o programa JONSWAP apareceu com o pico mais pronunciado, e o fator de pico  $\gamma$  foi a parametrização acrescentada às observações.

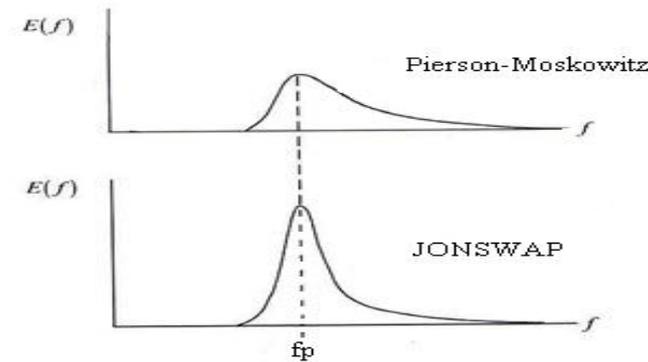


Figura 2.2 - Forma do espectro de Pierson-Moskowitz e JONSWAP.  
 Fonte: Adaptado de [HOLTHUIJSEN \(2007\)](#)

O espectro formado próximo à costa geralmente é formado por pistas de dimensões pequenas, possuindo valores mais baixos de comprimento e período, resultando em frequências mais altas. Já as ondas que são formadas afastadas da costa são geradas por pistas de maior dimensão e com maior duração de incidência de ventos, principalmente porque são originados pela passagem de ciclones extratropicais ou atuação de ventos mais constantes como os ventos alísios. Pode-se observar esta relação na figura 2.3, em que a dimensão da pista varia mantendo-se um valor constante de vento ( $u$ ). Para esta representação, utilizou-se o espectro JONSWAP, mas com a frequência de pico e o parâmetro  $\alpha$  modificados para inclusão da dependência com a pista ( $X$ ) ([MASSEL, 1996](#)) :

$$f_p = 3,5 \frac{g}{u} \left( \frac{g X}{u^2} \right)^{-0.33}$$

$$\alpha = 0,076 \left( \frac{g X}{u^2} \right)^{-0.22}$$

À medida em que o espectro tende ao estágio totalmente desenvolvido, isto é, quanto maior for a pista em relação ao vento incidente, seus componentes continuam recebendo energia e crescendo, alterando a frequência de pico e a velocidade de propagação. A velocidade de propagação ou velocidade de fase ( $c$ ), é obtida através da relação de dispersão das ondas representada por [DEAN e DALRYMPLE \(1990\)](#):

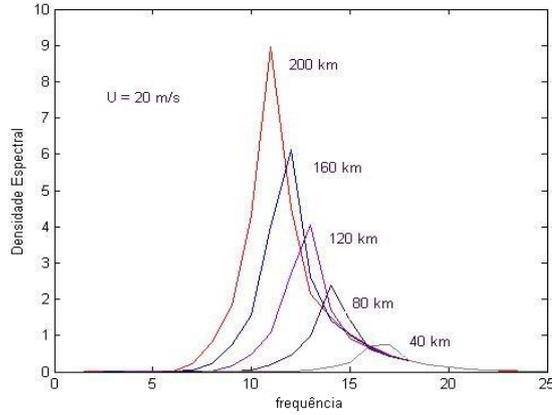


Figura 2.3 - Variação de energia do espectro em relação ao tamanho da pista

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.1)$$

e a relação:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.2)$$

onde  $k$  é o número de onda ( $k = \frac{2\pi}{L}$ ) e  $\omega$  é a frequência angular. Substituindo 2.1 em 2.2, obtém-se:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.3)$$

Isto significa que o espectro que está sendo formado, possui componentes com diferentes dimensões, comprimentos e frequências, e se propaga com diferentes velocidades, de acordo com as relações 2.1 e 2.3. Enquanto estas componentes recebem energia transferida pelos ventos, são chamados de *wind-sea* ou vagas. Os componentes do espectro que possuem maior comprimento se propagarão com velocidades maiores que as de menor comprimento, dispersando uma das outras com o passar do tempo. Quando as componentes de onda deixam sua área de formação, deixando também de receber energia do vento, se propagando para outras áreas, são conhecidos como *swell* ou marulho.

### 3 MODELOS DE ONDAS OCEÂNICAS

Os modelos de onda atuais como o WAM (WANDIGROUP, 1988) utilizado pelo ECMWF, WAVEWATCH III (TOLMAN, 2002) utilizado pela NOAA/NCEP e SWAN (RIS et al., 1999) utilizado pela Delft University of Technology, são modelos espectrais, dos quais podemos obter a altura significativa, período de pico e direção como uma relação do espectro, que descreve o cenário geral das condições de onda em um determinado momento. Porém, o espectro é composto mais detalhadamente, com energia de ondas formadas por ventos locais (*wind-sea*) em uma determinada região e grupos de ondas originários de locais afastados (*swell*), que se unem ao *wind-sea* desta região para compor a totalidade de energia contida em um espectro. Desta forma, quando se caracteriza um clima de ondas de uma região, é necessário ter conhecimento de suas características de formação, isto é, se a região estudada possui maior influência de *wind-sea* ou de *swell*, de ambas ou de uma composição mais complexa com dois ou mais sistemas de *swell*. Para esta finalidade é necessário realizar o particionamento da energia do espectro identificando qual sistema é predominante.

Nos modelos numéricos espectrais são calculados os espectros de onda e seus parâmetros integrais como altura de onda, frequência de pico, direção de pico, dentro outros. Este tipo de modelo calcula a evolução espacial e temporal do espectro bidimensional de ondas  $E(f, \theta)$ . Para isto, é resolvida a equação de transporte advectivo com base na conservação da densidade espectral de energia da forma:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_g \nabla F = S_{tot} \quad (3.1)$$

onde  $F = F(f, \theta, x, y, t)$  é o espectro direcional de onda e  $c_g$  é o vetor velocidade de grupo e o termo fonte ( $S_{tot}$ ) é tipicamente representado como somatório de 3 processos, a entrada de energia pelo vento ( $S_{in}$ ), interações não lineares do tipo onda-onda ( $S_{nl}$ ), e dissipação por quebra (*whitecapping*) -  $S_{ds}$ .

Dependendo das características o modelo espectral, pode ser classificado de primeira, segunda e terceira geração. Os modelos de primeira geração consideram que o termo fonte total é composto apenas pelo somatório do termo de entrada pelo vento e dissipação por *whitecapping*,  $S_{tot} = S_{in} + S_{ds}$ . Modelos de primeira geração superestimavam a contribuição atmosférica e só produziam bons resultados para regiões

geográficas ou sistemas meteorológicos para os quais haviam sido criados.

Nos modelos de segunda geração, o termo fonte consiste no somatório do termo de entrada pelo vento, termo de interações onda-onda e o termo de dissipação  $S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$ . O grande avanço deste tipo de modelo está no fato de incluir uma função paramétrica para representação das interações não-lineares onda-onda no termo  $S_{nl}$ . O balanço dos termos fonte nos modelos de terceira geração é representado da mesma forma que para os modelos de segunda geração. As diferenças fundamentais aparecem na forma de cálculo apresentado nestes modelos. O maior e principal avanço é o fato de apresentarem uma solução completa para o termo de interações não-lineares onda-onda.

### 3.1 WAVEWATCH III (WW3)

O WW3 é o modelo de previsão de ondas de terceira geração, desenvolvido pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) / NCEP (National Centers for Environmental Prediction), similar ao modelo WAM (WANDIGROUP (1988), ??).

O Modelo WW3 é uma evolução do WAVEWATCH I desenvolvido na Delft University of Technology (TOLMAN, 1989) e WAVEWATCH II desenvolvido na NASA, Goddard Space Flight Center (TOLMAN, 1992). A física do modelo inclui geração de energia, dissipação devido à quebra de ondas e fricção com o fundo, refração, advecção, e interações onda-onda quádruplas. A física do WW3 não era apropriada para águas rasas (abaixo de 40m de profundidade), principalmente por não considerar as interações não lineares triplas que dominam a propagação das ondas nestas localidades, porém, esta parametrização foi incluída na última versão 3.14 (TOLMAN, 2009).

Diversos trabalhos foram realizados com a finalidade de analisar a acurácia do modelo de previsão de ondas WW3. Rogers e Wittmann (2002), por exemplo, discutem a sensibilidade da energia do campo de ondas em diferentes modelos físicos e com diferentes forçantes de campo de vento. Seus estudos mostraram que as forçantes, em vez dos modelos físicos de onda, que definem as maiores diferenças na altura significativa dos campos de onda gerados pelo modelo numérico.

Feng et al. (2004) comparam valores de campos de ondas a partir de diferentes forçantes. Uma delas são com campos de ventos da reanálise do NCEP e a outra

forçante um produto combinado entre ventos da reanálise do NCEP com dados do escaterômetro Quikscat. Esses campos de vento foram implementados no WW3 e comparados com dados do satélite de altimetria TOPEX, tanto para uma grade global, como para grades regionais. Valores de altura significativa gerados por campos de vento da reanálise do NCEP foram mais coincidentes para a grade global, com o período subestimado antes de 8,2 s e superestimado acima deste valor. Na grade regional, os valores foram coincidentes para todos os dados de entrada no modelo. Para casos acima de 1,5 m de altura significativa, os modelos apresentaram mais consistência, sugerindo que regiões com ventos mais fortes resultam em campos de onda com maior acurácia.

No trabalho de [Padilla-Hernandez et al. \(2004\)](#), os autores analisam o desempenho dos modelos de terceira geração WW3, SWAN e WAM, comparados com dados de bóias DWR (directional wave rider) e com um ADCP (acoustic doppler current profiler). Concluíram que todos os modelos realizam satisfatoriamente a previsão de ondas, apesar de em casos específicos, como a passagem de tempestades, a rápida variação de campos de vento faz com que os modelos subestimem os valores de altura significativa, concluindo que quanto menor o intervalo de atualização dos campos de vento, melhor os resultados gerados pelos modelos. Concluem também que o desempenho do WW3 é melhor quando comparado com os dados das bóias e do ADCP, e que o aninhamento SWAN com WW3 apresenta resultados ligeiramente melhores do que SWAN aninhado com WAM.



## 4 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDA

O aproveitamento da energia proveniente das ondas depende da altura da onda, da velocidade com que se propagam e principalmente do dispositivo responsável pela conversão em energia útil. Há diversos tipos e tamanhos de conversores, sendo o critério de classificação relacionado à região em que são instalados. São agrupados da seguinte forma:

- dispositivos costeiros (shoreline);
- dispositivos próximos à costa (nearshore);
- dispositivos afastados da costa (offshore).

### 4.1 Dispositivos costeiros

São aqueles que estão fixos na orla costeira. Por esta vantagem imediata, possuem maior facilidade de instalação e manutenção, sem a necessidade de sistemas de fundeio e uma grande extensão de cabos submarinos. Por outro lado, estão localizados em regiões em que a onda já sofreu perdas de energia pelo atrito com o assoalho marinho. A instalação desse tipo de dispositivo pode ser feita em áreas onde há concentração de energia devido à refração e difração da onda, para diminuir as perdas de energia e melhorar o aproveitamento do conversor.

Para os dispositivos costeiros, o mecanismo mais utilizado para a conversão de energia de ondas para energia elétrica é o OWC (Oscillating Water Column) ou Coluna de Água Oscilante. A Coluna de Água Oscilante, ilustrado na figura 4.1, é um sistema no qual a estrutura fica parcialmente submersa, apresentando uma região aberta para a superfície livre do mar. Quando as ondas passam por esta região deslocam o ar contido numa câmara, aumentando a pressão dentro desta e fazendo com que haja o movimento de uma turbina.

### 4.2 Dispositivos próximos à Costa

Estes dispositivos não estão fixos na orla e sim em uma curta distância desta, situam-se numa região igualmente com perdas energéticas. O próprio dispositivo citado anteriormente, o OWC, pode ser considerado como dispositivo próximo à costa se estiver

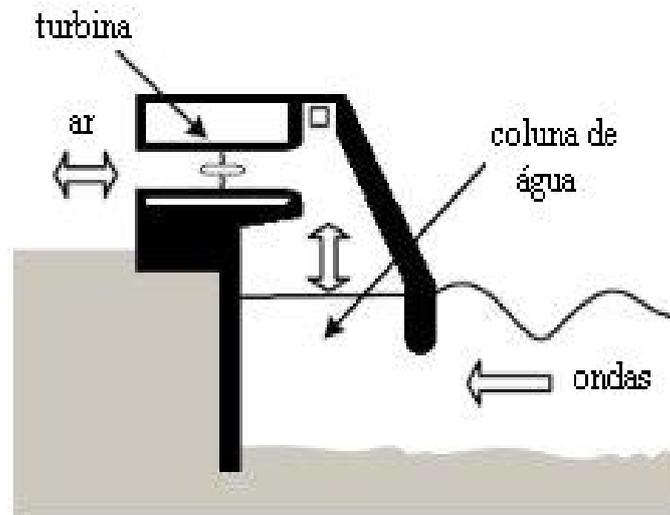


Figura 4.1 - Coluna de água oscilante (OWC)  
 Fonte: Adaptado de Vinning (2005)

instalado em um quebra-mar que não se encontra exatamente na orla. Como dispositivos mais característicos, tem-se o Point Absorber ou Corpos flutuantes (figura 4.2) e também o Overtopping ou Galgamento (figura 4.3). O dispositivo de corpos flutuantes, bóias ou point absorber possui sistema de ancoragem, e o movimento das ondas faz com que a estrutura do conversor acompanhe este movimento. Como está fixo no fundo, a parte do dispositivo que se move (energia mecânica) é o responsável pela conversão de energia.

O dispositivo de overtopping ou galgamento funciona de forma semelhante a uma usina hidroelétrica. O movimento das ondas leva a água até um reservatório, que escoar através de um coletor, onde está localizada a turbina que irá se movimentar pela passagem da água acumulada. Este sistema, considerado de dispositivo próximo à costa, pode também ser instalado na linha costeira, de acordo com a hidrodinâmica local.

### 4.3 Dispositivos afastados da costa

Estes dispositivos são instalados em regiões de grandes profundidades, onde a perda de energia com o fundo oceânico não ocorre. Estão expostos à regime de ondas mais intensos comparados aos dispositivos costeiros, produzindo maior quantidade de energia convertida. Por outro lado, o desafio tecnológico é maior, pois o sistema

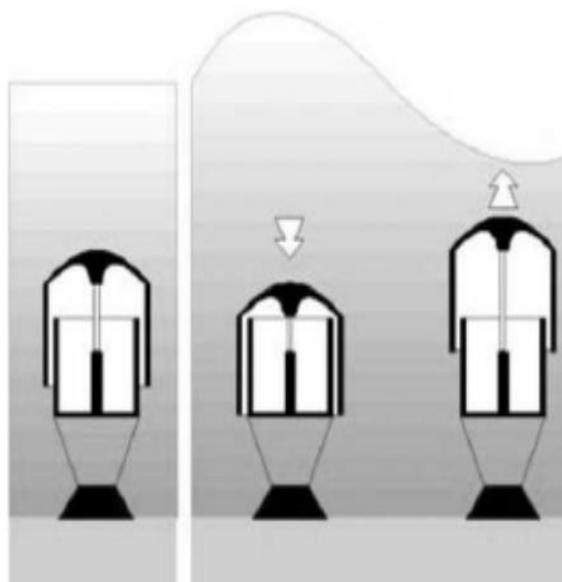


Figura 4.2 - Point absorber ou Corpos flutuantes  
 Fonte: Vinning (2005)

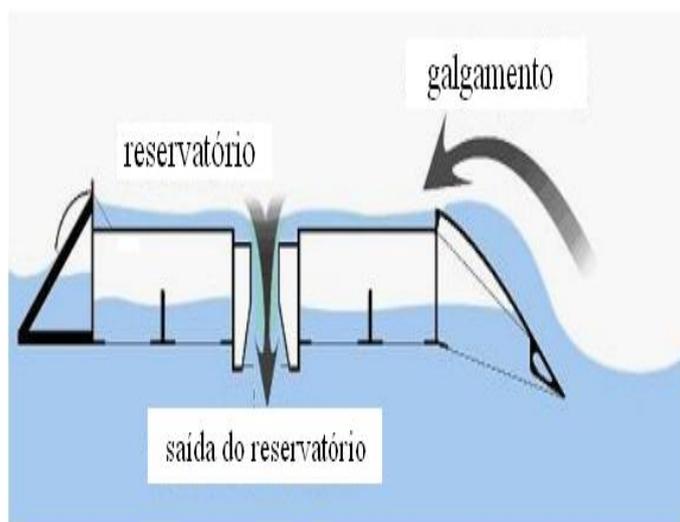


Figura 4.3 - Dispositivo de Galgamento  
 Fonte: Adaptado de Cruz e Sarmiento (2004)

de fundeio e a transmissão de energia para o continente através dos cabos submarinos são fatores limitantes. Existem dispositivos afastados da costa com diferentes técnicas de conversão. Os mais conhecidos são o Arquimedes Wave Swing, Pelamis

e Wave Dragon.

O Arquimedes Wave Swing foi desenvolvido pela Teamwork Technology em 1994. Este sistema segue o princípio dos corpos flutuantes, com movimentação das turbinas gerada pela pressurização do ar dentro do cilindro que forma a estrutura do conversor. Na figura 4.4, observa-se o Wave Dragon, um dispositivo que pode ser considerado de galgamento afastado da costa. O desenvolvimento deste dispositivo foi realizado pela Wave Dragon ApS, um consórcio internacional que engloba empresas e instituições da Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, Suécia, Áustria e Alemanha. Com uma potência que pode ir dos 4 aos 11 MW, foi o primeiro dispositivo afastado da costa a introduzir eletricidade numa rede elétrica, em junho de 2003, na cidade de Nissum Bredning, Dinamarca (CRUZ; SARMENTO, 2004).

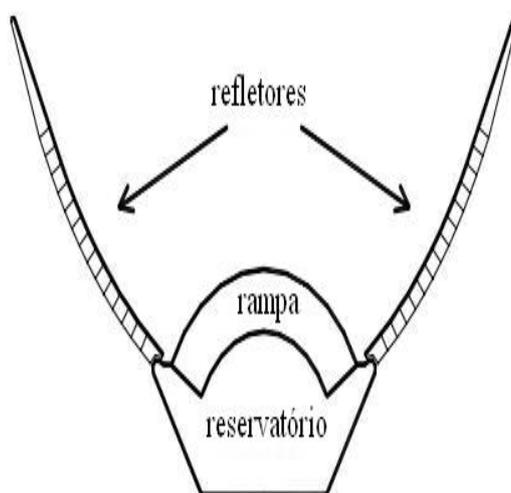


Figura 4.4 - Principais componentes do Wave Dragon  
Fonte: Adaptado de Krofoed et al. (2004)

O Pelamis (figura 4.5) é um dispositivo do tipo progressivo, desenvolvido pela Ocean Power Delivery Ltd (Escócia). Os dispositivos progressivos são sistemas alongados com uma dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento de onda e estão dispostos no sentido de propagação da onda, de modo a gerarem um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda. Consiste em uma estrutura articulada semi-submersa composta por diferentes módulos cilíndricos unidos por juntas flexíveis.

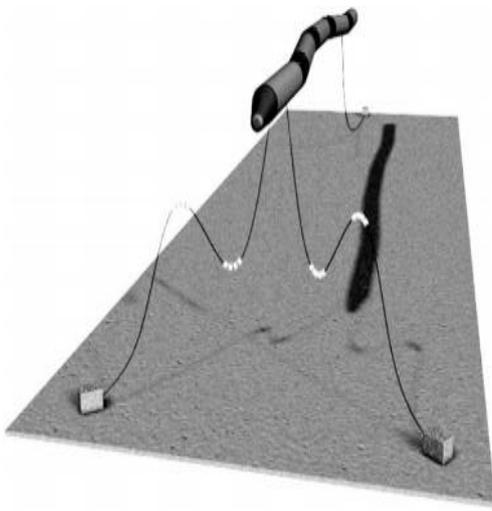


Figura 4.5 - Ilustração do Pelamis  
Fonte: Clement et al. (2002)



## 5 ENERGIA DE ONDA

A energia total contida em uma onda consiste de dois tipos: a energia potencial e a energia cinética. A primeira é resultante da diferença da superfície livre e a altura da onda e a segunda é resultante do movimento das partículas da água através do fluido. Através do fluxo de energia total, pode-se compreender como ocorre a transmissão e as mudanças nos parâmetros de onda à medida que esta percorre a plataforma continental até atingir a zona costeira. Esta é a energia disponível que será utilizada para a conversão em energia elétrica.

### 5.1 Energia potencial

A energia potencial das ondas é o resultado do deslocamento de massa de uma posição em equilíbrio contra o campo gravitacional. Quando a água está em repouso, a energia potencial é mínima, entretanto, quando ocorre o deslocamento das partículas em equilíbrio, há realização de trabalho, aumentando a energia potencial. A energia potencial de uma onda senoidal por unidade de área superficial, considerando uma pequena coluna de fluido representada na figura 5.1, com massa  $dm$  é:

$$d(E_p) = dm g \bar{z} \quad (5.1)$$

onde  $\bar{z}$  é o centro da gravidade de massa e  $dm$  é a massa diferencial por unidade de largura e  $g$  é a força da gravidade.

O centro da gravidade de massa  $\bar{z}$  e a massa diferencial por unidade de largura  $dm$  são representados por:

$$\bar{z} = \frac{h + \eta}{2} \quad (5.2)$$

$$dm = \rho(h + \eta) dx \quad (5.3)$$

onde  $h$  é a profundidade local e  $\eta$  a elevação da superfície do mar representada por (DEAN; DALRYMPLE, 1990):

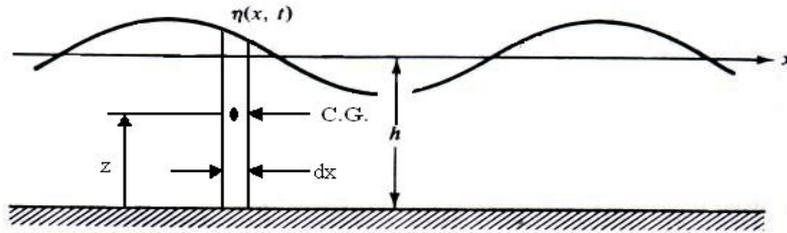


Figura 5.1 - Representação de uma pequena coluna de fluido  
 Fonte: Adaptado de (DEAN; DALRYMPLE, 1990).

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx - \omega t \quad (5.4)$$

A energia potencial sobre um comprimento de onda  $L$  para uma onda progressiva de altura  $H$  é:

$$E_p = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(E_p) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{h + \eta^2}{2} dx \quad (5.5)$$

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} (h^2 + \eta h + \eta^2) \right] dx \quad (5.6)$$

Substituindo  $\eta$  em 5.6, temos:

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \left[ \frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)^2 dx \right] \quad (5.7)$$

Conduzindo a integração de 5.7, a equação da energia potencial fica:

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (5.8)$$

## 5.2 Energia cinética

Trabalho ( $W$ ) é o produto de uma força constante pela distância percorrida por uma partícula, sob uma aceleração constante:

$$W = Fd \quad (5.9)$$

Para uma aceleração constante, é possível utilizar as relações:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (5.10)$$

$$x = \frac{v - v_0}{2} t \quad (5.11)$$

onde  $v$  é a velocidade final da partícula,  $v_0$  é a velocidade inicial ( $v_0 = 0$ ). Substituindo as relações 5.10 e 5.11 em 5.9, esta se modifica em:

$$W = Fd = m.a.x. \quad (5.12)$$

$$W = E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5.13)$$

A energia cinética é o trabalho realizado pela ação de uma força resultante em uma partícula. Associada a uma pequena parcela de fluido de massa  $dm$ , da mesma forma como ilustrada na energia potencial, a energia cinética é representada por:

$$d(E_c) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (5.14)$$

Para encontrar a energia cinética por unidade de área superficial, deve-se integrar 5.14 sobre uma profundidade e sobre um comprimento de onda:

$$E_c = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (5.15)$$

Da teoria linear das ondas, os componentes  $u$  e  $w$  da velocidade potencial, são representados por (DEAN; DALRYMPLE, 1990):

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (5.16)$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (5.17)$$

Substituindo  $u$  e  $w$  na equação 5.15, obtemos:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{\rho}{2L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \left[ \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \right]^2 \\ &+ \left[ \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \right]^2 dz dx \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{\rho}{2L} \left( \frac{H\omega}{2} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2(kh)} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \omega t) \\ &+ \sinh^2 k(h+z) + \sin^2(kx - \omega t) dz dx \end{aligned} \quad (5.19)$$

Conduzindo a integração de 5.19, obtemos a relação da energia cinética:

$$E_c = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (5.20)$$

A energia total é a soma da energia potencial com a energia cinética, portanto :

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (5.21)$$

A energia total por onda por unidade de largura é simplesmente a inclusão do termo horizontal ( $L$ ), que é o comprimento de onda:

$$E_L = \frac{\rho g H^2}{8} L \quad (5.22)$$

### 5.3 Fluxo de energia

As ondas transportam energia pelo oceano, e transportam massa apenas quando se propagam próximo à costa, onde ocorre a interação das ondas com o fundo oceânico. A taxa temporal de energia transferida de um local para outro é chamada de fluxo de energia. Este fluxo ( $F_{energia}$ ) é a soma do transporte de energia potencial e cinética, mais a transferência horizontal por trabalho ( $W$ ) realizado pela pressão na direção da propagação da onda ( $P_{wave}$ ) (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$F_{energia} = f_1 + f_2 + f_3$$

onde  $f_1$  é o fluxo de energia potencial,  $f_2$  é o fluxo de energia cinética e  $f_3$  o fluxo de energia de  $P_{wave}$ , representados por:

$$f_1 = \left( \int_{-d}^{\eta} (\rho g z) u_x dz \right) \Delta y \Delta t$$

$$f_2 = \left( \int_{-d}^{\eta} \left( \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u_x dz \right) \Delta y \Delta t$$

$$f_3 = \left( \int_{-d}^{\eta} (P u_x) dz \right) \Delta y \Delta t$$

onde  $P = -\rho g z + P_{wave}$ .

Para computar toda a energia transportada, devemos realizar o somatório dos transportes de energia potencial, cinética e  $P_{wave}$ .

$$F_{energia} = \int_{-d}^{\eta} (\rho g z) u_x dz + \frac{1}{2} (\rho u^2) u_x dz + P_{wave} u_x dz \quad (5.23)$$

$$F_{energia} = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} (\rho u^2) u_x + \int_{-d}^{\eta} P_{wave} u_x dz \quad (5.24)$$

Segundo [HOLTHUIJSEN \(2007\)](#) a primeira integral de 5.24 é de terceira ordem, e a aproximação considerada é de segunda ordem, sendo portanto desconsiderada. Deste modo, toda a energia é transportada pelo trabalho de  $P_{wave}$ , que está em fase com o movimento orbital horizontal e com a elevação da superfície. A expressão que define este transporte é:

$$F_{energia} = \int_{-d}^{\eta} P_{wave} u_x dz \quad (5.25)$$

onde os limites de integração  $\eta$  e  $d$  representam a elevação do nível do mar e a profundidade, respectivamente e  $u_x$  a componente do eixo das abcissas da velocidade da onda, cuja direção está alinhada com a direção do vento. Substituindo as expressões de  $P_{wave}$  e  $u_x$ , segundo a teoria linear das ondas ([DEAN; DALRYMPLE, 1990](#)), conduzindo a integração e simplificando termos, o fluxo de energia é representado por:

$$F_{energia} = \left( \frac{\rho g a^2}{2} \right) \frac{1}{2} + \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\omega}{k} \quad (5.26)$$

onde  $a$  é a amplitude,  $\omega$  é a frequência angular,  $k$  é número de onda. Uma vez que a energia total é  $E = \frac{\rho g a^2}{2} = \frac{\rho g H^2}{8}$ , a velocidade da onda  $c = \frac{\omega}{k}$  e  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ , a equação do fluxo de energia torna-se:

$$F_{energia} = E n C \quad (5.27)$$

onde  $nC$  é a expressão que representa a velocidade de grupo ( $c_g$ ) ou a velocidade de transporte de energia. Portanto, o fluxo de energia é representado por:

$$F_{energia} = E c_g = \frac{\rho g H^2 c_g}{8} \quad (5.28)$$

Esta relação representa o fluxo de energia para ondas individuais. Para análise do fluxo de energia em um espectro, considera-se a energia total (cinemática e potencial) por unidade de área como [HOLTHUIJSEN \(2007\)](#):

$$E_{tot} = \rho g E(f)^2 \quad (5.29)$$

onde

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta$$

Neste caso utiliza-se a altura significativa, parâmetro estatístico representado por  $H_s = 4E(f)^{\frac{1}{2}}$  ao invés da altura de onda  $H$ , e o fluxo de energia é representado por:

$$F_{energia} = \rho g \int_0^{\text{inf}} c_g(f) E(f) df \quad (5.30)$$

Para águas profundas, a velocidade de grupo  $c_g = \frac{g}{4\pi f}$ , reduzindo o fluxo de energia para:

$$F_{energia} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\text{inf}} \frac{E(f)}{f} df \quad (5.31)$$

Levando-se em conta que o período médio  $T_e$  é representado por:

$$T_e = \frac{\int_0^{\text{inf}} f^{-1} E(f) df}{\int_0^{\text{inf}} E(f) df} \quad (5.32)$$

e substituindo  $T_e$  e  $H_s$  na equação 5.31, o fluxo de energia pode então ser representado por:

$$F_{energia} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (5.33)$$

É usual representar o fluxo de energia em kW/m, resumindo a equação 5.33 para:

$$F_{energia} \approx 0,5 H_s^2 T_e \quad (5.34)$$



## 6 SISTEMAS METEOROLÓGICOS FORMADORES DE ONDA

Os campos de vento responsáveis pela geração de onda no litoral brasileiro são provenientes do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e da passagem de ciclones e anticiclones extratropicais. Os ventos alísios, originários do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (alísios de sudeste) e do Atlântico Norte (alísios de nordeste), são responsáveis principalmente pela geração de ondas no norte e nordeste brasileiro. O padrão de circulação atmosférica nas regiões sul e sudeste está sob regime de campos de ventos da ASAS, sendo frequentemente alterado quando há a passagem de ciclones extratropicais, mudando os campos de vento de nordeste para sudeste, sul e sudoeste, gerando campos de ondas principalmente de sul.

Na região equatorial, zona de máxima temperatura superficial do mar e onde corre a convergência dos ventos alísios, caracteriza-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No verão do Hemisfério Sul, esta zona se encontra mais ao norte e no inverno mais ao sul, próxima ao equador, acompanhando a oscilação da ASAS.

A ASAS também possui uma variação meridional ao longo do ano. Observa-se na figura 6.1, que no verão, este sistema se encontra mais ao sul e a leste enquanto que no inverno está posicionada mais ao norte e a oeste, próximo da costa brasileira.

Os ciclones extratropicais são vórtices, resultado da quebra de ondas do fluxo zonal, responsáveis por tempos chuvosos e tempestades. Estes ciclones contribuem para a formação ou na intensificação da frontogênese, favorecendo a confluência das linhas isotérmicas, transportando massa de ar quente para o sul e massa de ar frio para o norte. Segundo a literatura, a região de formação dos ciclones extratropicais no hemisfério sul varia de 30° a 60°S (PEZZA; AMBRIZZI, 2003) em latitude, e 40° a 60°W em longitude (NECCO, 1982).

Dentro desta área de abrangência há regiões que possuem maior frequência de formação de ciclones na América do Sul. Segundo Gan e Rao (1991), uma destas áreas se situa ao redor do Golfo de San Matias (42.5°S, 62.5°W), na Argentina, com maior intensidade no verão, e outra ao redor do Uruguai (31.5°S, 55°W) mais intenso no inverno. Observando as oscilações sazonais, H.A. (1965) aponta algumas variações e define regiões de máxima ciclogênese entre 25 e 35°S no verão, 45 a 50°S no inverno; Taljaard (1967) define a região ao norte de 35°S como máximo ciclogênético e Sinclair (1995), a região ao redor de 30°S no inverno.

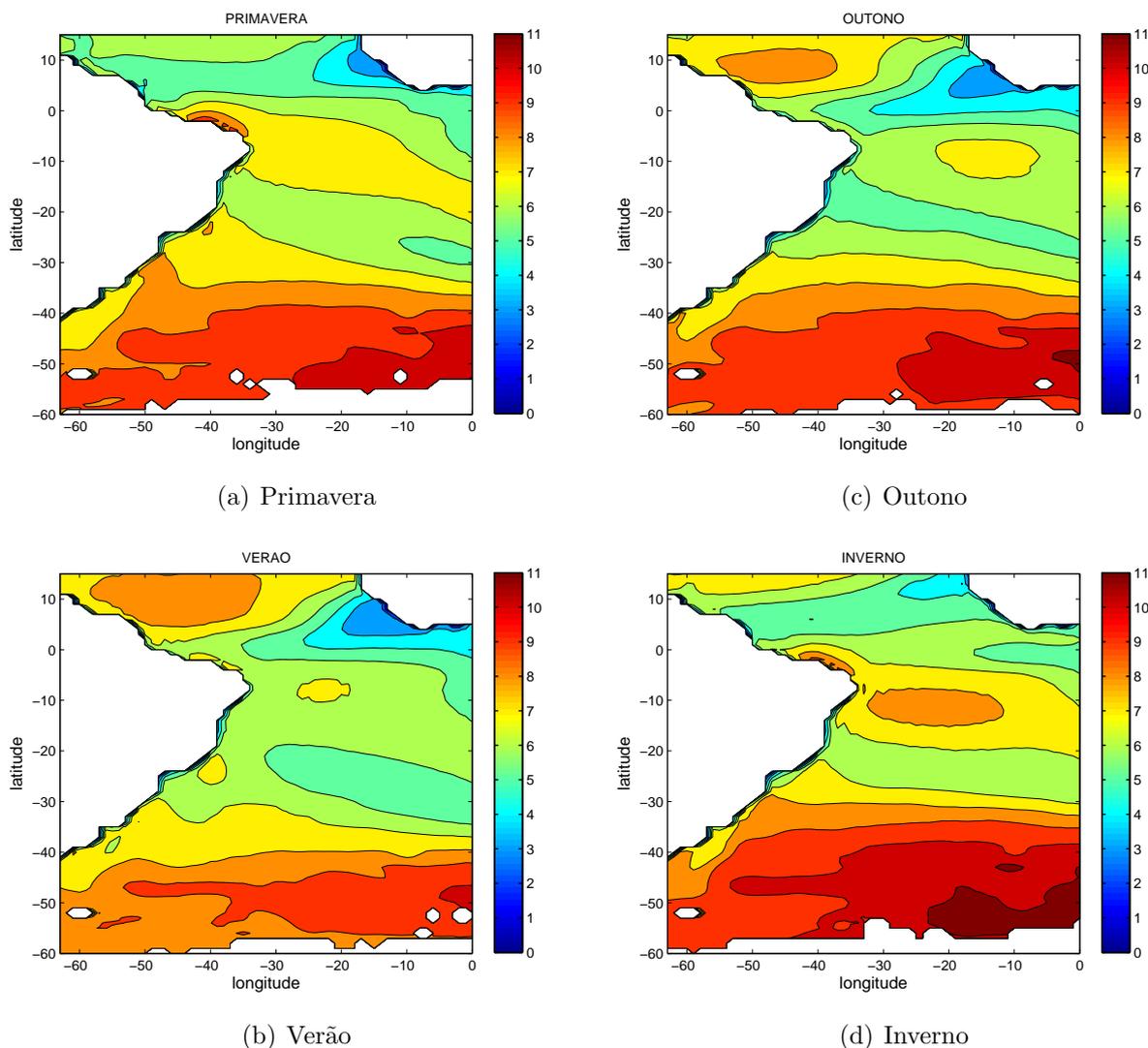


Figura 6.1 - Médias da intensidade dos ventos (m/s) na região de estudo no período de 1997 a 2009 apresentadas por estações do ano.

Os ciclones extratropicais possuem contribuição na formação ou intensificação de sistemas frontais. Esses sistemas se deslocam pelo litoral brasileiro, e seus campos de ventos geram ondas oceânicas. Dependendo da intensidade da baixa pressão do sistema frontal, do gradiente de pressão sobre o Brasil, e do anticiclone pós frontal, as frentes frias podem chegar até o nordeste, possuindo média mensal de 4 a 6 ocorrências entre os meses de abril a dezembro na região sul e sudeste (LEMOS; CALBETE, 1996).

Além da variabilidade sazonal há também uma variabilidade interanual, com casos

de comportamento anômalo durante os anos de El Niño, como o enfraquecimento da ZCIT, alterações no deslocamento e comportamento de sistemas frontais e intensificação dos ventos de oeste sobre o nordeste (CAVALCANTI, 1996).

Além dos sistemas frontais, passagem de ciclones e anticiclones migratórios e os ventos alísios, o clima de ondas no Brasil recebe também influência de outras localidades. Por exemplo, na região norte e nordeste pode-se identificar também a contribuição de ciclones extratropicais originários do hemisfério norte para o clima de *swell* (INNOCENTINI et al., 2001). Branco (2005) aponta também a contribuição de tempestades extratropicais provenientes do Pacífico e Índico, porém com muito menos energia do que os sistemas citados anteriormente.



## 7 PARTICIONAMENTO DA ENERGIA DO ESPECTRO

A coexistência de *wind-sea* e *swell* pode afetar significativamente estruturas *offshore*, operações de pequenas embarcações, entrada de grandes navios em portos e também processos como transferência de *momentum* entre a superfície do mar e a atmosfera (HANSON; PHILLIPS, 1999). Identificar e separar os componentes pertencentes ao *wind-sea* e ao *swell* proporciona uma descrição muito mais realística do estado de agitação marítima, pois revela qual a contribuição de cada sistema para o clima de ondas de cada região, que é de grande importância tanto para a ciência como para a segurança da navegação e das atividades de engenharia.

Com o objetivo de estudar detalhadamente a composição energética do espectro, surgiram métodos para avaliar qual a contribuição isolada do *wind-sea* e do *swell* na energia total. Os algoritmos de separação de picos espectrais, segundo Aarnes e Krostad (2001), foram propostos inicialmente por Earle (1984), Vartdal e Barstow (1987) e Torsethaugen (1993), diferenciando a energia proveniente do *wind-sea* da energia do *swell*. A energia total de um espectro pode ser composta de várias maneiras:

- somente por um sistema *wind-sea*;
- somente por um sistema *swell*;
- por um sistema *wind-sea* e um sistema *swell* ;
- ou por um sistema *wind-sea* e mais de um sistema *swell*.

Um espectro formado por mais de um *swell* possui energia proveniente de eventos meteorológicos distintos, que originaram diferentes sistemas de ondas. Os primeiros algoritmos citados acima não discriminam a energia proveniente de diferentes sistemas. O primeiro algoritmo a particionar a energia do espectro formado por mais de um *swell* foi originalmente proposto por Gerling (1992). Primeiramente, o método utilizado isola as frequências de pico, ou seja, identifica a frequência que possui mais energia e que caracteriza a direção e o período de pico do sistema. Em seguida, une a energia de cada frequência que está associada ao pico para compor a energia total do sistema.

Contudo, a grande dificuldade encontrada é delimitar a energia nas fronteiras dos

sistemas, definindo se uma determinada frequência pertence a este ou aquele sistema. Gerling (1992) optou por desprezar a energia localizada na fronteira.

Hasselmann et al. (1994) aprimoraram a técnica de Gerling (1992), incluindo também os valores que se encontram próximos aos limites dos sistemas. Utilizaram uma técnica na qual a matriz espectral é invertida, ou seja, os pontos de máximo que eram considerados picos, passam a ser pontos de mínimo. Assim pode-se considerar o espectro como uma bacia hidrográfica, por onde o fluxo escorreria até os pontos de mínimos separando naturalmente o limite das áreas de influência de cada mínimo.

Hanson (1996) e Hanson e Phillips (2001) adicionaram à técnica de Hasselmann et al. (1994) rotinas de rastreamento da evolução individual de cada sistema de onda formado, estimando também o tempo de trajetória e o local de formação dos campos de onda.

Independente do método utilizado, todos os esquemas de particionamento seguem a seguinte lógica: isolamento dos picos de energia, identificação e combinação de picos de energia, remoção de partições com baixa energia e estatística dos principais parâmetros de ondas.

## 7.1 Algoritmo de particionamento

A necessidade em separar diferentes sistemas de onda apresentados em um espectro foi a motivação para o desenvolvimento neste trabalho, de um algoritmo de particionamento baseado nas referências citadas anteriormente. O algoritmo de particionamento desenvolvido localiza a(s) frequência(s) de pico no espectro e agrupa a energia que está associada a este ponto. Cada valor associado a esta frequência de pico será considerada parte de um sistema, proveniente de processos locais (*wind-sea*) ou provenientes de regiões distantes (*swell*).

Considere a matriz espectral  $E_{i,j}$  associado a uma frequência  $f_i$  e a uma direção  $\theta_j$ , onde  $i = 1, \dots, nf$  e  $j = 1, \dots, nd$ , com  $nf$  e  $nd$  representando o número de frequências e de direções, respectivamente. O algoritmo realiza o particionamento da matriz espectral  $E_{i,j}$  em famílias  $(E_{i,j})_k$ , com  $k = 1, 2, \dots, nk$  através de um procedimento composto por cinco passos principais:

- I) para representação das direções ao longo da grade espectral ( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$ ), deve-se lembrar que a direção  $345^\circ$  ( $nd$ ) será comparada com a direção

$360^\circ (= 0^\circ)$ , portanto deve-se considerar  $E_{i,nd+1} = E_{i,1}$ . Para representação das frequências, deve-se lembrar que  $i = 0$  e  $i = nf + 1$  não devem ser considerados;

II) para descobrir os valores de  $E_{i,j}$  que representam um pico espectral, deve-se computar a diferença entre  $E_{i,j}$  e cada um de seus 8 vizinhos ( $E_{m,n} - E_{i,j}$ ), com  $m = [(i-1), i, (i+1)]$  e  $n = [(j-1), j, (j+1)]$ . O vizinho que possuir a maior diferença será considerado *pai* do ponto  $(i, j)$  e denominado  $(i_F, j_F)$ , sendo representado pela convenção:

$$i_F = \begin{cases} -1 & \text{se o } \textit{pai} \text{ possuir a frequência igual a } f_{(i-1)}, \\ 0 & \text{se o } \textit{pai} \text{ possuir a frequência igual a } f_{(i)}, \\ +1 & \text{se o } \textit{pai} \text{ possuir a frequência igual a } f_{(i+1)}. \end{cases}$$

A mesma convenção é adotada para  $j_F$ . Quando  $(i_F, j_F) = (0, 0)$ ,  $(i, j)$  é considerado um máximo. Este será máximo de todos seus vizinhos, exceto para máximos adjacentes;

III) depois dos valores de máximo serem descobertos e cada índice da matriz espectral  $E_{i,j}$  ser codificado, cada valor representante de um pico espectral representará uma *família* ou sistema, e cada pico receberá um valor de máscara que identifica cada sistema, variando de  $n = 1$  a  $nk$ , onde  $nk$  representa o número máximo de máscaras ou sistemas;

IV) após o *pai* de cada sistema receber sua máscara, os índices vizinhos associados a cada pico receberão o mesmo valor de máscara, sendo considerados *filhos* e os demais índices ao redor que são associados a esta *família* ou sistema também receberão o mesmo valor. Para esta tarefa, a leitura da matriz com as máscaras é realizada seguindo o procedimento:

- fixando  $i$  e variando  $j$  de 1 a  $nd$ ;
- fixando  $j$  e variando  $i$  de 1 a  $nf$ ;
- fixando  $i$  e variando  $j$  de  $nd$  a 1;
- fixando  $j$  e variando  $i$  de  $nf$  a 1;

À medida em que a distribuição das máscaras ocorre, muitos índices permanecem sem marcação, pois estão associados a outro pico ou muitas vezes o índice vizinho ao qual pertence não foi ainda numerado. Com o procedimento demonstrado acima, garante-se que cada índice possua uma *filiação*; mesmo assim, este procedimento é realizado duas vezes.

V) depois de separar os sistemas e identificá-los, o algoritmo verifica se estes deverão ser unidos pelo critério de separação apresentado por [Hanson e Phillips \(2001\)](#). Assim, deve-se avaliar se o critério de distância entre dois picos  $\delta f^2$  é maior ou menor que o critério de espalhamento de pico  $\Delta f^2$ . A distância entre dois picos é representada por:

$$\Delta f^2 = (f_{px,1} - f_{px,2})^2 + (f_{py,1} - f_{py,2})^2 \quad (7.1)$$

onde  $f_{px} = f_p \cos(\theta_p)$  e  $f_{py} = f_p \sin(\theta_p)$ .

O espalhamento de pico é representado por:

$$\delta f^2 = (f_x - f_x^2) + (f_y - f_y^2) \quad (7.2)$$

onde

$$f_x = \overline{f \cos(\theta)} = \frac{1}{e} \int_f \int_\theta S(f, \theta) f \cos(\theta) d\theta df \quad (7.3)$$

$$f_y = \overline{f \sin(\theta)} = \frac{1}{e} \int_f \int_\theta S(f, \theta) f \sin(\theta) d\theta df \quad (7.4)$$

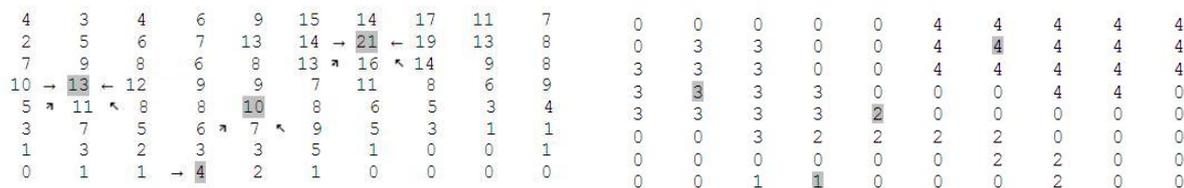
$$f_x^2 = \overline{f^2 \cos^2(\theta)} = \frac{1}{e} \int_f \int_\theta S(f, \theta) f^2 \cos^2(\theta) d\theta df \quad (7.5)$$

$$f_y^2 = \overline{f^2 \sin^2(\theta)} = \frac{1}{e} \int_f \int_\theta S(f, \theta) f^2 \sin^2(\theta) d\theta df \quad (7.6)$$

e a energia total  $e$  é definida como:  $e = \int \int S(f, \theta) d\theta df$ . Se o critério de separação  $\Delta f^2 \leq \delta f^2$  ocorrer, deve-se unir os sistemas.

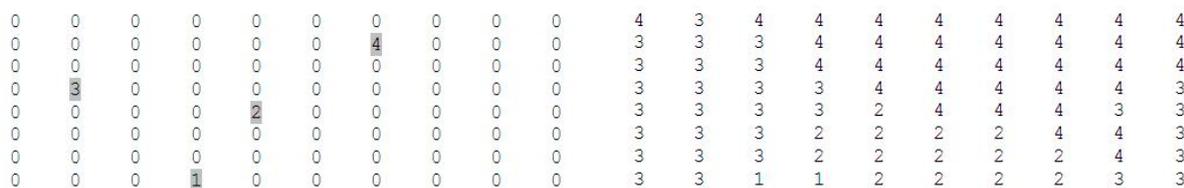
Na figura 7.1 a seguir observa-se o exemplo de uma matriz  $E_{i,j}$  fictícia e seus processos de particionamento. Em 7.1(a), nota-se em destaque os picos espectrais e

os índices vizinhos que apontam para eles. Neste estágio, os passos I e II foram executados, com os picos identificados e seus vizinhos com *afiliação* recebida.



(a) Matriz  $E(i, j)$  fictícia

(c) Identificação dos vizinhos do pico



(b) Identificação dos picos

(d) Matriz  $E(i, j)$  fictícia particionada

Figura 7.1 - *Processo de particionamento em uma matriz  $E(i, j)$  fictícia*

Na figura 7.1(b), os picos recebem valores de máscara, identificando a quantidade e posição dos sistemas distribuídos ao longo da matriz espectral. Neste estágio, o passo III foi realizado.

Em 7.1(c) inicia-se a distribuição dos valores de máscara através dos índices associados aos picos, caracterizando a energia proveniente de cada sistema. Neste processo, o passo IV foi realizado. O passo V verifica se os sistemas devem ser unidos, pelo critério de separação apresentado anteriormente. Caso ocorra união de sistemas, o algoritmo redistribui os valores de máscara, e apresenta a partição final como observa-se em 7.1(d).

## 7.2 Separação do *wind-sea* e *swell*

A distinção entre sistemas de *wind-sea* e *swell* não foi adotado neste trabalho, porém será útil em análises futuras e facilmente aplicado, pois o critério de separação está inserido no algoritmo de particionamento.

Para separar as frequências de pico do *wind-sea* das frequências de pico do *swell*,

o espectro analisado deverá passar primeiramente por um critério apresetado por Hanson e Phillips (2001), que irá agrupar as frequências de pico pertencentes ao *wind-sea* para valores em um domínio do espectro dentro da região definida por:

$$f_p \geq \frac{g}{2\pi} [\phi u_{10} \cos(\theta)]^{-1}, \quad \text{com } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad (7.7)$$

onde  $f_p$  é a frequência de pico,  $u_{10}$  é a velocidade do vento a 10 metros de altura,  $\theta$  é o ângulo entre a velocidade de fase e  $u_{10}$  e  $\phi$  é o fator *wave age*. *Wave age* é a razão entre a velocidade de fase e  $u_{10}$ . Esta relação indica a área sobre o *wind-sea* que será considerada para análise, sendo considerada *swell* as frequências de pico que estiverem fora da área designada por  $\phi$ . O valor deste fator varia, com Hanson e Phillips (2001) utilizando 1.5 e Tracy et al. (2007) utilizando 1.7. A diferença entre a área que estes valores abrangem pode ser observada na figura 7.2.

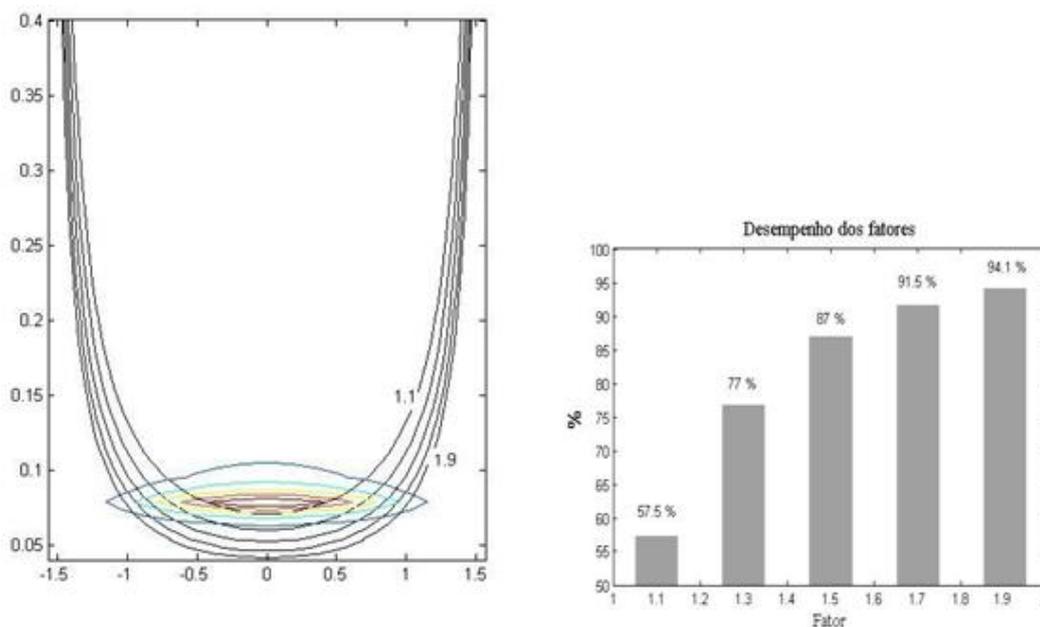


Figura 7.2 - Desempenho dos fatores de *wave age* sobre um espectro

O valor do fator *wave age* pode determinar uma área que avance sobre parte da ener-

gia do espectro pertencente ao *swell* (valor de  $\phi$  mais alto), ou também pode excluir parte significativa da energia do *wind-sea* (valor de  $\phi$  mais baixo). O valor escolhido a ser utilizado pode ser alterado com o decorrer de observações da abrangência deste critério sobre o espectro. Toda partição cujo pico estiver dentro dos limites do fator *wave age* será considerado *wind-sea* e toda a energia será combinada em um único sistema. As demais partições serão consideradas de *swell*.



## 8 RESULTADOS

Serão apresentados neste capítulo os resultados da climatologia de ondas obtidos com o modelo WW3 durante o período de 1997 a 2009. Observa-se na figura 8.1 a região estudada, que abrange o norte da Argentina, Uruguai, Brasil, Guiana Francesa e parte do Suriname. Esta região foi dividida em 10 áreas, e o critério de agrupamento utilizado foi a semelhança em relação à direção de pico dos sistemas de ondas atuantes. No transcorrer das discussões deste capítulo serão descritas as características mais específicas de cada área.

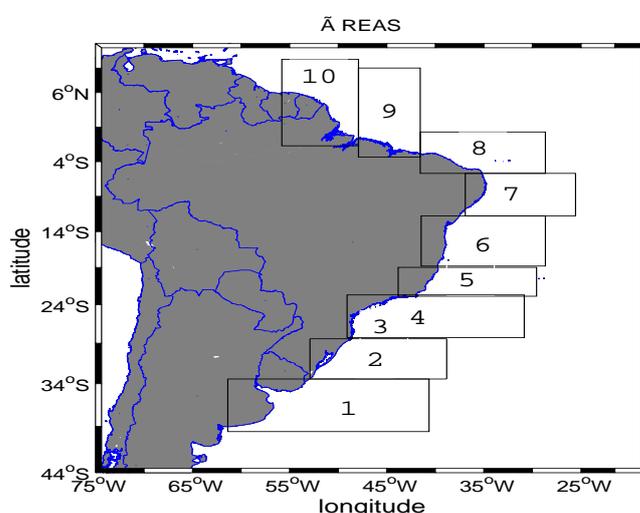


Figura 8.1 - Região de estudo

As discussões focarão a variação da frequência das ocorrências de sistemas de ondas por direção, a média do período de pico e a média da altura significativa. Em seguida, serão apresentados os eventos mais intensos, separados através do percentil 90 % e 99 % da altura significativa e por fim, os resultados da energia de onda através de médias mensais e anuais.

As porcentagens de ocorrências dos sistemas de onda, identificados pela direção de propagação, serão analisadas ressaltando as principais bandas de ocorrência, destacando a direção de maior porcentagem de casos, e suas respectivas médias, como a do período de pico e da altura significativa. As figuras que serão apresentadas reúnem informações equivalentes a cada mês, de todo intervalo de 1997 a 2009. Os parâmetros analisados foram agrupados segundo a direção de pico de cada sistema

de onda computado.

As direções dos sistemas de onda estão padronizadas de acordo com a convenção trigonométrica, referenciando um sistema do sentido de origem para o destino. Para simplificar, as direções foram agrupadas em S (entre  $75^\circ$  e  $105^\circ$ ), SE (entre  $120^\circ$  e  $150^\circ$ ), L (entre  $165^\circ$  e  $195^\circ$ ), NE (entre  $210^\circ$  e  $240^\circ$ ), N (entre  $255^\circ$  e  $285^\circ$ ), NO (entre  $300^\circ$  e  $330^\circ$ ), O (entre  $345^\circ$  e  $15^\circ$ ) e SO (entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ ). As direções também serão agrupadas em bandas, cujo intervalo de abrangência pode variar a cada área.

## 8.1 Área 1

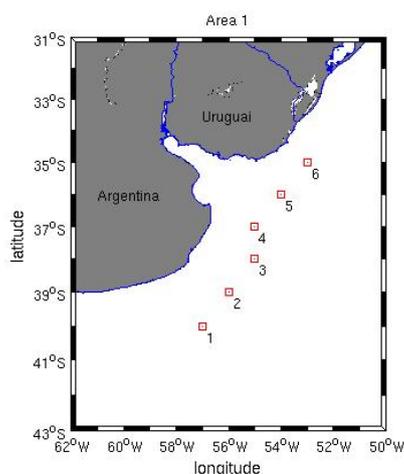
A área 1, que compreende a região costeira norte da Argentina e a região costeira do Uruguai (figura 8.2(a)), possui duas bandas de ocorrências de ondas bem definidas durante todo ano. Pode-se observar pela figura 8.2(b), que estas bandas são representadas pelas porcentagens de ocorrência de sistemas, distribuídas ao longo dos meses e identificadas pela direção de pico.

Uma destas bandas abrangem sistemas de ondas que foram formadas por campos de vento do quadrante nordeste, gerando campos de onda entre as direções de L ( $195^\circ$ ) a NE ( $240^\circ$ ), com a direção de  $225^\circ$  (NE) a mais representativa, caracterizando a banda de nordeste. A outra banda é representada por sistemas gerados por campos de ventos dos quadrantes sudeste e sudoeste, formando campos de ondas de SO ( $60^\circ$ ) a S ( $105^\circ$ ), com a direção de  $75^\circ$  (S) sendo a maior representante da banda sul.

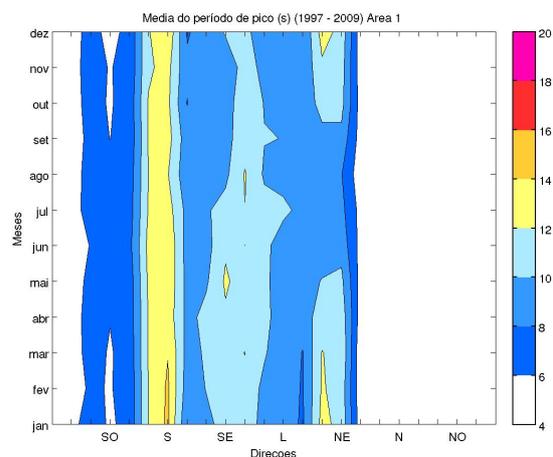
Uma terceira banda de ocorrências também é formada por ventos do quadrante sudeste, com campos de ventos mais comuns de LSE, enquanto que na banda sul os campos de ventos mais característicos são de SSE à SO. Esta banda é intermediária entre as bandas sul e nordeste, e será chamada de banda sudeste, com a direção de  $150^\circ$  (SE) sendo a mais representativa desta área.

O padrão de circulação atmosférica da área 1 está sob regime de campos de ventos da ASAS, sendo a banda nordeste o padrão de campos de ondas esperado. Este padrão é alterado quando há a passagem de ciclones extratropicais, mudando os campos de vento de nordeste para sudeste, sul e sudoeste, gerando campos de ondas da banda sul.

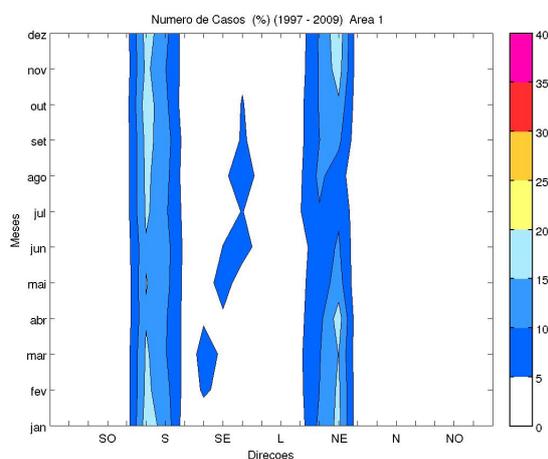
Nota-se pela figura 8.2(b), que na banda nordeste, a direção de NE ( $225^\circ$ ) apresenta de 15 a 20 % dos casos nos meses de novembro a abril. No inverno, a ASAS se



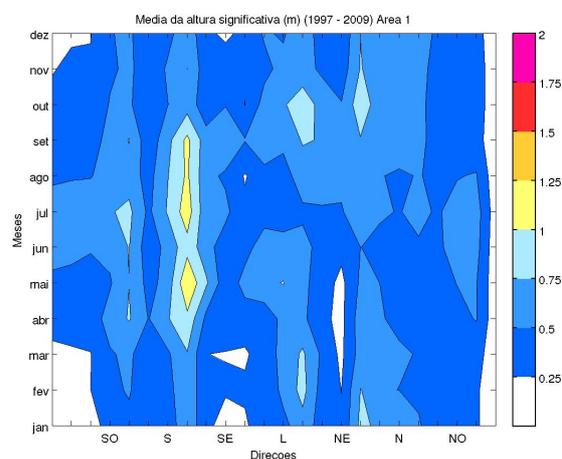
(a) Área 1



(c) Média do período de pico da área 1



(b) Número de casos da área 1



(d) Média da altura significativa da área 1

Figura 8.2 - Área 1 -Norte da Argentina e Uruguai, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

desloca mais ao norte no Atlântico Sul (ver figura 6.1(d)), deslocando os campos de vento de nordeste, reduzindo as ocorrências desta banda para 5 a 15 % dos casos, e aumetando as ocorrências das bandas sudeste e sul.

Na banda sul, a direção de S ( $75^\circ$ ) representa de 15 a 20 % dos casos durante quase todo ano, reduzindo no outono para 10 a 15 %. A redução de casos no outono da banda sul, e no inverno da banda nordeste, leva um aumento dos casos nas direções de SE ( $135^\circ$  e  $150^\circ$ ), que apresenta menos de 5 % dos casos ao longo do ano, passando para uma variação de 5 a 10 %. Nos meses de fevereiro à abril, a direção de SE ( $120^\circ$ )

também apresenta uma variação de 5 a 10 % dos casos, representando menos até 5 % dos sistemas no restante do ano.

Na figura 8.2(c), observa-se o comportamento ao longo do ano da média do período de pico, separados pelas direções de pico. Nesta figura, nota-se que a banda sul apresenta as maiores médias de período de pico, de 8 a 14 s, sendo que a direção de S ( $90^\circ$ ) apresenta a maior variação, de 14 a 16 s nos meses de janeiro à março. Já na figura 8.2(d), observa-se o comportamento da média da altura significativa ao longo do ano, distribuídas pelas direções de pico. Nota-se que esta média na banda sul, varia de 0,25 a 0,75 m, sendo que na direção S ( $105^\circ$ ) apresenta a maior média, de 0,75 a 1,25 m, no outono e no inverno. Esta média é explicada pelos deslocamentos dos ciclones extratropicais, que geram ondas de SO ( $60^\circ$ ), passando pelas direções de S ( $75^\circ$  e  $90^\circ$ ), e gerando ocasionalmente (menos que 5 % dos sistemas), casos intensos de campos ondas da direção S ( $105^\circ$ ).

Nas bandas sudeste e nordeste, as médias do período de pico (figura 8.2(c)) oscilam de 6 a 12 s, com as direções de SE ( $135^\circ$  e  $150^\circ$ ) e NE ( $210^\circ$ ) apresentando média entre 12 e 14 s, com destaque para a direção de NE ( $210^\circ$ ) que apresentou esta variação durante todo os meses de verão (DJF). A média de altura significativa (figura 8.2(d)) para as bandas sudeste e nordeste oscilou entre 0,25 e 0,75 m, chegando a 1,0 m de média na direção de L ( $195^\circ$ ), nos meses de fevereiro, março, setembro e outubro, e na direção de NE ( $240^\circ$ ) durante quase toda primavera (SON) e verão.

Os sistemas mais intensos serão apresentados pelo percentil 90 % e 99 % da altura significativa, que serão chamados de P90 e P99, respectivamente. Os valores de altura significativa acima do P90 variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas acima de 1,2 m no verão, 1,4 m no outono e 1,5 m no inverno e primavera. Observa-se pela figura 8.3 as porcentagens de casos acima do P90, separados pela direção de pico e seu comportamento ao longo do ano. Esses sistemas foram mais comuns entre as direções de S ( $75^\circ$  a  $105^\circ$ ), com 20 a 30 % dos casos no mês de abril e no inverno, e de L ( $195^\circ$ ) a NE ( $225^\circ$ ), representando 10 a 20 % das ocorrências principalmente na primavera e verão.

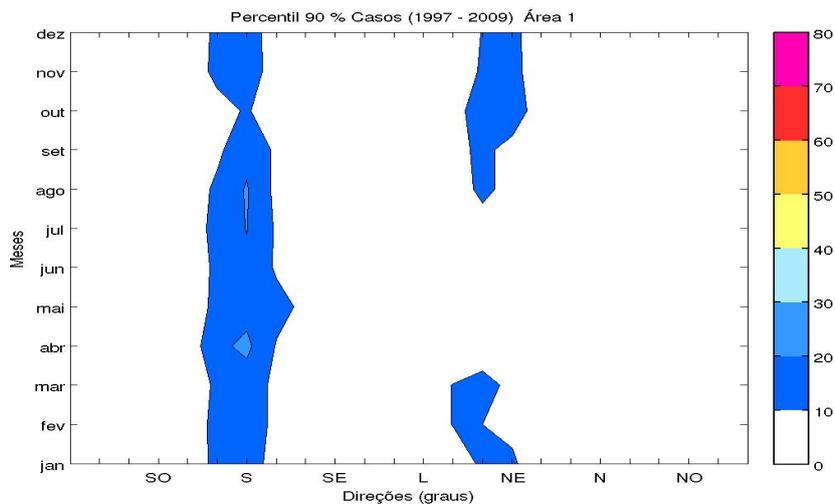


Figura 8.3 - Número de casos acima do Percentil 90 %

As figuras que serão exibidas a seguir, apresentam as oscilações sazonais de ocorrência acima do P90, apresentando as direções que tiveram as maiores médias de altura significativa e seus respectivos períodos de pico. Observa-se pelas figuras 8.4(a), 8.4(b), 8.4(c) e 8.4(d), que algumas direções apresentaram média de altura significativa maior que as demais direções ao longo do ano, e estas foram agrupadas para melhor descrever seus comportamentos ao longo das estações. Estes grupos de direções de maior destaque compreendem as direções de 30° a 60°, 105° a 165°, 225° a 255° e 315° a 345°, e serão chamados de grupo 1, grupo 2, grupo 3 e grupo 4, respectivamente.

O grupo 1 (30° a 60°) possui sistemas que variam entre 8 e 10 s na primavera e verão, e entre 8 e 12 s no outono e inverno. O grupo 2 (105° a 165°) possui uma variação de período de pico mais comum entre 12 e 14 s. Já os grupo 3 (225° a 255°) e 4 (315° a 345°) oscilam entre 6 e 8 s, com exceção à primavera do grupo 3 que oscilou entre 8 e 12 s.

As maiores médias de altura significativa ocorreram nos grupos 1, 2 e 3 durante a primavera e nos grupos 1 e 2 durante o outono, variando de 3,0 a 5,5 m, e no grupo 1 durante o inverno, chegando a 5,0 m de média. O grupo 3 apresentou médias entre 2,0 e 4,0 m durante todo o ano, principalmente da direção de N (255°). A direção de NE (240°), que apresentou uma média de 2,0 m durante quase todo ano, destaca-se bastante na primavera atingindo 5,5 m de média de altura significativa. O grupo 4

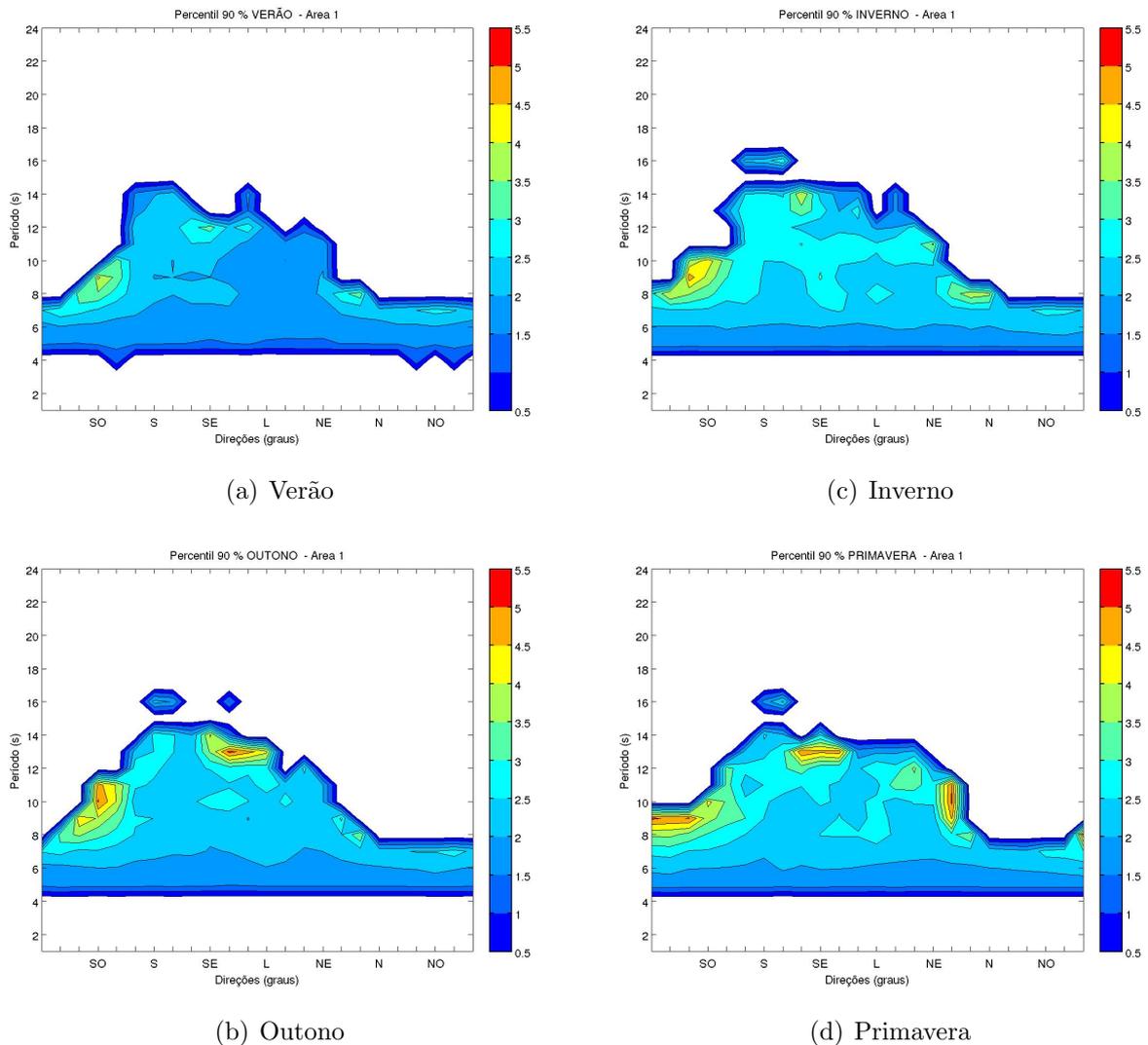


Figura 8.4 - Percentil 90% da altura significativa - Área 1

apresentou variação entre 1,5 e 3,0 m de média durante todo o ano, apresentando também na primavera, um comportamento diferente das outras estações, com a união das direções do grupo 4 com as direções do grupo 1. O comportamento diferenciado apresentado pelos grupos 1 e 4 mostra que, na primavera os campos de vento do quadrante SO a NO são mais intensos nesta época do ano, gerando campos de ondas com média de altura significativa elevadas entre as direções de NO (315°) a SO (60°).

Outro grupo de destaque foi a ocorrência de casos entre 16 e 18 s. No inverno, esses sistemas ocorreram entre as direções de S (75° a 105°), com média de 1,5 a 3,0 m. No outono e na primavera esses sistemas ocorreram entre as direções de S (90° e

105°), não ocorrendo no verão, período em que as médias de altura significativa foi a menor para todos os grupos de direções.

Os valores de altura significativa acima do P99 também variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas acima de 2,7 m no verão, 3,3 m no outono e inverno e 3,2 m na primavera.

Observa-se pela figura 8.5, as porcentagens de casos acima do P99, separados pela direção de pico e seu comportamento ao longo do ano. Esses sistemas foram mais comuns entre as direções de e S (75° a 105°), com 20 a 40 % dos casos no verão e no inverno. Entre as direções de L (180°) a NE (225°), houve uma variação de 10 a 20 % das ocorrências no mês de março, e de 10 a 30 % entre os meses de setembro a dezembro.

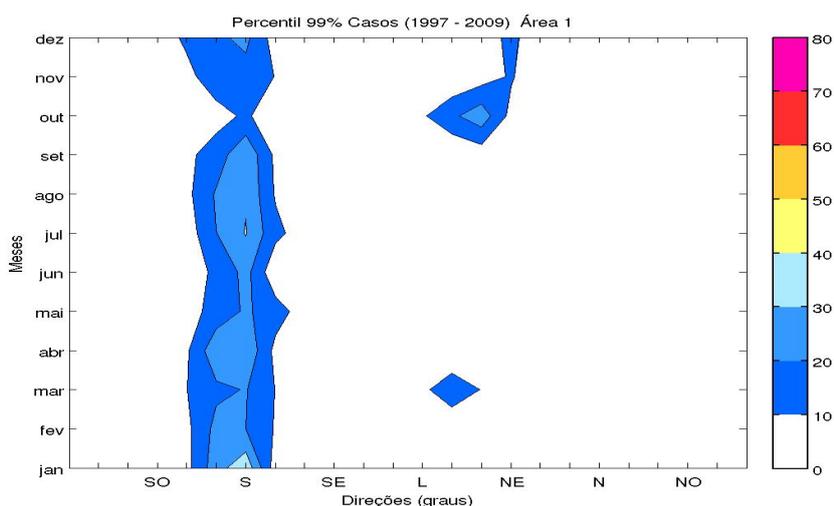


Figura 8.5 - Número de casos acima do Percentil 99 %

As figuras 8.6(a), 8.6(b), 8.6(c) e 8.6(d), apresentam as ocorrências acima do P99, através da média da altura significativa e seus respectivos períodos de pico. Observa-se nestas figuras, que a banda sudeste (105° a 195°) apresentou as maiores médias de altura significativa, com destaque para as direções de SE (120° a 150°), que no verão apresentaram média de até 4,5 m e no inverno até 6,5 m, entre os períodos de pico entre 12 e 14 s. Os casos entre os períodos de 8 a 12 s também obtiveram média elevada nesta banda, de 4,0 a 5,5 m, principalmente no outono e inverno.

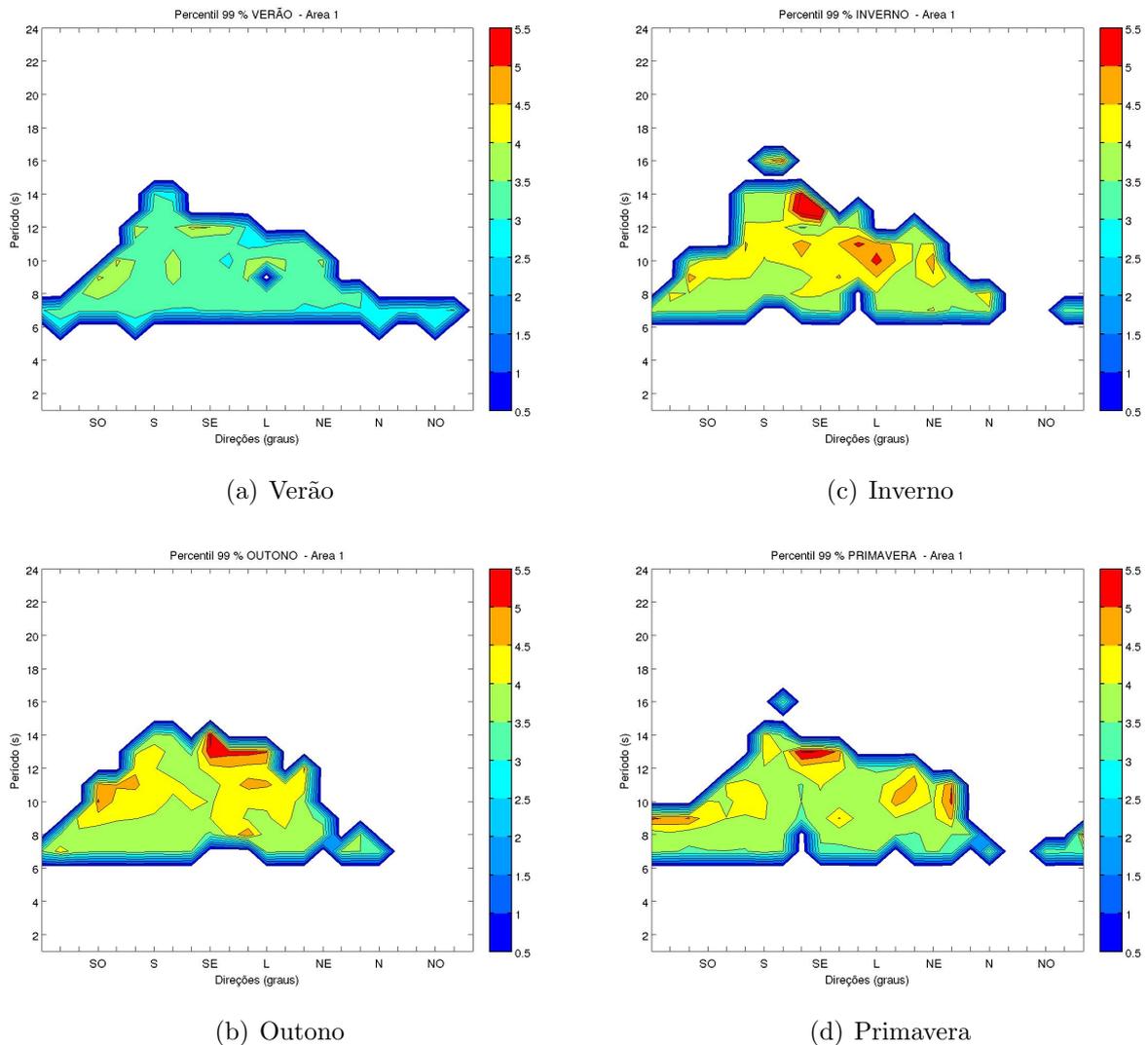


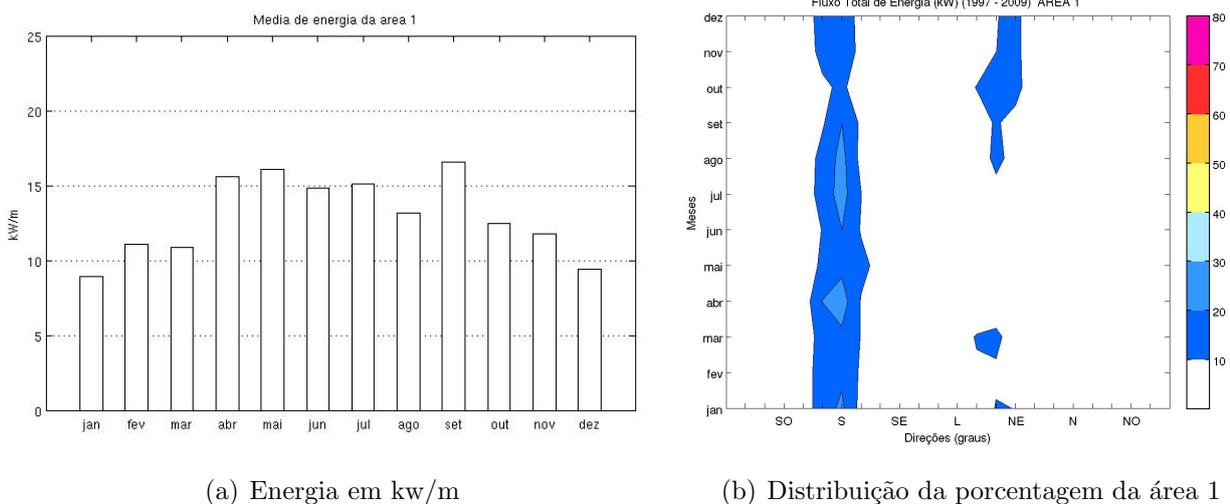
Figura 8.6 - Percentil 99% da altura significativa - Área 1

As bandas sul e nordeste, também apresentaram médias altas de até 5,0 m, com destaque para o inverno e primavera, nas direções de NE (225° e 240°), entre os períodos de pico de 8 a 12 s. Assim como no P90, os valores acima do P99 mostraram que na primavera os sistemas entre as direções de 315° e 345° (grupo 4) apresentaram médias elevadas, unindo-se com as direções do grupo 1 (30° a 60°), entre os períodos de 6 a 8 s.

Observa-se também, que entre os períodos de pico de 16 a 18 s ocorreram sistemas acima de 3,3 e 3,2 m, na direção de S (105°) na primavera e nas direções de S (90° e 105°) no inverno, apresentando uma média de altura significativa de até 5,5 m.

Apesar de apresentar as maiores médias acima do P99, a banda sudeste, como observado pela figura 8.5 apresenta menos de 10 % dos casos, enquanto que as direções nas bandas sul e nordeste apresentam uma porcentagem bem maior. Levando-se em conta que a energia é calculada através da altura significativa e do período médio, nota-se que os valores apresentados na figura 8.7(b) são coerentes com os resultados apresentados de média de altura significativa e de porcentagem de ocorrência acima do P90 e P99.

A média mensal pode ser observada pela figura 8.7(a). Entre os meses de abril e setembro os valores da média de energia são mais elevados, passando de 15 kW/m. Observa-se pela figura 8.7(b), que entre esses meses, a energia está concentrada nos sistemas provenientes de sul, entre as direções de SO (60°) a S (105°), com sistemas de nordeste apresentando menos que 10 % nesta época do ano.



(a) Energia em kw/m

(b) Distribuição da porcentagem da área 1

Figura 8.7 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 1

Nos meses de verão e parte da primavera, nota-se que as médias mensais diminuem, e os sistemas de sul e nordeste contribuem com 10 a 20 % da energia, apresentando valores de média entre 9 e 13 kW/m.

A média por direção pode ser observada pela figura 8.8, que os sistemas de onda das direções de sul e nordeste representam as maiores médias, com a direção de S (90°) a de maior intensidade, representando até 20 kW/m, seguida da direção S (75°). A média anual da área 1 é 12,97 kW/m.

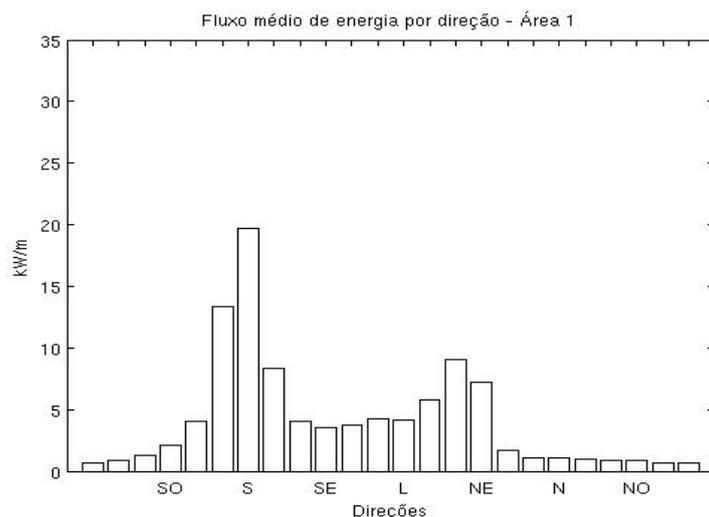


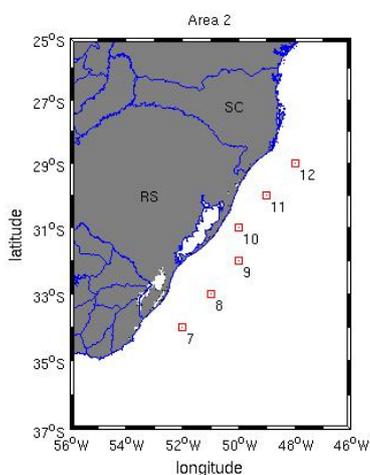
Figura 8.8 - Média de fluxo de energia por direção - Área 1

## 8.2 Área 2

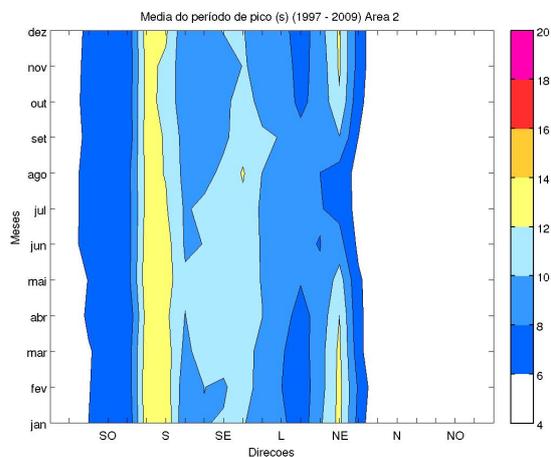
A área 2, que compreende a região costeira do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina (figura 8.9(a)), apresenta as mesmas variações de direções que a área 1, com a banda nordeste variando de L (195°) a NE (240°) e a banda sul, de SO (60°) a S (105°). A banda sudeste da área 2 se diferencia da banda sudeste da área 1 pelo aumento de número de casos nas direções de SE (120°, 150° e 165°) no primeiro semestre.

Apesar de apresentar a mesma variação de bandas de ocorrências da área 1, observa-se pela figura 8.9(b), que a área 2 apresenta maior porcentagem de casos. A direção NE (225°), na banda nordeste, apresenta de 15 a 25 % de ocorrência na primavera, verão e outono, e de 5 a 15 % no inverno. A banda sul apresentou, pela direção de S (75°), uma variação de 20 a 25 % durante quase todo ano, representando até 30 % dos sistemas nos meses de janeiro, setembro e outubro. A banda sudeste manteve a mesma variação de 5 a 10 % de ocorrência encontrada na área 1, com a maior parte dos casos concentrados no primeiro semestre,

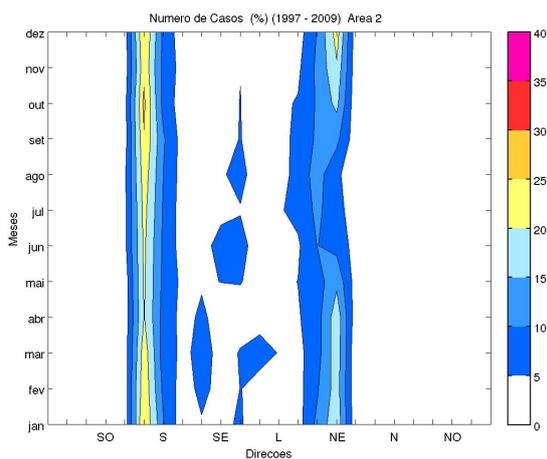
ficando abaixo dos 5 % no restante do ano.



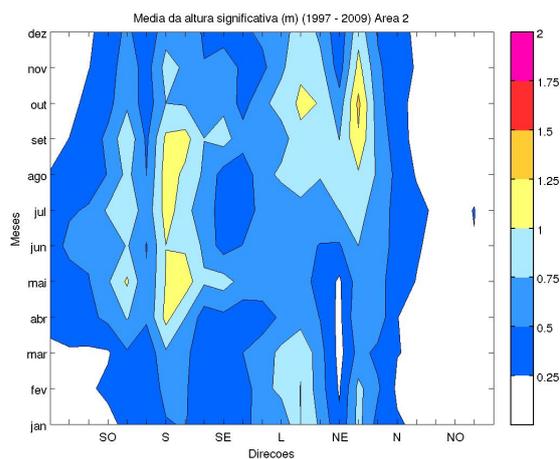
(a) Área 2



(c) Média do período de pico da área 2



(b) Número de casos da área 2



(d) Média da altura significativa da área 2

Figura 8.9 - Área 2, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Na figura 8.9(c), observar-se que a banda sul apresenta médias de período de pico, entre 8 a 14 s, sendo que as direções de S (75° e 90°) apresentam variação de 12 a 14 s durante todo o ano. Na área 1, houve registro no verão, de variação de média de 14 a 16 s nesta banda, o que não ocorre na área 2. A banda sudeste apresenta média de período de pico de 8 a 12 s, chegando até 14 s em agosto da direção SE (150°). Na banda nordeste, a direção NE (225°) oscilou de 10 a 14 s durante a primavera,

verão e outono.

Já na figura 8.9(d), nota-se que a média de altura significativa na banda sul variou de 0,25 a 0,75 m, sendo que as direções de S (90° e 105°) apresentam a maior média, de 0,75 a 1,25 m, no outono e inverno. Nas bandas sudeste e nordeste, observa-se em relação à área anterior, que as direções que obtiveram destaque na área 1, se intensificam na área 2, com a direção de L (195°) variando de 0,75 a 1,25 m de agosto a março. A direção de NE (240°) durante o verão, outono e inverno, apresenta variações de 0,5 a 1,0 m, chegando a uma média de 1,0 a 1,5 na primavera.

Os valores de altura significativa acima do P90 na área 2 variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas acima de 1,3 m no verão, 1,5 m no outono e 1,7 m no inverno e 1,8 m na primavera. Observa-se pela figura 8.10, que esses sistemas foram mais comuns entre as direções de S (75° e 90°), com 20 a 30 % dos casos no outono e no inverno, e de L (180°) a NE (240°), representando 10 a 20 % das ocorrências no final do inverno, primavera e verão, com um pico de 20 a 30 % das ocorrências no mês de outubro, principalmente das direções de NE (210° e 225°).

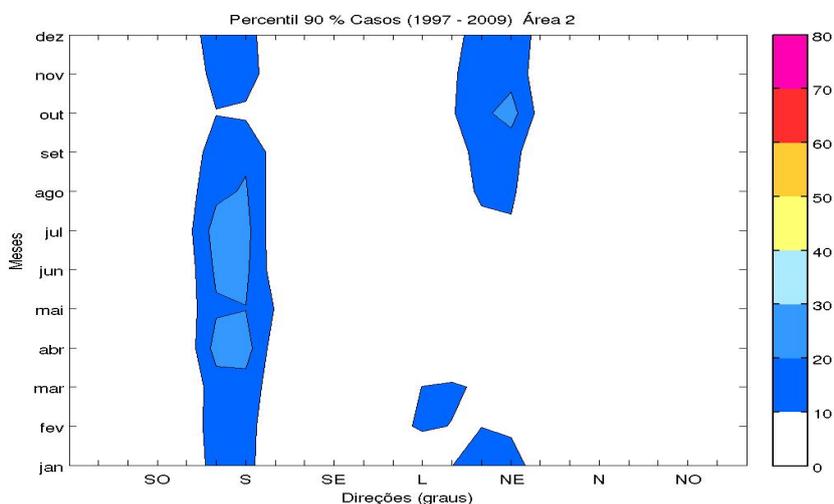


Figura 8.10 - Número de casos acima do Percentil 90 %

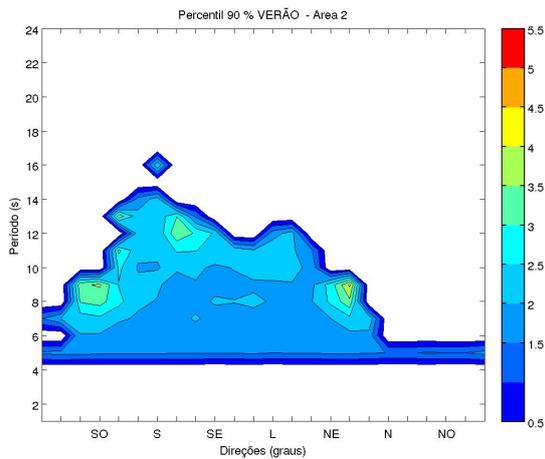
Os grupos apresentados na área 1 podem ser também utilizados na área 2, com a diferença apenas no intervalo dos períodos de pico. O grupo 1 (30° a 60°) da área 2 varia de 5 a 14 s, enquanto que o grupo 2 continua variando de 12 a 14 s. Já o

grupo 3 oscila entre de 6 e 12 s e o grupo 4 manteve a mesma variação da área 1, de 6 a 8 s.

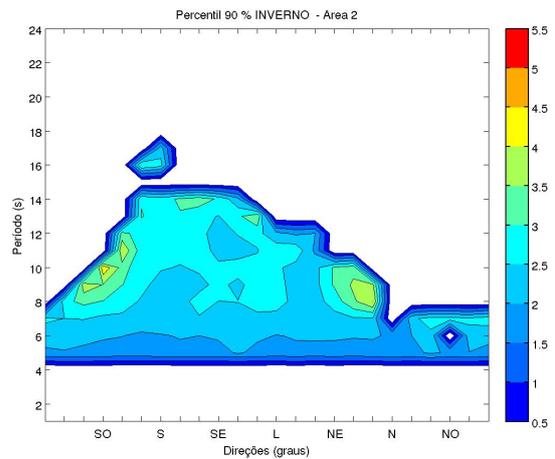
Na área 2, observa-se pelas figuras 8.11(a), 8.11(b), 8.11(c), 8.11(d), que os sistemas acima do P90 foram menos intensos que na área 1. O grupo que obteve maior média foi o grupo 1, apresentando média de altura significativa de até 5,5 m no outono, inverno e primavera. O grupo 3 também apresentou média de até 5,5 m na primavera e de até 4,0 m no inverno.

O grupo 2 apresentou média de 3,0 a 4,0 m, com maiores valores no outono e primavera. Já o grupo 4 apresentou média de até 3,5 m na primavera, 3,0 m no outono e inverno, não obtendo média acima de 1,5 m no verão. Destaque para a direção de SO ( $60^\circ$ ), que manteve média alta (2,5 a 5,5 m) em todas as estações do ano.

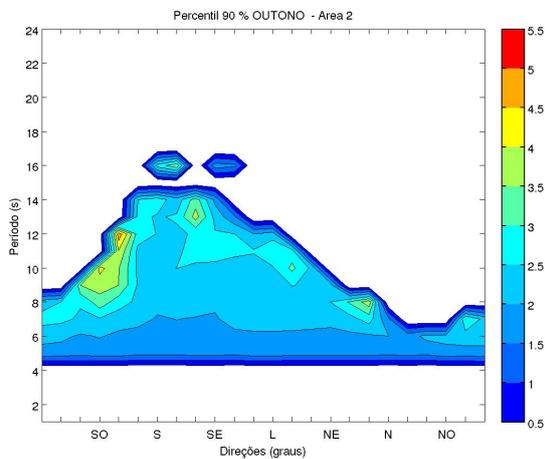
Assim como na área 1, a área 2 apresentou sistemas entre 16 e 18 s de período de pico, apresentando média acima de 1,5 m também no verão, o que não ocorreu na área 1. Esses sistemas ocorreram na direção S ( $90^\circ$ ) no verão, entre S e SE no outono, entre SO e S no inverno, e de S ( $90^\circ$  e  $105^\circ$ ) na primavera, período o qual a média foi mais alta, com até 4,5 m.



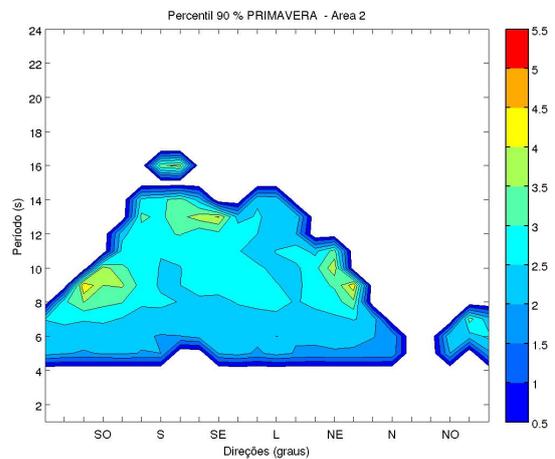
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.11 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 2

Os valores de altura significativa acima do P99 variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas acima de 2,7 m no verão, 3,3 m no outono, 3,4 no inverno e na primavera. Observa-se pela figura 8.12, que esses sistemas foram mais comuns entre as direções de SO (60°) a S (90°), com 20 a 40 % dos casos no verão, outono e no inverno, com maiores destaques para os meses de janeiro, abril e julho. No mês de abril observa-se uma variação de 40 a 50 % dos casos.

A direção de SE (120°) se destacou, variando de 10 a 20 % no mês de maio, ficando abaixo de 10 % no restante do ano. Entre as direções de L (165° a 195°), houve uma variação de 10 a 20 % das ocorrências nos meses de janeiro a abril, e entre L (195°)

e NE (240°) uma variação 10 a 30 % entre os meses de setembro a dezembro, com destaque para a direção de NE (225°) no mês de outubro.

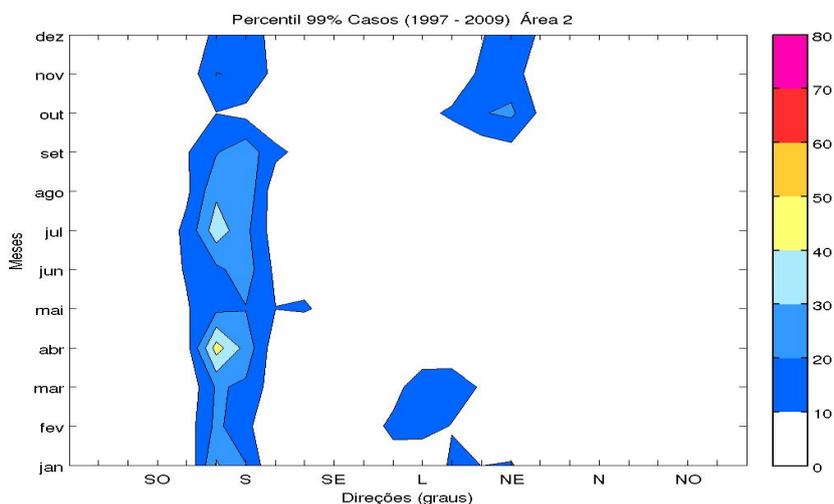


Figura 8.12 - Número de casos acima do Percentil 99 %

Na área 2 não houve destaque de nenhuma banda de ocorrência, como foi com a banda sudeste na área 1. A direção que apresentou maior média de altura significativa foi a de SO (60°), entre os períodos de pico de 10 a 12 s, com até 5,5 m no outono, como é possível observar na figura 8.13(b). Observa-se pelas figuras 8.13(c) e 8.13(d), que a direção de SO (60°) apresenta no inverno e na primavera uma média de de 4,0 a 5,0 m e no verão de 3,5 a 4,5 m (ver figura 8.13(a)).

A maior parte das direções que apresentaram maiores médias oscilaram entre 4,0 e 5,0 m. Nas direções de S (105°) e SE (120°), durante o inverno e a primavera, entre os períodos de 10 a 14 s, e nas direções de SE (150° e 165°), L (195°) e NE (210°), entre os períodos de pico entre 8 e 12 s.

No outono (figura 8.13(b)), as direções de SE (135° e 150°) também variaram entre 4,0 e 5,0 m entre os períodos de pico de 8 e 10 s, e no verão (figura 8.13(a)), as maiores médias de altura significativa oscilaram entre 3,5 e 4,5 m nas direções de S (105°) e SE (135°) com períodos de pico entre 12 e 14 s, e na direção de NE (240°) com períodos de pico entre 8 e 10 s.

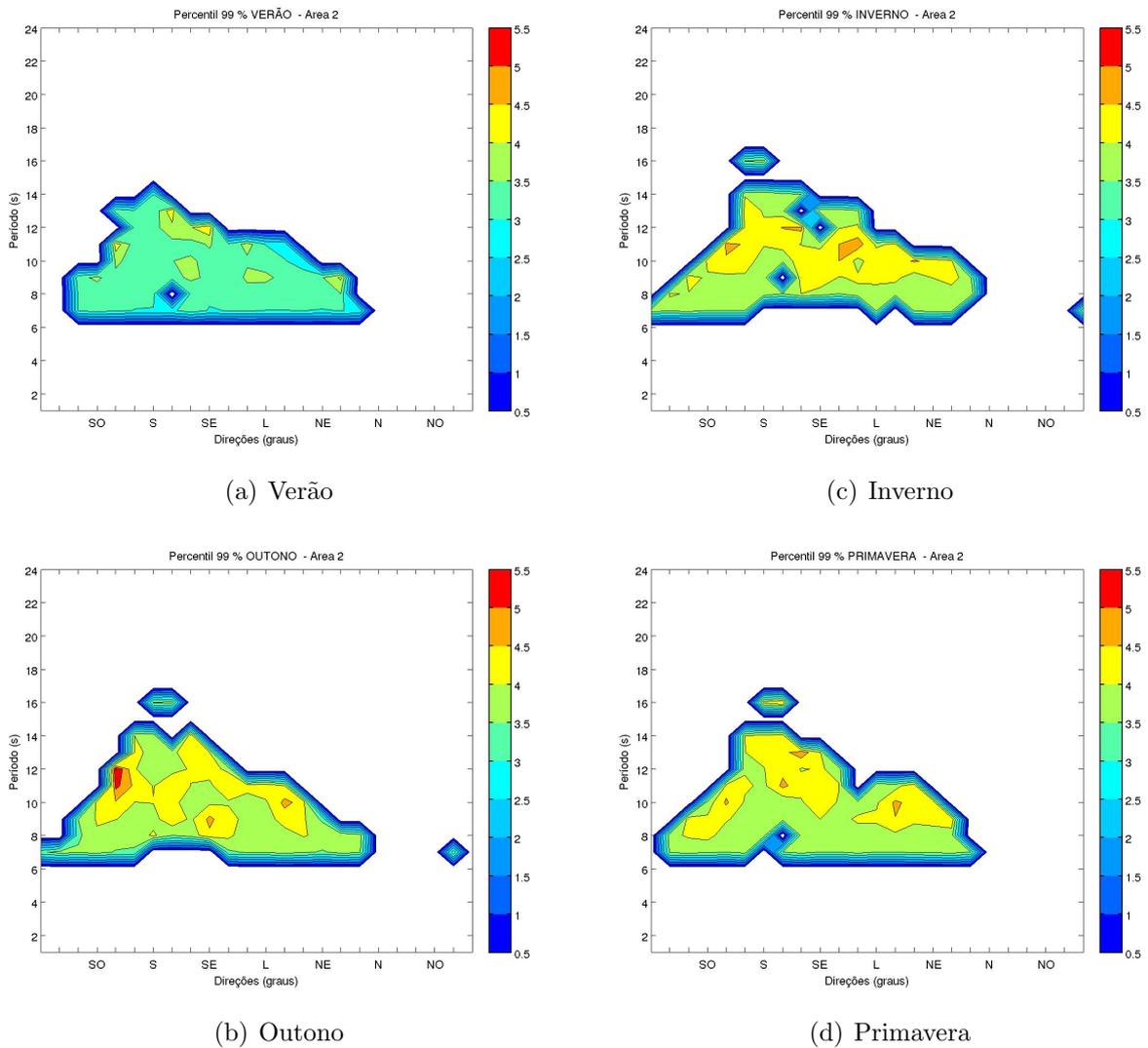
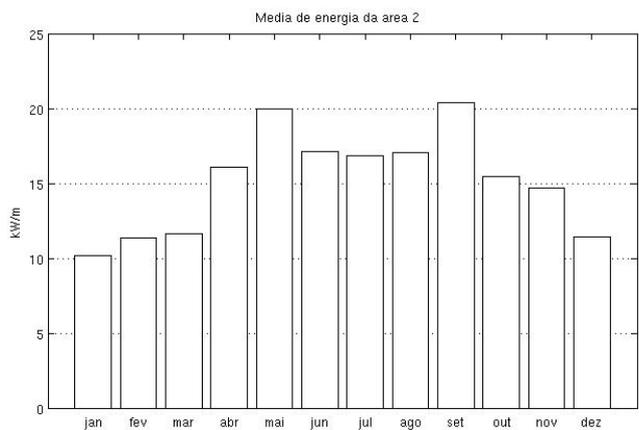


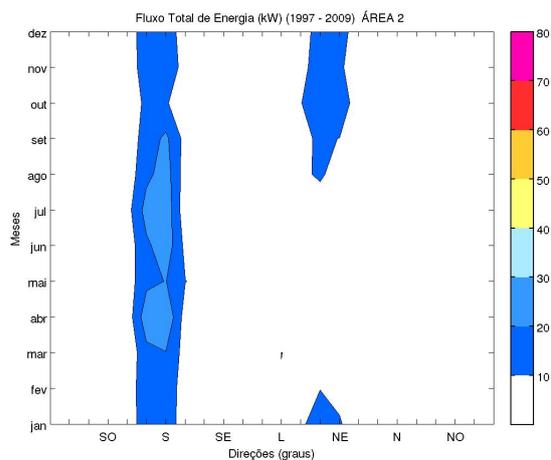
Figura 8.13 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 2

Da mesma forma que na área 1, a área 2 apresenta uma distribuição de porcentagens de média de energia que se asselha com a distribuição dos sistemas acima do P90 e P99. Observa-se pela figura 8.14(a), que nos meses de maio e setembro a média de energia atinge 20 kW/m com média acima de 15 kW/m entre os meses de abril e outubro. Nota-se pela figura 8.14(b), que entre março e setembro, os maiores valores de energia estão concentrados nos sistemas de sul, apresentando 20 a 30 % da energia.

Nos meses de verão e primavera, as médias das direções de nordeste representam de 10 a 20 % da energia, da mesma forma que nos sistemas de sul. Nestes meses ocorre redução nas médias mensais, porém mantendo-se acima de 10 kW/m.



(a) Energia em kw/m



(b) Distribuição da percentagem da área 2

Figura 8.14 - Energia média em kW/m e distribuição da percentagem das médias de energia por direção da área 2

Observa-se pela figura 8.15, a média por direção, na qual os sistemas de onda das direções de sul e nordeste representam as maiores médias, com valores aumentando em relação à área 1. As direções de S (75° e 90°) apresentam as maiores médias, 18,3 e 21,3 kW/m, respectivamente, seguidas pela direção NE (240°), cuja média foi de 9,9 kW/m. A média anual da área 2 é de 15,14 kW/m.

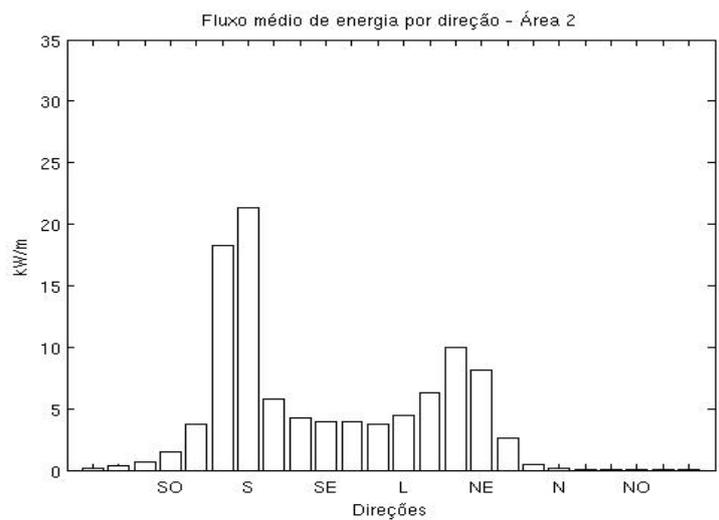
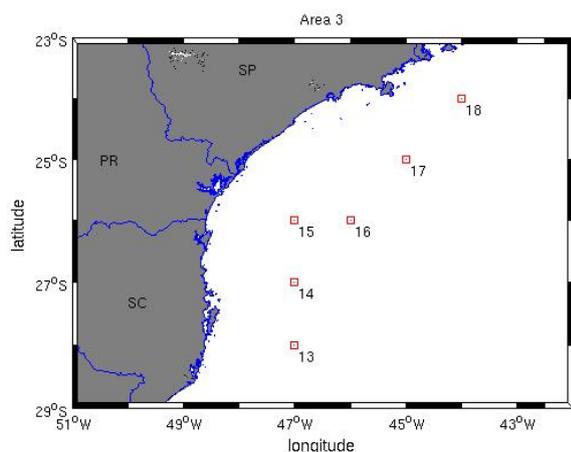


Figura 8.15 - Média de fluxo de energia por direção - Área 2

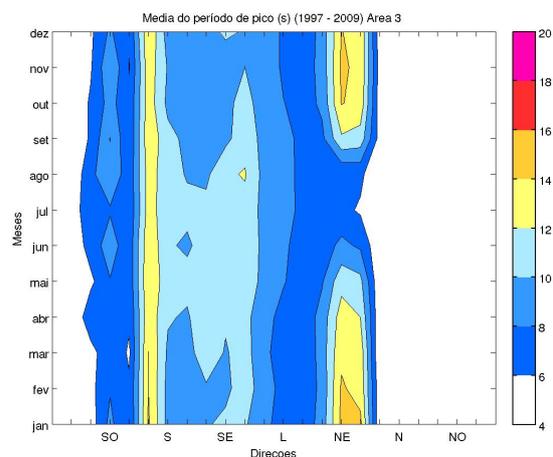
### 8.3 Área 3

A área 3, que abrange desde a região costeira central de Santa Catarina até o a região costeira sul do Rio de Janeiro (figura 8.16(a)), apresenta a banda nordeste diferente das áreas anteriores. Observa-se pela figura 8.16(b) que as porcentagens de ocorrência foram menores comparados às áreas 1 e 2, com campos de ondas de NE ( $225^\circ$ ) variando de 10 a 15 % no verão e de 5 a 10 % no inverno, enquanto que nas áreas 1 e 2 representavam até 25 % dos casos. Houve também um aumento no número de casos da banda sudeste, fazendo com que as duas bandas (nordeste e sudeste) se unissem na área 3. Na direção de L ( $195^\circ$ ), nota-se um aumento dos casos entre junho e setembro e na direção de L ( $180^\circ$ ) mais comum no outono do que em outras épocas do ano. Outras direções da banda sudeste também apresentam aumento nos casos, por exemplo as direções de SE ( $120^\circ$  e  $150^\circ$ ) variaram de 5 a 10 % durante todo primeiro semestre ( $120^\circ$ ) e durante todo o ano ( $150^\circ$ ). Na banda sul, as ocorrências continuaram constantes durante todo o ano, com a direção de S ( $75^\circ$ ) oscilando de 25 a 30 % durante praticamente todo ano, com exceção apenas do mês de abril que variou entre 20 e 25 %.

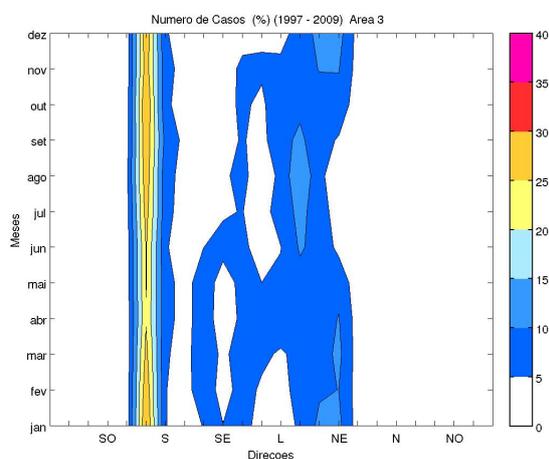
Observa-se pela figura 8.16(c), que a média do período de pico da banda nordeste da área 3 se intensifica em relação a área 2, variando de 10 a 16 s na primavera, verão e outono e entre 6 e 10 s no inverno. A direção de NE ( $225^\circ$ ) se destacou nesta banda por apresentar média entre 12 e 14 s durante toda primavera e verão. A banda sudeste variou de 6 a 12 s, com destaque para a direção de SE ( $150^\circ$ ), assim como nas outras áreas apresentou médias maiores que as demais direções desta banda, de 12 a 14 s durante o mês de agosto. Na banda sul, a direção de S ( $75^\circ$ ) apresentou variação de 14 a 16 s durante o verão, permanecendo entre 12 a 14 s durante o restante do ano. A direção de S ( $90^\circ$ ) variou de 8 a 10 s na primavera, verão e outono, e entre 10 e 12 s no inverno.



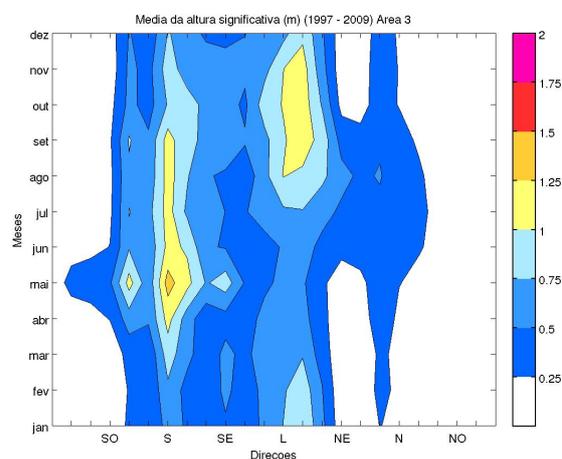
(a) Área 3



(c) Média do período de pico da área 3



(b) Número de casos da área 3



(d) GMédia da altura significativa da área 3

Figura 8.16 - Área 3, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

A banda nordeste foi a que apresentou a maior média de período de pico, porém observa-se pela figura 8.16(d) que a média da altura significativa variou apenas entre 0,25 e 0,75 m durante o inverno e começo da primavera. Na banda sudeste, as direções de L (180° e 195°) apresentaram médias de 0,75 a 1,25 m no inverno e primavera e de 0,5 a 1,0 m durante o verão e outono. A maior média da região foi da direção de S (90°), que variou de 1,0 a 1,25 m durante todo o outono, inverno e começo de primavera, apresentando máximo de média no mês de maio, de 1,25 a 1,5 m. A direção de SO (60°) apresentou média de até 0,75 m durante quase todo ano, apresentando um máximo também no mês de maio, chegando a 1,25 m de média de

altura significativa.

Para os sistemas acima de P90, observa-se pela figura 8.17 que a área 3 possui uma distribuição de sistemas similar às áreas 1 e 2. Na área 3, no entanto, nota-se um aumento de porcentagem das direções da banda sul, principalmente em relação à direção de S ( $75^\circ$ ), que representa de 30 a 50 % dos sistemas acima do P90 no meses de abril a agosto. No mês de maio, ocorrências acima do P90 aparecem representando 10 a 20 % entre as direções de S ( $105^\circ$ ) a SE ( $120^\circ$ ), fato que não ocorreu nas áreas anteriores. Observa-se também que entre as direções de L ( $180^\circ$ ) a NE ( $240^\circ$ ), os sistemas acima do P90 aparecem principalmente no final do inverno, primavera e verão, representando de 10 a 20 % dos casos.

Os valores de altura significativa acima do P90 variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas maiores que 1,2 m no verão, 1,3 m no outono e no inverno, e 1,7 m na primavera.

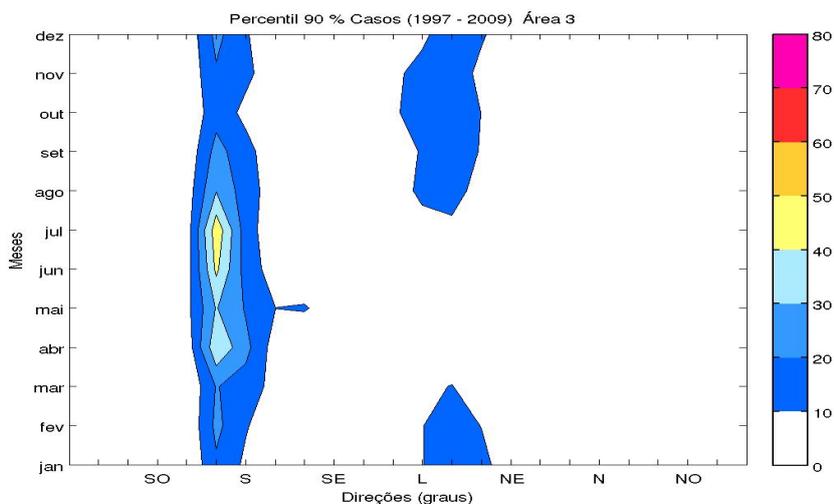


Figura 8.17 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Na área 3, observa-se pelas figuras 8.18(a), 8.18(b), 8.18(c), 8.18(d), que os sistemas que apresentaram maior média de altura significativa acima do P90 ocorreram nos meses equivalentes ao outono. Entre as direções de SO ( $45^\circ$  e  $60^\circ$ ) a média varia de 2,5 a 4,5 m, com períodos de pico entre 8 e 14 s. Durante o restante do ano, essas direções também aparecem com médias elevadas em relação às demais direções. As direções de S ( $75^\circ$  e  $90^\circ$ ) se destacam mais na área 3 devido aos sistemas que

aparecem durante todo o ano entre 16 e 18 s, principalmente nos meses de inverno e primavera. Na banda sudeste, destaques para as direções entre SE (135°) e L (180°), que principalmente no inverno e na primavera apresentam médias altas, de 2,5 a 4,0 m, com períodos de pico principalmente entre 12 e 14 s. Há também entre as direções de SE (120° e 135°), sistemas que se destacam acima do P90 entre os períodos de pico de 16 a 18 s. Na banda nordeste, entre as direções de NE (225° e 240°), os sistemas são comuns ao longo do ano, apresentando uma média de altura significativa maior nos meses de inverno e primavera, variando entre 2,5 e 4,0 m nos períodos de pico de 6 a 10 s. Aparecem frequentemente, menos no verão, médias de até 3,0 m entre as direções de N (285°) a O (345°), com período de pico entre 6 e 8 s.

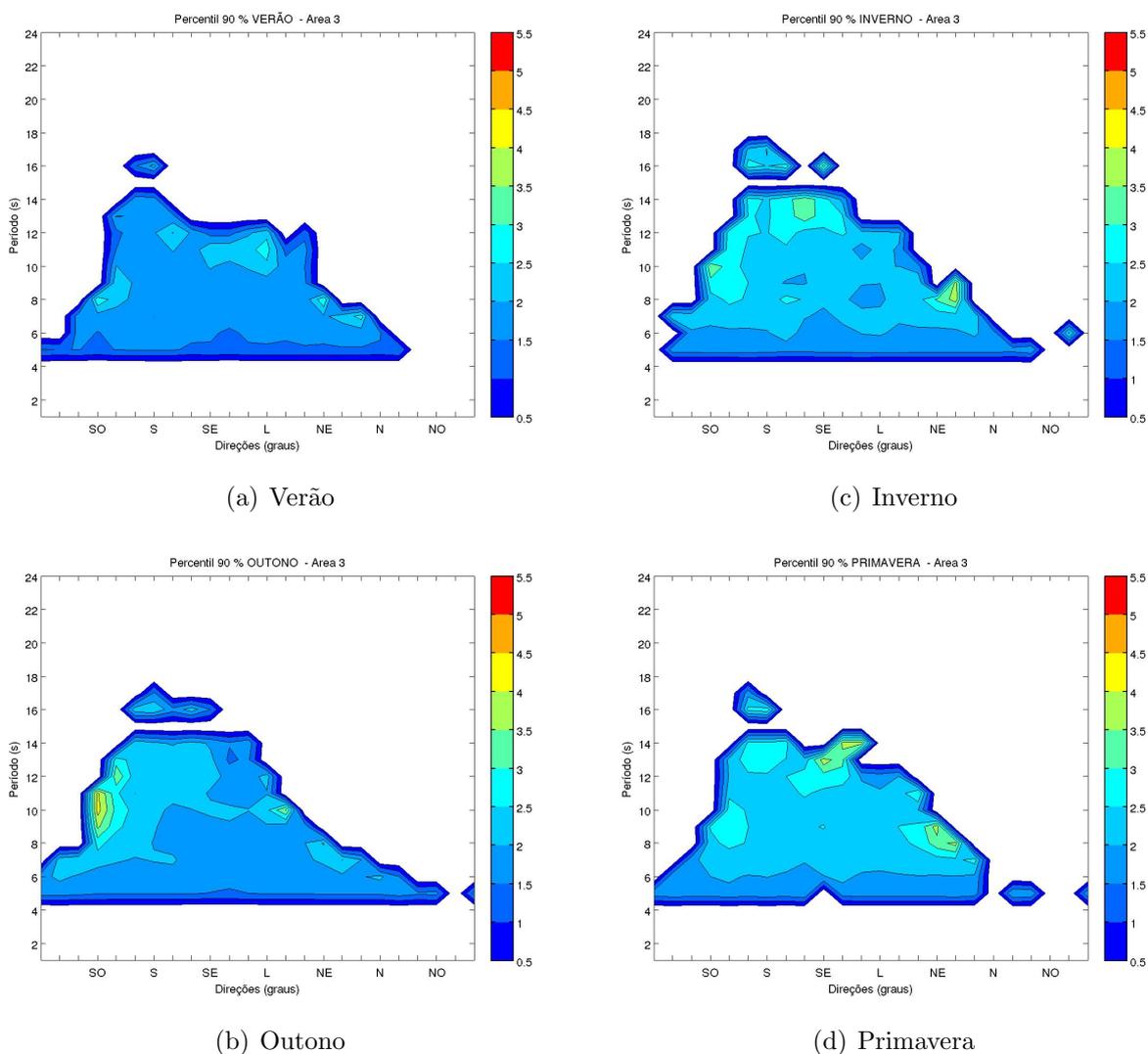


Figura 8.18 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 3

Para os sistemas acima de P99, observa-se pela figura 8.19 que a grande maioria dos sistemas ocorreram no inverno da direção de S (75°), representando 50 a 70 % dos casos. Entre as direções de SE (150°) e L (180°), nos meses de janeiro a março e entre L (180°) e NE (225°), nos meses de setembro a dezembro, os sistemas representaram de 10 a 20 % das ocorrências. Os valores de altura significativa acima do P99 variaram na área 3 de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas acima de 2,3 m no verão, 2,9 m no outono, 3,1 no inverno e 3,0 m na primavera.

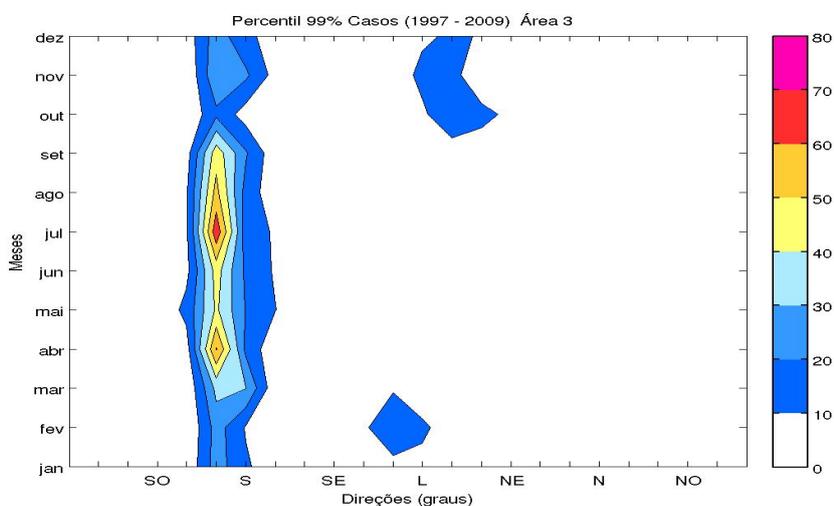


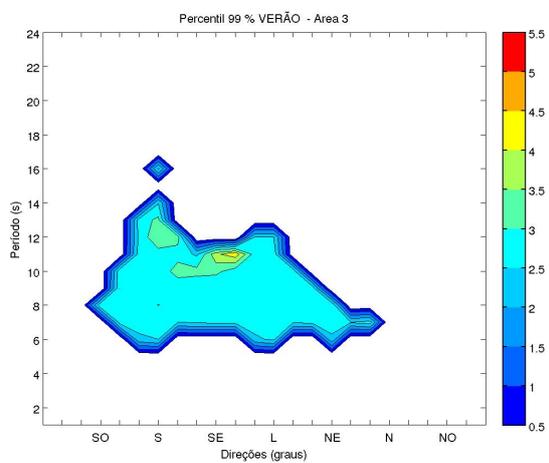
Figura 8.19 - Número de casos acima do Percentil 99 %

Observa-se pelas figuras 8.20(a), 8.20(b), 8.20(c), 8.20(d), que os sistemas mais intensos na área 3 ocorreram principalmente nos meses de inverno, entre as direções de SE (135° e 150°), tanto nos períodos de pico entre 8 e 14 s como entre 16 e 18 s. A média passou de 5,5 m. A direção de SO (60°), entre os períodos de pico de 10 e 12 s, apresentou média de altura significativa entre 4,0 e 5,0 m, e em S (75° e 90°) também houve registro de sistemas entre 16 e 18 s, com média de até 4,0 m.

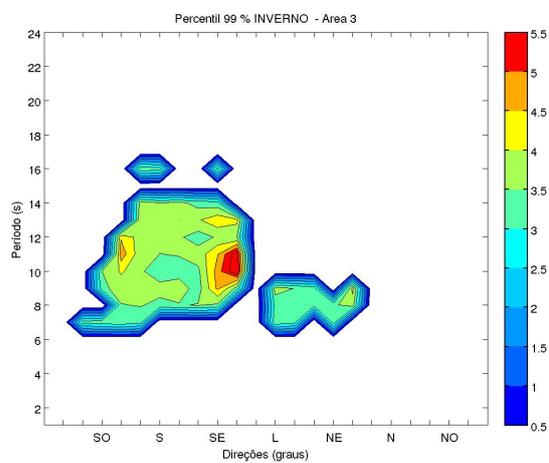
Entre as direções de L (180°) a NE (240°) observa-se que na banda nordeste também houve direções com destaques na média de altura significativa, variando de 2,5 m no verão a 5,0 m no outono, entre os períodos de pico de 6 e 10 s.

No verão, a direção de destaque é a de SE (150°), que apresenta média de altura significativa de até 4,5 m, e a direção de S (90°), com média de 3,0 a 3,5 m entre os

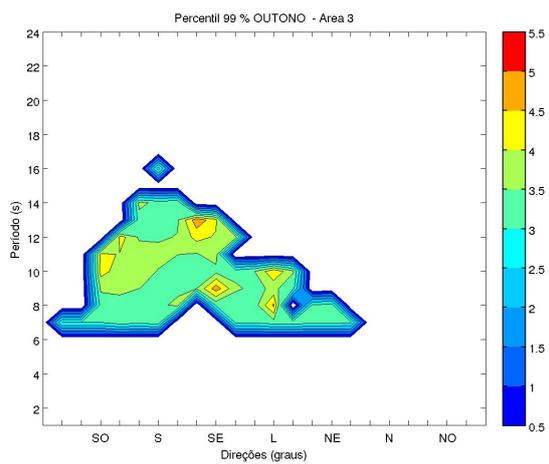
períodos de pico de 10 a 14 s.



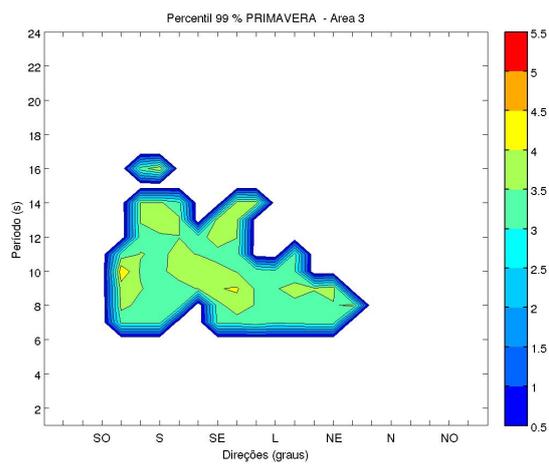
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono

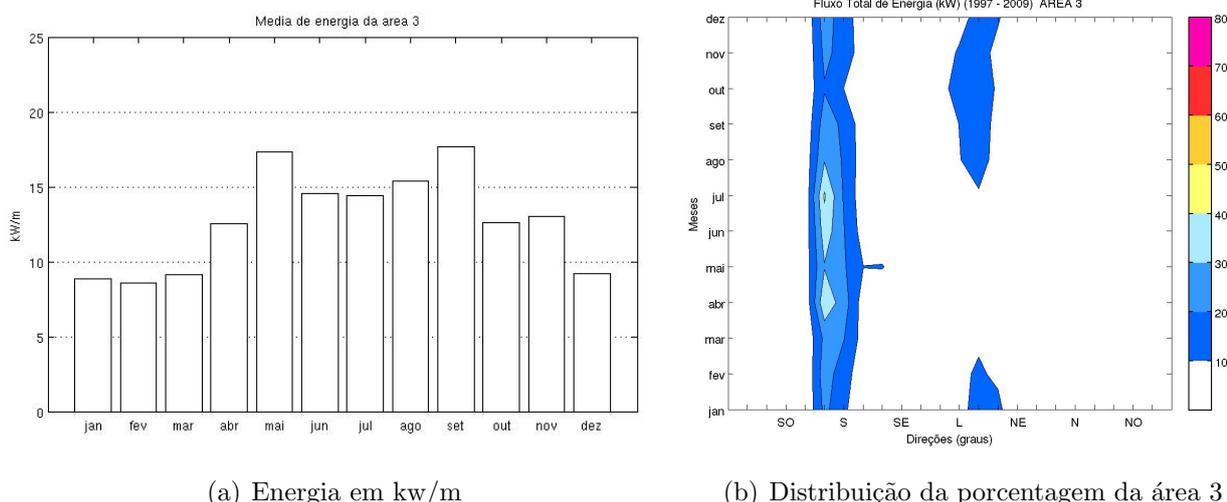


(d) Primavera

Figura 8.20 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 3

As médias mensais de energia na área 3, como pode-se observar pela figura 8.21(a), apresentam valores em torno de 15 kW/m nos meses de maio a setembro, com valores máximos nos meses de maio e setembro. Estes valores decrescem, apresentando média abaixo de 10 kW/m principalmente nos meses de verão.

Observa-se pela figura 8.21(b), na área 3 ocorre um aumento nas porcentagens dos sistemas de sul, mostrando a importância que os sistemas originados dos ciclones extratropicais possuem no clima de ondas das regiões sul e sudeste do litoral brasileiro. O mês de julho, por exemplo, através da direção de S (75°) representa entre 40 e 50 % da energia desta área, representando nos demais meses de inverno e outono de 30 a 40 %.



(a) Energia em kW/m

(b) Distribuição da porcentagem da área 3

Figura 8.21 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 3

Assim como observado nas áreas anteriores, as direções de nordeste apresentam valores de 10 a 20 % da energia de onda nos meses de primavera e verão. Nas áreas 1 e 2, essas direções de nordeste variaram entre L (195°) e NE (225°), e na área 3, estas médias mensais foram mais importantes entre direções de L (180°) e NE (210°).

Na figura 8.22, observa-se que os sistemas de onda das direções de sul e nordeste continuam representando as maiores médias. A média da direção de S (75°) é maior que a direção S (90°), apresentando média de 28,5 kW/m contra 17,8 kW/m, seguida

pela direção NE (225°), cuja média foi de 10,8 kW/m. A média anual da área 3 é de 12,73 kW/m.

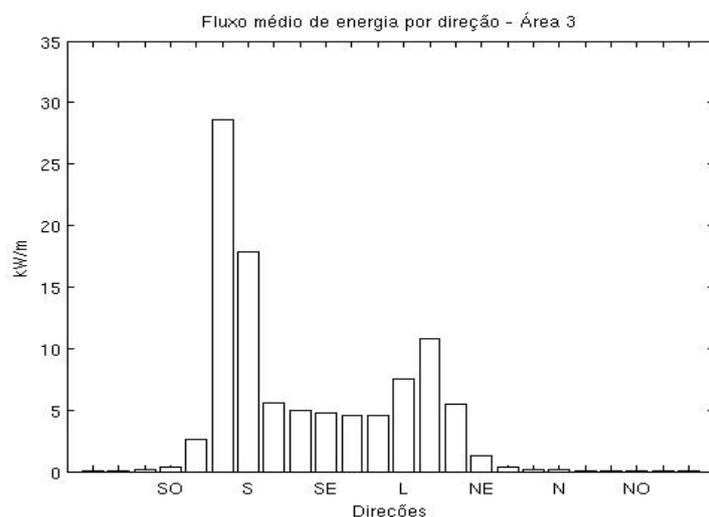
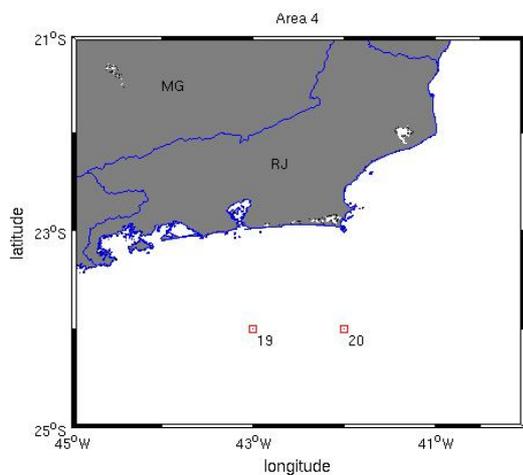


Figura 8.22 - Média de fluxo de energia por direção - Área 3

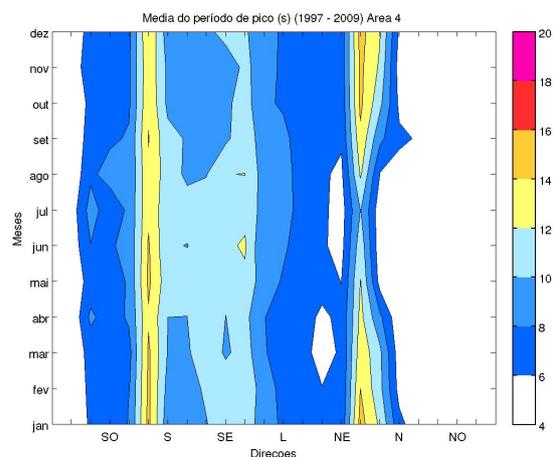
#### 8.4 Área 4

A área 4 (figura 8.23(a)), compreende a região oceânica central do Estado do Rio de Janeiro, que difere da região sul do mesmo Estado, principalmente em relação às bandas nordeste e sudeste. Observa-se pela figura 8.23(b), que a banda nordeste é bem definida, com a direção de maior casos passando a ser de NE (240°), enquanto que nas áreas anteriores a direção de maior número de casos era a de NE (225°). A direção de NE (240°) varia de 5 a 25 % das ocorrências durante a primavera, verão e outono, reduzindo para menos de 5 % no inverno.

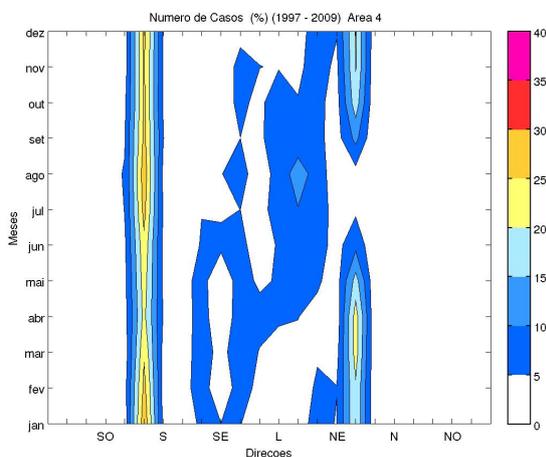
Quando a ASAS se desloca mais para o norte no inverno, os campos de vento são mais comuns de leste nesta região, gerando campos de onda de L (180° a 195°), com ocorrências entre 5 e 10 % no outono, inverno e primavera, com máximo nos meses de julho e agosto representando de 10 a 15 % dos casos. A porcentagem de casos da direção de SE (120°) se mantém contínua entre 5 a 10 % no primeiro semestre e a direção de SE (150°) começa a apresentar redução de casos no segundo semestre, quando comparado com a área 3. A banda sul continua a apresentar a direção de S (75°) com o maior número das ocorrências, variando de 20 a 25 % nos meses de março a junho, e de 25 a 30 % dos casos no restante do ano.



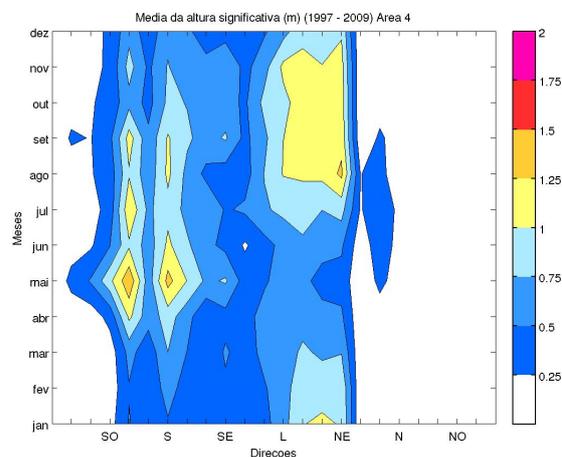
(a) Área 4



(c) Média do período de pico da área 4



(b) Número de casos da área 4



(d) Média da altura significativa da área 4

Figura 8.23 - Área 4, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Pela figura 8.23(c), observa-se que na banda nordeste, a direção de NE ( $240^\circ$ ) apresenta média de período de pico de 14 a 16 s durante a primavera e verão, com casos entre N ( $255^\circ$  e  $270^\circ$ ) apresentando média entre 6 e 12 s. A banda sudeste apresenta média de 6 a 12 s, com destaque para a direção de SE ( $150^\circ$ ) que variou entre 12 e 14 s no mês de maio. Na banda sul, a direção de S ( $75^\circ$ ) apresentou variação de 14 a 16 s durante o verão e outono, permanecendo entre 12 a 14 s nos meses de inverno e primavera. A direção de S ( $90^\circ$ ) variou de 10 e 12 s nos meses de maio a julho, e de 8 a 10 s nos demais meses.

Na figura 8.23(d), observa-se que a média de altura significativa entre as direções de L (180°) a NE (225°) variou entre 1,0 a 1,25 m durante os meses de inverno e primavera, chegando a 1,5 m no mês de agosto da direção de NE (225°). Na direção de NE (240°), entre maio e setembro, a média da altura significativa variou entre 0,25 a 0,5 m, ficando abaixo de 0,25 m no restante do ano. Na banda sudeste a média oscilou entre 0,25 a 0,75 m, com maiores médias entre SE (120° e 135°). Na banda sul, as direções de SO (60°) e S (90°) apresentaram médias que atingiram 1,5 m no mês de maio, mantendo valores entre 0,75 a 1,25 m durante o inverno e primavera.

Na área 4, observa-se pela figura 8.24 que os casos acima do P90 possuem distribuição de sistemas parecidos com a área 3. As direções da banda sul da área 4 aparecem com porcentagens um pouco menores que a área anterior, apresentando as maiores variações na direção de S (75°), de 30 a 50 % entre os meses de março a julho. Já na banda nordeste, as porcentagens aumentaram em relação à área 3, com a direção de NE (210°) representando de 10 a 30 % dos casos no verão, 10 a 20 % na primavera, e variações abaixo de 10 % no outono e inverno.

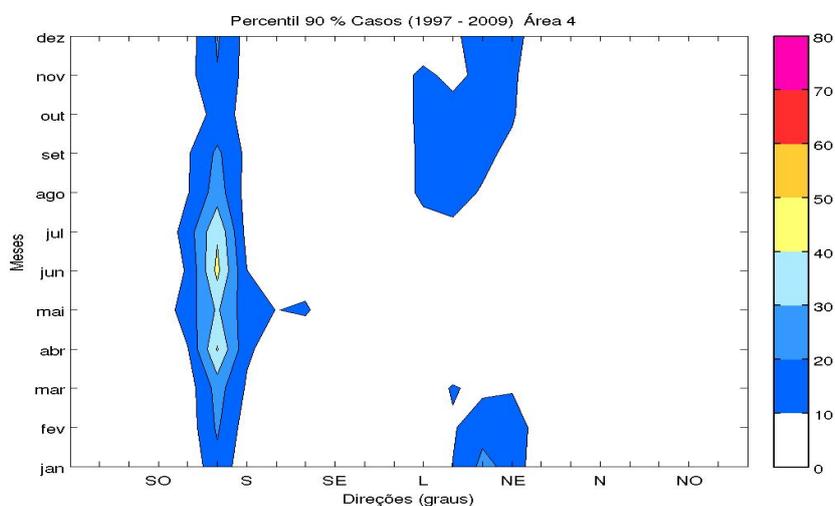
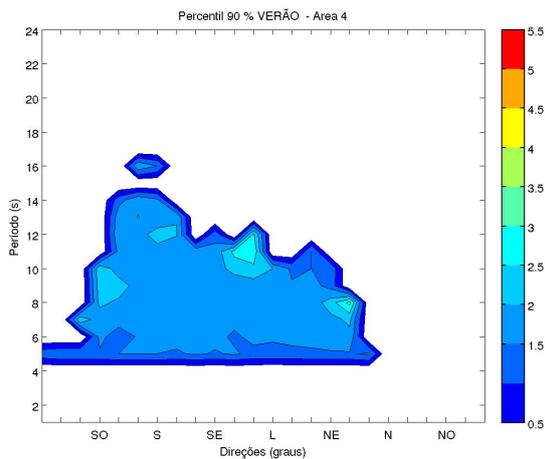


Figura 8.24 - Número de casos acima do Percentil 90 %

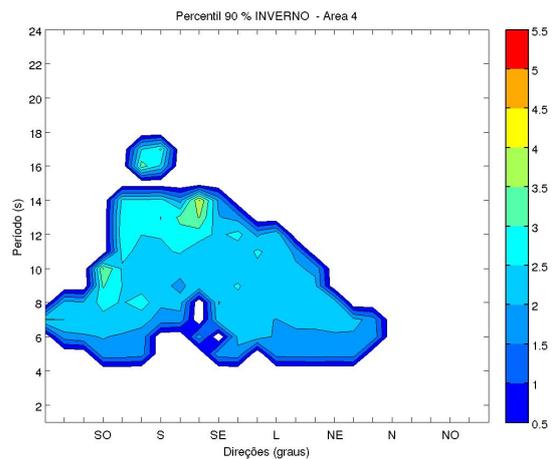
Os valores de altura significativa acima do P90 variaram de acordo com as estações do ano, sendo considerados os sistemas maiores que 1,2 m no verão, 1,3 m no outono, 1,7 m no inverno e na primavera.

Observa-se pelas figuras 8.25(a), 8.25(b), 8.25(c), 8.25(d), que as maiores médias de

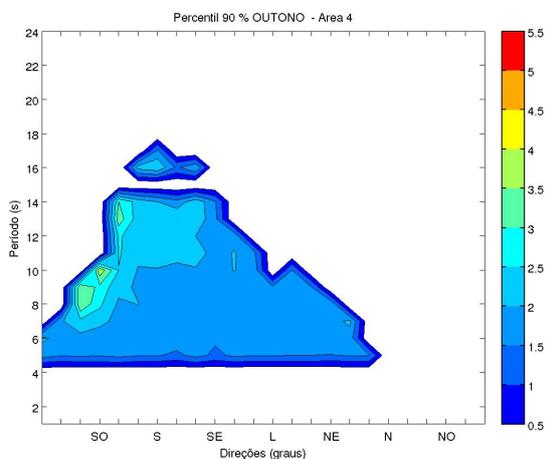
altura significativa acima do P90 ocorreram entre as direções de S ( $105^\circ$ ) e SE ( $135^\circ$ ), nos meses equivalentes ao inverno e primavera, de 2,5 a 4,0 m, entre os períodos de pico de 10 a 14 s. No outono e no verão esse grupo de direções não apresentam grandes valores de médias, destacando-se no outono as direções de SO ( $30^\circ$  a  $60^\circ$ ), com média de altura significativa de 2,5 a 4,0 m, entre os períodos de pico de 6 a 14 s.



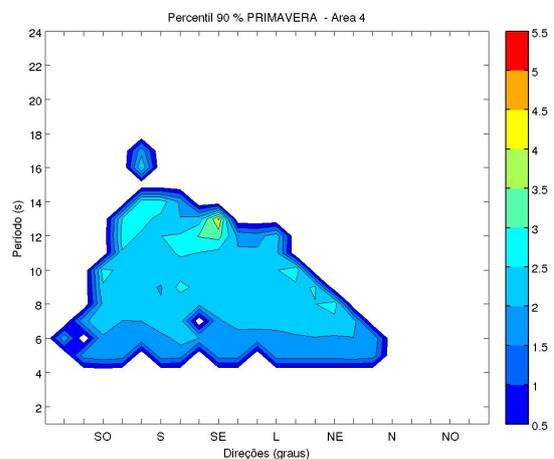
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.25 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 4

As direções da banda nordeste não apresentaram médias que se destacassem, apenas no verão, a direção de NE (240°) apresentou média de até 3,5 m entre o período de pico de 6 a 8 s e a direção de L (165°) com média de 2,5 a 3,0 m entre os períodos de pico de 10 a 12 s.

A presença de sistemas entre os períodos de pico de 16 a 18 s ocorreram em todas as estações, com maior média de altura significativa no inverno da direção de SO (60°), chegando até a 4,0 m e no outono, com sistemas variando entre SO (60°) e SE (120°), com média de até 2,5 m.

Os sistemas maiores que 2,2 m no verão, 2,8 m no outono, 2,9 m na primavera e 3,1 m no inverno foram os casos considerados acima do P99. Observa-se na figura 8.26, que estes sistemas representaram de 40 a 60 % dos casos somente da direção de S (75°), e na direção de SE (120°) nos meses de inverno representando de 10 a 30 % das ocorrências. A área 4 apresenta sistemas acima do P99 distribuídos ao longo da banda sudeste de forma descontínua, não ultrapassando valores acima de 30 % dos casos nos períodos em que aparecem. Já na banda nordeste, a direção de NE (225°) aparece representando de 10 a 20 % dos casos no verão, ficando abaixo de 10 % no restante do ano.

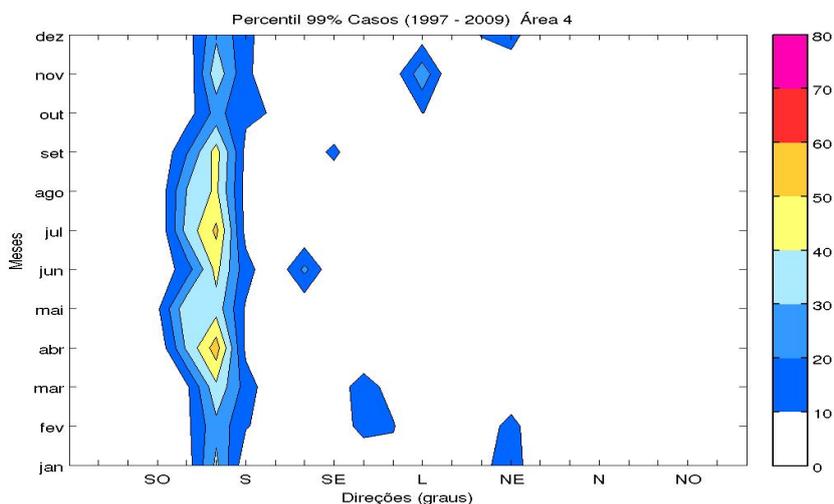


Figura 8.26 - Número de casos acima do Percentil 99 %

Observa-se pelas figuras 8.27(a), 8.27(b), 8.27(c), 8.27(d), que no outono, a direção de S (105°), entre os períodos de pico de 12 e 14 s, apresentou a maior média de

altura significativa acima do P99. No inverno, as direções de SO (60°) e SE (120°), entre os períodos de pico de 10 a 14 s foram os mais intensos. Durante os meses de primavera, as direções de SO (60°), S (75° e 90°) e entre as direções de S (105°) a SE (135°), se destacaram com os sistemas mais intensos e durante os meses de verão, a direção de L (165°) foi a que apresentou maior média.

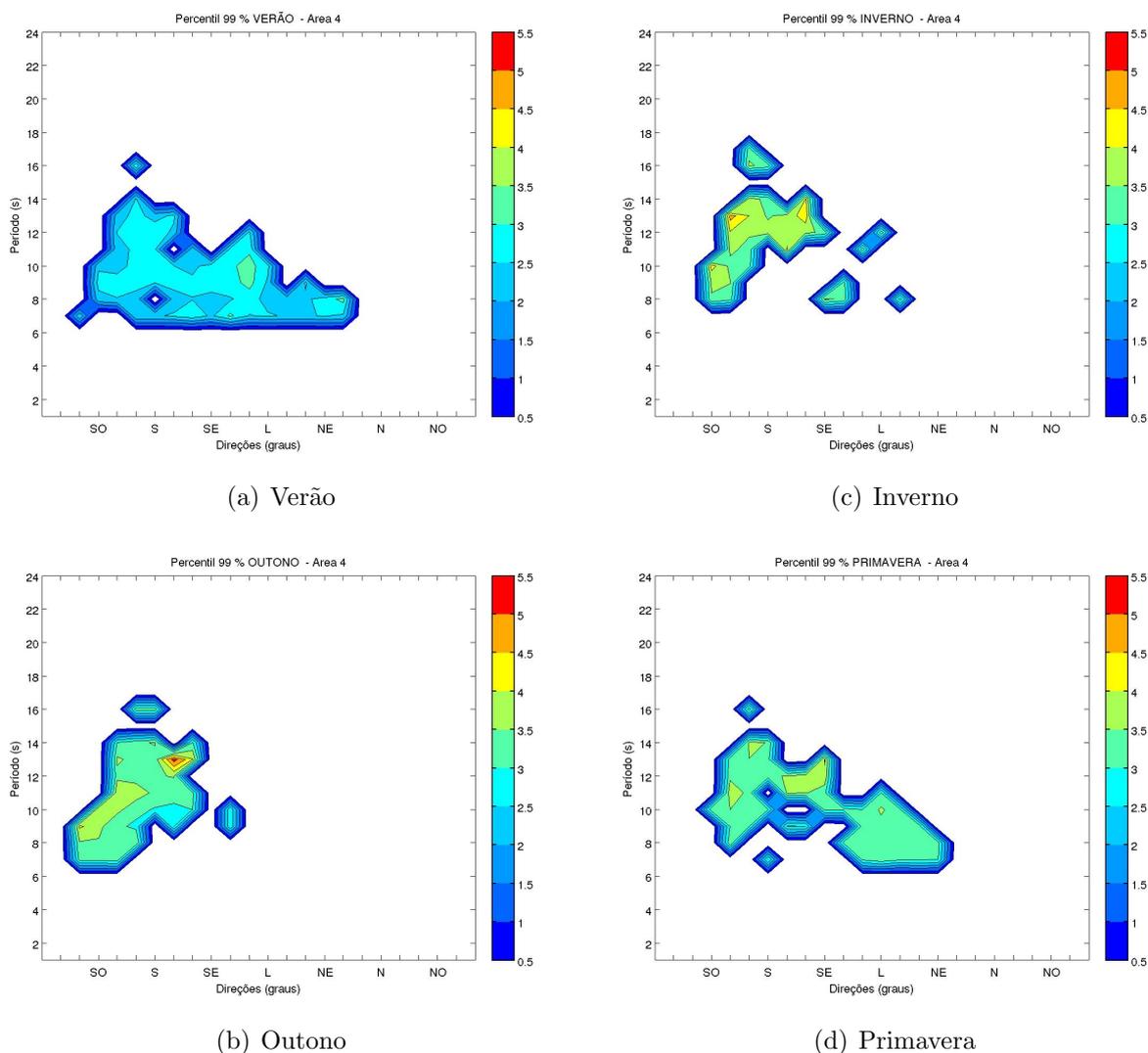


Figura 8.27 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 4

Como observado nas figuras 8.24 e 8.26, as maiores porcentagens de sistemas acima do P90 e P99 foram da direção de S (75°). Observa-se pela figura 8.28(b), que a maior parte da energia é proveniente dos sistemas de onda de sul, principalmente

da direção de S ( $75^\circ$ ), representando de 30 a 50 % da energia nos meses de outono e inverno, e de 20 a 30 % nos meses de primavera e verão.

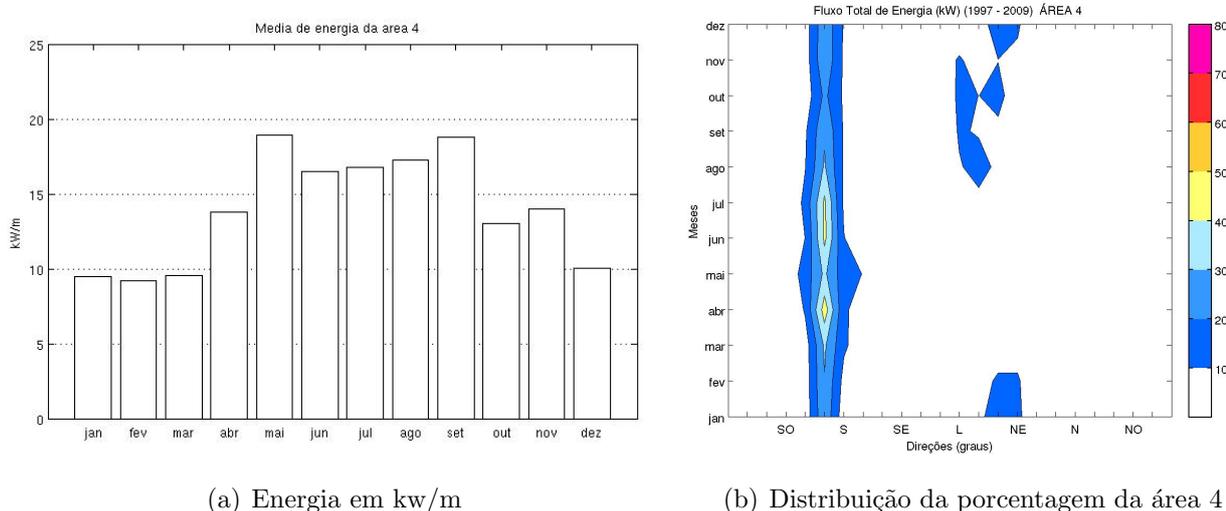


Figura 8.28 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 4

Observa-se pela figura 8.28(a), que as médias de energia apresentaram valores acima de 15 kW/m entre os meses de maio a setembro, com máximos em torno de 18 kW/m. Os demais meses apresentaram redução na média de energia, apresentando valores abaixo de 10 kW/m entre os meses de janeiro e março.

Comparados com a área 3, os sistemas de nordeste da área 4 apresentaram redução na porcentagem de energia entre as direções de L ( $195^\circ$ ) e NE ( $210^\circ$ ), variando entre 10 e 20 % nos meses de outubro a fevereiro. Nota-se que entre os meses de agosto e novembro, ocorre um aumento entre os sistemas das direções de L ( $165^\circ$  a  $195^\circ$ ), da mesma forma que foi observado pelas figuras 8.23(b) e 8.26, apresentando de 10 e 20 % da energia neste período do ano.

Observa-se pela figura 8.29, que os sistemas de onda das direções de sul representam as maiores médias. Na área 4, a média da direção de S ( $75^\circ$ ) é maior apresentada até o momento, com valor de 32,9 kW/m. As demais direções de sul e nordeste apresentaram média em torno de 10 kW/m. A média anual da área 4 é de 13,9 kW/m.

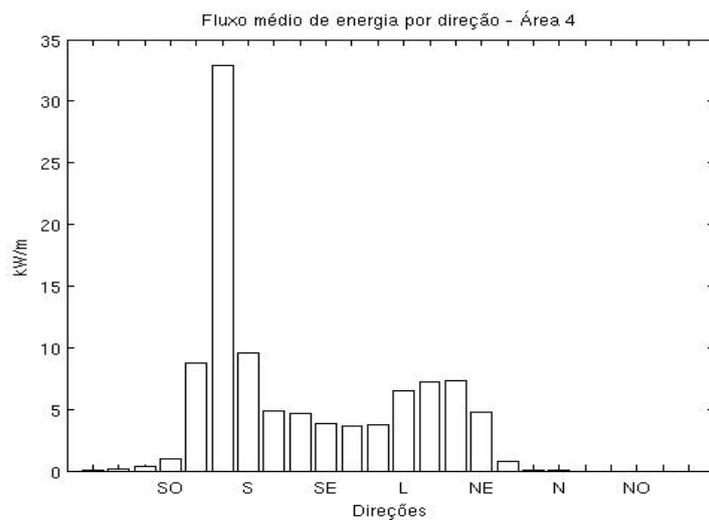
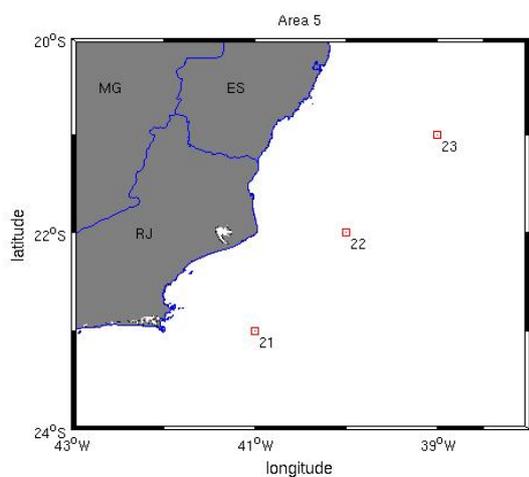


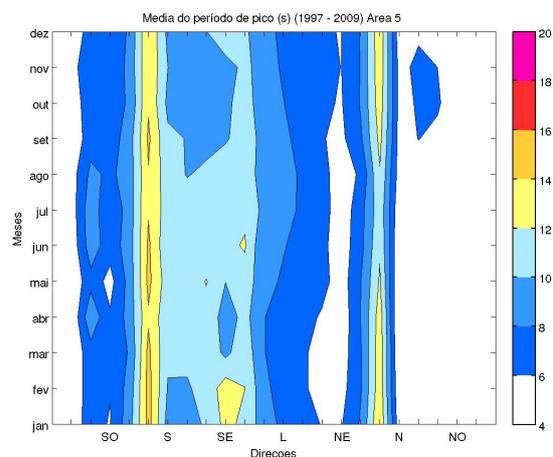
Figura 8.29 - Média de fluxo de energia por direção - Área 4

## 8.5 Área 5

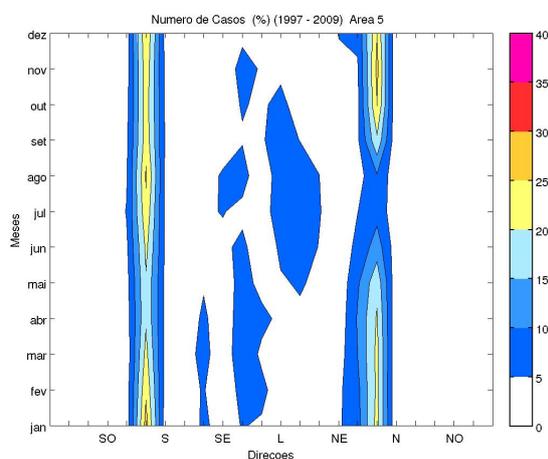
Observa-se pela figura 8.30(a), que a área 5 compreende a região entre o norte do litoral fluminense e centro-sul do litoral do Espírito Santo. Essa região apresenta a banda nordeste bem definida, com direção de maior ocorrência passando de NE (240°) na área 4 para N (255°). Pela figura 8.30(b), nota-se que na direção N (255°) as porcentagens dos casos variam entre 5 e 15 % no inverno, aumentando para uma variação de 10 a 30 % no restante do ano, principalmente na primavera e no verão. Na banda sudeste também é possível observar a redução de casos nas direções de L (180° e 195°) durante o inverno, variando de 5 a 10 %, ficando abaixo de 5 % das ocorrências no restante do ano. A direção de SE (120°) da área 5 também apresenta redução de casos em relação à área 4, apresentando variação de 5 a 10 %, enquanto que a direção de SE (135°) mantém a mesma variação que a área anterior durante o primeiro semestre, reduzindo a porcentagem de casos no segundo semestre. A banda sul da área 5 apresenta porcentagens um pouco menores que a banda sul da área 4, com a direção de S (75°) ainda apresentando a maioria dos casos, variando entre 15 e 20 % no outono e entre 20 a 30 % no restante do ano, principalmente nos meses de janeiro e agosto.



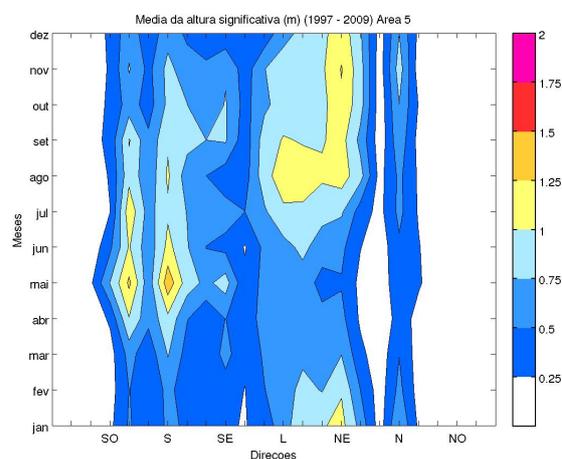
(a) Área 5



(c) Média do período de pico da área 5



(b) Número de casos da área 5



(d) Média da altura significativa da área 5

Figura 8.30 - Área 5, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Na figura 8.30(c) observa-se que a média do período de pico na banda nordeste, analisada pela direção N (255°) oscila de 10 s no inverno a 14 s no verão. A direção de N (285°) apresenta uma variação de 6 a 8 s durante os meses setembro a novembro, ficando abaixo dos 6 s no restante do ano.

Na banda sudeste, a direção de SE (150°) apresenta média de 12 a 14 s nos meses de fevereiro e junho, apresentando médias entre 12 e 14 s no restante do ano. A direção de SE (135°) apresentou média de período de pico entre 12 e 14 s nos meses de janeiro e fevereiro, e no restante do ano variando entre 8 e 12 s. Na banda sul

observa-se valores de média de período de pico entre 14 e 16 s na direção de S ( $75^\circ$ ), durante quase todo o verão e outono, e também nos meses de agosto a setembro. A direção de SO ( $30^\circ$ ) apresenta uma variação entre 8 e 10 s no mês de abril e no inverno.

Observa-se na figura 8.30(d), que a direção de NE ( $225^\circ$ ), cuja frequência de casos foi menor que 5 % durante todo o ano, e média de período de pico menor que 6 s, foi a que apresentou a maior média de altura significativa da banda nordeste, de 0,5 a 1,25 m, com casos de até 1,5 m de média nos meses de novembro. A direção de N ( $270^\circ$ ) também apresentou menos que 5 % de casos e média de períodos de pico menor que 6 s, porém apresentou média de altura significativa entre 0,5 m no verão e inverno até 1,0 m na primavera. Na banda sudeste, as direções L ( $180^\circ$  e  $195^\circ$ ) apresentaram média de 1,0 a 1,25 m em julho, agosto e setembro, com valores entre 0,5 a 1,0 m nos demais meses. A direção de SE ( $120^\circ$ ) apresentou em maio, setembro e outubro, variação de 0,75 a 1,0 m, e de 0,25 a 0,75 m no restante do ano. A banda sul, nas direções de SO ( $60^\circ$ ) e S ( $90^\circ$ ), as médias de altura significativa chegaram a 1,5 m no mês de maio, mantendo valores entre 0,75 a 1,25 m durante o inverno e primavera, e de 0,5 a 0,75 m na primavera e verão.

Observa-se pela figura 8.31, que os casos acima do P90 continuam principalmente de S ( $75^\circ$ ), porém com frequência de ocorrências um pouco menor que nas áreas anteriores. Os sistemas considerados acima do P90 na área 5 possuem altura significativa maior que 1,2 m no verão e outono, 1,6 no inverno e 1,5 m na primavera. No outono e inverno, a direção de S ( $75^\circ$ ) representa de 20 a 40 % dos casos, enquanto que as direções da banda sudeste e nordeste representam menos que 10 % dos casos. Na primavera e no verão, os casos da banda sul diminuem para 10 a 20 %; mesmos valores apresentados para a banda sudeste, entre as direções de L ( $180^\circ$  e  $195^\circ$ ) e para a banda nordeste, entre as direções de NE ( $210^\circ$ ) a N ( $255^\circ$ ).

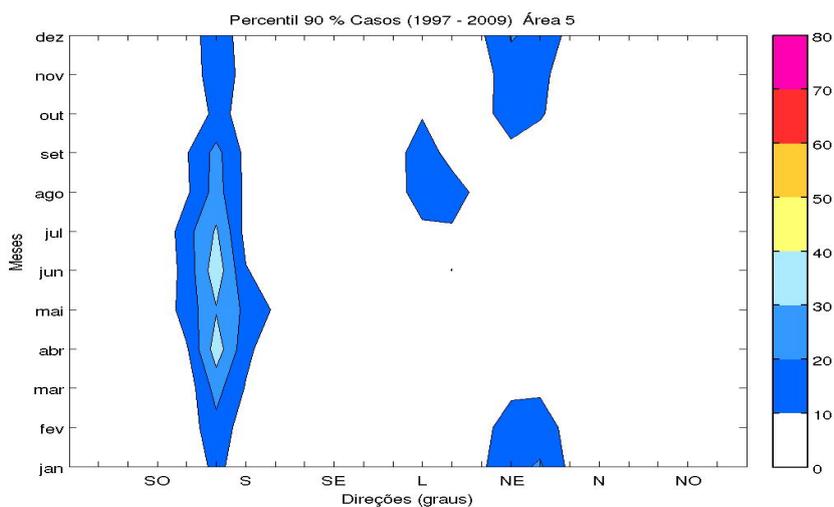


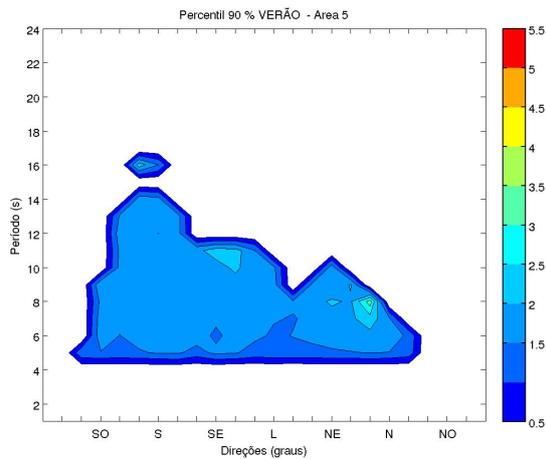
Figura 8.31 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Observa-se pelas figuras 8.32(a), 8.32(b), 8.32(c), 8.32(d), que as maiores médias de altura significativa ocorreram durante os meses de outono, principalmente entre as direções SO ( $30^\circ$  a  $60^\circ$ ), nos períodos de pico de 8 a 10 s. A média varia de 2,5 a 4,0 m, enquanto que no inverno e verão, as maiores médias variam de 2,5 a 3,5 m entre S ( $90^\circ$ ) e SE ( $120^\circ$ ), com período de pico entre 12 a 14 s e na direção N ( $255^\circ$ ) entre 6 a 8 s. Na primavera, esses grupos também se destacam, porém com média entre 2,5 e 3,0 m.

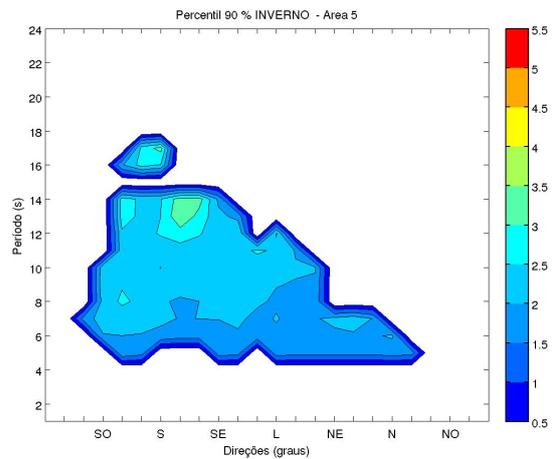
Os sistemas entre os períodos de pico de 16 a 18 s também estão presentes na área 5, variando entre SO ( $60^\circ$ ) e S ( $90^\circ$ ) nos meses de inverno, primavera e verão e entre SO ( $60^\circ$ ) e SE ( $120^\circ$ ) no outono. As maiores médias desses sistemas ocorreram nos meses de inverno, chegando a 3,5 m.

Para os casos acima do P99, observa-se pela figura 8.33, que os sistemas mais intensos da área 5 possuem distribuição parecida com a área 4. Os valores de altura significativa que separam os sistemas acima do P99 variam de acordo com as estações, sendo que no verão são para sistemas acima de 2,1 m, 2,6 m no outono e primavera e 2,9 m no inverno.

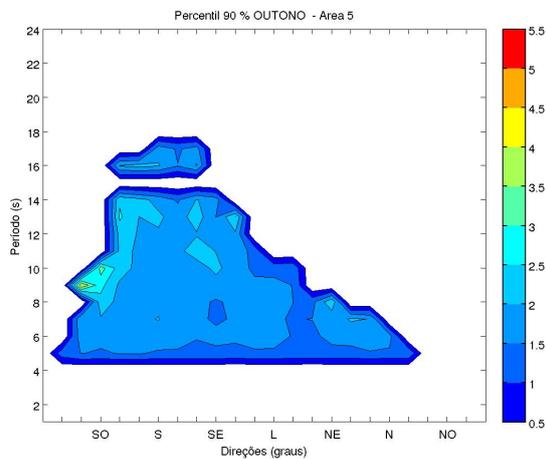
Apesar de apresentar distribuição parecida com a área anterior, a área 5 apresenta uma porcentagem menor na banda sul, com a direção de S ( $75^\circ$ ) variando de 30 a 60 % dos casos no outono e entre 30 e 50 % no inverno. Na banda sudeste, as



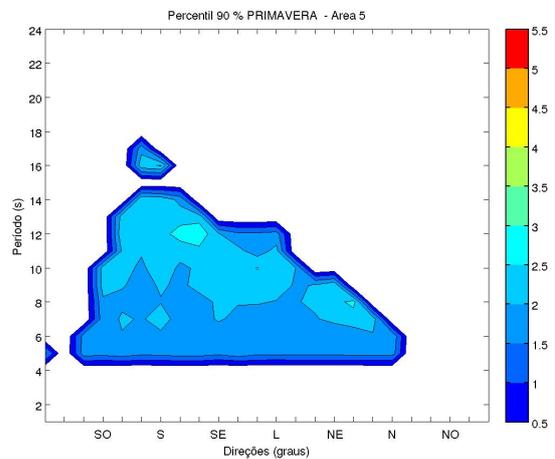
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.32 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 5

frequências de ocorrência são semelhantes com a da área 4. Na banda nordeste, as ocorrências variam de 10 a 20 % apenas no verão, permanecendo com valores abaixo de 10 % nos demais meses do ano.

Observa-se pelas figuras 8.34(a), 8.34(b), 8.34(c), 8.34(d), que as maiores média de altura significativa acima do P99 encontram-se na direção de S ( $105^\circ$ ), tanto no outono, com média de até 5,0 m, quanto no inverno, com média de até 4,5 m. Esses sistemas ocorreram entre 12 e 14 s de período de pico. Já na primavera, esta direção apresentou média de até 4,0 m entre os períodos de pico de 10 a 12 s.

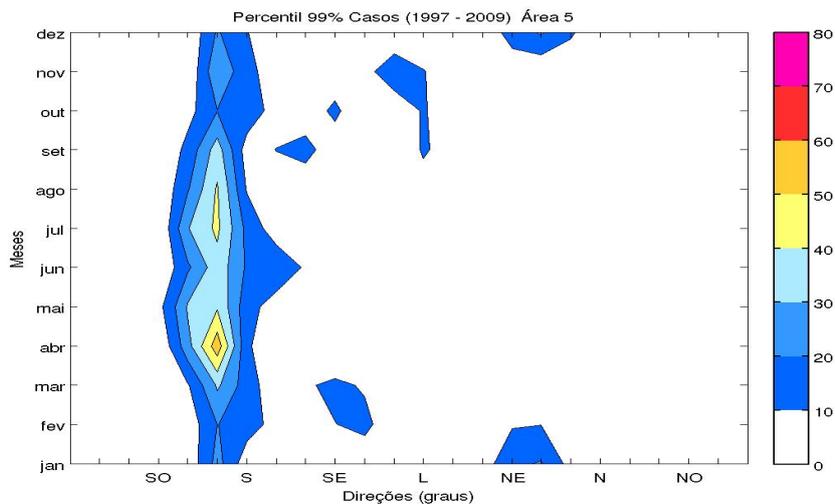


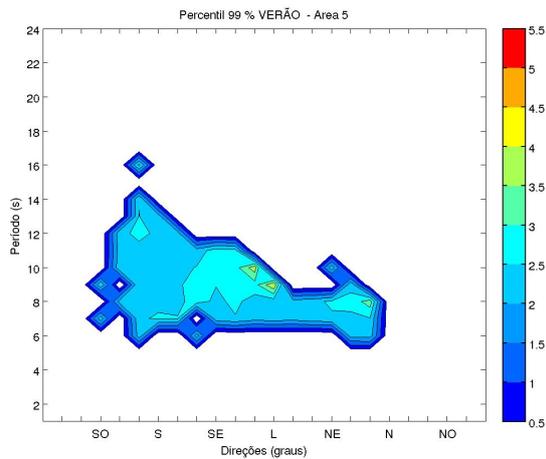
Figura 8.33 - Número de casos acima do Percentil 99 %

No verão, os sistemas mais intensos com média de até 4,0 m ocorreram na banda sudeste, entre as direções de SE (150°) e L (180°), com períodos de pico de 8 a 12 s. Em todos os meses, a banda nordeste representada principalmente pela direção de NE (240°), apresentou sistemas com média de até 3,5 m entre os períodos de pico de 6 a 10 s.

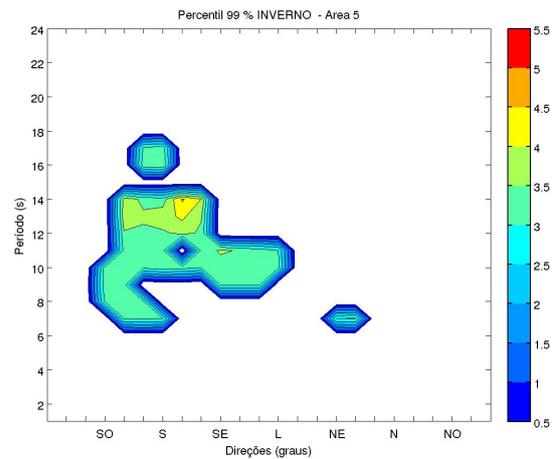
O grupo de sistemas entre os períodos de pico de 16 a 18 s ocorreram durante todos os meses, com maior média de altura significativa no inverno, de até 4,0 m, ocorrendo nas direções da banda sul, principalmente entre SO (60°) e S (90°).

Na área 5, a média de energia apresentou valores um pouco menores em comparação com a área 4. Apresentou as mesmas características, ou seja, valores acima de 15 kW/m entre os meses de maio a setembro e redução nos valores referentes aos meses de verão, apresentando média abaixo de 10 kW/m entre janeiro e março, como pode-se observar pela figura 8.35(a). Os sistemas de sul na área 5 assim como nas áreas anteriores apresentaram as maiores porcentagens de energia (ver figura 8.35(b)), principalmente da direção de S (75°), representando de 30 a 40 % da energia nos meses de outono e inverno e de 20 a 30 % nos meses de primavera e verão.

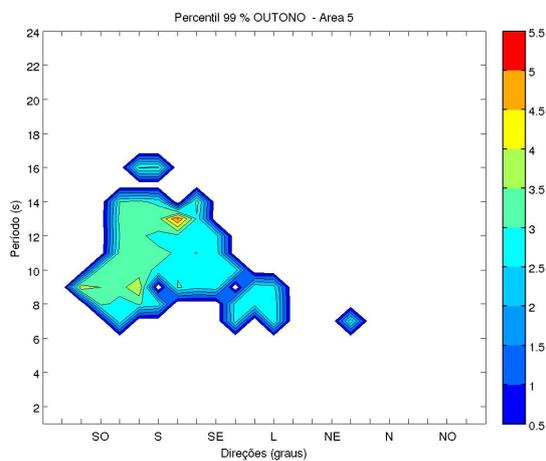
Nota-se que entre os meses de agosto a outubro, ocorre um agrupamento de energia entre as direções de L (165° a 195°) da mesma forma que na área 4 representando de 10 a 20 % da energia deste período do ano. A energia proveniente das direções



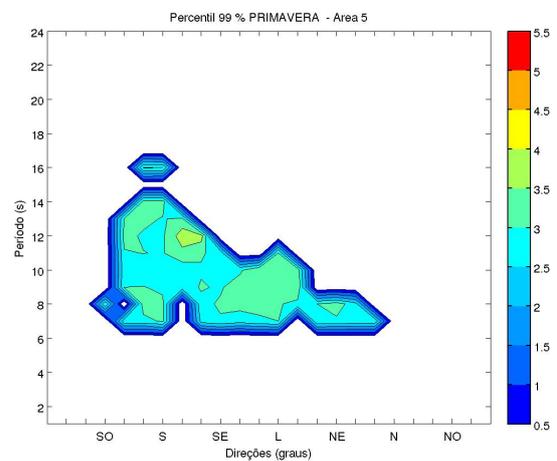
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.34 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 5

de nordeste também representa 10 a 20 % da energia para os meses de verão, entre as direções de NE (210° a 240°).

Observa-se pela figura 8.36, que os sistemas de onda das direções de sul representam as maiores médias da área 5, com maior média da direção de S (75°), 30 kW/m. Em comparação com a área 4, a área 5 apresenta um aumento na média do fluxo de energia nas direções de NE (240°) e N (255° e 270°), e redução nas demais direções de nordeste. A média anual da área 5 é de 13,1 kW/m.

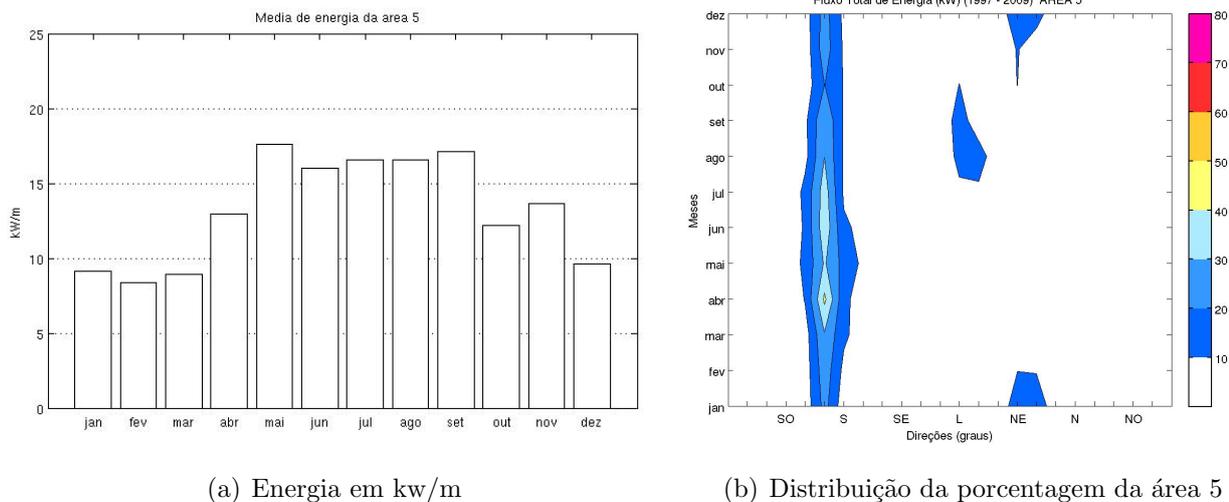


Figura 8.35 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 5

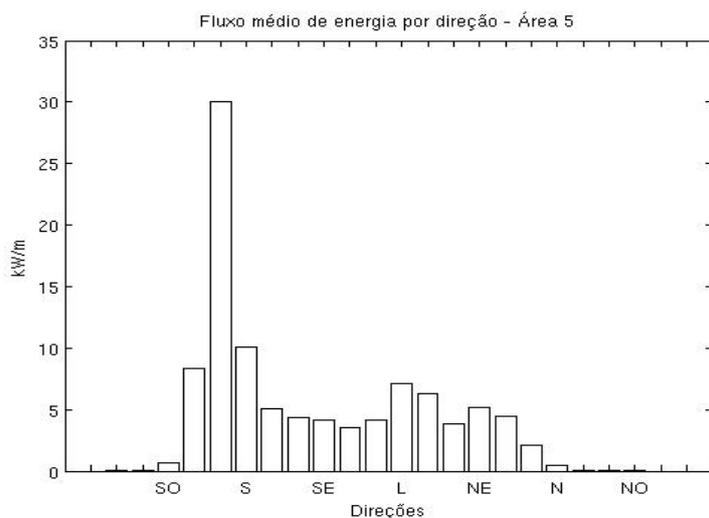


Figura 8.36 - Média de fluxo de energia por direção - Área 5

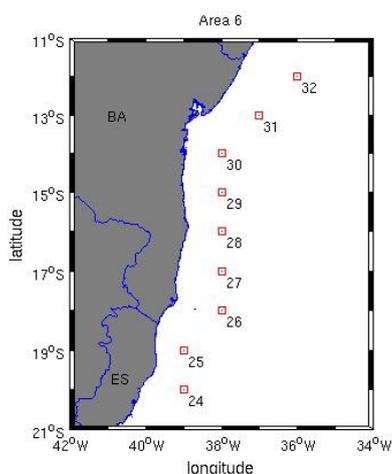
## 8.6 Área 6

Na figura 8.37(a) observa-se a área 6, que compreende a região costeira centro-norte do Espírito Santo, a região costeira da Bahia, até a região costeira sul do Estado de Sergipe. Observa-se pela figura 8.37(b), que esta área apresenta as bandas nordeste, sudeste e sul bem definidas, sendo que na banda nordeste, a direção que apresentou o maior número de ocorrência foi a N ( $255^\circ$ ), variando de 10 a 15 % no inverno e de

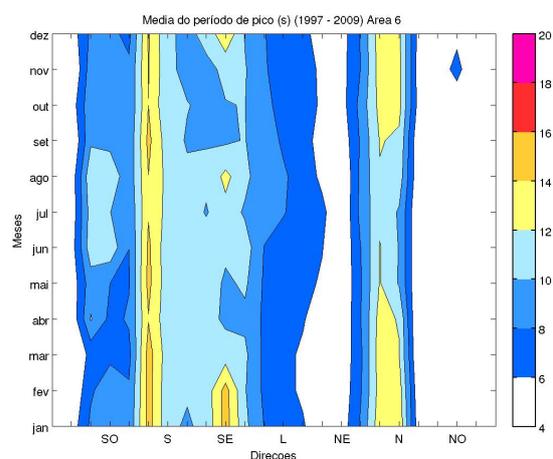
15 a 30 % dos casos na primavera, verão e outono.

A banda sudeste apresenta uma variação contínua ao longo do ano (acima de 5 %) não apresentada pelas regiões anteriores. Os campos de vento da ASAS atuam de nordeste principalmente na primavera e verão, e de leste, mais comuns no outono e principalmente no inverno. São responsáveis pela geração de campos de onda que variam de 5 a 10 % entre as direções de SE (150°) a L (180°). Esta última direção, representa nos meses de julho e agosto até 15 % dos casos desta área. A direção de SE (135°) também apresentou um aumento no número de casos nos meses de julho e agosto, quando comparado com a área 5, representando de 5 a 10 % dos casos, e permanecendo abaixo de 5 % no restante do ano.

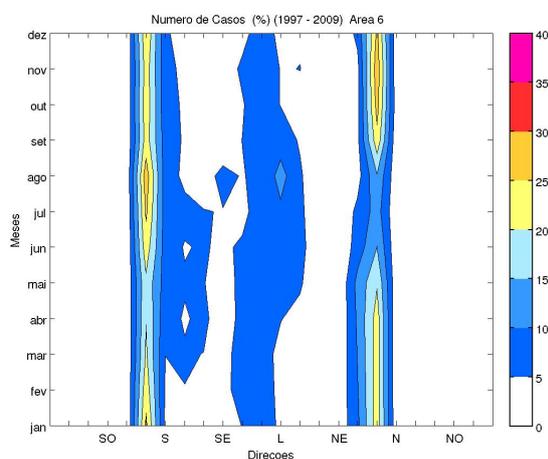
A banda sul, com a direção de S (75°) ainda sendo a de maior número de caso desta banda, varia de 15 % dos casos no outono, chegando a 30 % no inverno. Houve também ocorrência de casos entre S (90°) e SE (120°), com 5 a 10 % de frequência durante os meses de fevereiro a julho, o que não ocorreu nas demais áreas, onde os casos não haviam passado dos 5 % de frequência.



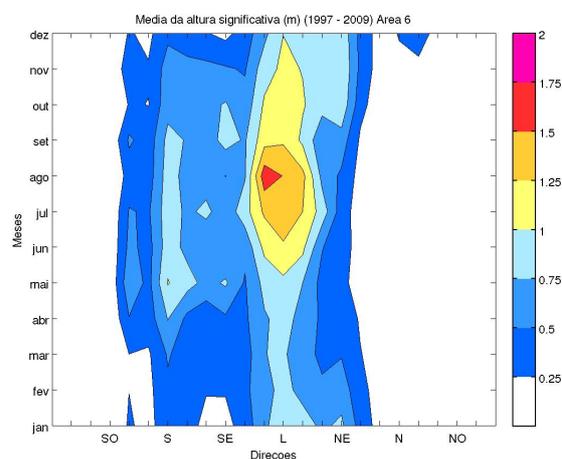
(a) Área 6



(c) Média do período de pico da área



(b) Número de casos da área 6



(d) Média da altura significativa da área

Figura 8.37 - Área 6, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Observa-se pela figura 8.37(c), que a banda nordeste apresentou média do período de pico de 12 a 14 s entre as direções de N ( $255^\circ$  e  $270^\circ$ ) durante toda a primavera, verão e outono. No mês de novembro, a direção de NO ( $315^\circ$ ) apresentou média entre 6 e 8 s, permanecendo abaixo dos 6 s no restante do ano. Na banda sudeste, a média do período de pico variou entre 6 e 12 s. A direção de SE ( $135^\circ$ ) se destacou nesta banda de ocorrências, com valores entre 12 a 16 s no verão, e no mês de agosto de 12 a 14 s, variando de 8 a 12 s no outono, inverno e primavera. Na banda sul, a direção de S ( $75^\circ$ ) variou entre 14 e 16 s durante quase todo o ano, reduzindo para uma média entre 12 e 14 s no inverno. Entre as direções de SO ( $30^\circ$  a  $45^\circ$ ), de maio

a setembro, a média variou entre 10 e 12 s, e entre 6 e 10 s nos demais meses.

Pela figura 8.37(d) observa-se a média da altura significativa. A direção de NE (225°) apresenta variação de 0,25 a 1,0 m durante a primavera e começo de verão, e entre 0,25 e 0,75 m no restante do ano. A média da altura significativa na banda sudeste variou entre 1,0 a 1,75 m no inverno e primavera das direções de L (165° a 195°), com os maiores valores no mês de agosto e entre 0,75 e 1,0 m no restante do ano. Já na banda sul, a média da altura significativa diminui em relação a área 5, com a direção de S (90°) variando de 0,75 a 1,0 m nos meses de abril a setembro, chegando a 1,25 m no mês de maio. A direção de SO (60°) variou entre 0,5 e 0,75 m entre abril e julho, apresentando média abaixo de 0,5 m nos demais meses.

Os sistemas acima do P90 da área 6 apresentam valores acima de 1,0 m no verão, 1,1 m no outono, 1,7 m no inverno e 1,4 m na primavera. Para os sistemas acima do P90, observa-se pela figura 8.38, que a área 6 apresenta uma distribuição de direções bem diferentes das áreas anteriores. Nesta área a influência de campos de onda de leste é bem nítida. Os campos de vento da ASAS são responsáveis pela formação de 20 a 40 % dos casos de onda de L (180°), principalmente durante os meses de inverno e primavera.

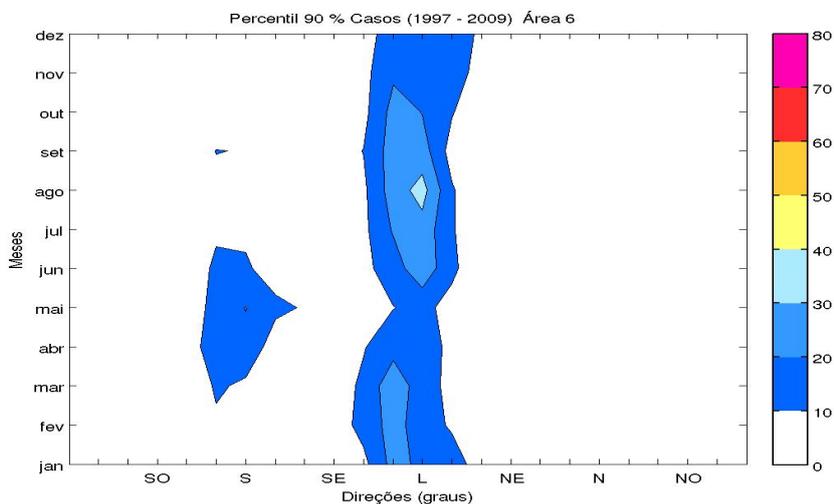
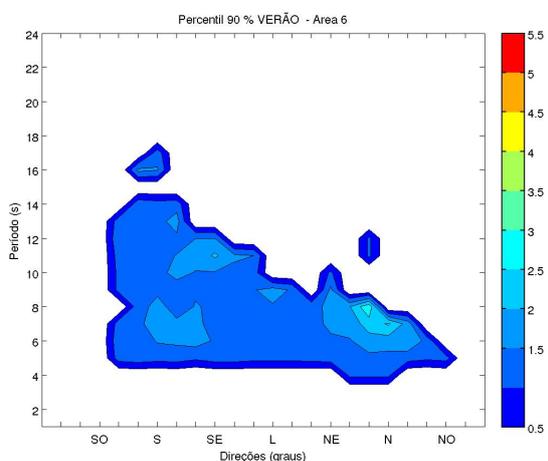


Figura 8.38 - Número de casos acima do Percentil 90 %

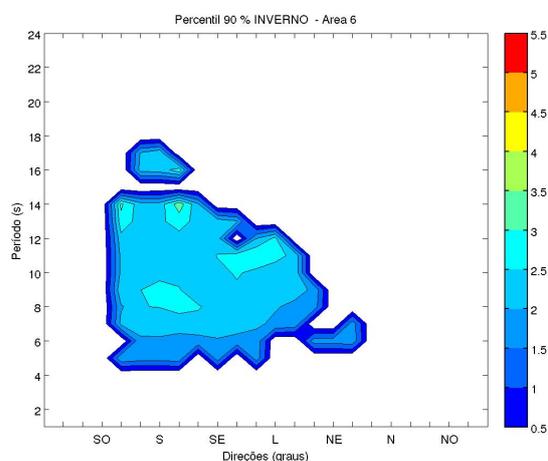
No verão e começo de outono as maiores frequências de sistemas são da direção SE (165°), de 20 a 30 %. Entre os meses de março a maio, quando as direções de SE

(165°) e L (180°) apresentam redução de casos, nota-se que aparecem sistemas mais intensos da banda sul, nas direções S (75° e 105°), com uma variação de 10 a 20 % dos casos.

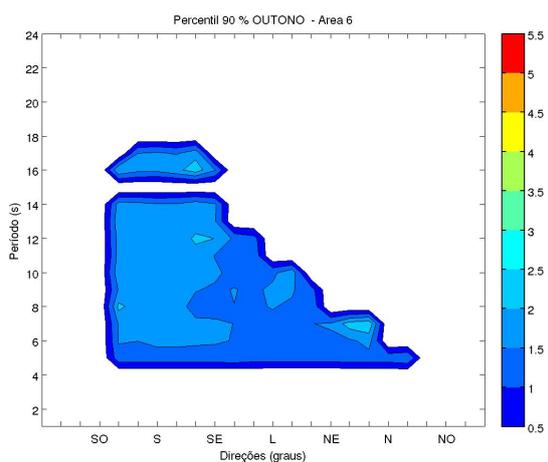
Observa-se pelas figuras 8.39(a), 8.39(b), 8.39(c), 8.39(d), que a maior média de altura significativa acima do P90 ocorreu entre as direções de S (60° e 105°) durante os meses de inverno, entre os períodos de pico de 12 e 14 s, com valores de até 3,5 m. Nota-se também que entre as direções de S (75° a 105°), com período de pico entre 6 a 10 s, e entre SE (135°) e L (180°) com período de pico entre 10 a 12 s, a média chegou a 3,0 m.



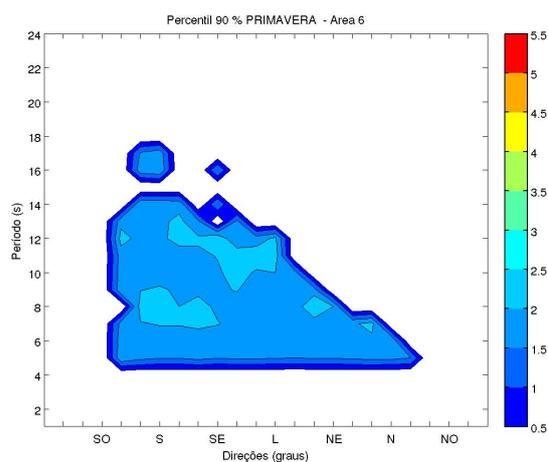
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.39 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 6

No verão, o destaque foi para a direção de N (255°), que obteve uma média de até 3,0 m entre os períodos de pico de 6 a 8 s, apresentando também sistemas entre os períodos de pico de 10 a 12 s. No outono e na primavera, os sistemas que mais se destacam são aqueles entre os períodos de pico de 16 a 18 s, que variaram de SO (60°) a SE (135°) com média de até 2,0 m. No verão e no inverno, estes sistemas também ocorreram, variando de SO (60°) a S (105°) apresentando maiores médias no inverno, chegando a 3,0 m.

Os sistemas acima do P99 da área 6 também apresentam uma distribuição de casos bem diferente das áreas anteriores. Observa-se pela figura 8.40, que as direções da banda sudeste apresentam porcentagens bem mais elevadas, representando 10 a 40 % dos casos entre os meses de maio a novembro. Entre as direções de S (75° a 105°), os sistemas também representam de 10 a 40 % dos casos, principalmente no mês de abril, quando os sistemas da banda sudeste apresentam redução de frequência para menos que 10 %. Na banda nordeste, entre os meses de dezembro e janeiro, as direções de NE (240°) a N (255°) apresentaram de 10 a 20 % dos casos, ficando abaixo dos 10 % no restante do ano.

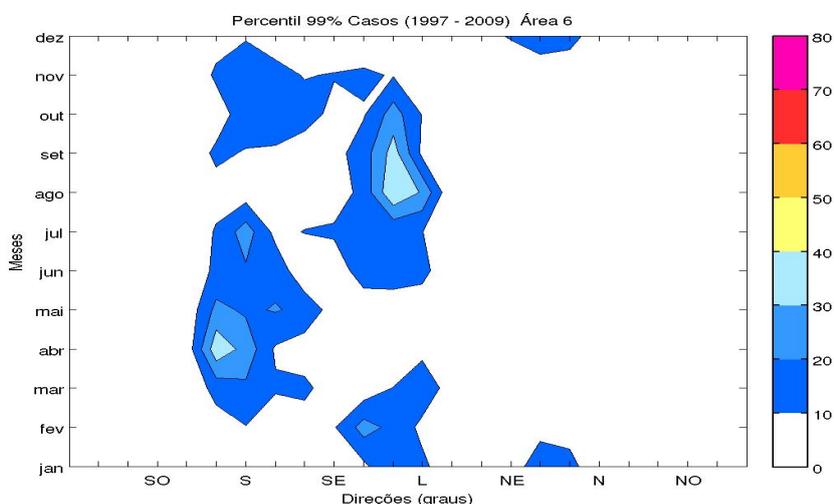
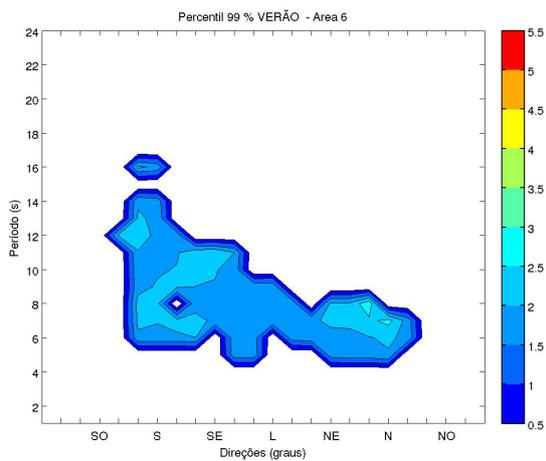
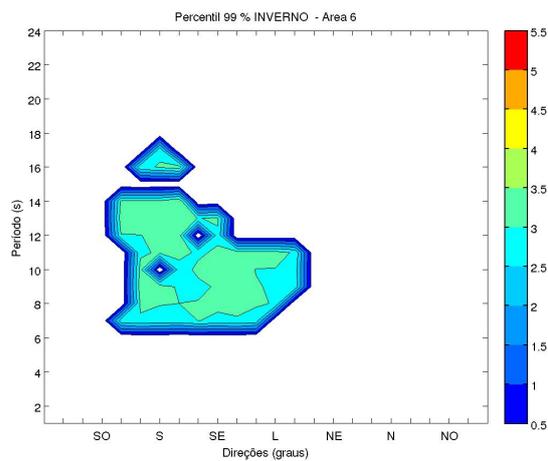


Figura 8.40 - Número de casos acima do Percentil 99 %

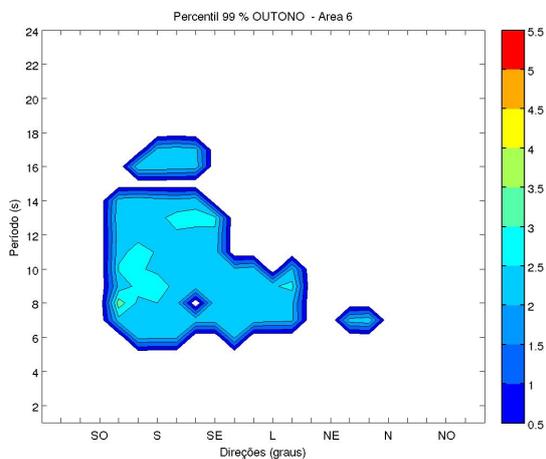
Para os sistemas acima do P99, foram considerados os casos maiores que 1,7 m no verão, 2,0 m no outono, 4,7 m no inverno e 4,3 m na primavera. Observa-se pelas figuras 8.41(a), 8.41(b), 8.41(c), 8.41(d), que a maior média, de até 4,0 m, foi da direção de SE (135°) durante os meses de primavera, entre os períodos de pico de 10 a 12 s. Os meses de inverno apresentaram uma média de altura significativa acima do P99 de até 3,5 m entre as direções de SO (60°) a SO (180°).



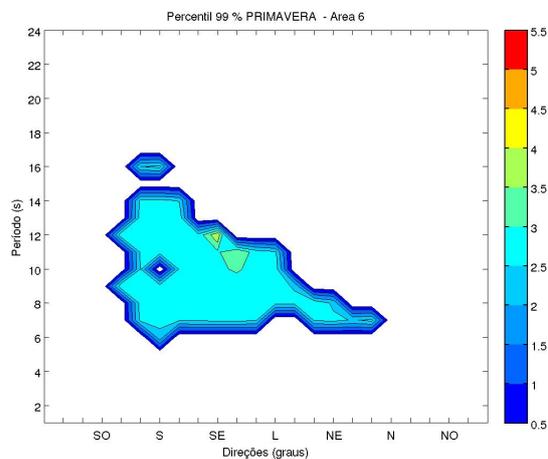
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono

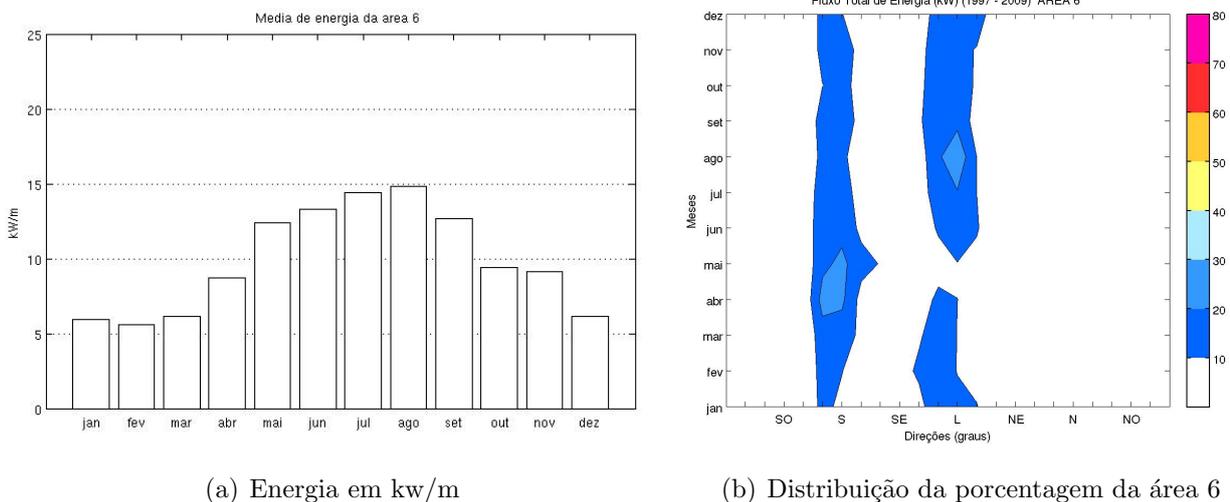


(d) Primavera

Figura 8.41 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 6

No outono, o destaque foi para as direções de SO (60°) a S (90°) entre os períodos de pico de 6 a 12 s, e para as direções de S (105°) a SE (135°) entre os períodos de pico de 12 a 14 s. No verão, as maiores médias de até 3,0 m ocorreram entre as direções de N (255° e 270°), entre os períodos de pico de 6 a 8 s. Para os sistemas entre 16 e 18 s, os valores acima do P99 ocorreram entre SO (60°) e S (105°) no verão e na primavera, e entre SO (60°) e SE (120°), com maiores médias encontradas no inverno, de até 3,5 m.

Na área 6 observa-se pela figura 8.42(a), que os valores de média mensal de energia são mais elevados entre os meses de maio a setembro, variando entre 10 e 15 kW/m, apresentando valores abaixo de 10 kW/m nos demais meses.



(a) Energia em kW/m

(b) Distribuição da porcentagem da área 6

Figura 8.42 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 6

Pode-se observar pela figura 8.42(b), que a distribuição da porcentagem da energia na área 6 é compartilhada entre as direções das bandas sul e sudeste, representando de 10 a 20 % da energia durante praticamente todo o ano. As exceções estão nos meses de outono para a banda sul e nos meses de inverno na banda sudeste, onde a porcentagem de energia pode chegar até 30 %.

Observa-se pela figura 8.43 que a distribuição de média de fluxo de energia pelas direções da área 6 é muito diferente das áreas anteriores. As direções de S (75° e 90°) continuam com médias altas, em torno de 15 kW/m, porém compartilhando médias parecidas com as direções de L (165° e 180°). A média das direções de nordeste e norte aparecem reduzidas em relação às áreas anteriores. A média anual da área 6 é de 9,8 kW/m.

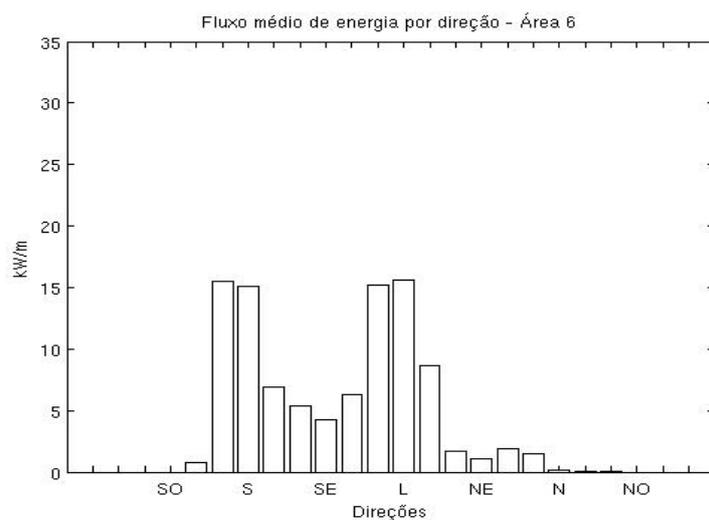
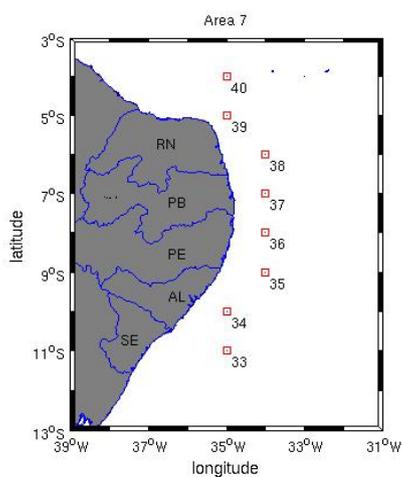


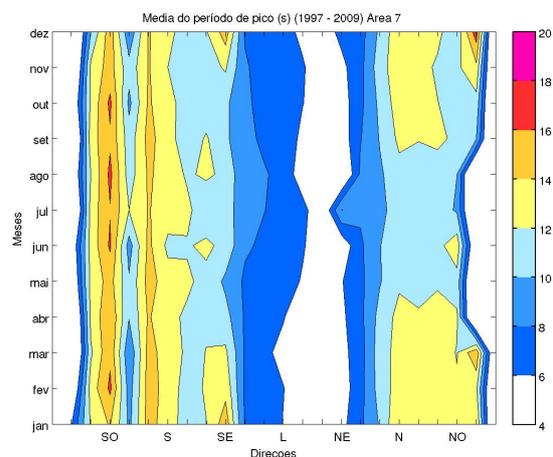
Figura 8.43 - Média de fluxo de energia por direção - Área 6

## 8.7 Área 7

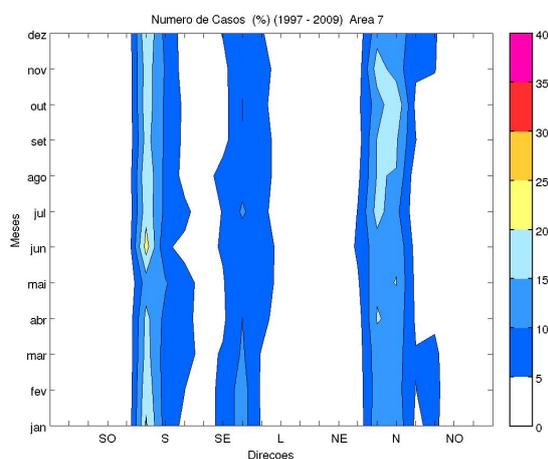
A área 7 (figura 8.44(a)), abrange desde a região costeira norte de Sergipe até a região leste da costa do Rio Grande do Norte. Observa-se pela figura 8.44(b), que nesta área o padrão das direções na banda nordeste é diferenciado em relação às áreas 5 e 6, apresentando campos de onda mais frequentes entre NE (240°) e N (285°), com 5 a 20 % dos casos, principalmente no inverno e na primavera. Na banda sudeste, a direção mais frequente foi a de SE (150°), variando de 5 a 15 % das ocorrências, com a maior parte dos casos nos meses de janeiro a abril e também em julho.



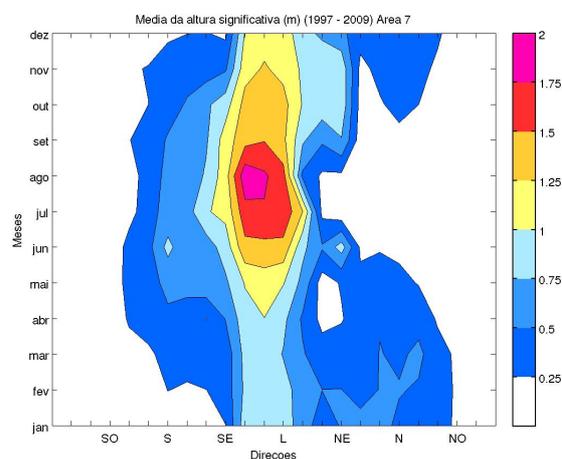
(a) Área 7



(c) Média do período de pico da área 7



(b) Número de casos da área 7



(d) Média da altura significativa da área 7

Figura 8.44 - Área 7, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

A banda sul, com maior número de casos em S ( $75^\circ$ ), representa 15 a 20 % das ocorrências durante praticamente o ano todo, com máximo de casos no mês de junho, apresentando de 20 a 25 % dos sistemas. Com relação às áreas anteriores, as bandas sul e nordeste da área 7 apresentaram porcentagem de casos menores, enquanto que a banda sudeste da área 7 manteve as mesmas porcentagens das áreas anteriores.

Pela figura 8.44(c), observa-se que a média do período de pico foi mais alta nas direções pertencentes à banda sul, com a direção de SO ( $45^\circ$ ) apresentando uma

variação acima de 14 s durante todo o ano, chegando a intervalos de 16 a 18 s nos meses de fevereiro, junho, agosto e outubro. A direção de S ( $75^\circ$ ) variou o ano todo entre média de 14 a 16 s e a direção de S ( $90^\circ$ ) entre 12 e 14 s. A média dos períodos de pico na banda nordeste varia de 6 a 14 s, apresentando no mês de dezembro média entre 16 e 18 s da direção de NO ( $330^\circ$ ). Já na banda sudeste, a direção de SE ( $135^\circ$ ) apresentou valores de média de período de pico entre 10 e 16 s e a direção de L ( $165^\circ$ ), uma variação de 6 a 8 s durante todo o ano.

Apesar de apresentar uma das menores média de período de pico, a direção de L ( $165^\circ$ ), cujos campos de vento formadores são de leste, mostraram ser intensos ao longo de todo ano, principalmente no inverno e na primavera, gerando uma média de altura significativa de 0,75 a 2,0 m, como observa-se na figura 8.44(d). As médias elevadas de período de pico das direções de SO ( $45^\circ$ ) e NO ( $330^\circ$ ), mostraram que estes sistemas que chegaram na área 7 foram formadas em outra localidade, porém chegando com uma média de altura significativa menor que 0,25 m. Na direção de S ( $75^\circ$ ) a média da altura significativa variou em até 0,5 m e em S ( $90^\circ$ ) de 0,25 a 0,5 m no outono e na primavera, chegando a 1,0 m no inverno.

Na área 6, os sistemas acima do P90 começam a ser mais frequentes nas direções da banda sudeste, com casos também na banda sul. Já na área 7, nota-se pela figura 8.45 a tendência dos sistemas mais intensos pertencerem às direções da banda sudeste. O maior número de casos na área 7 é representado pela direção de SE ( $150^\circ$ ), variando de 20 a 40 % dos casos nos meses de outono e de inverno, e de 30 a 50 % dos casos nos meses de primavera e verão. Os sistemas considerados acima do P90 possuem valores acima de 1,2 m no verão e no outono, 1,9 m no inverno e 1,5 m na primavera.

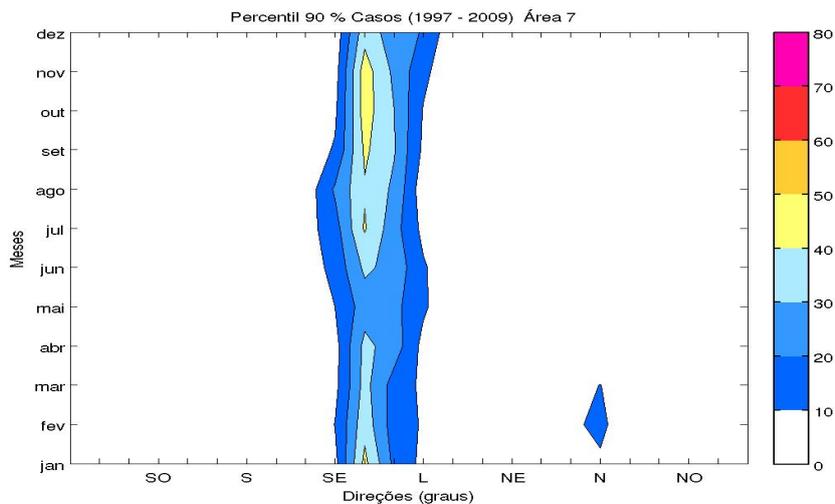


Figura 8.45 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Observa-se pelas figuras 8.46(a), 8.46(b), 8.46(c), 8.46(d), que os sistemas acima do P90 na área 7 são mais frequentes durante os meses de primavera, entre as direções de SE (135°) e L (165°), com média de altura significativa de até 3,5 m e período de pico entre 8 e 14 s. No inverno, as direções entre SO (60°) e SE (135°) apresentam até 3,0 m de média entre os períodos de 6 a 14 s.

Nota-se que em todos os meses, os sistemas entre períodos de pico de 16 a 18 s ocorreram nas direções da banda sul, entre SO (60°) e S (105°), com os maiores valores de médias de altura significativa nos meses de inverno.

Observa-se também, que entre as direções de N (270° a 285°) ocorreram sistemas tanto entre os períodos de 16 a 18 s como entre 18 e 20 s. Essas ocorrências não haviam aparecido nas áreas anteriores; são sistemas de ondas de norte, e muitos desses sistemas são provenientes de *swell* formados por ciclones no Atlântico Norte, como já observados por Innocentini et al. (2001).

Há também ocorrências de sistemas entre NE (240°) e NO (315°), que foram mais comuns nos meses de verão e outono, formando três grupos de sistemas que variam de 6 a 14 s, 16 a 18 s e 18 a 20 s, com média de até 2,0 m

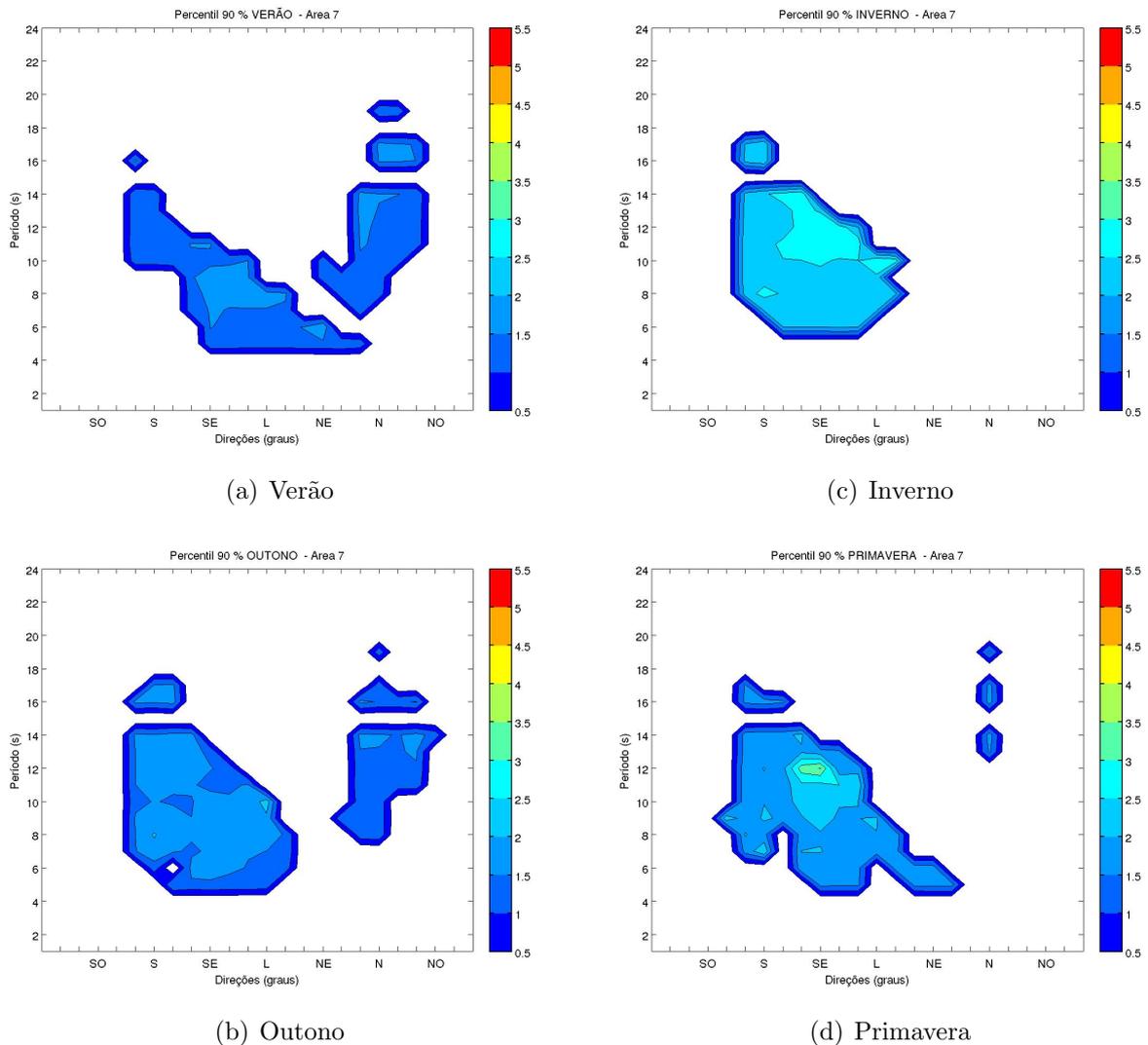


Figura 8.46 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 7

Os sistemas considerados acima do P99 apresentaram altura significativa maior que 1,7 m no verão, 1,8 m no outono, 2,7 m no inverno e 2,3 m na primavera. Observa-se pela figura 8.47, que esses sistemas ocorreram principalmente na banda sudeste, com a direção de SE ( $150^\circ$ ) representando de 40 a 50 % dos casos na primavera e verão, e entre 10 e 30 % no outono e inverno. Alguns casos acima do P99 (entre 10 e 20 %) podem ser observados em janeiro e fevereiro das direções de N ( $255^\circ$  e  $270^\circ$ ).

Observa-se pelas figuras 8.48(a), 8.48(b), 8.48(c), 8.48(d), que os sistemas mais intensos ocorrem no inverno, da direção de SE ( $150^\circ$ ) entre os períodos de pico de 10 a 12 s. Na primavera, sistemas de SE ( $120^\circ$  a  $135^\circ$ ) também aparecem com média

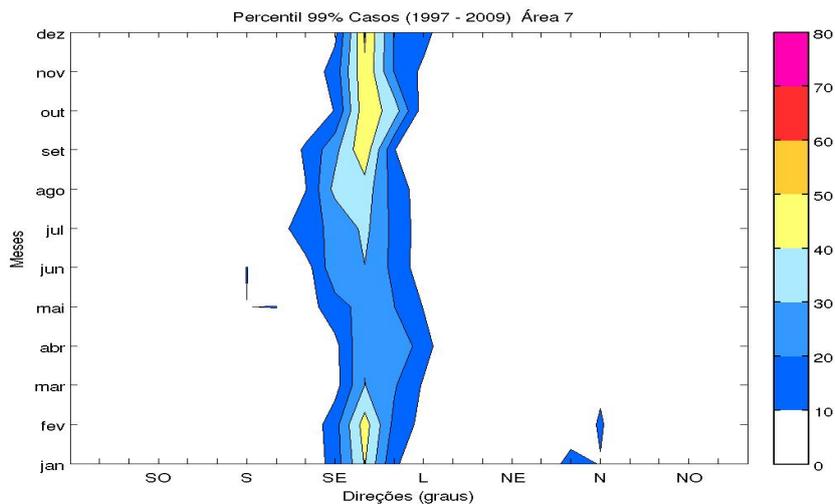


Figura 8.47 - Número de casos acima do Percentil 99 %

mais alta, entre períodos de pico de 10 a 12 s. Ainda na primavera, encontram-se sistemas de S ( $75^\circ$  a  $90^\circ$ ) variando de 6 a 14 s, mas com média abaixo das direções da banda sudeste.

No outono e no verão, as médias de altura significativa são menores do que as encontradas no inverno e na primavera, porém ocorrem sistemas que só aparecem nesta época do ano. Os sistemas de NE ( $240^\circ$ ) a NO ( $315^\circ$ ) variam de 10 a 20 s de período de pico no verão e de 10 a 18 s no outono. Os sistemas de sudeste variam entre 4 e 10 s no verão e 4 e 14 s no outono, e na banda sul, os sistemas que aparecem no verão são de S ( $75^\circ$ ) entre os períodos de pico de 16 e 18 s. Sistemas com períodos de pico entre 16 e 18 s também aparecem no outono (de SO ( $60^\circ$ ) a SE ( $120^\circ$ )) e no inverno (de S ( $90^\circ$ )), não aparecendo na primavera.

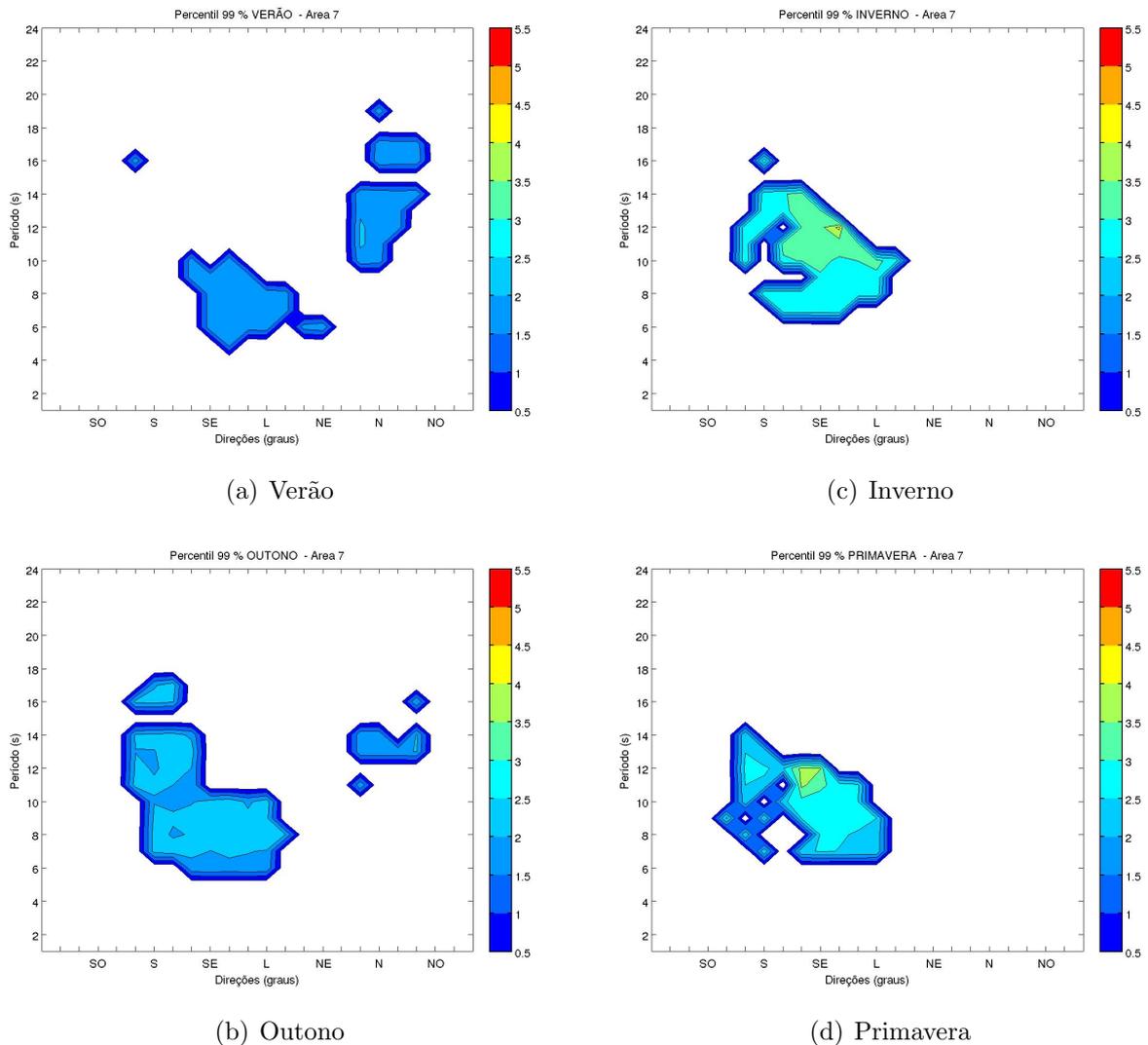
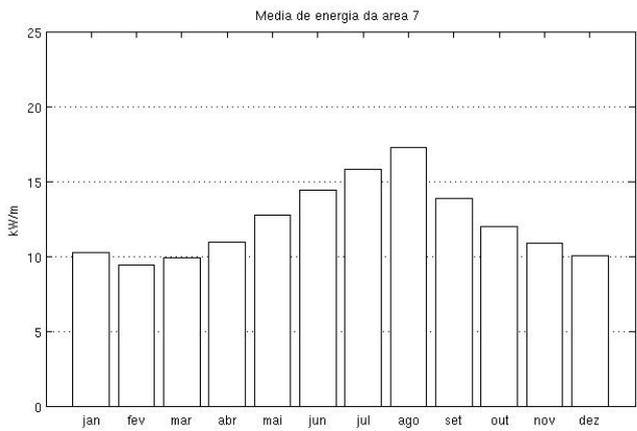


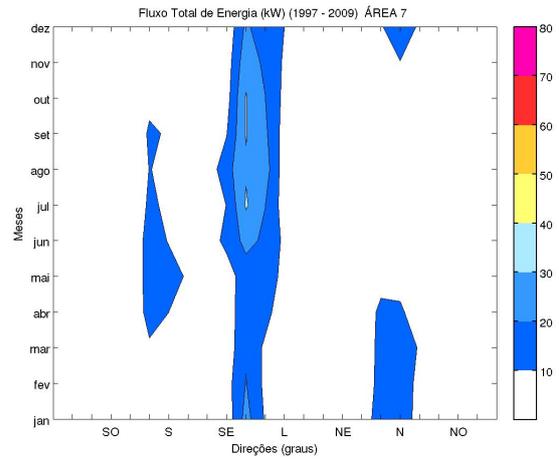
Figura 8.48 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 7

Observa-se pela figura 8.49(b) que a maior porcentagem de energia da área 7 vem da direção de SE ( $150^\circ$ ), variando de 10 a 20 % nos meses de outono e entre 20 a 40 % nos meses de inverno, primavera e verão. Os sistemas de sul e nordeste contribuem com 10 a 20 % da energia nos meses de outono e inverno entre as direções de SO ( $60^\circ$ ) a S ( $90^\circ$ ) e nos meses de verão e começo de outono entre as direções de NE ( $240^\circ$ ) e N ( $270^\circ$ ).

Na figura 8.49(a), pode-se observar que a área 7 apresenta a menor média de energia, de 9 kW/m no mês de fevereiro, com os valores aumentando até atingir o máximo de 17 kW/m em agosto, voltado a decrescer nos meses seguintes.



(a) Energia em kw/m



(b) Distribuição da porcentagem da área 7

Figura 8.49 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 7

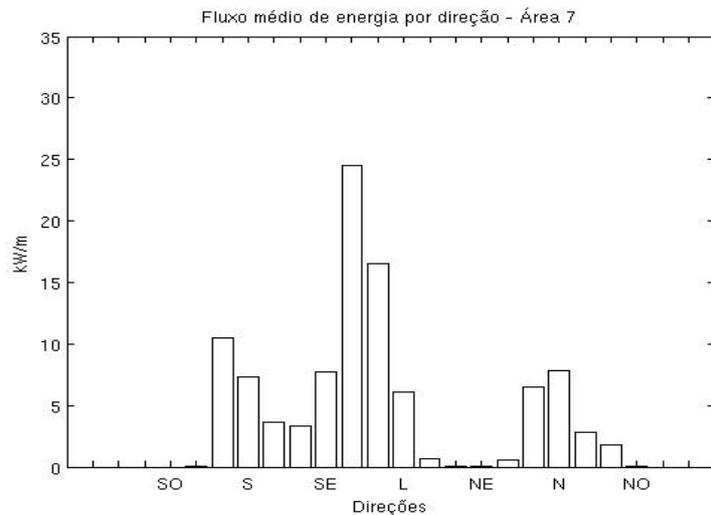


Figura 8.50 - Média de fluxo de energia por direção - Área 7

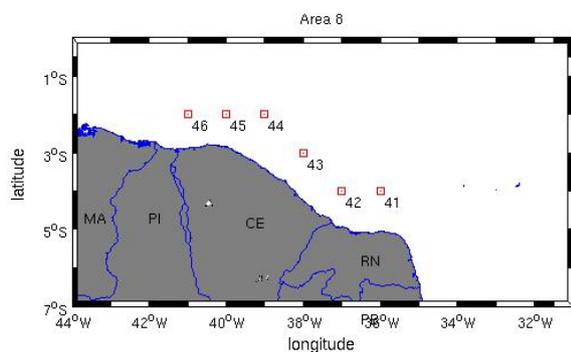
Na área 7, a direção L ( $150^\circ$ ) contribui com os valores mais altos de energia, seguida da direção L ( $165^\circ$ ), com valores de 24,5 e 16,5 kW/m, respectivamente. Observa-se pela figura 8.50, que as direções de S ( $75^\circ$  e  $90^\circ$ ) ainda apresentam média de destaque, juntamente com as direções de N ( $255^\circ$  e  $270^\circ$ ), com valores em torno de 10 kW/m. A média anual da área 7 é de 12,2 kW/m.

## 8.8 Área 8

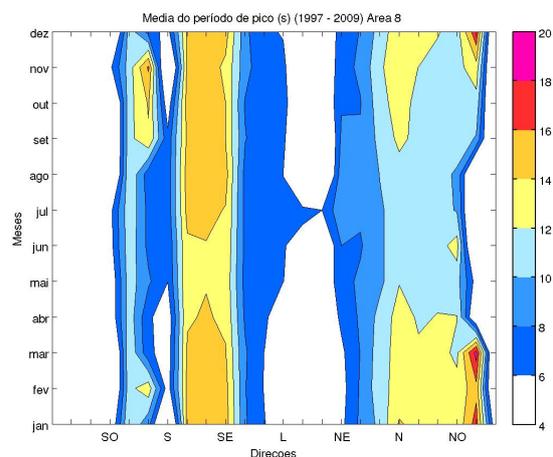
A área 8 (figura 8.51(a)), compreende a região costeira norte do Rio Grande do Norte, a região costeira do Ceará e do Piauí. A partir desta região as bandas de sistemas de ondas começam a se diferenciar das áreas anteriores devido à costa brasileira ser voltada para o hemisfério norte, e o regime de ventos prevalecer de leste a nordeste.

Observa-se pela figura 8.51(b) que a banda sul não apresenta sistemas ou estão abaixo de 5 % dos casos, e as ocorrências de maior incidência estão concentrados nas bandas sudeste e nordeste. A banda sudeste apresenta ocorrências de campos de onda mais frequentes entre SE (135°) e L (180°), com casos de SE (150°) representando até 20 % dos sistemas nos meses de junho a agosto e de L (165°) durante outono, inverno e primavera. A banda nordeste da área 8 concentra as maiores porcentagens de ocorrência entre NE (240°) e NO (315°), com a direção de N (255°) variando entre 15 e 20 % nos meses de março a junho e na primavera chegando a representar até 25 % das ocorrências.

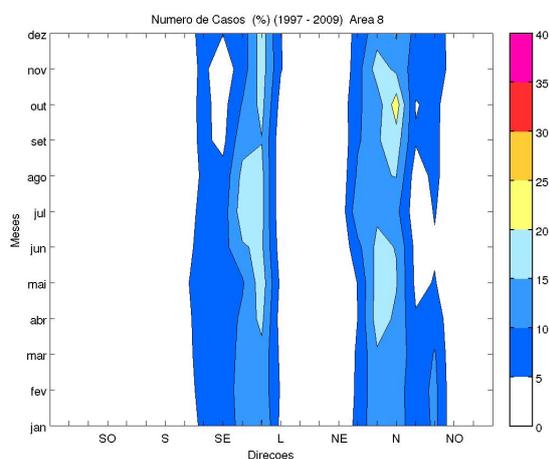
Na figura 8.51(c), observa-se que as médias de período de pico são mais intensas na banda nordeste. Durante o verão, a média varia de 14 a 20 s, com maiores valores no mês de março, principalmente da direção de NO (330°). As demais direções da banda nordeste possuem média entre 10 e 14 s, com os maiores valores na primavera e no verão. A banda sudeste apresenta média de período de pico de 12 a 16 s entre as direções de S (105°) a SE (135°), e entre 6 e 10 s nas direções de SE (135°) e L (165°). A banda sul também apresenta média de até 18 s no mês de novembro da direção de S (75°), que foram registradas pelos pontos com maior proximidade da área 7.



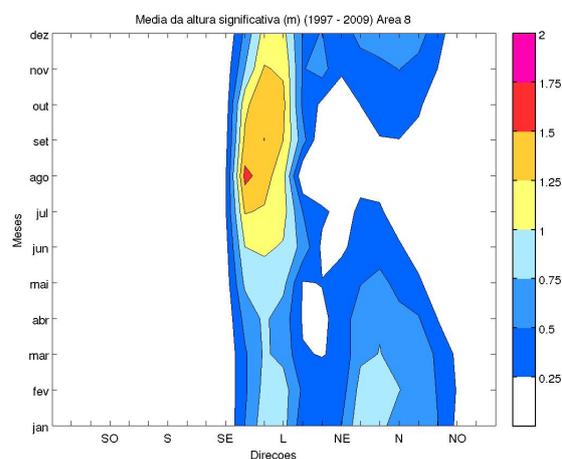
(a) Área 8



(c) Média do período de pico da área 8



(b) Número de casos da área 8



(d) Média da altura significativa da área 8

Figura 8.51 - Área 8, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Pela figura 8.51(d) nota-se que a média de altura significativa da banda nordeste possui valores de até 1,0 m durante o verão e o outono, reduzindo para menos que 0,25 m nos meses de julho e agosto. A banda sudeste apresenta as maiores médias de altura significativa da área 8. As direções de SE (150°), L (165° e 180°), variam de 0,5 a 1,0 m no primeiro semestre, e no segundo semestre, com os maiores valores (de até 1,75 m) ocorrendo no mês de agosto da direção de SE (150°).

Os casos acima de P90 na área 8 são representados por sistemas com altura significativa maiores que 1,3 no verão, 1,2 no outono e 1,6 no inverno e primavera.

Observa-se pela figura 8.52, que assim como na área 7, a banda sudeste da área 8 apresenta a maior parte dos casos acima do P90 entre as direções de SE (150°) e L (165°), variando de 50 a 70 % dos casos no inverno. Na banda nordeste, entre as direções NE (240°) e N (270°) representam de 10 a 40 % entre os meses de janeiro a maio, com as maiores porcentagens na direção de N (255°).

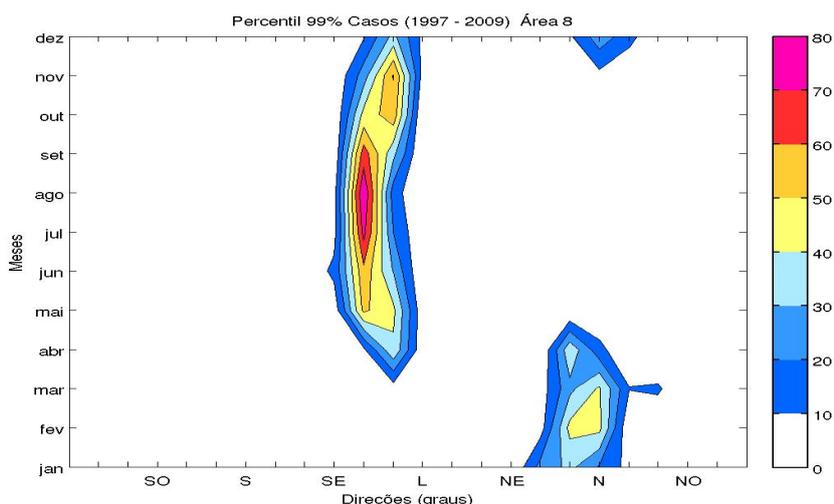
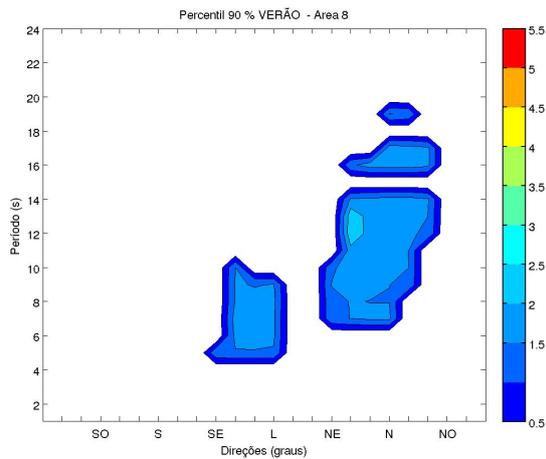


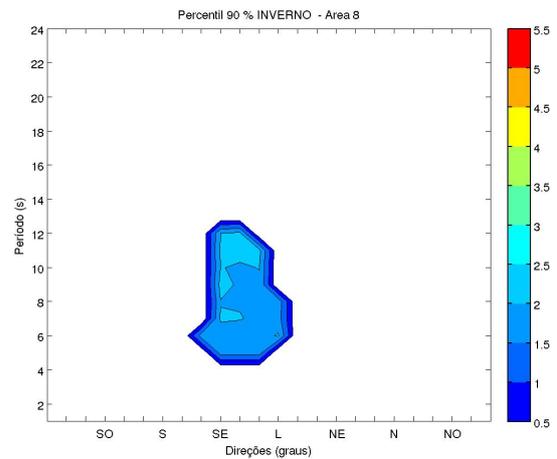
Figura 8.52 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Observa-se pelas figuras 8.53(a), 8.53(b), 8.53(c), 8.53(d) que não há muitos destaques nos valores de média de altura significativa de nenhuma direção em específico. Nota-se que os sistemas que ocorreram nos meses de inverno e primavera foram um pouco mais intensos, principalmente nas direções da banda sudeste. Os destaques estão nas direções entre NE (225°) e NO (315°), que não ocorrem no inverno e começam a aparecer durante os meses de primavera. No verão e no outono, casos dessas direções aparecem mais frequentemente, com destaque para os sistemas que ocorrem entre os períodos de pico de 16 a 18 s e entre 18 e 20 s, principalmente os campos de onda de norte (270°).

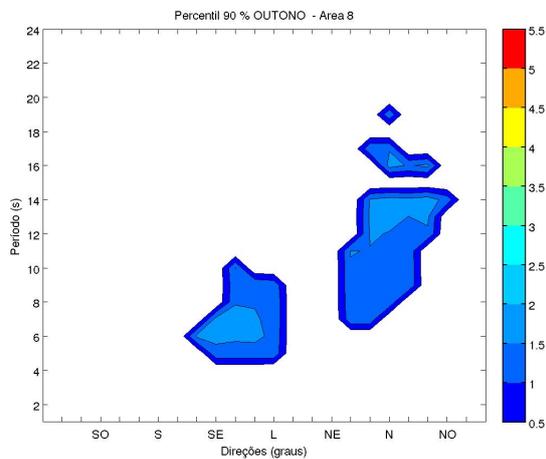
Os sistemas acima do P99 compreendem os casos que apresentaram altura significativa maiores que 1,9 m no verão, 1,7 no outono, 2,2 no inverno e na primavera. Observa-se pela figura 8.54, que estes casos foram mais frequentes da direção de SE (150°), variando de 60 a 80 % dos casos nos meses de inverno e representando menos que 10 % de janeiro a abril. Enquanto os sistemas da banda sudeste apresentam



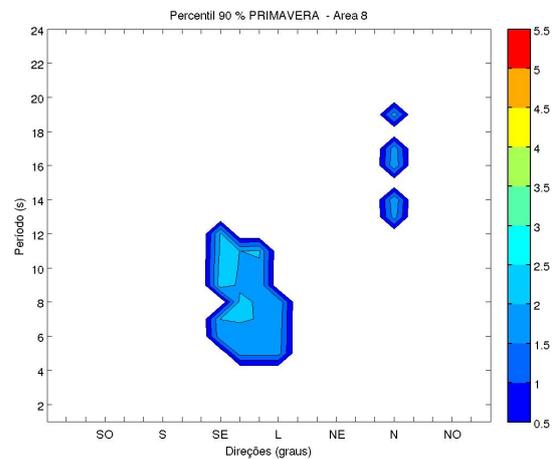
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.53 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 8

redução no número de casos, as direções da banda nordeste apresentam aumento, variando de 30 a 50 % principalmente da direção de N ( $255^\circ$ ) nos meses de verão e outono.

Observa-se pelas figuras 8.55(a), 8.55(b), 8.55(c), 8.55(d), que nos meses de inverno e primavera, os sistemas acima do P99 aparecem apenas nas direções da banda sudeste, entre as direções de SE ( $120^\circ$ ) a L ( $180^\circ$ ) e com período de pico de 6 a 14 s. Nota-se que nestes meses, as médias da altura significativa também são maiores, atingindo até 3,0 m.

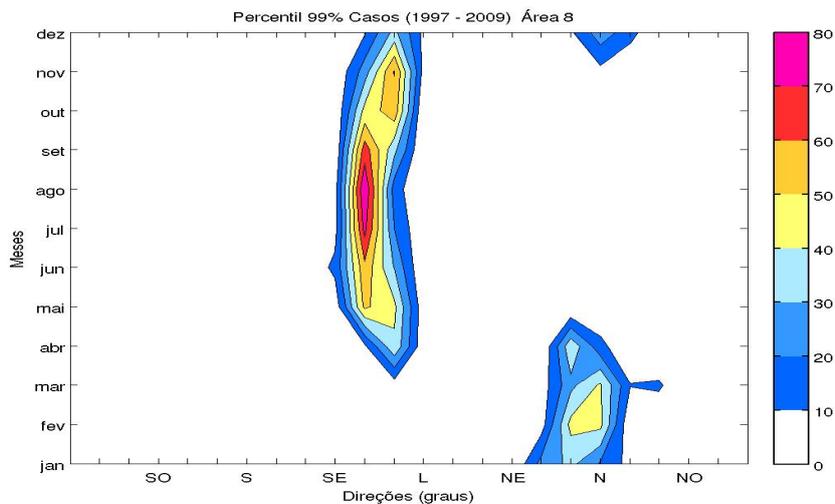


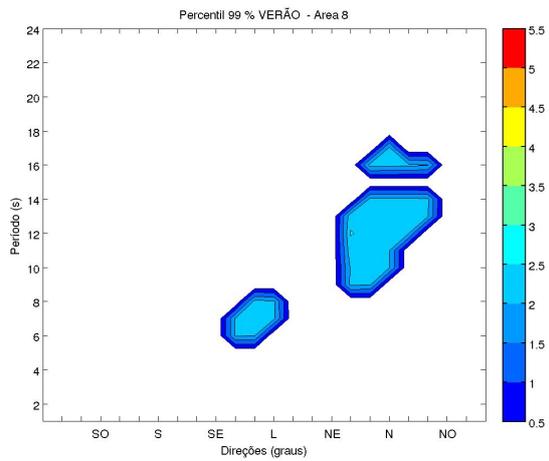
Figura 8.54 - Número de casos acima do Percentil 99 %

Nos meses de verão e outono, as direções de sudeste também aparecem, com média de altura significativa menor que no inverno e primavera. Neste período, há também ocorrência de sistemas da banda nordeste, entre as direções de NE (225°) a NO (315°), entre os períodos de 6 a 14 s e também entre 16 a 18 s. As maiores médias de altura significativa ocorrem nos meses de verão, variando até 2,5 m.

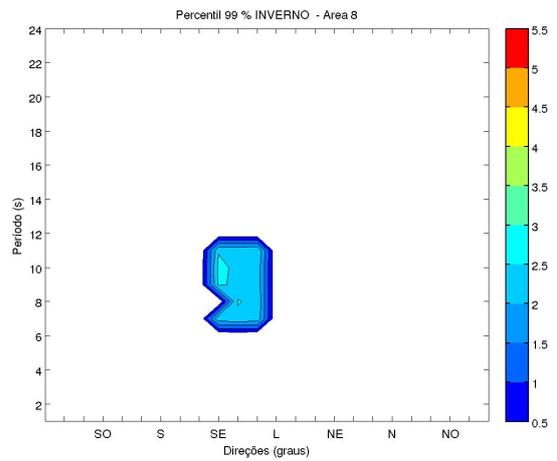
Observa-se pela figura 8.56(a) que os valores de média de energia da área 8 foram menores do que nas áreas anteriores, oscilando entre 6 e 13 kW/m, com os meses de primavera e verão apresentando os maiores valores, acima de 10 kW/m, atingindo o máximo em janeiro.

Pode-se observar pela figura 8.56(b) que os sistemas de nordeste, entre NE (240°) e N (270°), foram reponsáveis por 20 a 30 % da energia nos meses de verão, enquanto que os sistemas de sudeste (principalmente de L (165°)) contribuem com 10 a 20 % da energia no mesmo período. No inverno e na primavera os sistemas da banda sudeste predominam, apresentando porcentagens de energia entre 40 e 60 %, com destaque para no mês de agosto.

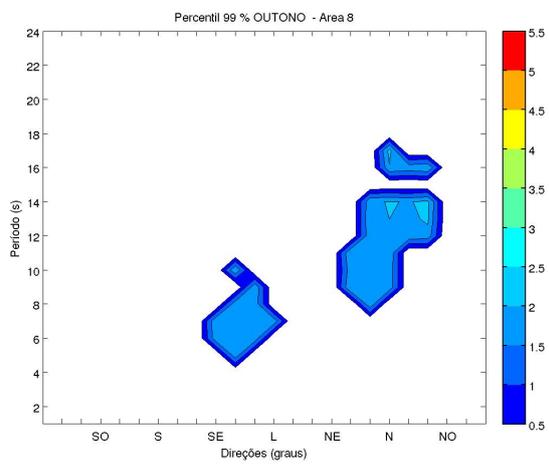
Observa-se pela figura 8.57, que os sistemas de leste e norte são os maiores fornecedores de energia na área 8. A direção L (165°) apresenta a maior média, de 28,9 kW/m, seguida das direções N (255° e 270°), com médias de 15,2 e 13,7 kW/m respectivamente. Não há contribuição de sistemas de sul nesta região, e a média anual



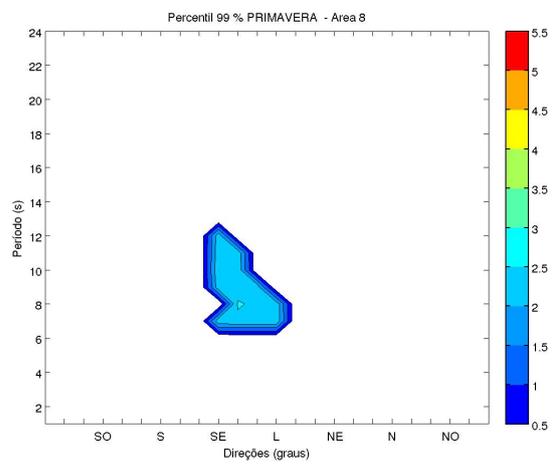
(a) Verão



(c) Inverno



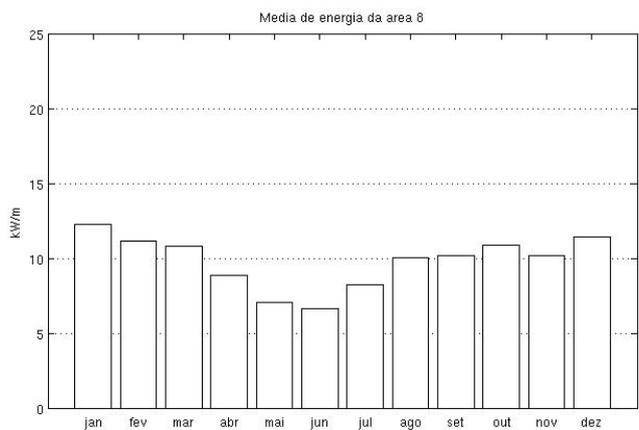
(b) Outono



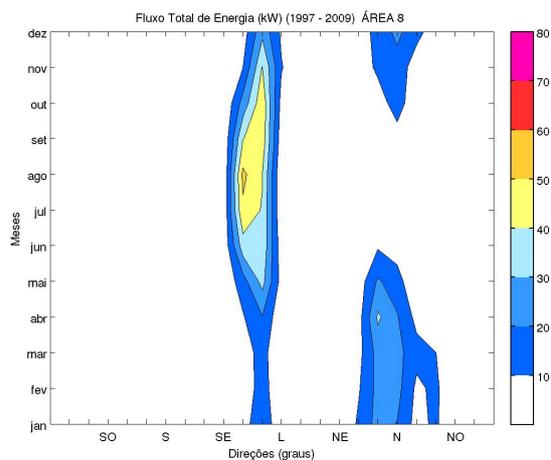
(d) Primavera

Figura 8.55 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 8

da área 8 é de 7,5 kW/m.



(a) Energia em kW/m



(b) Distribuição da porcentagem da área 8

Figura 8.56 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 8

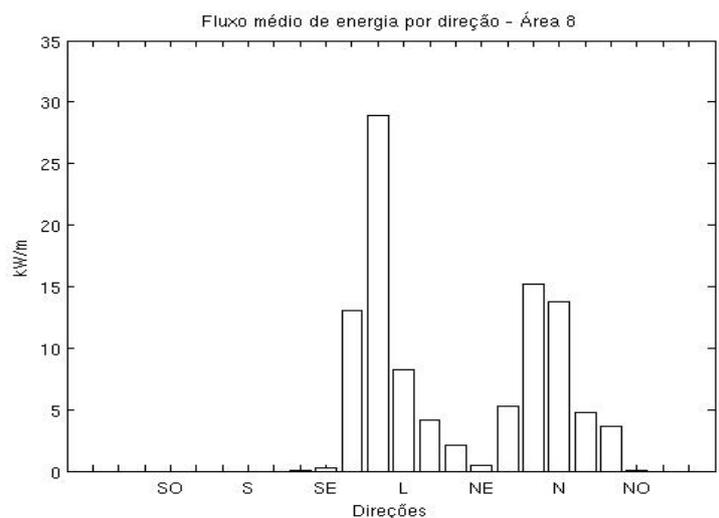


Figura 8.57 - Média de fluxo de energia por direção - Área 8

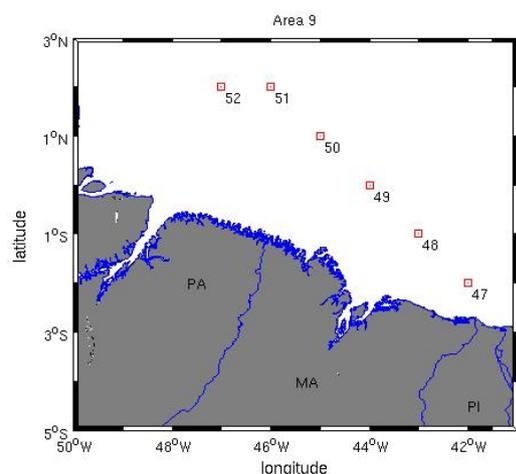
## 8.9 Área 9

A área 9 (figura 8.58(a)), compreende a região costeira do Maranhão e parte litoral do Pará. Observa-se pela figura 8.58(b) que a banda sudeste apresenta a maior porcentagem de ocorrência da área. Entre as direções de SE (135°) e L (180°), as ocorrências variam entre 5 e 15 %, com a direção de L (165°) representando de 15 a 30 % dos sistemas nos meses de abril a dezembro. A banda nordeste da área 9

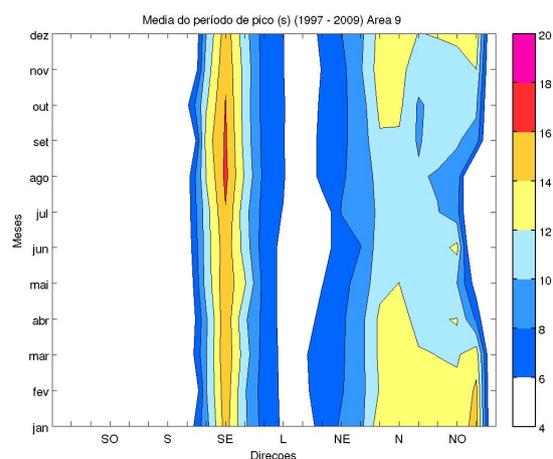
concentra as maiores porcentagens de ocorrência entre NE (210°) e NO (315°), com as direções de NE (240°) e N (270°) chegando a representar entre 15 e 20 % dos sistemas, enquanto que as demais direções desta banda variaram de 5 a 15 %.

Na figura 8.58(c), observa-se que a direção de SE (135°) apresentou as maiores médias de período de pico, variando entre 16 e 18 s nos meses de julho a outubro, e entre 14 e 16 s no restante do ano. Entre as direções de N (255°) e NO (330°), a média do período de pico variou de 12 a 14 s principalmente no verão, reduzindo para o intervalo de 10 a 12 s no inverno. A direção de NO (330°) apresentou variação de 14 a 16 s nos meses de janeiro e fevereiro.

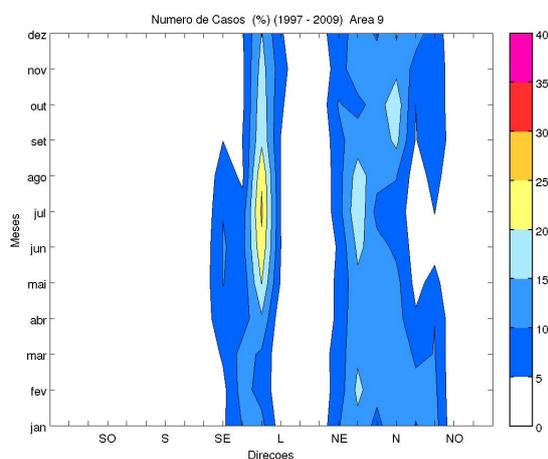
Pela figura 8.58(d) nota-se que entre as direções NE (225°) e NE (240°) ocorreu a maior média de altura significativa, de 1,0 a 1,75 m entre os meses de janeiro e maio, permanecendo com valores abaixo de 0,75 m no restante do ano. A direção de L (180°) também apresentou média elevada, de 1,0 a 1,5 m durante o segundo semestre.



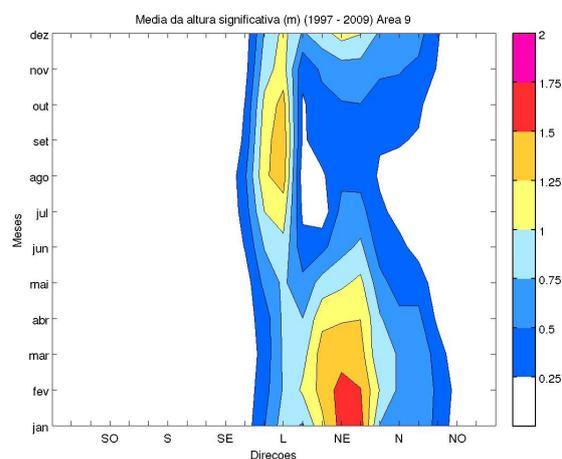
(a) Área 9



(c) Média do período de pico da área 9



(b) Número de casos da área 9



(d) Média da altura significativa da área 9

Figura 8.58 - Área 9, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Os sistemas acima do P90 na área 9 são os casos que apresentaram altura significativa maior que 1,8 m no verão, 1,5 m no outono, 1,3 m no inverno e primavera. Observa-se pela figura 8.59, que os sistemas acima de 1,8 m e 1,5 m são mais frequentes de NE (210°) a N (255°), com as maiores porcentagens da direção de NE (240°), representando de 40 a 60 % dos casos. Nos meses de inverno e primavera, nos quais os sistemas acima do P90 são representados pelos casos acima de 1,3 m, são mais frequentes das direções de SE (150°) a L (180°), com a direção de L (165°) apresentando as maiores porcentagens, de 20 a 80 % dos casos, sendo os meses de inverno o de maior frequência, enquanto que as direções de nordeste passam a representar

menos que 10 % dos casos.

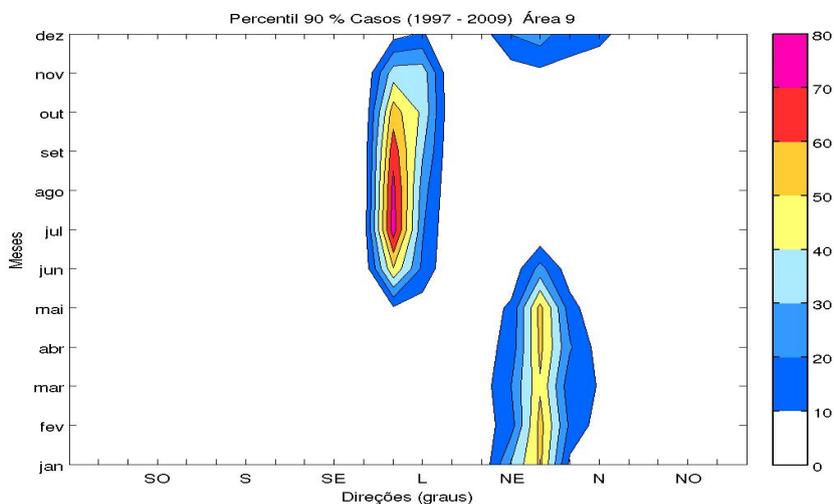
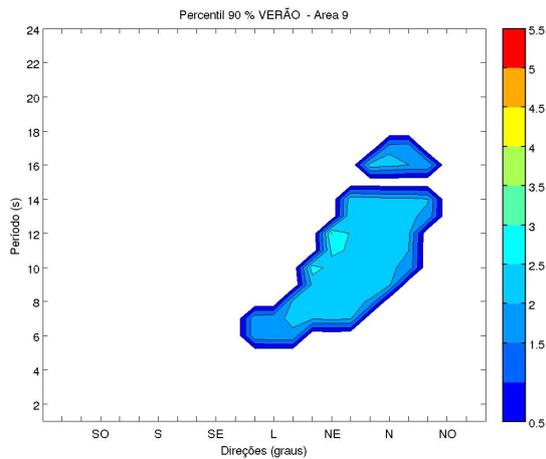


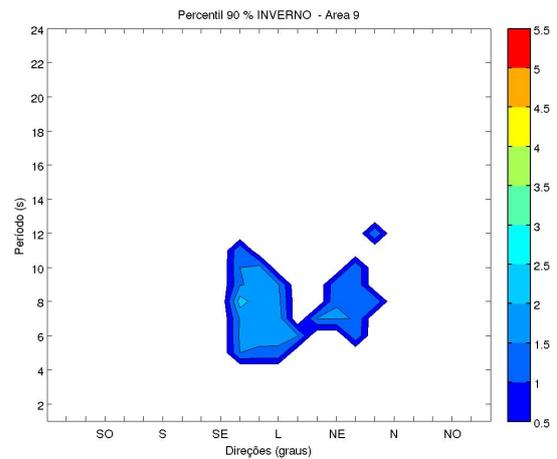
Figura 8.59 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Observa-se pelas figuras 8.60(a), 8.60(b), 8.60(c), 8.60(d), que os meses de verão e outono possuem uma distribuição de ocorrências semelhantes, com as maiores médias entre as direções de NE (225°) e N (270°), entre os períodos de pico de 6 a 14 s. Nota-se também, a ocorrência de sistemas entre os períodos de pico de 16 e 18 s, principalmente entre as direções de N (255° e 270°).

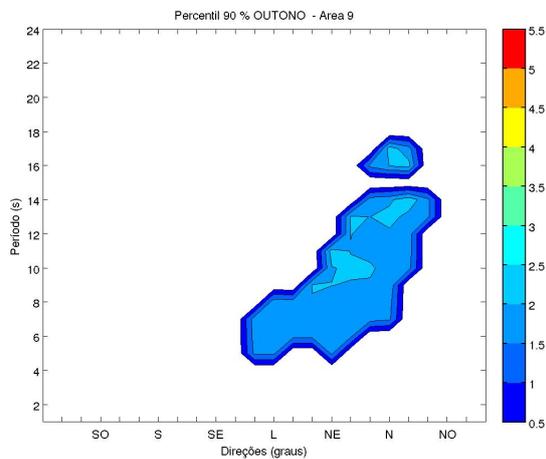
Os meses de inverno e primavera apresentam distribuições de casos ao longo das direções um pouco diferentes dos meses de verão e outono. Observa-se que as direções com maiores médias de altura significativa acima do P90 variaram entre SE (135°) e N (285°), com destaque para a direção de N (270°) na primavera, que apresenta sistemas entre os períodos de pico de 16 e 18 s. No inverno, há uma grande redução de casos de sistemas provenientes da banda nordeste, deixando as direções da banda sudeste em maior evidência neste período do ano.



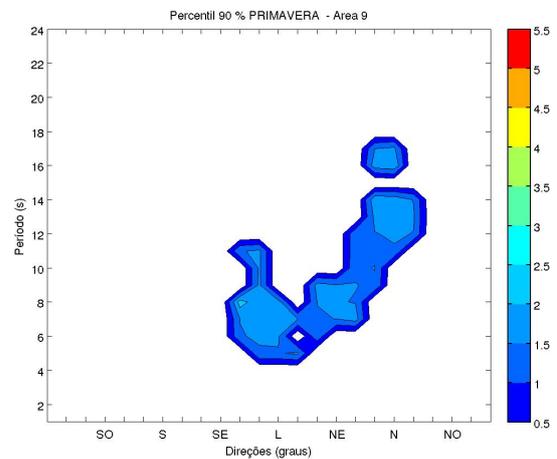
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.60 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 9

Os casos acima do P99 na área 9, são representados por sistemas acima da altura significativa de 2,5 m no verão, 2,3 m no outono e 1,9 m no inverno e na primavera. Observa-se pela figura 8.61, que os sistemas acima do P99 possuem distribuição semelhante aos sistemas acima do P90. Durante os meses de inverno e primavera, os sistemas de sudeste são mais frequentes, com a direção de SE (150°) representando até 80 % dos casos nos meses de inverno, e menos de 10 % dos casos nos meses de verão e outono. Neste período, as direções de nordeste apresentam aumento de ocorrências, variando de 30 a 60 % dos casos, principalmente da direção de NE (240°).

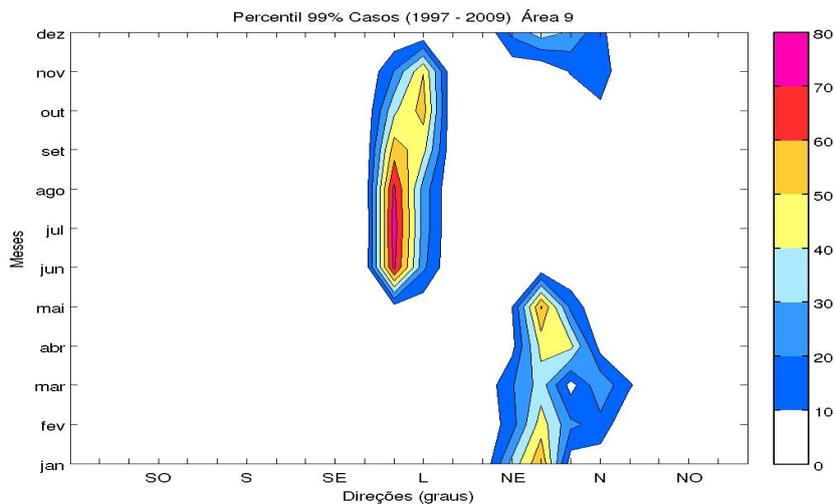
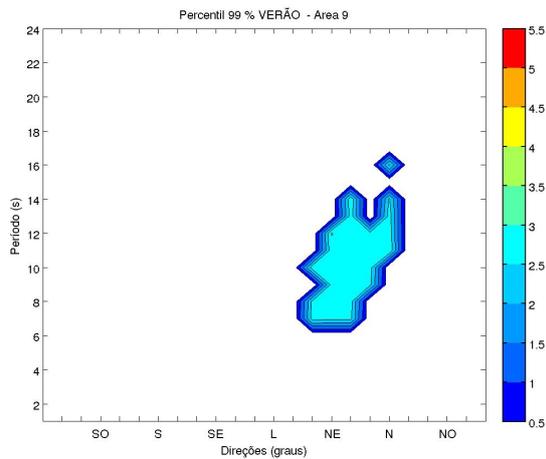
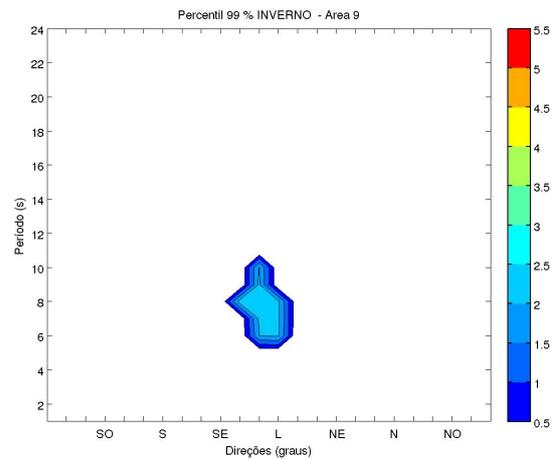


Figura 8.61 - Número de casos acima do Percentil 99 %

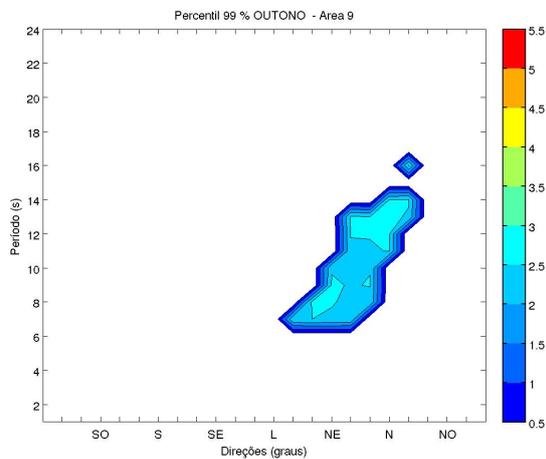
Observa-se pelas figuras 8.62(a), 8.62(b), 8.62(c), 8.62(d), que assim como nos sistemas acima do P90, os sistemas acima do P99 são mais frequentes nos meses de verão e outono, com destaques para as direções de N (270° e 285°), que apresentam casos entre os períodos de pico de 16 a 18 s. Já no inverno e na primavera, a redução de sistemas provenientes da banda nordeste é bem grande na primavera, não ocorrendo no inverno, que apenas apresenta sistemas mais intensos entre as direções de SE (135°) a L (180°). Na primavera, a direção de N (270°) se destaca por apresentar casos entre os períodos de pico entre 12 e 14 s e entre 16 e 18 s.



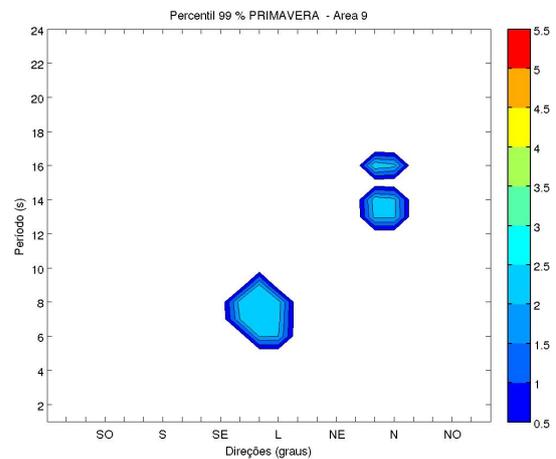
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.62 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 9

Durante os meses de maio a novembro, observa-se pela figura 8.63(a) que as médias de energia ficaram abaixo de 10 kW/m, com os menores valores nos meses de inverno. Pelas figuras 8.59 e 8.61, nota-se que nestes meses, os sistemas de nordeste acima de P90 e P99 representam menos que 10 % dos casos, e da mesma forma a porcentagem de energia também reduz, como se observa pela figura 8.63(b). Em contrapartida, nos meses de inverno, os sistemas de sudeste chegam a representar de 60 a 70 % da energia da área 9 .

Durante os meses de primavera, verão e outono, os sistemas de nordeste são reponíveis pela maior parte da energia, com a direção de NE (240°) representando de

30 a 40 % do total nesta época do ano. Neste período, as médias ficam acima de 10 kW/m, apresentando valores em torno de 15 kW/m de média nos meses de janeiro a março.

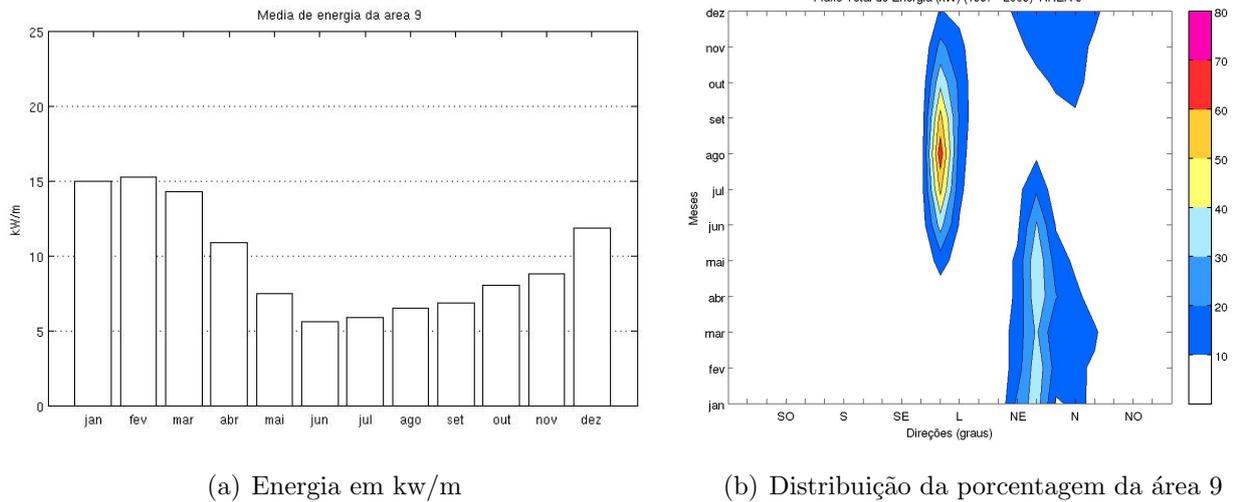


Figura 8.63 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 9

Observa-se pela figura 8.64 que na área 9 há o predomínio dos sistemas de norte e nordeste, com a direção de NE (240°) contribuindo com uma média de 25,7 kW/m. As direções de norte (255° e 270°) apresentam média acima de 10 kW/m, e a direção de L (165°) contribui com média de 17,7 kW/m. A média anual da área 9 é de 8,3 kW/m.

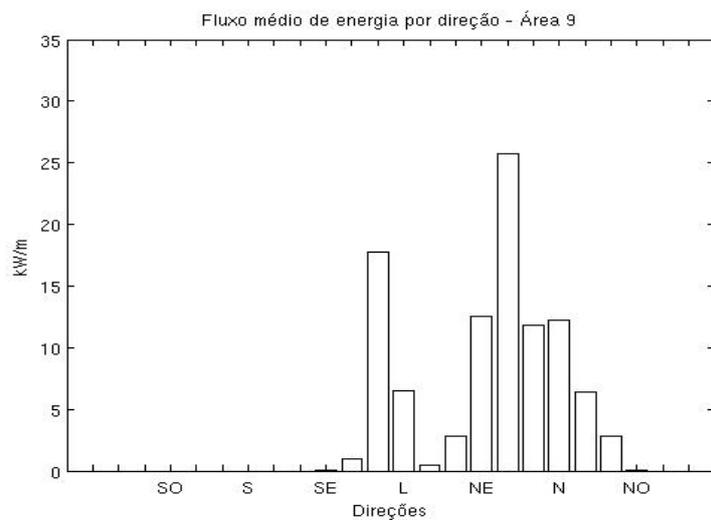


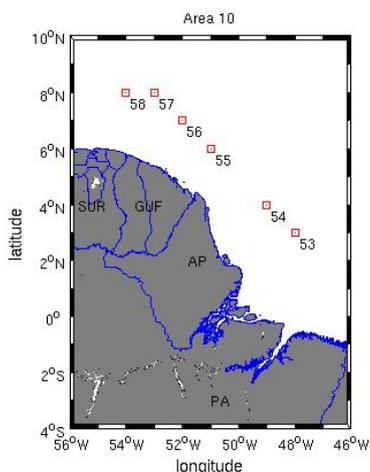
Figura 8.64 - Média de fluxo de energia por direção - Área 9

### 8.10 Área 10

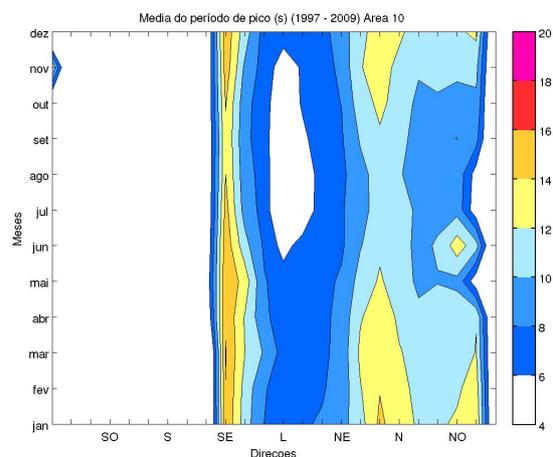
A área 10 (figura 8.65(a)), compreende parte da região costeira do Pará, onde se encontra a foz do Rio Amazonas, a região costeira do Amapá, a região costeira da Guiana Francesa e parte do litoral do Suriname. Observa-se pela figura 8.65(b), que a banda nordeste possui porcentagens menores do que a região 8 e 9. Entretanto, a banda sudeste da área 10, comparada com as áreas 8 e 9, possui um aumento no número de casos.

A banda nordeste apresenta porcentagens de 5 a 20 % dos casos entre as direções de L (195°) a NO (315°), com o maior número de sistemas da direção de NE (225°) no mês de julho, N (255°) no mês de outubro, e N (285°) em fevereiro. Já a banda sudeste, a direção de SE (150°) representa de 15 a 30 % dos casos no inverno, variando de 5 a 15 % no restante do ano.

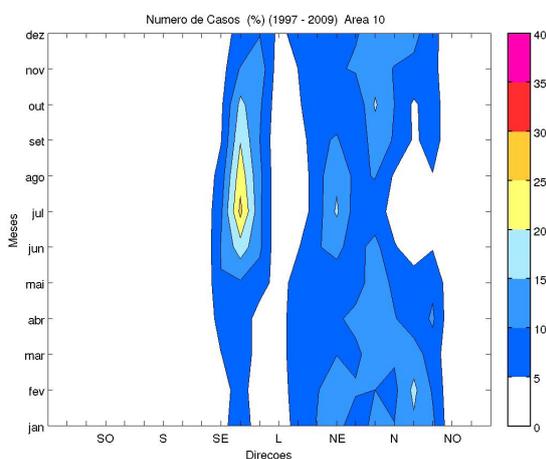
Na figura 8.65(c), observa-se que a direção de SE (135°) apresenta a maior média de período de pico, variando de 12 a 14 s nos meses de agosto a outubro, e entre 14 e 16 s nos demais meses. Na banda nordeste, entre as direções de NE (240°) e N (270°), a média variou entre 10 e 12 s no inverno e entre 12 e 14 s no verão, com a direção de N (255°) apresentando média de 14 a 16 s no mês de janeiro.



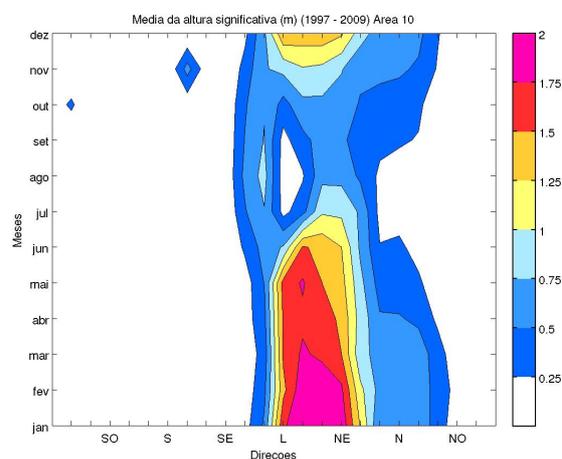
(a) Área 10



(c) Média do período de pico da área 10



(b) Número de casos da área 10



(d) Média da altura significativa da área 10

Figura 8.65 - Área 10, apresentando a porcentagem de número de casos, médias do período de pico e da altura significativa

Entre as direções de L ( $165^\circ$ ) a NE ( $225^\circ$ ), a média do período de pico variou entre 4 e 10 s, mas apresentou a maior média de altura significativa da área 10. Observa-se pela figura 8.65(d), que esta média variou de 1,75 a 2,0 m entre janeiro e março, permanecendo com média acima de 1,5 m durante todo o verão, outono e começo de inverno. Durante o restante do inverno e primavera, a média varia entre 0,25 a 1,0 m, ficando abaixo de 0,25 m na direção de L ( $180^\circ$ ) entre os meses de julho a setembro. Entre N ( $255^\circ$ ) e NO ( $315^\circ$ ), a média da altura significativa foi de 0,25 a 0,75 m ficando abaixo de 0,25 m no inverno. A direção de S ( $105^\circ$ ) apresentou média entre 0,25 a 0,75 m no mês de novembro e a direção de O ( $15^\circ$ ), média entre

0,25 e 0,5 m no mês de outubro. No restante do ano, assim como na área anterior, essas direções não haviam apresentado média ou sempre ficaram com média abaixo de 0,25 m.

Os sistemas acima do P90 na área 10, são representados por altura significativa acima de 2,2 m no verão, 2,0 m no outono, 1,2 m no inverno e 1,0 m na primavera. Observa-se pela figura 8.66 que a os sistemas mais frequentes acima do P90 nesta área são das direções de L (180°) a NE (240°), com as maiores frequências durante o primeiro semestre, chegando a 50 % no mês de julho.

De agosto a outubro, quando há redução de ocorrências das direções da banda nordeste, as direções entre SE (135°) e L (165°) apresentam aumento no número de casos, chegando a 50 % dos casos entre agosto e setembro.

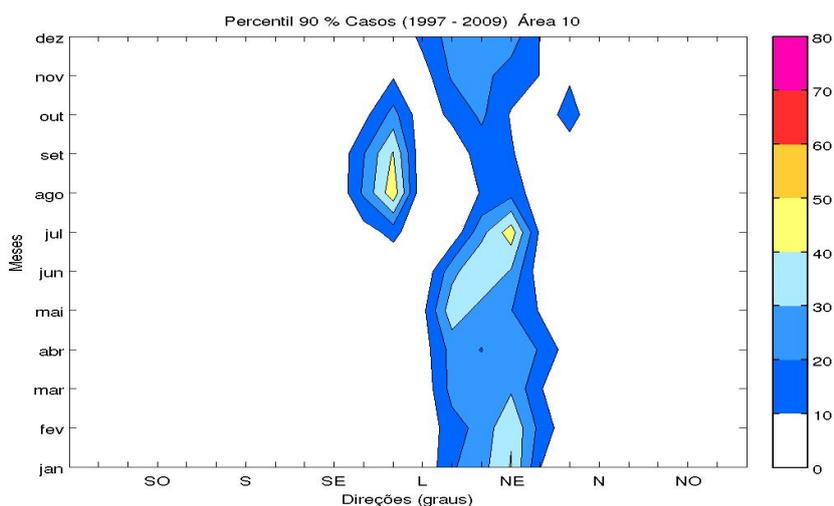
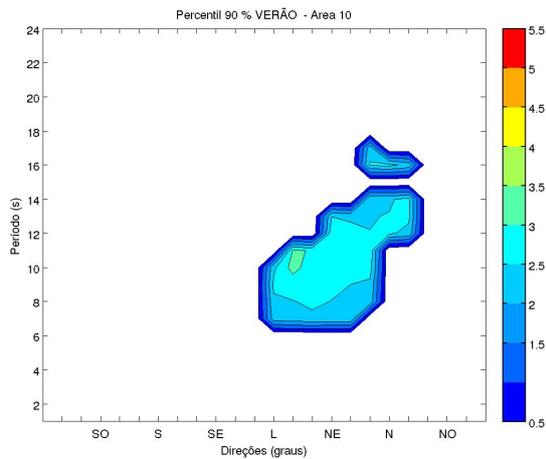


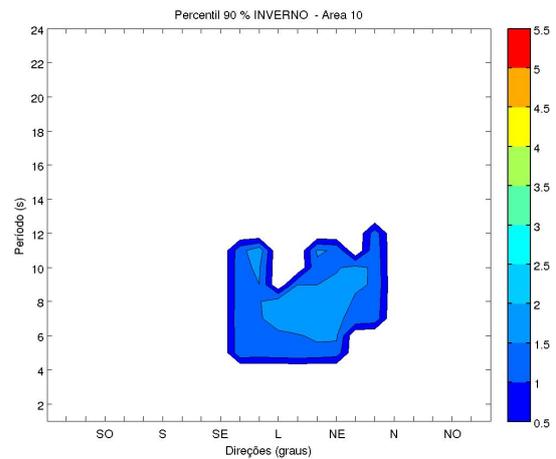
Figura 8.66 - Número de casos acima do Percentil 90 %

Observa-se pelas figuras 8.67(a), 8.67(b), 8.67(c), 8.67(d), que os meses de verão apresentam os sistemas com maior média de altura significativa entre os casos acima do P90. O destaque acontece na direção de L (180°), que apresenta média de até 3,5 m entre os períodos de pico de 10 a 12 s. Tanto no verão como no outono, os sistemas de N (255° a 285°) aparecem também entre os períodos de pico de 16 a 18 s.

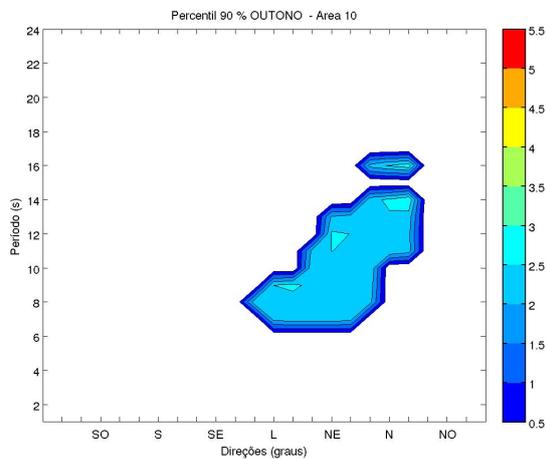
O inverno é o período que apresenta as menores médias de altura significativa entre



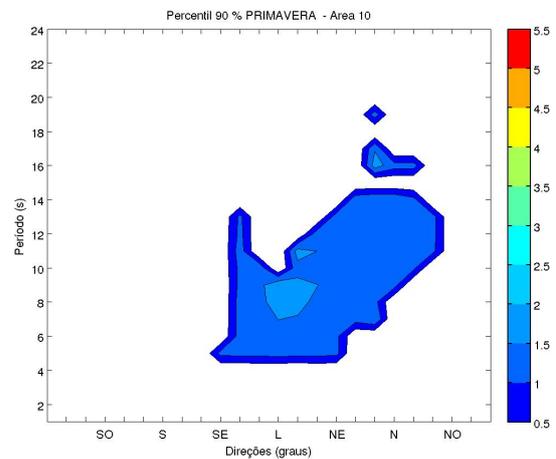
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono



(d) Primavera

Figura 8.67 - Percentil 90% da altura significativa - ÁREA 10

os sistemas acima do P90, variando entre as direções de SE ( $150^\circ$ ) a N ( $255^\circ$ ) com períodos de pico de 4 a 12 s. Na primavera, os valores de média de altura significativa não são altas, porém apresentam maior número de casos distribuídos ao longo das direções, variando de SE ( $120^\circ$ ) a NO ( $315^\circ$ ). As direções de destaque deste período foram a de N ( $255^\circ$  e  $270^\circ$ ) que apresentaram casos entre 16 e 18 s e também entre os períodos de pico de 18 a 20 s (somente de N ( $255^\circ$ )).

Os sistemas que representam o P99 da área 10, possuem altura significativa acima de 2,9 m no verão, 2,6 m no outono, 2,0 m no inverno e 1,7 m na primavera. Observa-se pela figura 8.68 que os sistemas mais frequentes ocorrem nos meses de inverno e

nos meses do começo da primavera, na direção de L ( $165^\circ$ ), representando até 80 % dos casos, enquanto que na banda nordeste, neste mesmo período, os casos ficam abaixo dos 10 %. Em compensação, as direções entre L ( $180^\circ$ ) e NE ( $240^\circ$ ) são mais frequentes ao longo de todo o ano, apresentando máximos de ocorrências em maio da direção de L ( $180^\circ$ ) e julho na direção de NE ( $225^\circ$ ), variando de 40 a 60 %.

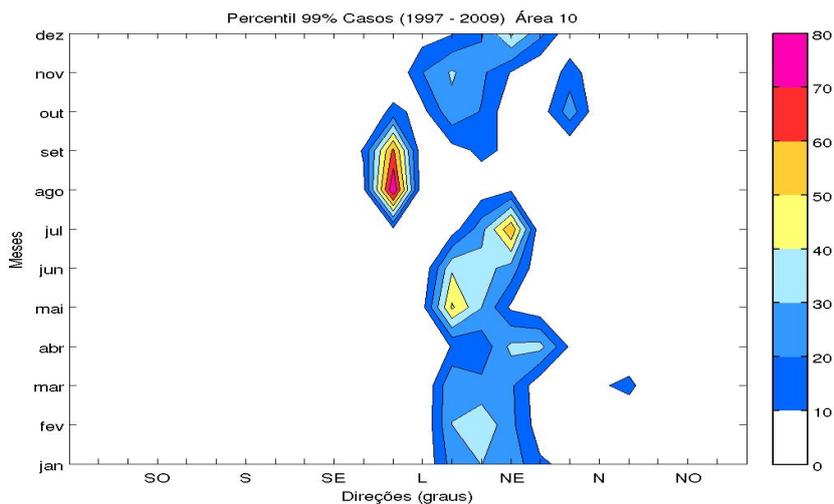
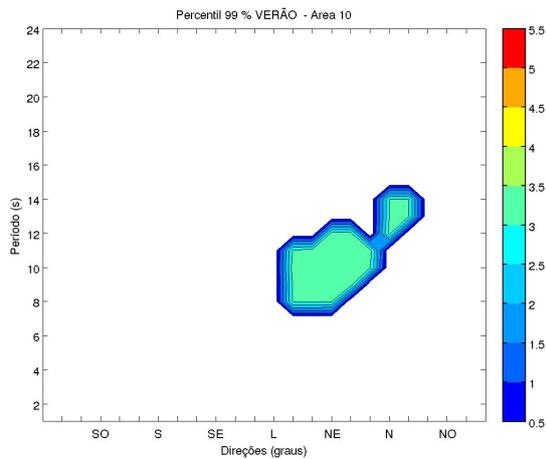


Figura 8.68 - Número de casos acima do Percentil 99 %

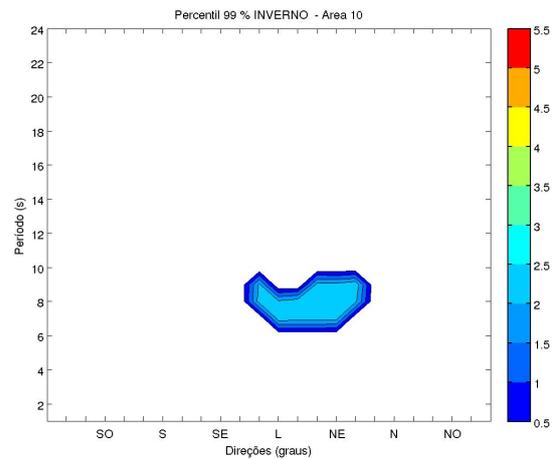
Observa-se pelas figuras 8.69(a), 8.69(b), 8.69(c), 8.69(d), que os sistemas mais intensos ocorrem nos meses de verão, variando entre L ( $180^\circ$ ) e N ( $285^\circ$ ) e entre os períodos de pico de 8 a 14 s. No outono, os destaques aparecem para as direções de N ( $270^\circ$  e  $285^\circ$ ), que apresentam sistemas entre períodos de pico de 16 a 18 s.

Durante o inverno, os sistemas variam entre as direções de SE ( $150^\circ$ ) a NE ( $240^\circ$ ), com períodos de pico de 6 a 10 s, sem nenhuma direção que apresente algum destaque. Na primavera, o destaque ocorre na direção de N ( $255^\circ$ ) que apresenta sistemas entre os períodos de pico de 16 a 18 s. Nota-se que os sistemas de nordeste possuem períodos de pico maiores que os sistemas de sudeste.

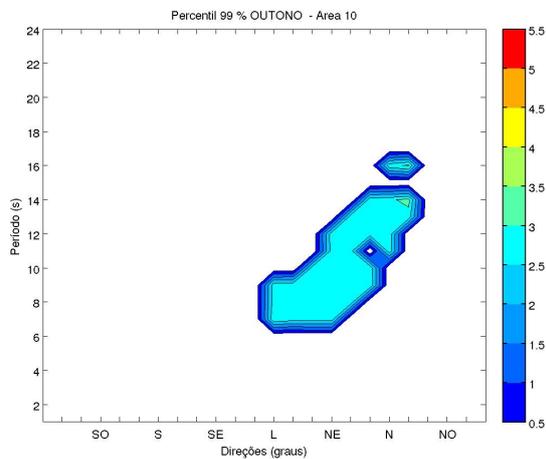
Observa-se na figura 8.70(a), que os valores de energia da área 10 são mais intensos nos meses de verão, apresentando valores acima de  $15\text{kW/m}$  com máximo de  $18\text{kW/m}$  no mês de fevereiro. Nota-se pela figura 8.70(b), que neste período do ano, os sistemas de nordeste representam de 10 a 30 % desta energia, principalmente entre as direções de L ( $195^\circ$ ) a NE ( $240^\circ$ ).



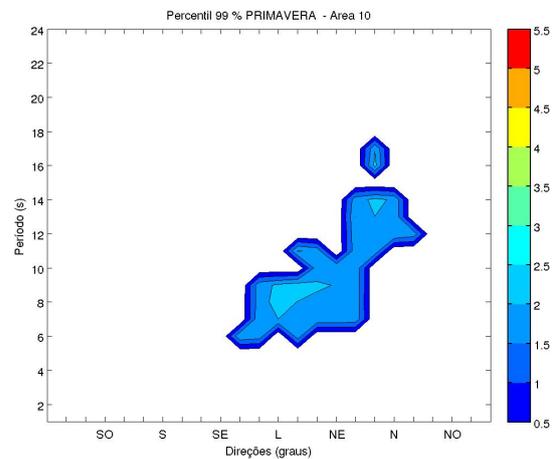
(a) Verão



(c) Inverno



(b) Outono

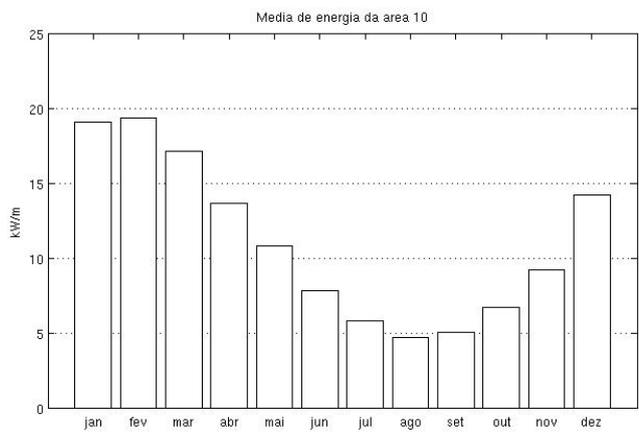


(d) Primavera

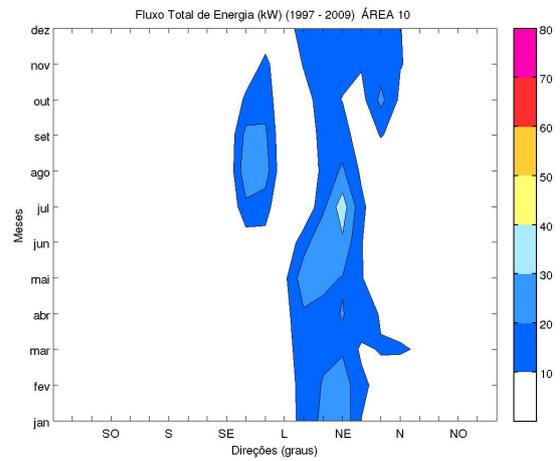
Figura 8.69 - Percentil 99% da altura significativa - ÁREA 10

No inverno, quando há redução da média mensal de energia, observa-se que a contribuição dos sistemas de nordeste diminui, aumentando a porcentagem de sistemas de sudeste, principalmente das direções de SE ( $150^\circ$ ) e L ( $165^\circ$ ).

Observa-se pela figura 8.71, que os sistemas de nordeste e norte contribuíram com as maiores médias de fluxo de energia, com as direções de NE ( $210^\circ$  e  $225^\circ$ ) apresentando valores de 18,4 e 21,6 kW/m, respectivamente. A média anual da área 10 é de 11,1 kW/m.



(a) Energia em kw/m



(b) Distribuição da porcentagem da área 10

Figura 8.70 - Energia média em kW/m e distribuição da porcentagem das médias de energia por direção da área 10

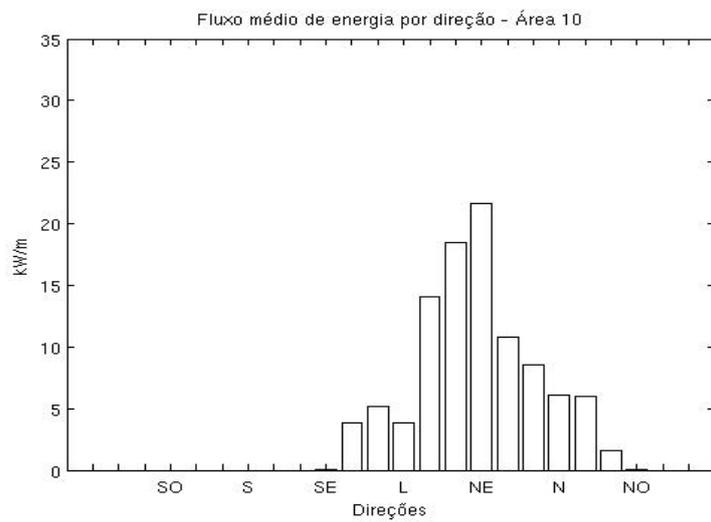


Figura 8.71 - Média de fluxo de energia por direção - Área 10



## 9 CONCLUSÕES

As conclusões dos resultados são apresentadas separadamente pelos tipos de sistemas atuantes, suas frequências de ocorrência nas áreas, médias do período de pico e altura significativa, e as direções dos sistemas mais intensos e suas estações mais frequentes. As conclusões sobre a energia de onda disponível para conversão em energia elétrica na região de estudo será descrita por área, exaltando as médias mensais e as regiões com melhores resultados apresentados.

### 9.1 Sistemas da banda sul

Os sistemas provenientes da banda sul ( $75^\circ$  a  $105^\circ$ ) são atuantes desde a área 1 até a área 7. Essas áreas abrangem a região oceânica norte da Argentina até o litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte. As maiores porcentagens destes sistemas ocorrem entre Santa Catarina e sul do Espírito Santo, variando de 20 a 30 % das ocorrências durante quase todo ano. Na área 1, região mais próxima dos campos de vento que geram os sistemas de sul, a frequência de casos varia de 10 a 20 %. Do Espírito Santo ao Rio Grande do Norte a frequência destes sistemas diminuem, porém mantendo ocorrência entre 20 a 30 % nos meses de verão e inverno e entre 10 a 20 % nos demais meses.

A média do período de pico oscila entre 12 e 14 s da área 1 até a área 3 (litoral de São Paulo), passando para uma média de 14 a 16 s no litoral do Rio de Janeiro até o Rio Grande do Norte. Observa-se que o *swell*, formado pelos cilones próximo da área 1, que se propagam para leste sobre o oceano Atlântico Sul, geram sistemas com maiores médias de período de pico a partir da área 3, com os valores aumentando em direção as áreas 4, 5, 6 e 7. Pode-se notar também, que próximo das áreas de origem destes sistemas a média de altura significativa são altas, chegando aos máximos valores nas áreas 3, 4 e 5 (de Santa Catarina ao sul de Espírito Santo), perdendo energia e apresentando valores menores no nordeste. A média de altura significativa varia no inverno de 0,75 a 1,25 m na área 1 e 2, de 0,75 a 1,5 m no outono e no inverno das áreas 3, 4 e 5, ficando abaixo de 0,75 m nas áreas 6 e 7, também nos meses de outono e inverno, período em que estes sistemas foram mais intensos.

Os sistemas da banda sul acima do P90 são mais intensos nos meses de primavera e outono nas áreas 1 e 2, e nas áreas 3, 4 e 5 nos meses de outono e inverno. Os sistemas acima do P90 com períodos de pico entre 16 e 18 s ocorrem nos meses de

outono e primavera da área 1 e 2, e em todos os meses das áreas 3 a 5. Estes casos também aparecem de forma menos intensa nas áreas 6 e 7.

Para os sistemas acima de P99, os sistemas da banda sul foram mais intensos nos meses de outono e primavera da área 1. Já na área 2 e 3 nos meses de outono e inverno. Na área 4 e 5 esses sistemas aparecem nos meses de outono, inverno e primavera, restringindo-se aos meses de inverno nas áreas 6 e 7. Os casos entre 16 e 18 s de período de pico aparecem na área 1 nos meses de inverno e primavera, na área 2 nos meses de outono, inverno e primavera, e em todo o ano nas áreas 3 a 6, ficando ausente na primavera da área 7.

## 9.2 Sistemas da banda nordeste

Os sistemas de nordeste possuem uma banda de distribuições bem definida nas áreas 1 e 2, variando de L ( $195^\circ$ ) a NE ( $240^\circ$ ), com uma frequência de 5 a 20 % das ocorrências ao longo do ano. Na área 3, a porcentagem destes sistemas diminuem, variando de 5 a 15 %, ocorrendo a união dos sistemas de nordeste aos sistemas de sudeste, voltando a ficar com uma banda bem definida nas áreas 4, 5 e 6, com frequências de casos aumentando de 5 % no inverno a 30 % no verão, com a distribuição de direções passando a variar de NE ( $225^\circ$ ) a N ( $255^\circ$ ).

A partir da área 7 os sistemas de nordeste apresentam redução na porcentagem de ocorrência, porém a distribuição de direções aumenta, sendo representados por sistemas de NE ( $225^\circ$ ) a NO ( $300^\circ$ ), incluindo também os sistemas de norte. Durante a primavera e o inverno, as ocorrências possuem maior frequência de ocorrência, variando de 15 a 25 %. Nas áreas 8, 9 e 10 os sistemas são mais frequentes de NE ( $240^\circ$ ) e N ( $270^\circ$ ), variando de 15 a 25 %.

A média do período de pico dos sistemas de nordeste variam de 6 a 12 s nas áreas 1 e 2, com as direções de NE ( $225^\circ$  a  $240^\circ$ ) apresentando média de 12 a 14 s nos meses de verão. Nas áreas 3 e 4 os sistemas de NE apresentam média entre 12 e 16 s nos meses de primavera e verão e entre 6 e 12 s nos meses de outono e inverno. A partir da área 5, a média do período de pico se mantém com um padrão parecido, variando de 12 a 14 s nos meses de primavera e verão e entre 10 e 12 s nos meses de outono e inverno.

Nas áreas 7 e 8, a direção de NO ( $330^\circ$ ) se destaca apresentando nos meses de verão média de até 18 s.

A média de altura significativa na banda nordeste, representada pela direção de NE (240°) apresenta maiores valores nos meses de inverno e primavera, da área 1 a área 5, variando de 1,0 a 1,5 m, com exceção da área 3, onde os valores ficam abaixo de 0,75 m. A partir da área 6, a média da altura significativa apresenta valores mais altos nos meses de verão e outono, apresentando média de até 1,75 m nas áreas 9 e 10.

Os sistemas acima de P90 da banda nordeste estão presentes na área 1 nos meses de primavera, e nos meses de inverno e primavera das áreas 2 e 3, e voltando a ocorrer apenas na primavera nas áreas 4 e 5. A partir da área 6, esses sistemas são mais comuns nos meses de primavera, verão e outono, aparecendo no inverno apenas nas áreas 9 e 10. A partir da área 7, aparecem grupos de sistemas provenientes de N (270°) com valores entre 14 e 20 s de período de pico. Na área 9 estes sistemas oscilam entre 14 e 16 s (menos no inverno) e na área 10 há casos de até 20 s de período de pico nos meses de primavera e de até 18 s no verão e outono.

Para os sistemas acima de P99, os sistemas da banda nordeste são mais intensos nos meses de inverno e primavera nas áreas 1, 2 e 5. Na área 3 estes sistemas aparecem apenas nos meses de outono e apenas nos meses de primavera na área 4. Na área 6, este padrão se altera, sendo mais intensos nos meses de primavera e verão. Nas áreas 7 e 8 os sistemas acima de P99 são mais intensos nos meses de verão e outono e nas áreas 9 e 10 são intensos durante quase todo ano (menos no inverno). Os casos com período entre 16 e 18 s ocorrem nas áreas 8, 9 e 10, com sistemas principalmente da direção de N (270°).

### **9.3 Sistemas da banda sudeste**

Entre as bandas sul e nordeste, as direções de SE (120°) a L (180°) compõem os sistemas de sudeste. Nas áreas 1 e 2, esses sistemas apresentam variação entre 5 e 10 % , principalmente de SE (150°) nos meses de inverno. Nas áreas 3 e 4, a distribuição de ocorrências dos sistemas da banda de sudeste se misturam com a distribuição dos sistemas da banda nordeste, com destaque para a direção de L (195°) que oscilou entre 10 e 15 % no inverno, apresentando menos de 10 % das ocorrências nos demais meses, assim como as demais direções da banda sudeste. A área 5 representa um transição entre uma distribuição descontínua da porcentagem de ocorrências das áreas anteriores, para uma distribuições mais contínua ao longo do ano na área 6. Esta área apresenta de 5 e 10 % dos sistemas durante todo o ano, principalmente

entre as direções de SE (150°) a L (180°).

Na área 7 a distribuição dos sistemas de sudeste se desloca entre SE (135°) a L (165°), mantendo as mesmas frequências da área 6, apenas com um aumento dos casos (10 a 15 %) nos meses de verão da direção de SE (150°). A partir da área 8, os sistemas de SE (150°) e L (165°) apresentam uma aumento na frequência das ocorrências, principalmente nos meses de verão, variando de 15 a 20 % na área 8 e entre 25 a 30 % nas áreas 9 e 10.

A média do período de pico dos sistemas da banda sudeste apresentam um padrão de 8 a 12 s durante todo ano, com ocorrências isoladas de 12 a 14 s nas direções de SE (135° e 150°). A partir da área 6, a ocorrência de sistemas entre 12 a 14 s de média de período de pico é mais comum, com casos de 14 a 16 s nos meses de verão. Já na área 8, a média de período de pico entre 14 a 16 s, entre as direções de SE (120° e 150°) ocorrem durante quase todo ano, chegando a apresentar uma variação entre 16 a 18 s nos meses de primavera na área 9.

Da área 1 a área 5, a média de altura significativa dos sistemas da banda sudeste apresentam valores de até 1,0 m nos meses de inverno e entre 0,25 e 0,75 m nos demais meses. Na área 6, durante todo o segundo semestre a média fica acima de 1,0 m, chegando a 1,75 m entre as direções de L (165° a 195°) e a 2,0 m na área 7. Nas áreas 8 e 9, essa média se mantém alta, com a área 10 também apresentando média de até 2,0 m, com exceção dos meses de verão.

Os sistemas acima de P90 da banda sudeste ocorrem no outono e primavera das áreas 1 e 2, nos meses de inverno e primavera da área 3 a área 9, e nos meses de verão e outono na área 10, sendo mais intensos nas áreas 1 a 4, ou seja, região oceânica norte da Argentina a região oceânica central do Rio de Janeiro. Os casos entre os períodos de pico de 16 a 18 s de período de pico ocorrem nos meses de outono nas áreas 1, 2, 4 e 5, e nos meses de outono e inverno na área 3.

Os sistemas acima de P99 da banda sudeste são intensos nos meses de outono e inverno das áreas 1 a 5, e nas áreas de 6 a 9 nos meses de inverno e primavera. Na área 10 estes sistemas aparecem durante todo ano. Os casos com período entre 16 e 18 s da banda sudeste ocorrem apenas nos meses de inverno da área 1 e nos meses de outono e inverno na área 6.

## 9.4 Fluxo de energia

Nos resultados apresentados relacionados ao fluxo de energia, pode-se observar a distribuição deste parâmetro ao longo dos meses e as direções que apresentaram as maiores médias, com suas respectivas porcentagens de ocorrência ao longo do ano. Na figura 9.1, observa-se a distribuição da média anual do fluxo de energia ao longo do litoral brasileiro, e abaixo a descrição da influência das bandas de direções ao longo da área de estudo.

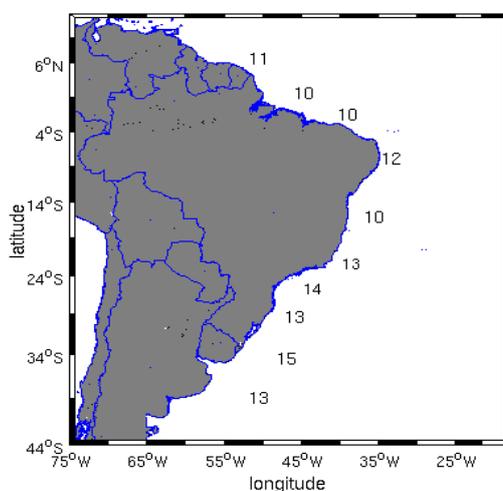


Figura 9.1 - Média anual de energia (kW/m)

Os sistemas da banda sul são os responsáveis pela grande parte da energia de ondas das áreas 1 a 5, com uma representação maior dos sistemas de nordeste nas áreas 2 e 3 nos meses de primavera e verão. Na área 6, as direções das bandas sul e sudeste contribuem com porcentagens semelhantes, e a partir da área 7 as direções da banda sudeste passam a apresentar as maiores porcentagens entre os sistemas que dispõem energia de ondas.

Entre as áreas 1 e 5, os meses de abril a setembro apresentam média mensal acima de 15 kW/m, com destaque para a área 2, entre o Rio Grande do Sul até a região oceânica na latitude do município de Florianópolis - SC. Esta área atinge máximo de 20 kW/m nos meses de maio e setembro, com média mensal sempre acima de 10 kW/m. As áreas 6 e 7 apresentam os maiores valores de média mensal de energia de ondas entre os meses de abril e outubro, variando de 10 a 15 kW/m na área 6

e entre 10 a 17 kW/m na área 7. Esta área também apresenta média acima de 10 kW/m nos demais meses (com exceção de fevereiro - 9 kW/m), da mesma forma que na área 1.

A área 8 foi a que apresentou as menores médias mensais, com valor máximo nos meses de verão, apresentando média de 13 kW/m no mês de janeiro, ficando abaixo de 10 kW/m entre os meses de abril e agosto. Nas áreas 9 e 10, os meses de janeiro a abril apresentam os maiores valores de média, chegando a 15 kW/m na área 9 e a 19 kW/m na área 10, e nos meses de inverno apresentando média abaixo de 10 kW/m.

As áreas 2 e 7 foram as que apresentaram melhores resultados, com média mensal de energia de onda acima de 10 kW/m durante todo o ano. Apesar da área 1 apresentar valores absolutos maiores que a área 7, a região oceânica da área 2 possui uma plataforma continental muito extensa enquanto que a área 7 possui a plataforma continental mais curta do litoral brasileiro. Este fator influencia na escolha do tipo de conversor de energia de onda em energia elétrica a ser escolhido, acarretando aumento/decréscimo nos custos de instalação, transferência de energia por cabos submarinos e na própria dissipação de energia de onda com o fundo oceânico à medida em que os sistemas de onda se aproximam da costa.

Por todos estes fatores, a área 7 é a mais indicada para instalação de conversores de onda, principalmente do tipo *offshore*, que aproveitam o máximo de energia dos sistemas de onda por serem instalados em profundidades em que a perda de energia pelo atrito com o assoalho oceânico não ocorre. Além disso, como a plataforma continental é mais estreita, a utilização de conversores *offshore* fica mais viável, uma vez que estrutura de cabos submarinos para condução da energia convertida para o continente será a menor possível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARNES, J.; KROGSTAD, H. E. . **Partitioning sequences for the dissection of directional ocean wave spectra: a review.** 2001. Disponível em:  
<[http://soprano.cls.fr/fact\\_sheets/pdf/partitioningsequences.pdf](http://soprano.cls.fr/fact_sheets/pdf/partitioningsequences.pdf)>.  
Acesso em: 28 set 2010. 33
- BRANCO, F. V. **Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira.** 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. 31
- BROOKE, J. **Wave energy conversion.** New York: Elsevier Science Ltd, 2003. 2
- CAVALCANTI, I. F. A. Episódios de el niño/ oscilação sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o brasil. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. 31
- CLEMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCÃO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN K. PETRONCINI, S.; PONTES, M. T.; SCHILD, P.; SJOSTROM, B.; SORENSEN, H. C.; THORPE, T. Wave energy in europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405–431, 2002. 19
- CRUZ, J. M. B.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas:** introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. Alfragide, Portugal: Fernandes & Terceiro, Lda., 2004. 65 p. Disponível em:  
<[http://www.wavec.org/client/files/Livro\\_EO\\_IA.pdf](http://www.wavec.org/client/files/Livro_EO_IA.pdf)>. 17, 18
- DEAN, R.; DALRYMPLE, R. **Water wave mechanics for Engineers and Scientists.** New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1990. 9, 21, 22, 24, 26, 129, 130, 134, 136
- EARLE, M. D. **Development of algorithms for separation of sea and swell.** [S.l.: s.n.], 1984. 53 p. MEC-87-1. 33
- FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures No 4**, v. 20, p. 185–201, 2007. 2

- FENG, H.; VANDEMARK, B.; CHAPRON, B.; BECKLEY, B. Use of a global wave model to correct altimeter sea level estimate. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004, Anchorage, Alaska. **Proceedings...** Anchorage, 2004. p. 2738–2741. 12
- GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over south america. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293–1302, 1991. 29
- GERLING, T. W. Partitioning sequences and arrays of directional wave spectra into component wave systems. **J. Atmos. Ocean. Techn.**, v. 9, p. 444–458, 1992. 33, 34
- H.A., V. L. Climatological study of the atmospheric circulation in the southern hemisphere during the igy, part i: July 1957-31 march 1958. **J. Appl. Meteorol.**, v. 4, p. 479–491, 1965. 29
- HANSON, J. L. **Wind sea growth and swell evolution in the Gulf of Alaska**. Ph.D. dissertation — The Johns Hopkins University, Laurel,MD, 1996. 34
- HANSON, J. L.; PHILLIPS, O. M. Wind sea growth and dissipation in the open ocean. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 29, p. 1633–1643, 1999. 33
- \_\_\_\_\_. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. **J. Atmos. Oceanic. Technol.**, v. 18, p. 277–293, 2001. 34, 36, 38
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H. Measurements of wind wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). **Deutsche Hydrographische Zeitschrift Supplement**, v. 12, n. A8, p. 95, 1973. 8
- HASSELMANN, S.; HASSELMAN, K.; BRUNING, C.; KOMEN, G. **Extraction of wave spectra from SAR image spectra, in dynamics and modeling of ocean waves**. England: Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1994. 34
- HOLTHUIJSEN, H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. Great Britain: Cambridge University Press, 2007. 387 p. 6, 7, 9, 25, 26, 27
- INNOCENTINI, V.; PRADO, S. C.; PEREIRA, C. S.; ARANTES, F. O.; BRANDÃO, I. N. Ocorrência de vagas no arquipélago de São Pedro e São Paulo: caso de 24 de outubro de 1999. **Rev. Bras. Met.**, v. 16, p. 177–186, 2001. 31, 90

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. France, 1994. 306 p. 1

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. France, 2004. 577 p. 1

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. France, 2006. 601 p. 1

KROFOED, J. P.; FRIGAARD, P.; FRIIS-MADSEN, E.; SORENSEN, H. C. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. In: WORLD RENEWABLE CONGRESS (WREC 2004), 8., 2004, Denver, Colorado. **Proceedings...** Dener: Elsevier Ltd., 2004. 18

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987- 1995. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. 30

MASSEL, R. **Ocean surface waves**: their physics and prediction. Londres: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1996. 9

MILES, J. On the generation of surface waves by shear flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 22, p. 823–827, 1957. 6

NECCO, G. V. Comportamiento de vórtices ciclónicos en el Área sudamericana durante el fgge: ciclogénesis. **Meteorologica**, v. 13, p. 7–20, 1982. 29

PADILLA-HERNANDEZ, R.; PERRIE, W.; TOULANY, B.; SMITH, P. C.; ZHANG, W.; JIMENEZ-HERNANDEZ, S. Intercomparison of modern operational wave models. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVE HINDCASTING AND FORECASTING, 2004, Oahu, Hawai. **Proceedings...** Oahu, 2004. 13

PANICKER, N. N. Power resource potential of ocean surface waves. In: WAVE AND SALINITY GRADIENT WORKSHOP, 1976, Newark, Delaware, USA. **Proceedings...** Newark, 1976. p. j1–j48. 1

PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T. Variability of southern hemisphere cyclone and anticyclone behavior: Further analysis. **J. Climate**, v. 16, p. 1075–1083, 2003. 29

PIERSON, W.; MOSKOWITZ, L. A proposed spectral form fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, p. 5181–5190, 1964. 8

RIS, R.; HOLTHUIJSEN, H.; BOOJI, N. A third-generation wave model for coastal regions. part II: Verification. **J. Geophys Res.**, v. 104, p. 7667–7681, 1999. 11

ROGERS, W.; WITTMANN, P. **Quantifying the role of wind field accuracy in the U.S. Navy’s global ocean nowcast/forecast system.** [S.l.: s.n.], 2002. 29 p. 12

RUSU, E.; SOARES, C. G. Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the portuguese nearshore. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1501–1510, 2009. 2

SALTER, S. H. Wave power. **Nature**, p. 249:720–4, 1974. 2

SORENSEN, R. **Basic Wave Mechanics:** for coastal and ocean engineers. New York: Wiley-Interscience, 1993. 8

TALJAARD, J. J. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the southern hemisphere during the igy. **J. Appl. Meteorol.**, v. 6, p. 973–987, 1967. 29

TOLMAN, H. L. The numerical model wavewatch: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. **Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering**, Delft University of Technolog., n. 89-2, p. 72, 1989. 12

\_\_\_\_\_. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 22, p. 1095–1111, 1992. 12

\_\_\_\_\_. **User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 2.22. Technical Note.** Washington,DC: U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS,NCEP, 2002. 254 p. 3, 11

\_\_\_\_\_. **User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 3.14. Technical Note.** Washington,DC: U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS,NCEP, 2009. 276 p. 12

TORSETHAUGEN, K. A two peak wave spectral model. In: INTERNATIONAL OFFSHORE MECHANICS AND ARTIC ENGINEERING (OMAE) CONFERENCE, 11., 1993, Glasgow,Escócia,UK. **Proceedings...** EUA ASME, 1993. 33

- TRACY, B. A.; DEVALIERE, E. M.; HANSON, J. L.; NICOLINI, T.; TOLMAN, H. L. Wind sea and swell delineation for numerical wave modeling. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON HINDCASTING AND FORECASTING, 2007, North Shore, Hawaii. **Proceedings...** WMO/IOC/JCOMM, 2007. 38
- VARTDAL, L.; BARSTOW, S. F. **A separation algorithm for wind sea and swell for applications to directional Metocean data buoy.** Trondheim, Norway, 1987. 33
- VINNING, J. **Ocean Wave Energy Conversion.** Madison: University of Wisconsin: [s.n.], 2005. 44 p. Disponível em: <[http://homepages.cae.wisc.edu/~vining/JVining\\_WaveEnergyConversion.pdf](http://homepages.cae.wisc.edu/~vining/JVining_WaveEnergyConversion.pdf)>. 3, 16, 17
- WANDIGROUP. The wam model - a third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1775–1810, 1988. 11, 12
- WATERS, R.; ENGSTROM, J.; ISBERG, J.; LEIJON, M. Wave climate off the swedish west coast. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1600–1606, 2009. 2
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to Wave Analysis and Forecasting.** Geneve, Suisse, 1989. v. 2. 6
- YANG, I. **Wind generated ocean waves.** 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science Ltd, 1999. 288 p. ISBN 0-08-043317-0. 7



## DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ENERGIA POTENCIAL

A energia potencial das ondas é o resultado do deslocamento de massa de uma posição em equilíbrio contra o campo gravitacional. Quando a água está em repouso, a energia potencial é mínima, entretanto, quando ocorre o deslocamento das partículas em equilíbrio, há realização de trabalho, aumentando a energia potencial. A energia potencial de uma onda senoidal por unidade de área superficial, considerando uma pequena coluna de fluido representada na figura 7 abaixo, com massa  $dm$  é:

$$d(E_p) = dm g \bar{z} \quad (\text{A.1})$$

onde  $\bar{z}$  é o centro da gravidade de massa e  $dm$  é a massa diferencial por unidade de largura e  $g$  é a força da gravidade.

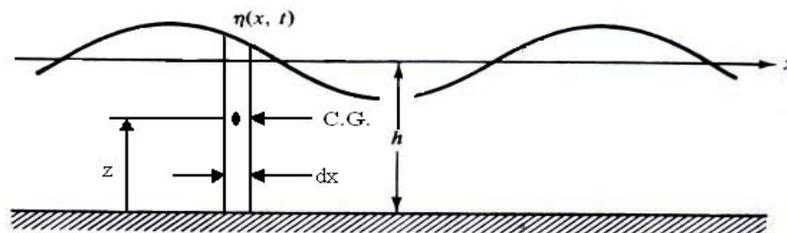


Figura A.1 - Representação de uma pequena coluna de fluido  
Fonte: Adaptado de (DEAN; DALRYMPLE, 1990).

O centro da gravidade de massa  $\bar{z}$  e a massa diferencial por unidade de largura  $dm$  são representados por:

$$\bar{z} = \frac{h + \eta}{2} \quad (\text{A.2})$$

$$dm = \rho(h + \eta)dx \quad (\text{A.3})$$

onde  $h$  é a profundidade local e  $\eta$  a elevação da superfície do mar representada por (DEAN; DALRYMPLE, 1990):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx - \omega t \quad (\text{A.4})$$

A energia potencial sobre um comprimento de onda  $L$  para uma onda progressiva de altura  $H$  é:

$$E_p = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(E_p) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{h + \eta^2}{2} dx$$

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} (h^2 + \eta h + \eta^2) \right] dx$$

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \left[ \int_x^{x+L} \frac{1}{2} h^2 dx + \int_x^{x+L} \eta h dx + \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right] \quad (\text{A.5})$$

Substituindo  $\eta$  em A.5, temos:

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \left[ \int_x^{x+L} \frac{1}{2} h^2 + h \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos^2(kx - \omega t) dx \right]$$

Definindo:

$$\begin{aligned}
 A &= \int_x^{x+L} \frac{1}{2} h^2 \\
 B &= h \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dx \\
 C &= \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos^2(kx - \omega t) dx
 \end{aligned}$$

Desta forma, a equação se resume em:

$$E_p = \frac{\rho g}{L} [A + B + C] \quad (\text{A.6})$$

A seguir, será realizada a integração de cada componente de A.6.

$$\begin{aligned}
 A &= \int_x^{x+L} \frac{1}{2} h^2 = \frac{1}{2} h^2 (x + L) - \frac{1}{2} h^2 (x) \\
 &= \frac{1}{2} h^2 (x + L - x) = \frac{1}{2} h^2 L
 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Integrando o termo B:

$$\begin{aligned}
 B &= h \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dx = \frac{hH}{2} \int_x^{x+L} \cos(kx - \omega t) dx \\
 &= h \frac{hH}{2} \int_{kx - \omega t}^{k(x+L) - \omega t} \cos(u) \frac{du}{k}
 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

onde  $u = kx - \omega t$  e  $dx = \frac{du}{k}$ .

$$\begin{aligned}
B &= \frac{hH}{2k} \int_{kx-\sigma t}^{k(x+L)-\sigma t} \cos(u) du = \\
&= \frac{hH}{2k} [\sin(k(x+L) - \sigma t) - \sin(kx - \sigma t)] \\
&= \frac{hH}{2k} [\sin(kx) - \sigma t + kL) - \sin(kx - \sigma t)] \\
&= \frac{hH}{2k} [\sin(\alpha + kL) - \sin(\alpha)] \tag{A.9}
\end{aligned}$$

onde  $\alpha = kx - \sigma t$ . Lembrando que o número de onda  $k = \frac{2\pi}{L}$ , e substituindo em A.9, obtém-se:

$$B = \frac{hH}{2k} [\sin(\alpha + 2\pi) - \sin(\alpha)] \tag{A.10}$$

Da relação  $\sin(a + b) = \sin(a) \cos(b) + \sin(b) \cos(a)$ , temos que:

$$\begin{aligned}
\sin(\alpha + 2\pi) &= \sin(\alpha) \cos(2\pi) + \sin(2\pi) \cos(\alpha) \\
&= \sin(\alpha) \tag{A.11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{hH}{2k} [\sin(\alpha) - \sin(\alpha)] \\
&= 0 \tag{A.12}
\end{aligned}$$

Integrando o termo C:

$$\begin{aligned}
C &= \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)^2 dx \\
&= \frac{H^2}{8} \int_x^{x+L} \cos^2(kx - \sigma t) dx \\
&= \frac{H^2}{8k} \int_x^{x+L} \cos^2(u) \frac{du}{k} \\
&= \frac{H^2}{8k} \int_{kx-\sigma t}^{k(x+L)-\sigma t} \cos^2(u) du \\
&= \frac{H^2}{8k} \left[ \frac{u}{2} - \frac{1}{4} \sin(2u) \right]_{kx-\sigma t}^{k(x+L)-\sigma t} \\
&= \frac{H^2}{8k} \left[ \frac{1}{2} (k(x+L) - \sigma t - (kx - \sigma t)) - \frac{1}{4} \sin(2k(x+L) - 2\sigma t) \right. \\
&\quad \left. - \sin(2kx - 2\sigma t) \right] \\
&= \frac{H^2}{8k} \left[ \frac{1}{2} ((kx - \sigma t) + kL - (kx - \sigma t)) - \frac{1}{4} \sin(2kx - 2\sigma t + 2kL) \right. \\
&\quad \left. - \sin(2kx - 2\sigma t) \right]
\end{aligned} \tag{A.13}$$

Definindo  $\beta = 2kx - \sigma t$  e  $kL = 2\pi$ , e substituindo em A.13 temos:

$$C = \frac{H^2}{8k} \left[ \frac{kL}{2} - \frac{1}{4} (\sin(\beta + 4\pi) - \sin(\beta)) \right] \tag{A.14}$$

Como  $\sin(\beta + 4\pi) = \sin(\beta) \cos(4\pi) + \sin(4\pi) \cos(\beta) = \sin(\beta)$ , então A.14 torna-se:

$$\begin{aligned}
C &= \frac{H^2}{8k} \left[ \frac{kL}{2} - \frac{1}{4}(\sin(\beta) - \sin(\beta)) \right] \\
&= \frac{H^2}{8k} \left( \frac{kL}{2} \right) \\
&= \frac{H^2 L}{16} \tag{A.15}
\end{aligned}$$

A equação final da energia potencial é o somatório dos termos A, B e C, resultando em:

$$E_p = \frac{\rho g h^2}{2} + 0 + \frac{H^2 L}{16} \tag{A.16}$$

Como a energia potencial é calculada entre a diferença da energia potencial com a presença de onda e a energia potencial com a ausência de onda (DEAN; DALRYMPLE, 1990), o primeiro termo de A.16 (dependente da profundidade) é ignorado, e a equação da energia potencial é representada por:

$$E_p = \frac{H^2 L}{16} \tag{A.17}$$

## DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA

Trabalho ( $W$ ) é o produto de uma força constante pela distância percorrida por uma partícula, sob uma aceleração constante:

$$W = Fd \quad (\text{B.1})$$

Para uma aceleração constante, é possível utilizar as relações:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (\text{B.2})$$

$$x = \frac{v - v_0}{2}t \quad (\text{B.3})$$

onde  $v$  é a velocidade final da partícula,  $v_0$  é a velocidade inicial ( $v_0 = 0$ ). Substituindo as relações B.2 e B.3 em B.1, esta se modifica em:

$$W = Fd = max \quad (\text{B.4})$$

$$W = m \frac{v}{t} \frac{v}{2}t \quad (\text{B.5})$$

$$W = E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{B.6})$$

A energia cinética é o trabalho realizado pela ação de uma força resultante em uma partícula. Associada a uma pequena parcela de fluido de massa  $dm$ , da mesma forma como ilustrada na energia potencial, a energia cinética é representada por:

$$d(E_c) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (\text{B.7})$$

Para encontrar a energia cinética por unidade de área superficial, devemos integrar B.7 sobre uma profundidade e sobre um comprimento de onda:

$$E_c = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (\text{B.8})$$

Da teoria linear das ondas, os componentes  $u$  e  $w$  da velocidade potencial, são representados por (DEAN; DALRYMPLE, 1990):

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (\text{B.9})$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{B.10})$$

Substituindo  $u$  e  $w$  na equação B.8, obtemos:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{\rho}{2L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \left[ \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \right]^2 \\ &+ \left[ \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \right]^2 \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{\rho}{2L} \left( \frac{H\omega}{2} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2(kh)} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \omega t) \\ &+ \sinh^2 k(h+z) + \sin^2(kx - \omega t) dz dx \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Definindo:

$$A = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{H\omega}{2} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2(kh)}$$

$$B = \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx + \omega t) + \sinh^2 k(h+z) + \sin^2(kx - \omega t) dz dx$$

(B.13)

Desta forma, a equação se resume em:

$$E_c = AB \quad (B.14)$$

A seguir, será realizada a integração de cada componente de B.14.

$$\begin{aligned} A &= \frac{\rho}{2L} \left( \frac{H\omega}{2} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2(kh)} \\ &= \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \right)^2 \frac{(gk)^2 \sinh^2(kh)}{k^2 g^2 \cosh^2(kh)} \frac{1}{\sinh^2(kh)} \end{aligned} \quad (B.15)$$

Lembrando que  $\sigma^2 = gk \tanh(kh)$ , B.15 torna-se:

$$A = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \quad (B.16)$$

Resolvendo o termo B:

$$\begin{aligned}
B &= \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta=0} \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx + \omega t) + \sinh^2 k(h+z) + \sin^2(kx - \omega t) dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx + \omega t) + \sinh^2 k(h+z) [1 - \cos^2(kx - \sigma t)] dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx + \omega t) + \sinh^2 k(h+z) \\
&\quad - \sinh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \sigma t) dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 [\cosh^2 k(h+z) - \sinh^2 k(h+z)] \cos^2(kx - \sigma t) \\
&\quad + \sinh^2 k(h+z) dz dx
\end{aligned} \tag{B.17}$$

Lembrando que  $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ , B.17 torna-se:

$$\begin{aligned}
B &= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \cos^2(kx - \sigma t) + \sinh^2 k(h+z) dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 (\cos^2(kx - \sigma t) + \cosh^2 k(h+z) - 1) dz dx
\end{aligned} \tag{B.18}$$

Da relação trigonométrica  $\cos^2 x = \frac{1+\cos(2x)}{2}$  e  $\sin^2 x = \frac{1-\cos(2x)}{2}$ , e aplicando a B.17, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
B &= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \frac{1 + \cos 2(kx - \sigma t)}{2} + \frac{1 + \cosh 2k(h + z) - 2}{2} dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \frac{1}{2} \left[ \cosh 2k(h + z) + \cos 2(kx - \sigma t) \right] dz dx \\
&= \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \frac{1}{2} \cosh(2kh + 2kz) dz dx + \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \frac{1}{2} \cos(2kx - 2\sigma t) dz dx \\
&= \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \int_{-h}^0 \cosh(u) dz dx + \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} z \cos(2kx - 2\sigma t) \right]_{-h}^0 dx \quad (\text{B.19})
\end{aligned}$$

onde  $u = 2kh + 2kz$  e  $dz = \frac{du}{2k}$ .

$$\begin{aligned}
B &= \frac{1}{4k} \int_x^{x+L} \left[ \sinh(2kh + 2Kz) \right]_{-h}^0 du + \int_x^{x+L} 0 - \left( -\frac{h}{2} \cos(2kx - 2\sigma t) \right) dx \\
&= \frac{1}{4k} \int_x^{x+L} \sinh(2kh) - 0 dx + \int_x^{x+L} \frac{h}{2} \cos(2kx - 2\sigma t) dx \\
&= \frac{1}{4k} \left[ \sinh(2kh)x \right]_x^{x+L} + \frac{h}{4k} \left[ \sin(2kx - 2\sigma t) \right]_x^{x+L} \\
&= \frac{1}{4k} [\sinh(2kh)x + L - \sinh(2kh)x] + \frac{h}{4k} [\sin(2kx - 2\sigma t + 2kL) - \sin(2kx - 2\sigma t)] \\
&= \frac{\sinh(2kh)(x + L)}{4k} - \frac{\sinh(2kh)x}{4k} + \frac{h}{4k} [\sin(\beta + 4\pi) - \sin(\beta)] \quad (\text{B.20})
\end{aligned}$$

Definindo  $\beta = 2kx - \sigma t$  e  $kL = 2\pi$ , e substituindo em B.20 temos:

$$\begin{aligned}
B &= \frac{\sinh(2kh)(x+L)}{4k} - \frac{\sinh(2kh)x}{4k} + \frac{h}{4k} [\sin(\beta + 4\pi) - \sin(\beta)] \\
&= \frac{\sinh(2kh)(x+L)}{4k} - \frac{\sinh(2kh)x}{4k} + \frac{h}{4k} [\sin(\beta) \cos(4\pi) + \sin(4\pi) \cos(\beta) - \sin(\beta)] \\
&= \frac{\sinh(2kh)(x+L)}{4k} - \frac{\sinh(2kh)x}{4k} \\
&= \frac{\sinh(2kh)}{4k} (x+L-x) \\
&= \frac{L \sinh(2kh)}{4k} \\
&= \frac{L \sinh 2(kh)}{4k} \\
&= \frac{L 2 \sinh(kh) \cosh(kh)}{4k} \\
&= \frac{L \sinh(kh) \cosh(kh)}{2k}
\end{aligned} \tag{B.21}$$

Desta forma, a equação da energia cinética fica:

$$E_c = AB = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \frac{L \sinh(kh) \cosh(kh)}{2k}$$

$$\begin{aligned}
E_c &= \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh(kh)} \right)^2 \frac{L \sinh(kh) \cosh(kh)}{2k} \\
&= \frac{\rho}{2L} \frac{g^2 H^2 k^2}{4\sigma^2} \frac{1}{\cosh^2(kh)} \frac{L \sinh(kh) \cosh(kh)}{2k} \\
&= \frac{\rho}{2} \frac{g^2 H^2 k}{4gk \tanh(kh)} \frac{1}{\cosh^2(kh)} \frac{\sinh(kh) \cosh(kh)}{2} \\
&= \frac{\rho g H^2}{16} \frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)} \frac{1}{\cosh^2(kh)} \sinh(kh) \cosh(kh) \\
&= \frac{\rho g H^2}{16} \frac{\cosh^2(kh)}{\cosh^2(kh)} \\
&= \frac{\rho g H^2}{16} \tag{B.22}
\end{aligned}$$



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.