



COPPE/UFRJ

ANÁLISE DOS EXTREMOS DE ONDA NO RIO DE JANEIRO ASSOCIADOS
A CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

Ricardo Martins Campos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente
Ribeiro
Ricardo de Camargo

Rio de Janeiro
Março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANÁLISE DOS EXTREMOS DE ONDA NO RIO DE JANEIRO ASSOCIADOS
A CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

Ricardo Martins Campos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Ricardo de Camargo, D.Sc.

Dr. José Antônio Moreira Lima, Ph.D.

Profa. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.

Dr. Rogério Neder Candella, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

Campos, Ricardo Martins

Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul/Ricardo Martins Campos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXVIII, 241 p. 29,7cm.

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Ricardo de Camargo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 189 – 194.

1. Análise de Extremos de Onda. 2. Geração de Ondas por Ciclones. 3. Modelagem de Ondas Extremas. I. Parente Ribeiro, Carlos Eduardo *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Ao mar ...

Agradecimentos

Inúmeros são os agradecimentos a todos os que contribuíram com este trabalho. Sem cada um deles nada teria sido feito. Faço questão de agradecer especialmente:

À minha família e a Deus.

Aos meus orientadores, Dr. Carlos Eduardo Parente Ribeiro e Dr. Ricardo de Camargo, por toda orientação científica e pessoal, grande amizade e exemplo de amor à ciência.

Ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

A todos os professores da Engenharia Oceânica da COPPE.

À equipe do CENPES/PETROBRAS e IEAPM/Marinha do Brasil, pela atenção, ajuda e fornecimento dos dados. Agradeço principalmente ao Eric Oliveira Ribeiro, ao Dr. José Antônio Moreira Lima e ao Dr. Rogério Neder Candella.

Aos cientistas do projeto Ciclones e ao Dr. Isimar de Azevedo Santos.

Ao Dr. Carlos Guedes Soares do Instituto Superior Técnico de Lisboa, pelo incentivo e encaminhamento de artigos com fundamental importância para a metodologia.

Aos meus amigos da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE, em especial ao Saulo e Fred, que muito me ajudaram com os entraves da modelagem, e à Débora Machado, Felipe Leite, Daniel Alvez, Guilherme Mill, João Marcos, Nathalie Gomes e muitos outros.

Aos funcionários da COPPE, principalmente à Marise Cardoso e Glace Farias.

À equipe do laboratório MASTER e IAG-USP, com destaque ao Wladimir José de Santis Junior, que colaborou bastante com o programa de identificação de ciclones.

À Marília da Engenharia Civil da COPPE, por me ajudar com a técnica POT.

À comunidade Linux, a qual unida tem permitido o crescimento de uma excelente

plataforma operacional, fundamental para este trabalho.

A todos os meus amigos de Santos, São Paulo e Rio de Janeiro.

Aos surfistas do Posto 2 em Santos. Em especial à turma do bodyboarding e ao professor Irapajy da Silva Caetano, que vem observando e registrando as ondas desde 1995 até hoje de manhã.

Aos meus padrinhos Aline e Victor, e a todos do Ministério Universidades Renovadas e Comunidade Bom Pastor.

Aos meus companheiros de música e banda.

Aos meus parceiros de Alagoas: Daniel, Ednaldo e Carlos.

À Vanessa, pelo grande carinho, atenção e amizade.

Aos gênios do jazz, por embalarem minhas maratonas de trabalho, fazendo me apaixonar profundamente pelas ondas sonoras.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DOS EXTREMOS DE ONDA NO RIO DE JANEIRO ASSOCIADOS
A CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

Ricardo Martins Campos

Março/2009

Orientadores: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Ricardo de Camargo

Programa: Engenharia Oceânica

As ondas na superfície do mar mais energéticas que atingem a Baía de Campos e região ao largo do estado do Rio de Janeiro são aquelas oriundas do quadrante sul, formadas por sistemas meteorológicos extratropicais. Este trabalho estuda os eventos extremos de onda na região gerados por ciclones e anticiclones, utilizando duas abordagens. A primeira, de análise estatística de extremos e aplicação da técnica Peaks Over Threshold (POT). A segunda, de estudo das características meteorológicas e evolução sinótica. São utilizadas medições do ondógrafo entre 1991 e 1995 e vinte anos de simulação do modelo WAVEWATCH III entre 1986 e 2005, forçado com o vento da reanálise II do NCEP/NCAR. Como resultado, as maiores ondulações que atingem a Baía de Campos são oriundas de sudoeste, com períodos de pico acima de 11 segundos, geradas por ciclones, incidindo prioritariamente no inverno e outono. As características mais importantes dos sistemas são o posicionamento e intensidade. A análise de extremos de altura significativa dos dados do ondógrafo forneceu valores de retorno para 50 e 100 anos, de respectivamente 8,77 e 9,54 metros; porém, com grande incerteza devido à pequena duração da série. A metodologia aplicada ao WAVEWATCH conseguiu captar a relação entre os extremos, apesar das limitações encontradas no hindcast. A aplicação da POT a sistemas sinóticos específicos mostrou favorecer a estimativa dos extremos. Os gerados por ciclones resultaram em $Hs_{50}=8,72$ e $Hs_{100}=9,34$ metros, e por anticiclones $Hs_{50}=6,69$ e $Hs_{100}=7,01$ metros.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXTREME WAVE ANALYSIS IN RIO DE JANEIRO ASSOCIATED WITH
EXTRA-TROPICAL CYCLONES IN THE SOUTHERN ATLANTIC

Ricardo Martins Campos

March/2009

Advisors: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Ricardo de Camargo

Department: Ocean Engineering

The most energetic ocean waves that reach the Campos Basis and the state of Rio de Janeiro are generated from extra-tropical weather systems. This study deals the extreme waves formed by cyclones and anticyclones, using two approaches. The first one is the statistical extreme analysis applying the Peaks Over Threshold (POT) technique. The second one is the study of metocean features and synoptic evolution. The method has used directional wave measurements from 1991 to 1995 and twenty years of WAVEWATCH III simulation from 1986 to 2005, forced by NCEP/NCAR reanalysis surface winds. The greatest swells hitting the Campos Basin have southwest direction, peak periods over than 11 seconds, generated by cyclones, occurring mainly on winter and autumn. The most important features of the systems are the placement (position and tracks) and intensity. The extreme buoy data analysis of significant height has resulted in return values for 50 and 100 year respectively 8.77 and 9.54 meters, but with considerable uncertainty due to the short duration of data collection. Despite the limitations of the hindcast, the methodology applied to the wave modeling results was able to capture the relationship between the extremes. The application of POT to the specific synoptic systems has improved the extreme estimates. The return values of waves generated by cyclones are $H_{s50}=8.72$ and $H_{s100}=9.34$ meters, and by anticyclones $H_{s50}=6.69$ and $H_{s100}=7.01$ meters.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xxii
Lista de Símbolos	xxv
1 Introdução	1
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Teoria linear	5
2.2 Caracterização vaga / marulho	6
2.3 Processos de geração - formulações espectrais	7
2.4 O clima de ondas na Bacia de Campos	12
2.5 Caracterização meteorológica do Atlântico Sul	14
2.5.1 Principais sistemas sobre o Atlântico Sul	14
2.5.2 Breve apanhado sobre ciclogênese e climatologia de ciclones no Atlântico Sul	15
2.5.3 Reanálise II do NCEP/NCAR	21
3 Detecção e Parâmetros dos Ciclones	23
3.1 Detecção dos eventos	24
3.2 Cálculo dos parâmetros adicionais de análise	28
4 Modelagem das Ondas	30
4.1 Introdução à modelagem de ondas	30
4.2 Simulação da agitação marítima - <i>Hindcast</i>	31
5 Avaliação dos Resultados do Modelo	35
5.1 Estatística básica empregada	35
5.2 Período e base de dados	36
5.3 Seleção dos eventos	37

5.4	Avaliação inicial - Hs, Tp, Dp	38
5.4.1	ww3Xbóia	38
5.4.2	bóiaXww3	42
5.4.3	Comentários e discussões	46
5.5	Divisão do espectro em faixas de frequências	50
5.5.1	ww3Xbóia	52
5.5.2	bóiaXww3	54
5.5.3	Comentários e discussões	56
5.6	PLEDSWW3	56
5.7	Casos selecionados	59
5.7.1	Caso 1 - Agosto de 1992 - Subestimação do modelo	60
5.7.2	Caso 2 - Março de 1994 - Superestimação do modelo	60
5.7.3	Caso 3 - Setembro de 1992 e Junho de 1994 - Coerência relativa entre modelo e bóia	62
5.7.4	Comentários e discussões	64
6	Análise Geral dos Eventos Extremos	65
6.1	Introdução	65
6.2	Teoria da técnica POT	66
6.3	Metodologia	71
6.4	Análise dos dados da bóia - 1991 a 1995	74
6.4.1	Conhecendo os dados	74
6.4.2	Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD	75
6.4.3	Fixação do limiar	78
6.4.4	Ajuste da GPD aos valores acima do limiar	79
6.4.5	Valores extremos	81
6.4.6	Comentários e discussões	82
6.5	Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W 23°S - 1991 a 1995 (controle)	83
6.5.1	Conhecendo os dados	83
6.5.2	Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD	84
6.5.3	Fixação do limiar	87
6.5.4	Ajuste da GPD aos valores acima do limiar	89
6.5.5	Valores extremos	90
6.5.6	Comentários e discussões	91

6.6	Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W 23°S - 1986 a 2005	92
6.6.1	Conhecendo os dados	92
6.6.2	Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD	93
6.6.3	Fixação do limiar	97
6.6.4	Ajuste da GPD aos valores acima do limiar	98
6.6.5	Valores extremos	99
6.6.6	Comentários e discussões	101
6.7	Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W 25°S - 1986 a 2005	103
6.7.1	Conhecendo os dados	103
6.7.2	Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD	105
6.7.3	Fixação do limiar	108
6.7.4	Ajuste da GPD aos valores acima do limiar	110
6.7.5	Valores extremos	111
6.7.6	Comentários e discussões	113
7	Meteorologia dos Extremos de Onda	115
7.1	Definição do sistema meteorológico gerador da ondulação	116
7.2	Eventos iid selecionados da bóia	117
7.3	Geração e evolução dos casos extremos	120
7.3.1	Características das ondulações	120
7.3.2	Análise dos processos de geração - extremos registrados pela bóia	125
7.3.3	Análise dos processos de geração - extremos resultantes do WAVEWATCH	149
7.3.4	Comentários e discussões	154
7.3.5	Relação entre extremos de onda e fenômenos meteorológicos de baixa frequência	157
8	Análise de Extremos - Ciclones e Anticiclones	162
8.1	Extremos de onda gerados por ciclones	162
8.1.1	Registrados pela bóia	162
8.1.2	Resultado da simulação do WAVEWATCH	163
8.2	Extremos de ondas gerados por anticiclones	169
8.2.1	Registrados pela bóia	169
8.2.2	Resultado da simulação do WAVEWATCH	170

8.3	Comentários e discussões	176
9	Conclusões	182
	Referências Bibliográficas	189
	Apêndices	195
A	Código da subrotina de detecção dos ciclones	196
B	Descrição dos modelos e a física do WAVEWATCH	197
B.1	Descrição simplificada dos modelos	197
B.2	O modelo WAVEWATCH III	201
B.2.1	Propagação	202
B.2.2	Termos Fonte	202
B.2.3	Descrição numérica	206
C	O evento do dia 30/05/1997	208
D	Extremos registrados pelo WAVEWATCH	210

Lista de Figuras

2.1	Gráficos representativos do crescimento de (a) Hs e (b) Tp, com o vento para mares completamente desenvolvidos. Modelo P&M.	10
2.2	Gráficos representativos do crescimento de (a) Hs e (b) Tp, com o vento e extensão da pista, formulação JONSWAP. As retas horizontais, após os pontos indicados, representam o desenvolvimento completo do mar (P&M).	10
2.3	Apresentação de Hs e Tp para a formulação do JONSWAP. (a) Relação entre o vento, extensão da pista e duração. Valores com ordenada acima das curvas representam mares limitados por pista, enquanto abaixo limitado por duração. (b) e (c) são respectivamente Hs e Tp limitados por pista. (d) e (e) são Hs e Tp limitados pela duração.	11
2.4	Zonas preferenciais de ciclogênese: (a) Adaptação de GAN & RAO (1991). (b) Resultado de REBOITA (2008) para ciclones menos intensos. (c) Resultado de REBOITA (2008) para ciclones mais intensos.	17
3.1	Representação dos critérios de seleção do programa. Em azul (B) o parâmetro borda, em vermelho (c) o centro, enquanto a grade em preto mostra os pontos usados para a média do vento. O campo colorido ao fundo é a pressão em superfície (em hPa) exemplificando um centro de baixa pressão.	25
3.2	Ajuste das funções para o gradiente de pressão (a), pressão no centro (b) e velocidade média do vento (c) em função da latitude.	27
3.3	Figura representativa dos cálculos dos parâmetros explicados. O círculo vermelho (c) corresponde ao centro do ciclone detectado. Os círculos coloridos são as tríades numeradas (pontos de grade de pressão em superfície) e os retângulos demonstram as áreas dos pontos usados para os cálculos do vento médio relativo à cada tamanho. O campo colorido ao fundo é a pressão em superfície (em hPa) exemplificando um centro de baixa pressão.	29
4.1	Batimetria usada para a simulação. O campo colorido representa a profundidade (-1) em metros.	34
4.2	Posição dos pontos de saída do WAVEWATCH e da bóia. Fonte: Google Maps.	34
5.1	Comparação dos eventos selecionados da série de altura significativa do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.	40

5.2	Comparação dos eventos selecionados da série de direção de pico do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.	40
5.3	Comparação dos eventos selecionados da série de período de pico do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.	41
5.4	Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de altura significativa do modelo. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.	44
5.5	Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de direção de pico do modelo. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos selecionados.	44
5.6	Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de período de pico. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos selecionados.	45
5.7	Exemplo de espectro direcional ao largo do Rio de Janeiro. No eixo das abcissas a frequência em Hz e na ordenada a direção em graus. O campo colorido apresenta a variância (energia).	45
5.8	Histograma da frequência relativa do erro do modelo. Figura extraída de ROCHA <i>et al.</i> (2004).	49
5.9	Avaliação do viés entre bóia e modelo em função da direção para o procedimento bóiaXww3. (a) Diferenças absolutas versus Dp. (b) Diferenças normalizadas versus Dp.	50
5.10	Avaliação do viés entre bóia e modelo em função da direção para o procedimento ww3XBóia. (a) Diferenças absolutas versus Dp. (b) Diferenças normalizadas versus Dp.	50
5.11	Comparação dos eventos selecionados da série de altura significativa do modelo com os valores concomitantes da bóia, por faixa de frequência. Diagramas de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (a) Faixa 1, (b) Faixa 2, (c) Faixa 3, (d) Faixa 4, (e) Faixa 5.	53
5.12	Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de altura significativa do modelo, por faixa de frequência. Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (a) Faixa 1, (b) Faixa 2, (c) Faixa 3, (d) Faixa 4, (e) Faixa 5.	55
5.13	Exemplo da PLEDS aplicada aos resultados do modelo em maio de 2001. (a) Plotagem utilizando a energia como entrada e (b) Altura significativa como entrada.	58
5.14	Ciclones detectados no mês de maio de 2005. A ondulação gerada por eles pode ser observada na figura 5.13.	58
5.15	Exemplo de ferramenta de análise para a ocorrência de grandes ondulações do quadrante sul, para maio de 1997. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) PLEDSWW3	59
5.16	Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para agosto de 1992.	61
5.17	Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para março de 1994.	61
5.18	Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para setembro de 1992.	63
5.19	Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para junho de 1994.	63

6.1	Apresentação dos dados da bóia. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.	74
6.2	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os dados da bóia - 1991 a 1995. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	76
6.3	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os dados da bóia selecionados. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.	76
6.4	Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os dados da bóia selecionados. Diferentes métodos empregados: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).	77
6.5	Comparação entre os estimadores para os dados da bóia - 1991 a 1995. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.	77
6.6	Variância dos parâmetros em função do limiar para os dados da bóia - 1991 a 1995. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	78
6.7	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os dados da bóia - 1991 a 1995. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	79
6.8	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Dados da bóia - 1991 a 1995.	79
6.9	Apresentação dos resultados do ajuste da GPD aos dados da bóia - 1991 a 1995. Comparação GPD versus empírico, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,572 m.	80
6.10	Resultado dos valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. A linha tracejada indica o intervalo de confiança de 95%. Dados da bóia - 1991 a 1995.	81
6.11	Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.	83
6.12	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	85
6.13	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.	85
6.14	Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).	86
6.15	Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.	86
6.16	Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	87
6.17	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	88
6.18	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.	88

6.19	Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,572 m.	89
6.20	Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.	90
6.21	Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.	93
6.22	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	94
6.23	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.	95
6.24	Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β . . .	95
6.25	Varição do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).	96
6.26	Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.	96
6.27	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	97
6.28	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	98
6.29	Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 3,775 m.	99
6.30	Número de eventos em cada ano para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	100
6.31	Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	101
6.32	Comparação entre a análise de extremos da bóia e do WAVEWATCH. Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos.	102
6.33	Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.	104
6.34	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	106
6.35	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Distribuição em ordem crescente da série (b) Média dos excessos acima do limiar.	106

6.36	Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β . . .	107
6.37	Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, -) e ML (azul, ..)	107
6.38	Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.	108
6.39	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	109
6.40	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.	110
6.41	Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 3,510 m.	111
6.42	Número de eventos em cada ano para os resultados do modelo no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.	112
6.43	Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.	113
6.44	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Foco nos limiares mais altos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.	114
7.1	Demonstração dos casos iid selecionados quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) Dp e Hs, (b) Tp e Hs.	119
7.2	Demonstração dos eventos extremos da bóia quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) Dp e Hs, (b) Tp e Hs.	121
7.3	Demonstração dos eventos extremos do WAVEWATCH quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) Dp e Hs, (b) Tp e Hs.	125
7.4	Caso 1, máximo dia 21/04/1991. PLEDSWW3 do mês correspondente.	128
7.5	Caso 1, máximo dia 21/04/1991. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	129
7.6	Caso 2, máximo dia 21/05/1992. PLEDSWW3 do mês correspondente.	130
7.7	Caso 2, máximo dia 21/05/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	131
7.8	Caso 3, máximo dia 12/06/1992. PLEDS do mês correspondente.	135
7.9	Caso 3, dia 12/06/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	136
7.10	Caso 4, máximo dia 25/08/1992. PLEDS do mês correspondente.	137
7.11	Caso 4, máximo dia 25/08/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	138
7.12	Caso 5, máximo dia 27/06/1994. PLEDS do mês correspondente.	139
7.13	Caso 5, máximo dia 27/06/1994. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	140

7.14	Caso 6, máximo dia 10/07/1994. PLEDS do mês correspondente.	143
7.15	Caso 6, máximo dia 10/07/1994. (a) (b) Trajetória dos ciclones, duração, vento máximo e pressão no centro. (c) (d) (e) Pressão e vento em superfície.	144
7.16	Caso 7, máximo dia 20/11/1994. PLEDS do mês correspondente.	145
7.17	Caso 7, máximo dia 20/11/1994. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.	146
7.18	Plotagem conjunta das trajetórias dos sete ciclones que geraram os eventos extremos de onda medidos pela bóia.	148
7.19	Plotagem conjunta das trajetórias dos ciclones que geraram os eventos extremos de onda simulados pelo WAVEWATCH.	154
7.20	Plotagem conjunta das trajetórias que geraram os eventos extremos de onda resultantes da simulação do WAVEWATCH. (a) 10 ciclones no outono, (b) 7 ciclones no inverno.	154
7.21	Figura ilustrativa do esquema de propagação típica dos ciclones (C) e anticiclones (A). O pontilhado destaca a pista de geração. (a) Caso de ciclone mais ao norte, em agosto de 1992. (b) Ciclone ao sul, em maio de 1992.	156
7.22	Comparação entre os índices e as séries. (a) Relação entre AAO e o número de ondulações iid geradas por ciclones. (b) Relação entre AAO e a frequência de ondas extremas geradas por ciclones. (c) Relação entre PDO e a ocorrência de extremos de onda geradas por ciclones.	160
7.23	Comparação entre os índices e as máximas alturas significativas anuais. (a) Máximo Hs geral e AAO. (b) Caso relacionado a ciclone e PDO.	161
8.1	Análise e determinação do limiar. (a) Número de excessos acima do limiar em função de u , (b) Extremos em ordem crescente, (c) Média dos excessos acima do limiar.	163
8.2	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	164
8.3	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.	165
8.4	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	167
8.5	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, para ciclones.	167
8.6	Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,237 m.	168
8.7	Valores extremos gerados por ciclones para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	169
8.8	Análise da determinação do limiar. (a) Número de excessos acima do limiar em função de u , (b) Extremos em ordem crescente e (c) Média dos excessos acima do limiar.	170

8.9	Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.	171
8.10	Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.	172
8.11	Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β	172
8.12	Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, para anticiclones.	173
8.13	Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente a equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,237 m.	175
8.14	Valores extremos gerados por anticiclones para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	176
8.15	Resultados finais. Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Apresentação conjunta dos resultados.	177
8.16	Diferença bóia - WAVEWATCH para Hs em função do limiar, em casos de ciclones e anticiclones.	179
8.17	Valores extremos corrigidos para períodos de retorno até 100 anos. Apresentação conjunta dos resultados.	181
C.1	PLEDS apresentando as ondas geradas pelo ciclone ocorrido entre os dias 28/05 e 02/06 de 1997. Em (a) o foco é no final do mês e em (b) nos primeiros dias.	208
C.2	Evolução dos campos de pressão e vento relativo ao ciclone que gerou a grande ondulação dos dias 28 de maio a 2 de abril de 1997.	209
D.1	Caso 1, máximo dia 04/08/1986. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	211
D.2	Caso 2, máximo dia 23/05/1987. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	212
D.3	Caso 3, máximo dia 13/11/1987. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	213
D.4	Caso 4, máximo dia 27/08/1988. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	214
D.5	Caso 5, máximo dia 14/10/1988. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	215
D.6	Caso 6, máximo dia 07/05/1989. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	216
D.7	Caso 7, máximo dia 20/05/1990. (a) PLEDSSW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	217

D.8	Caso 8, máximo dia 12/06/1992. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	218
D.9	Caso 9, máximo dia 21/07/1992. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	219
D.10	Caso 10, máximo dia 25/05/1993. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	220
D.11	Caso 11, máximo dia 09/03/1994. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	221
D.12	Caso 12, máximo dia 27/06/1994. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	222
D.13	Caso 13, máximo dia 10/07/1994. PLEDSWW3 do mês correspondente.	223
D.14	Caso 13, máximo dia 10/07/1994. Ciclones geradores da grande ondulação identificada. (a) e (b) trajetórias dos ciclones. (c), (d) e (e) campos de vento e pressão em superfície.. . . .	224
D.15	Caso 14, máximo dia 24/03/1996. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	225
D.16	Caso 15, máximo dia 03/05/1996. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	226
D.17	Caso 16, máximo dia 30/05/1997. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente (destaque para outra grande ondulação dia 24). (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	227
D.18	Caso 17, máximo dia 22/10/1997. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	228
D.19	Caso 18, máximo dia 31/05/1998. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	229
D.20	Caso 19, máximo dia 14/11/1998. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	230
D.21	Caso 20, máximo dia 31/05/1999. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	231
D.22	Caso 21, máximo dia 13/07/1999. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	232
D.23	Caso 22, máximo dia 18/07/2000. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	233
D.24	Caso 23, máximo dia 01/03/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.	234
D.25	Caso 24, máximo dia 07/05/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	235
D.26	Caso 25, máximo dia 19/05/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	236
D.27	Caso 26, máximo dia 22/06/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	237
D.28	Caso 27, máximo dia 26/05/2003. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	238
D.29	Caso 28, máximo dia 28/05/2004. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.	239

D.30	Caso 29, máximo dia 04/12/2004. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c)	
	Campos de vento e pressão em superfície.	240
D.31	Caso 30, máximo dia 31/01/2005. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c)	
	Campos de vento e pressão em superfície.	241

Lista de Tabelas

2.1	Resultados de ROCHA <i>et al.</i> (2004) para avaliação do vento da reanálise do NCEP/NCAR gerador de ondas significativas acima e abaixo de cinco metros. EM= Erro Médio, EMQ= Erro Médio Quadrático, CC=Coeficiente de Correlação.	22
3.1	Coeficientes da função de segundo grau $ax^2 + bx + c$ ajustada para a pressão no centro, gradiente de pressão e vento médio em cada latitude.	27
5.1	Valores de JT e $Dpmin$	37
5.2	Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação ww3Xbóia.	42
5.3	Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação bóiaXww3.	46
5.4	Resultados de ROCHA <i>et al.</i> (2004) para avaliação do WAVEWATCH III em ondas significativas acima e abaixo de 5 m. EM= Erro Médio, EMQ= Erro Médio Quadrático, CC=Coeficiente de Correlação.	48
5.5	Limiares das faixas de frequência (e período): divisão do espectro do WAVEWATCH e da bóia.	51
5.6	Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação ww3Xbóia por faixa de frequência.	52
5.7	Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação bóiaXww3 por faixa de frequência.	54
6.1	Parâmetros estatísticos básicos dos dados da altura significativa da bóia.	74
6.2	Ajuste da GPD aos dados (bóia) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	78
6.3	Resultado dos valores extremos rv para aplicação da POT aos dados da bóia. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	81
6.4	Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.	84
6.5	Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	88
6.6	Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	90
6.7	Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.	92

6.8	Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	98
6.9	Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	101
6.10	Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.	105
6.11	Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	109
6.12	Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	112
7.1	CrITÉRIOS de entrada para o programa de identificação dos ciclones.	116
7.2	Eventos iid de onda registrados pela bóia. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone (anticicl) ou cavado).	118
7.3	Eventos extremos registrados pela bóia. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone ou cavado).	120
7.4	Eventos extremos resultantes da simulação do WAVEWATCH. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone ou cavado).	123
7.5	Divisão sazonal dos extremos de onda associados a ciclones e anticiclones. $\%_{est}$ é a porcentagem associada à estação e $\%_{total}$ a porcentagem no total. A média de H_s , D_p e T_p é representada respectivamente por \bar{H}_s , \bar{D}_p e \bar{T}_p	124
7.6	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 1.	129
7.7	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 2.	131
7.8	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 3.	136
7.9	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 4.	138
7.10	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 5.	140
7.11	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 6.	144
7.12	Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 7.	146
7.13	Correlação entre os índices MEI, PDO, AAO e as séries de eventos iid e extremos.	158
7.14	Correlação entre os índices e as alturas significativas máximas por ano.	161
8.1	Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado, gerados por ciclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	166
8.2	Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	168
8.3	Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (<i>a.l.</i>) fixado, gerados por anticiclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β	173

8.4	Valores extremos r_v para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	175
8.5	Resultados finais. Valores extremos r_v da aplicação da POT. Apresentação conjunta dos resultados. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	178
8.6	Diferença (bóia - WAVEWATCH) entre as alturas significativas geradas por ciclones e anticiclones. Como a POT não foi aplicada à série do ondógrafo em anticiclones, não é possível definir os extremos nessa situação.	179
8.7	Valores extremos r_v da aplicação da POT corrigidos, apresentação conjunta dos resultados. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.	181
B.1	Importância relativa dos mecanismos físicos nos diferentes domínios enumerados anteriormente, segundo YOUNG (1999): ⊗ desprezível; ○ menor importância; ● significativa; ★ dominante.	198
B.3	Definição das classes de modelos baseados na representação do termo fonte (YOUNG, 1999 e BRANCO, 2004).	201

Lista de Símbolos

ROMANOS

A	termo de ação da onda
<i>Ang</i>	ângulo entre o ciclone e o Rio de Janeiro
B	série de altura significativa da bóia
<i>bcmin</i>	gradiente de pressão mínimo
<i>borda</i>	média da pressão adjacente ao centro do ciclone
busca	distância máxima (°) percorrida pelo ciclone em 6 horas
<i>C</i>	velocidade de propagação da onda
<i>C_g</i>	velocidade de grupo
<i>C_λ</i>	coeficiente de arrasto do vento
<i>coefang</i>	coeficiente angular da reta
<i>coeflin</i>	coeficiente linear da reta
<i>cov</i>	covariância
corr	correlação entre GPD e empírico
D	duração no cap. 2 e distância ao RJ no cap. 3
Dp	direção de pico
d	profundidade ou espessura da lâmina d'água
E	espectro
En	energia total das ondas
<i>F</i>	espectro direcional no cap. 4
F	função de distribuição dos eventos iid
<i>f</i>	frequência
<i>f_p</i>	frequência de pico
<i>f_{hf}</i>	frequência de corte
G	função de distribuição generalizada de Pareto
Gp	gradiente de pressão
g	gravidade
H	altura da onda

H_s	altura significativa ($4,01\sqrt{m_0}$)
H_{s50}	valor de retorno de H_s para 50 anos
H_{s100}	valor de retorno de H_s para 100 anos
h	escala de mistura
iid	estatisticamente independente e identicamente distribuído
k	número de onda
k_{hf}	número de onda de corte
L	comprimento de onda
m_0	momento de ordem zero ou área do espectro
N	espectro de densidade de ação das ondas
N_u	número de excessos acima do limiar
$\%N_u$	porcentagem do número de excessos acima do limiar
n	número de pontos de uma série iid
n_{anos}	número de anos
n_e	número de eventos esperado em pr anos
n_{meses}	número de meses
P_c	pressão no centro
p_{max}	pressão máxima no centro do ciclone para a detecção
pr	período de retorno
R	taxa de limitação por pista
R_n	razão entre velocidade de grupo e velocidade de fase
RG1 RG2 e RG3	regiões de máxima ciclogênese da figura 2.4, de REBOITA (2008)
R_T	raio de Terra
res	resolução em graus
rv	valor extremo ou valor de retorno, resultado da técnica POT
S_{bot}	termo de interação com o fundo
S_{ds}	termo de dissipação
S_{in}	termo de interação onda vento, fonte de energia.
S_{nl}	termo não linear
S_{tot}	energia total do espectro do WAVEWATCH, fonte e sumidouro
T	período
T_p	período de pico
Tipo	parâmetro do formato e tamanho do ciclone
t	instante de tempo
tempomin	duração mínima em horas para detectar o ciclone
U_{alt}	intensidade do vento a determinada altura alt

u	limiar (<i>threshold</i>) para determinar a cauda da GPD
u_{10}	componente zonal do vento a 10 metros
$V_{\text{máx}}$	máxima intensidade do vento na pista
V_{med}	intensidade média do vento na pista
V_{min}	vento mínimo na pista para detectar o ciclone
v_{10}	componente meridional do vento a 10 metros
W	série de H_s do WAVEWATCH
X	comprimento da pista em km
X_{σ}	fator de incremento da grade de frequências do WAVEWATCH
x	deslocamento das abcissas ou variação longitudinal
y	deslocamento das ordenadas ou variação latitudinal

GREGOS

α_n	nível de energia adimensional de Phillips
β	parâmetro de escala da GPD
Γ	constante empírica de interação com o fundo
γ	termo de picosidade do espectro JONSWAP
Δt_g	passo de tempo global
$\Delta t_{p,m}$	passo de tempo de propagação espacial
δ	desvio padrão
ζ_{10}	vorticidade relativa a 10 metros
θ	direção das ondas
λ	longitude
μ	média
ξ	parâmetro de forma da GPD
ρ	parâmetro adimensional de interação onda-vento
ς	função empírica do estágio de desenvolvimento do mar
ϕ	latitude
Ψ_{nl}	constante do método DIA
ω	frequência angular
ω_a	frequência adimensional da componente espectral

SIGLAS E ABREVIATURAS

AAO	Oscilação Antártica (índice)
AAS	Anticiclone do Atlântico Sul
AE	Anticiclone Extratropical
CC	Coefficiente de Correlação
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CE	Ciclones Extratropicais
DAAT	<i>Directional Analysis with Adaptative Techniques</i>
EM	Erro Médio
EMQ	Erro Médio Quadrático
EN	El Niño
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GPD	<i>Generalized Pareto Distribution</i>
GRADE1	Região entre 85° e 5° oeste, 75° e 10° sul
GRADE2	Região entre 70° oeste e 20° leste, 70° e 15° sul
IE	Índice de Espalhamento
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LN	La Niña
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
ML	<i>Maximum Likelihood Method</i>
MOM	<i>Moment Method</i>
N	Direção Norte
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NE	Direção Nordeste
NW	Direção Noroeste
PDO	Oscilação Decadal do Pacífico (índice)
P&M	Pierson e Moskowitz
PKD	<i>Pickands' Estimator</i>
PLEDS	<i>Plotting the Evolution of the Directional Spectrum</i>
POT	<i>Peaks Over Threshold</i>
PWM	<i>Probability Weighted Moments</i>
S	Direção Sul
SE	Direção Sudeste
SW	Direção Sudoeste
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Capítulo 1

Introdução

Os fenômenos ondulatórios estão entre os mais encontrados no planeta. A banda dominante do espectro de energia no oceano está associada às ondas superficiais de gravidade¹, as quais são geradas pelo vento e possuem períodos entre um e trinta segundos. As ondas representam a principal e mais constante forma de transporte de energia no mar, exercendo papel preponderante na determinação das feições litorâneas e constituindo-se na mais efetiva ameaça às obras costeiras, à segurança da navegação e às operações navais (CANDELLA, 1997).

Todos os anos o litoral sudeste brasileiro é surpreendido com grandes ondulações vindas do sul, geralmente acompanhadas de ventos fortes e péssimas condições do tempo. Algumas vezes, causam diversos prejuízos financeiros e colocam em risco a vida das pessoas. Existem vários registros relacionados à tais problemas, destacando as seguintes datas (fonte: <http://www.ondas.ufrj.br/>):

- 26/08/1992: Morte de um pescador no “Caminho dos Pescadores” no Leme;
- 01/06/1997: Destruição da ciclovía do Flamengo e do calçadão de São Conrado. Prejuízos também na Marina da Glória;
- 25/09/1999: Danos ao calçadão de Copacabana com depósito de areia nas pistas;
- 24/04/2008: Acidente com grandes ondas atingindo a barca Rio-Niterói, deixando vinte feridos.

Outra atividade extremamente vulnerável a situações extremas de onda é a exploração de gás e petróleo em águas profundas. A Bacia de Campos é a maior bacia petrolífera do país, situada a nordeste do estado do Rio de Janeiro. Na região, estão presentes estruturas

¹A partir daqui serão chamadas somente de “ondas”.

como plataformas de petróleo, navios tipo FPSO, entre outras embarcações responsáveis pelas operações. Grande parte das atividades é extremamente dependente das condições do mar.

Nesse contexto, o estudo das condições meteoceanográficas ao largo do Rio de Janeiro tem crescido e ganhado importância. Trabalhos como SOUZA (1988), SEXAS (1997), PARENTE (1999) e PINHO (2003) forneceram enormes contribuições para o conhecimento do clima de ondas na região, o qual se apresenta bem detalhado nos dias atuais. Mais recentemente, surgiu a preocupação com a análise de extremos e estimação das futuras condições severas. CARDOSO JÚNIOR (2004) abordou os extremos de BOM TEMPO² e ondas de nordeste, enquanto SILVA (2008) os casos de BOM TEMPO com marulhos de sul. Estatisticamente os trabalhos selecionam os respectivos eventos de interesse, ajustam funções específicas à cauda da distribuição, extrapolando-as para longos períodos. Tal procedimento permite estimar os valores de retorno da altura significativa, por exemplo, em cinquenta ou cem anos. Os resultados são importantes para a engenharia costeira e oceanográfica em geral, com aplicação para projetos de estruturas sobre o oceano, portos, molhes, píeres etc.

Motivado por essas questões, se faz necessária a análise de extremos em casos de MAU TEMPO, estudando as ondulações do quadrante sul associadas a ciclones e anticiclones, as quais, segundo PARENTE (1999) e PINHO (2003), representam os eventos de maior energia.

Não há dúvida de que o crescimento do conhecimento da agitação marítima deve vir acompanhado de medições direcionais de onda e vento. A PETROBRAS e a Marinha do Brasil vêm demonstrando grande empenho nessas atividades, propondo campanhas e financiando ondógrafos, radares e ADCPs no sul e sudeste brasileiro. Deve-se destacar a dificuldade de se efetuar medições contínuas e longas em um ambiente tão hostil quanto o oceano, principalmente em águas distantes da costa. Por esse motivo, o maior registro direcional de ondas na Bacia de Campos corresponde a 42 meses entre 1991 a 1995. Em termos de análise estatística, a curta duração das séries se torna um grande problema, pois fenômenos extremos, apesar de recorrentes, apresentam pouca incidência. Dificilmente em um ano se vê o número superior a três grandes ressacas, pois sinóticamente dependem de situações muito restritas e pouco frequentes.

Na tentativa de solucionar tal problema surge a alternativa da modelagem numérica de ondas. Os grandes avanços computacionais ligados ao forte interesse nas previsões operacionais fizeram com que os modelos de geração e propagação de ondas se desenvolvessem rapidamente. Esses são baseados em espectros ajustados a dados empíricos coletados em situações de desenvolvimento do mar, como é o caso do *Joint North Sea Wave*

²Situação com vento nordeste e dominância do Anticiclone do Atlântico Sul.

Project (JONSWAP), HASSELMANN *et al.* (1973). O uso das simulações tem ajudado a entender o clima de ondas de regiões onde as medições se tornam difíceis. Entretanto, apresentam limitações principalmente em situações severas do mar. O estado da arte relacionado ao assunto é o modelo WAVEWATCH III (TOLMAN, 2002). ROCHA *et al.* (2004) o avaliam usando o vento da reanálise do NCEP/NCAR como forçante, simulando seis intensos ciclones extratropicais no ano de 1999, estudando as ondulações geradas no Atlântico Sul junto a região sul e sudeste utilizando os dados do TOPEX/Poseidon para comparação. Apesar de alguns problemas encontrados, os autores obtiveram correlação de 0,7 em casos severos (ondas acima de cinco metros) e concluem que o WAVEWATCH pode oferecer bons resultados em sistemas de alerta e análises de eventos extremos.

Sabe-se que uma das grandes vantagens da modelagem é a abrangência espacial e temporal, permitindo simulações longas em extensas regiões do globo. Tal vantagem estimula a análise estatística de extremos utilizando os resultados das simulações, mas exige uma abordagem cautelosa acompanhada dos impactos das limitações do modelo na matemática de aplicação dos ajustes das funções. Enfrentar esse desafio permite a expansão espacial da estimativa de extremos a qualquer lugar sobre o oceano e o aumento na duração das séries resulta em melhora no cálculo dos valores de retorno, dois pontos cada vez mais requisitados pela engenharia oceânica moderna.

Objetivos

O presente trabalho tem o **objetivo de estudar as grandes ondulações oriundas do quadrante sul na região ao largo do estado do Rio de Janeiro**, geradas por sistemas meteorológicos extratropicais. Tal objetivo se divide em dois:

1. Realizar uma análise de extremos das ondulações do quadrante sul, posteriormente dividindo em formação por **ciclones** e anticiclones;
2. Entender os processos de geração e caracterizar as condições meteoceanográficas dos eventos mais severos.

Para atingir tais objetivos foram utilizados dados direcionais de onda na Baía de Campos e vinte anos de simulação do modelo WAVEWATCH III no Atlântico Sul, baseado no vento da reanálise II do NCEP/NCAR. A análise de extremos contou com a técnica *Peaks Over Threshold* (POT). O estudo dos processos de geração teve o auxílio da DAAT/PLEDS (PARENTE, 1999) e do programa de identificação de ciclones. Maior

enfoque é dado a estes sistemas por estarem relacionados às maiores ondas no sudeste do Brasil.

A organização do trabalho ocorre da seguinte forma:

Primeiramente, no capítulo 2, são expostos os processos físicos fundamentais que serão abordados e citados ao longo do texto. Teorias específicas, como a técnica POT ou a simulação numérica da agitação matítima, estão presentes nas respectivas seções. No capítulo 3 é explicado o método de detecção de ciclones e o cálculo dos parâmetros adicionais, os quais serão utilizados nos capítulos 7 e 8. O código do programa se encontra no anexo A. No capítulo 4 é descrito o *hindcast* desenvolvido, o qual é avaliado no 5. A descrição e equações do WAVEWATCH estão contidas no anexo B. No capítulo 6 é proposta uma aplicação detalhada da POT com o desenvolvimento da análise geral dos extremos. Em 7 são estudados os processos de geração e características meteoceanográficas dos extremos, com enfoque nas análises sinóticas. Após o procedimento e depois de dividir os eventos gerados por cada sistema meteorológico, no capítulo 8 é feita a análise de extremos final, para ondas geradas por ciclones e anticiclones. Devido ao tema do presente trabalho se distribuir por áreas distintas (estatística, modelagem numérica, meteorologia e engenharia) cada capítulo se inicia com um preâmbulo e ao fim apresentam-se as discussões e comentários. Finalmente no capítulo 9 são desenvolvidas as conclusões priorizando os objetivos 1 e 2 descritos.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Essa primeira parte tem a função de apresentar a teoria e os processos físicos que são utilizados ao longo do trabalho. A descrição matemática do modelo de ondas bem como a estatística da análise de extremos estão inseridas respectivamente nos capítulos 4 e 6.

2.1 Teoria linear

Torna-se importante ao longo dessa dissertação algumas relações simples entre velocidade de propagação (C), comprimento de onda (L) e frequência (f), ou período (T). Para tanto, utilizam-se os resultados da Teoria Linear de Ondas. Inúmeros livros apresentam deduções e explicações completas sobre o assunto, entre eles DEAN e DALRYMPLE (1990) e YOUNG (1999), os quais serviram de base teórica para o presente estudo. Segundo YOUNG (1999), seis considerações físicas são feitas para aplicação da teoria:

- A profundidade do oceano, assim como o comprimento L (ou período T), são constantes;
- O movimento das ondas é bidimensional;
- As ondas possuem forma constante no tempo;
- O fluido (água) é incompressível;
- Efeitos de viscosidade, turbulência e tensão superficial são desconsiderados;
- A altura H é pequena comparada com o comprimento de onda L e a profundidade d , ou seja, $H/L \ll 1$ e $H/d \ll 1$.

Um dos principais resultados em termos de aplicação consiste na relação de dispersão:

$$\omega^2 = g.k.tanh(kd) \quad (2.1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, k o número de onda ($k = 2\pi/L$) e ω a frequência angular ($\omega = 2\pi/T$). Como o foco dessa dissertação está nos extremos de onda medidos em região com grande lâmina d'água, assim como os processos de geração associados a sistemas meteorológicos de grande escala, é possível tratar o problema considerando as ondas em águas profundas, onde não há interação direta com o fundo. Essa aproximação é válida quando $d/L > \frac{1}{2}$. Finalmente as relações simplificadas são:

$$\omega^2 = g.k \quad (2.2)$$

$$L = \frac{g.T^2}{2\pi} \quad (2.3)$$

$$C = \frac{g}{\omega} = 2.C_g \quad (2.4)$$

Sendo C a velocidade de fase e C_g a velocidade de grupo. Aproximando os valores da aceleração da gravidade e de π , chega-se a equação direta e funcional entre velocidade e período.

$$\begin{cases} C = 1,56 T \\ C_g = 0,78 T \end{cases} \quad (2.5)$$

Essa relação é importante nas análises dos extremos pois, a partir do período, é possível calcular aproximadamente a velocidade de propagação. Sabendo a distância do ponto de geração, facilmente se chega ao tempo em que tal onda demoraria para atingir o local de interesse. Por exemplo: certo ciclone a 3000 km do Rio de Janeiro gera ondas com períodos em torno de 12 segundos. De acordo com a equação 2.5, de velocidade de grupo, sabe-se que essas ondas propagam com velocidade por volta de 9,4 m/s e levam aproximadamente 89 horas para percorrer a distância.

2.2 Caracterização vaga / marulho

Previendo as futuras discussões sobre os processos de geração e propagação, é conveniente destacar duas diferentes classes de ondas de gravidade existentes no oceano: vagas (ou o termo em inglês *wind sea*, quando se enfatiza o estado) e marulhos (*swell*). As vagas são ondas que ainda estão na zona de geração e são ondas geralmente recém formadas ou que estavam se propagando e entraram numa região de fortes ventos, passando novamente

a receber energia. O marulho é composto por ondas que ou se propagaram para fora da zona de geração original e/ou não são mais capazes de receber energia do vento. Esse é capaz de se propagar por grandes distâncias. BARBER e URSELL (1948), MUNK *et al.* (1963) e SNODGRAS *et al.* (1966), através de evidências observacionais, destacam que as principais propriedades do marulho oceânico são: a propagação por longas distâncias, pouca perda de energia por dissipação viscosa e quebra, pouca modificação por interação com outros sistemas de ondas e grande concordância com a teoria linear, podendo ser divididos em sistemas individuais associados com fontes quase pontuais (tempestades individuais) (BRANCO, 2004).

O estágio de maturação ou desenvolvimento total das ondas para um dado vento se dá quando a velocidade de fase supera a intensidade do vento em superfície. A partir desse ponto, a então vaga passa a ser classificada como marulho. CAMPOS (2005) faz uma divisão entre os dois tipos, determinando a probabilidade média de ocorrência de cada um ao longo de todo o Atlântico Sul. Do trabalho é possível concluir que o máximo da geração acontece em 50°S, destacando a faixa entre 70° e 30°S. Ao norte de 30°S os processos de formação das ondas, na média, são ínfimos.

2.3 Processos de geração - formulações espectrais

O espectro de ondas em determinado ponto responde às características das ondas em diversas frequências e direções, oriundas de regiões adjacentes que muitas vezes podem distar de milhares de quilômetros. BRANCO (2004) analisa a influência de ondulações distantes no clima de ondas do sudeste brasileiro. PARENTE (1999) consegue, a partir de medições em somente um ponto na Bacia de campos, identificar diferentes padrões de onda associados a sistemas meteorológicos distribuídos por todo o Atlântico Sul. Nos últimos 40 anos, diversos autores vêm apresentando formulações espectrais que representam as características do mar a partir de variáveis como intensidade do vento, duração e área de atuação da pista. O desenvolvimento se dá baseado nos avanços teóricos assim como ajustes empíricos associados à grandes campanhas de medições de ondas.

PIERSON e MOSKOWITZ (1964), a partir de dados de navios no Atlântico Norte, desenvolveram a formulação espectral para mares completamente desenvolvidos (de agora em diante denominada somente P&M). Esta é função somente do vento, dada pela equação a seguir.

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \quad (2.6)$$

$$f_p = 0,8772 \left(\frac{g}{2\pi U_{19,5}} \right) \quad \alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$$

Onde E é o espectro em função da frequência f . O termo f_p é a frequência com maior energia e $U_{19,5}$ a intensidade do vento a 19,5 metros. CARTER (1982) analisa e compara a evolução espectral de diferentes formulações, destacando relações empíricas encontradas entre vento, tamanho da pista, duração e suas consequências na altura significativa (H_s) e período de pico (T_p). Como P&M aborda o caso de desenvolvimento completo do mar, esses parâmetros não são funções da duração ou da pista, como visto na equação 2.7. A figura 2.1 mostra os gráficos referentes a evolução de 2.7.

$$\begin{cases} H_s = 0,02466 U_{19,5}^2 \\ T_p = 0,785 U_{19,5} \end{cases} \quad (2.7)$$

Pela equação e gráficos é possível estimar qual a máxima onda esperada a partir de determinada intensidade do vento. Por exemplo, $U_{10,5} = 20\text{m/s}$ produz H_s com até 9,9 m e T_p de 15,7 s. Apesar de P&M apresentarem resultados muito importantes para o estudo das ondas, torna-se necessário em condições reais a utilização de duas novas variáveis: a duração e o tamanho da pista. O modelo JONSWAP vem tentar suprir essa necessidade. Esse baseia-se em uma extensiva coleta de dados no mar do Norte em águas profundas, a oeste da Dinamarca a 160 km da costa, vinculado ao programa *Joint North Sea Wave Project*, realizado entre 1968 e 1969. HASSELMANN *et al.* (1973) fornece os resultados. O espectro consiste na equação 2.7 do modelo P&M acrescido do termo de picosidade γ , conforme 2.8.

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^q \quad (2.8)$$

$$q = \exp \left[-\frac{(f - f_p)^2}{2 \sigma^2 f_p} \right] \quad \sigma = \begin{cases} 0,07 & f < f_p \\ 0,09 & f \geq f_p \end{cases}$$

$$\alpha = 0,076 \xi^{-0,22} \quad \xi = \frac{gX}{U_{10}^2} \quad f_p = 3,5 \frac{\xi^{-0,33} g}{U_{10}}$$

γ representa a razão entre a energia espectral máxima e a energia correspondente ao espectro de P&M, e na média vale 3,3. U_{10} agora é a intensidade do vento a 10 m (em m/s) e X o comprimento da pista (em km). Do espectro pode-se extrair H_s (em m) pela relação $H_s = 4,01 \sqrt{m_0}$, onde m_0 é o momento de ordem zero, ou a área do espectro. A equação geral do crescimento de H_s e T_p é dada pela equação 2.9 em função do vento e da pista. A figura 2.2 apresenta a evolução das alturas e períodos com U_{10} e X . O aumento dos

valores da ordenada ocorre até um limite, a partir do ponto em destaque no gráfico, onde o mar atinge completo desenvolvimento e pode ser descrito pelo modelo de P&M. Essa característica é observada pela reta horizontal, onde X pode crescer infinitamente e H_s e T_p não evoluem mais.

$$\begin{cases} H_s = 0,02013 X^{0,53} U_{10}^{0,90} \\ T_p = 0,605 X^{0,33} U_{10}^{0,34} \end{cases} \quad (2.9)$$

CARTER (1982) descreve o crescimento do mar pelo JONSWAP com duas limitações: de pista e duração. Observando a figura 2.2 considera-se limitado por pista as condições à esquerda do ponto em destaque, onde há evolução de H_s visto pelas cinco curvas. Nesses casos, o aumento da energia do espectro depende de X e a área de atuação do vento se torna crucial. Na região à direita dos pontos destacados (reta horizontal), o aumento de H_s e T_p só é possível com a intensificação do vento, descaracterizando a limitação por pista.

Supõe-se agora um vento constante U_{10} em uma pista X , soprando por um período t . A uma distância dX além da região de atuação, o mar não ficará limitado por pista antes que a energia de X tenha tido tempo suficiente para viajar a distância dX . Até então as ondas crescem com limitação de duração. Se a energia da onda se propaga com velocidade média v_c , o tempo dt para as ondas começarem a ficar limitadas por pista em $X + dX$ é dado aproximadamente por $dt = dX/v_c$. De acordo com CARTER (1982), o mar é limitado por pista se a duração em horas $D > 1,167 X^{0,7}/U_{10}^{0,4}$. Nesse caso utiliza-se:

$$\begin{cases} H_s = 0,0163 X^{\frac{1}{2}} U_{10} \\ T_p = 0,566 X^{\frac{3}{10}} U_{10}^{2/5} \end{cases} \quad (2.10)$$

Na limitação por duração, ou $D < 1.167 X^{0,7}/U_{10}^{0,4}$, a relação é a seguinte:

$$\begin{cases} H_s = 0,0146 D^{\frac{6}{7}} U_{10}^{9/7} \\ T_p = 0,540 D^{\frac{3}{10}} U_{10}^{2/5} \end{cases} \quad (2.11)$$

A figura 2.3(a) apresenta os limiares que separam os dois tipos de limitação para cinco intensidades de vento. Nela é possível ver a relação entre X e D para cada situação. Em X pequeno e grande duração, o mar é limitado por pista. Em grandes pistas e D pequeno a limitação está na duração. Quanto maior a intensidade do vento, mais rapidamente o mar sai da limitação de duração e entra na limitação de pista; pois para um mesmo dx , a velocidade v_c se torna maior, diminuindo dt . A recíproca é verdadeira. Se o vento for fraco, v_c é menor em dado dx , aumentando dt . Nesse caso o mar demora a entrar em limitação por pista. Os resultados das equações 2.10 e 2.11 estão na figura 2.3.

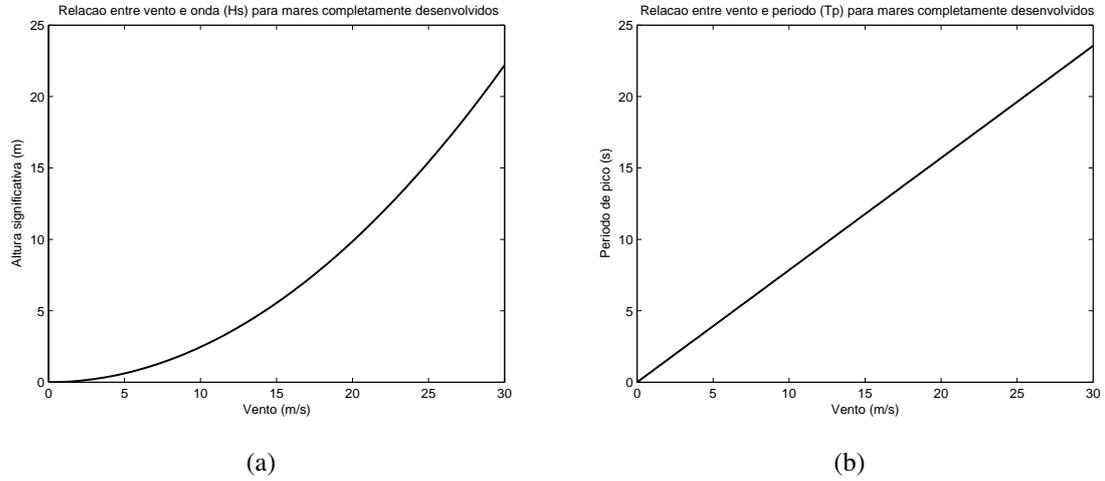


Figura 2.1: Gráficos representativos do crescimento de (a) H_s e (b) T_p , com o vento para mares completamente desenvolvidos. Modelo P&M.

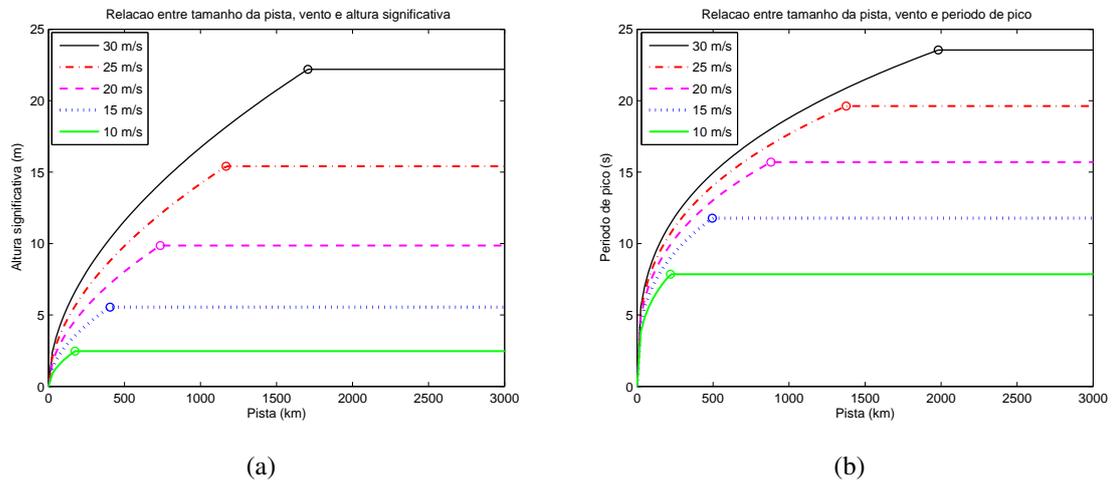
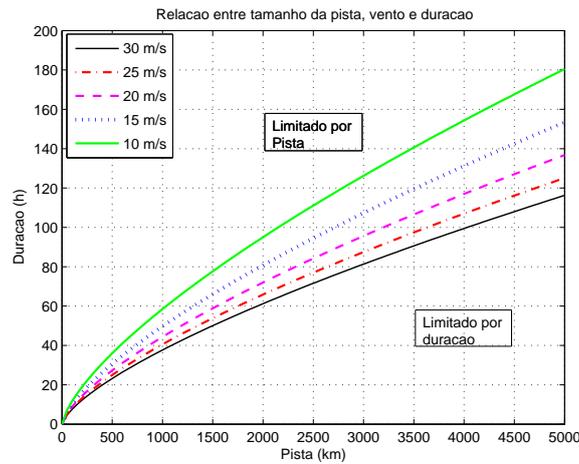
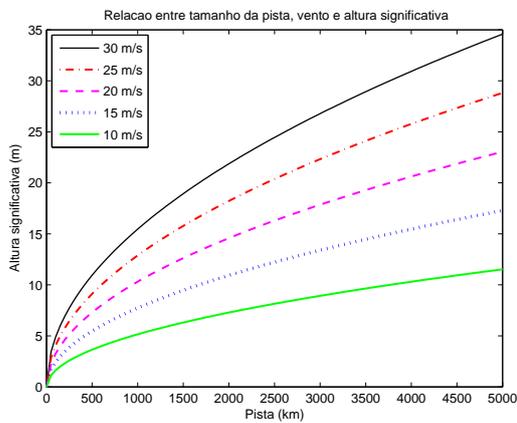


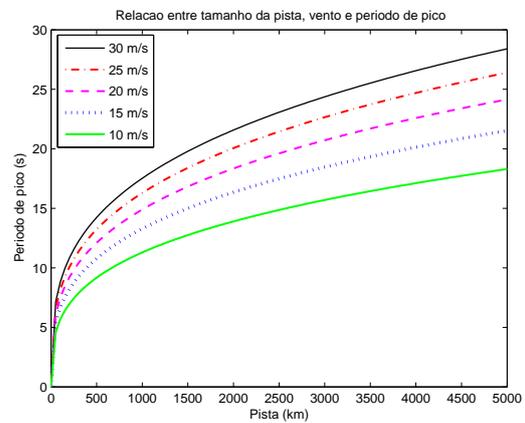
Figura 2.2: Gráficos representativos do crescimento de (a) H_s e (b) T_p , com o vento e extensão da pista, formulação JONSWAP. As retas horizontais, após os pontos indicados, representam o desenvolvimento completo do mar (P&M).



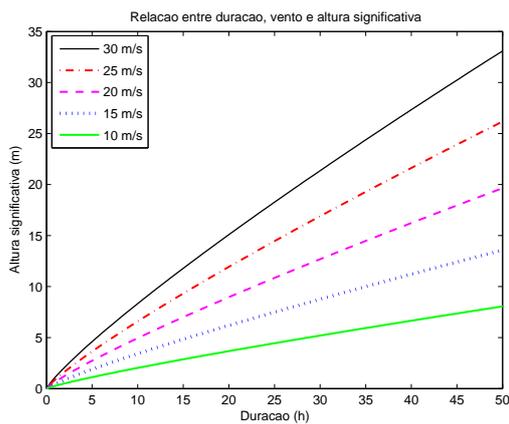
(a)



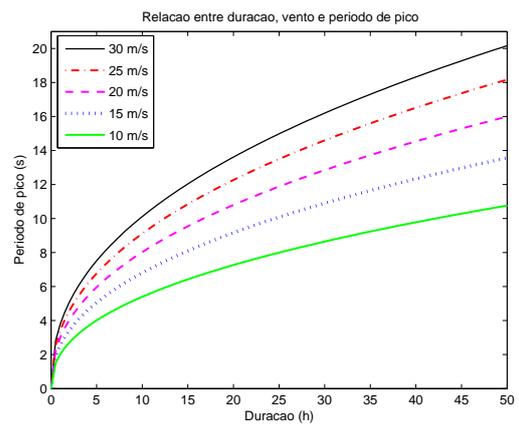
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.3: Apresentação de H_s e T_p para a formulação do JONSWAP. (a) Relação entre o vento, extensão da pista e duração. Valores com ordenada acima das curvas representam mares limitados por pista, enquanto abaixo limitado por duração. (b) e (c) são respectivamente H_s e T_p limitados por pista. (d) e (e) são H_s e T_p limitados pela duração.

CARTER (1982) calcula um parâmetro que auxilia a compreensão das relações de limitação citadas, denominado taxa de limitação por pista R :

$$R = 0,81 \left(\frac{U_{10}^2}{X} \right)^{0,05} \quad (2.12)$$

R varia de 0,7 (em grandes pistas e pouco vento) a 1,0 (em pequenas pistas e ventos fortes).

2.4 O clima de ondas na Bacia de Campos

Torna-se importante nesse momento, a realização de um apanhado de informações sobre a Bacia de Campos, tendo em vista o seu grau de importância. Atualmente o clima de ondas na região é bem conhecido, graças a algumas teses e artigos desenvolvidos principalmente junto ao Programa de Engenharia Oceânica da COPPE-UFRJ. Um dos primeiros abordando a temática é SOUZA (1988), onde são estudadas as descobertas iniciais sobre a evolução típica da agitação marítima na região. A partir de 12 meses de medições em águas profundas¹, o trabalho destaca a persistência das vagas de nordeste geradas pelo AAS e a chegada de algumas ondulações de sudoeste com longos períodos oriundas de ciclones extratropicais, apresentando a bimodalidade do mar muito constante na região. Apesar das limitações ligadas às medições, SOUZA (1988) foi importante para o conhecimento do clima de ondas na Bacia de Campos, assim como PARENTE e SOUZA (1989).

A primeira campanha relativamente extensa de medições direcionais de onda na região ocorreu entre 1991 e 1995. A bóia fundeada em lâmina d'água em torno de 1200 metros, foi desenvolvida para a PETROBRAS pela firma CONSUB. Com a coordenação do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc) do PEnO/COPPE, SEIXAS (1997) analisou inicialmente os dados, detectando mares trimodais: mar local, ondulação e ondulação com zona de geração distante. Logo em seguida VIOLANTE-CARVALHO (1998) descreve 12 situações distintas de mares, analisando as correlações com as situações meteorológicas associadas.

Utilizando os mesmos dados, PARENTE (1999) desenvolveu uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas, conhecida como DAAT (*Directional Analysis with Adaptive Techniques*). A DAAT é do tipo tempo-frequência e permite detectar, para uma mesma faixa de frequência, ondas de diversas direções. Essa nova metodologia forneceu grandes avanços na compreensão do clima de ondas na Bacia de Campos, permitindo a

¹ Feitas de 1985 a 1986 pelo Laboratório de Estruturas Navais do PEnO/COPPE, usando o sensor REMAG desenvolvido por Carlos Eduardo Parente Ribeiro, então no IPqM.

classificação dos estados de mar em quatro categorias:

- BOM TEMPO com marulho;
- BOM TEMPO sem marulho;
- MAU TEMPO - tempestade de sudoeste;
- MAU TEMPO - tempestade de sudeste.

O BOM TEMPO ocorre sempre com dominância do AAS sobre a região e ventos de nordeste. Algumas vezes ondulações distantes vindas do sul podem atingir a Baía de Campos, caracterizando a situação BOM TEMPO com marulho. O MAU TEMPO ocorre com a passagem de uma frente fria e ondas do quadrante sul. Os ciclones geram o MAU TEMPO de sudoeste, enquanto os anticiclones extratropicais em torno de 40°S o MAU TEMPO de sudeste. CARDOSO JÚNIOR (2004) estudou os extremos de onda em situações de BOM TEMPO sem marulho, enquanto SILVA (2008) aplicou a análise de extremos em casos de BOM TEMPO com marulho. SILVA (2008) chegou ao resultado de que as grandes ondas de sul com muita energia que incidem no Rio de Janeiro em condições de BOM TEMPO, são geradas em média a 3400 km da Baía de Campos, com 65% das distâncias superiores a 3200 km. Entre os resultados, é mostrado que grande parte das ondulações estudadas demoram mais de três dias desde a geração até atingir a bóia.

O trabalho mais detalhado sobre a caracterização do mar na região foi desenvolvido em PINHO (2003). Esse estuda a fundo as condições de vento e onda para as quatro classificações de PARENTE (1999). Tomando os resultados em MAU TEMPO de sudoeste, PINHO (2003) aponta a situação como a mais severa, com ventos locais muitas vezes superando 20 m/s e direções entre 200° e 220°. As ondas significativas associadas possuem maior ocorrência entre 1,5 e 2 m e T_p entre 8 e 12 s. Os maiores valores de H_s e T_p são de aproximadamente 6 m e 16 s respectivamente, com a maior onda individual medida igual a 11,7 m e direção 211°. O máximo T_p registrado foi 23,9 s. Nos casos de MAU TEMPO de sudeste, PINHO (2003) aponta os ventos com maior ocorrência entre 120 e 135° e intensidade entre 6 e 8 m/s. As ondas significativas mais frequentes tiveram direções entre 9 e 12 s e H_s entre 2 e 3 m. Os maiores T_p foram em torno de 14 e 16 s e as maiores alturas significativas entre 4 e 4,5 m.

2.5 Caracterização meteorológica do Atlântico Sul

2.5.1 Principais sistemas sobre o Atlântico Sul

Como um dos objetivos deste trabalho é estudar a evolução sinótica geradora dos extremos de onda, torna-se necessária uma apresentação resumida dos principais sistemas meteorológicos sobre o Atlântico Sul, descritos como:

- Anticiclone do Atlântico Sul, AAS;
- Ciclones extratropicais, CE;
- Anticiclones extratropicais, AE.

O AAS é o sistema de maior abrangência espacial, com diâmetro por volta de 2000 km. É resultado do braço descendente da célula de Hadley em torno de 30°S, o qual eleva a pressão causando divergência em superfície. O AAS semi-permanente é responsável pelas condições meteorológicas mais frequentes no Rio de Janeiro, com ventos fracos a moderados de NE. Antes da passagem de frentes frias sobre a região ou quando há o encontro do AAS e AE, ocorre a intensificação das pistas de nordeste, fazendo com que as vagas nessa direção adquiram grande energia.

Os CE, devido à sua importância para o trabalho, são descritos com maior detalhe na seção 2.5.2. Basicamente ocorrem em torno de 50°S associados ao braço ascendente da célula de Ferrel. Este cinturão é característico de zonas de baixa pressão e sistemas com ventos moderados e fortes propagando para leste e sudeste. Acompanhando os CE ocorrem os AE (às vezes chamado de anticiclone ou “alta” da retaguarda) deslocando-se a oeste dos CE e frentes associadas. A propagação dos AE se dá para leste e nordeste.

O posicionamento dos três sistemas citados possui variações sazonais acompanhando a migração da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e do equador térmico. No inverno austral o deslocamento se dá para norte, enquanto no inverno boreal para sul. O posicionamento e intensidade também podem variar com a ocorrência de fenômenos meteorológicos de baixa frequência, como o ENOS (El Niño Oscilação Sul), PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) e AAO (*Antarctic Oscillation*). Esses são descritos e analisados na seção 7.3.5.

CAMPOS (2005) descreve as grandes células de circulação citadas, seus efeitos nos sistemas meteorológicos em escala sinótica e consequente distribuição espacial na geração das ondas ao longo do Atlântico Sul. PINHO (2003) estuda os sistemas meteorológicos relacionando-os com clima de ondas na Bacia de Campos.

2.5.2 Breve apanhado sobre ciclogênese e climatologia de ciclones no Atlântico Sul

Ciclogênese

Ciclogênese é o processo de abaixamento da pressão atmosférica na superfície, com consequente formação de circulação ciclônica. Muitas vezes pode ser disparada por vórtices ciclônicos de altos níveis. Em baixos níveis, essa evolução é dependente do aquecimento próximo à superfície e do movimento vertical adiabático, ou seja, apresenta um cavado em superfície que vai intensificando até que a isóbara de baixa pressão se feche. Para que haja abaixamento da pressão na superfície deve haver diminuição de massa na coluna de ar, o que só é fisicamente viável se o perfil vertical apresentar maior divergência do que convergência. Essa explicação bem como os trabalhos de SUTCLIFFE (1947), TROUP e STRETEN (1972), FERREIRA (1989) e SATYAMURTY *et al.* (1990) foram consultados no site do laboratório MASTER (www.master.iag.usp.br). A seguir são descritos os principais resultados presentes na literatura que podem ser importantes para as análises das ondulações geradas por ciclones e anticiclones no Atlântico Sul.

SUTCLIFFE (1947), partindo da relação da variação da pressão em superfície, estabeleceu equações dinâmicas importantes que descrevem o desenvolvimento de ciclones para um sistema quasi-geostrófico. As primeiras identificações ocorreram por imagens de satélite, em TROUP & STRETEN (1971). Como resultados iniciais, no que diz respeito ao Hemisfério Sul, verificou-se que as ciclogêneses são mais frequentes em latitudes médias, entre 35° e 55°S, em quase todo o hemisfério. Na América do Sul e oceano Atlântico Sul (até 30°W), metade das ciclogêneses acontecem ao norte de 35°S, com maior frequência sobre o oceano no verão e sobre o continente no inverno. TROUP & STRETEN (1971) chegaram também ao resultado que as baixas quentes de superfície da região do Chaco tendem a se tornar sistemas ciclônicos desprendidos que se movem para leste, enquanto os CE apresentam deslocamento médio para leste e sudeste. Considerando as ocorrências de ciclones sobre o sul da América do Sul, 70% se formam na região entre 10° e 55°S, e 0° e 90°W, sendo o restante referentes à sistemas migratórios com origem fora desta área. Dos 70%, apenas 20% nascem no Pacífico Sul e 50% sobre o continente e oceano Atlântico Sul. Cerca de 90% dos casos têm influência no alinhamento de frentes frias (outono e inverno) ou em interações com sistemas convectivos (primavera e verão).

FERREIRA (1989) e SATYAMURTY *et al.* (1990) investigaram cuidadosamente a frequência de ciclones e seus desenvolvimentos, bem como suas áreas e estações preferenciais de geração na região da América do Sul, através de 7 anos de imagens de satélite e cartas sinóticas. Como resultado, na região de 30° a 70°W e 15° a 45°S, durante o período de observações (janeiro de 1980 a dezembro de 1986), o número de ciclones que

se formaram é cerca de 750, sendo 280 acima de 30°S. No ano de 1983 (forte EN) o número subiu 25%, sendo o principal aumento ao norte de 30°S. Quanto às direções de propagação, apenas 8% se dissiparam sem apresentar movimento significativo, enquanto 56% foram para sudeste e 22% para leste, sem variação sazonal característica desses valores. Foi verificado que há preferência pelas estações de transição. Todas as ocorrências ao norte de 30°S formaram-se ou desenvolveram-se sobre o continente. Algumas ressalvas devem ser feitas sobre esse trabalho, pois a análise de imagens de satélite apresentam as características em altos níveis, enquanto o interesse do presente trabalho está em baixos níveis, na interface oceano-atmosfera.

O importante trabalho de GAN e RAO (1991) foi realizado com base em 10 anos de dados para verificar as estações do ano preferenciais para ciclogêneses de superfície sobre a América do Sul. Foram utilizados: cerca de 14600 cartas de **superfície** (quatro por dia) da Força Aérea Brasileira, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1988; médias mensais para oito estações de radio-sondagem no Brasil e Argentina, de janeiro de 1978 a dezembro de 1987; e dados mensais de precipitação em doze estações no sul do Brasil. Como resultado, GAN e RAO (1991) observaram que existe variação sazonal dos sistemas e os meses de inverno apresentam maior frequência do que os meses de verão². Novamente a preferência de ocorrência está sobre o outono e inverno, com verão por último. Analisando a variação interanual, as maiores incidências foram em 1983 seguido por 1986 e 1987, anos de forte EN, sugerindo influência do fenômeno. Especialmente GAN e RAO (1991) mostraram que a ciclogênese apresenta basicamente dois núcleos durante todo o ano, conforme mostrado na figura 2.4(a). Este fato se deve a dois mecanismos ciclogênicos:

- No núcleo mais ao sul: instabilidade baroclínica local no escoamento de oeste;
- Núcleo mais ao norte: distúrbio baroclínico se movendo sobre uma cadeia de montanhas, que gera a chamada lee-ciclogênese a sota-vento da montanha.

Por fim GAN e RAO (1991) apontam direções de propagação com predomínio para sudeste no cinturão entre 15° e 40°S, e para leste entre 40° e 50°S.

O estado-da-arte relacionado a ciclogênese no Atlântico Sul se encontra no trabalho de REBOITA (2008), o qual analisa a climatologia dos eventos entre 1990 e 1999, comparando os resultados do modelo RegCM3 com as reanálises do NCEP/NCAR. O esquema numérico de detecção dos ciclones empregado é baseado em SUGARA (2000) e SINCLAIR (1994), que identifica mínimos de vorticidade relativa no campo de vento a 10

²Máximo em maio com 134, mínimo em dezembro com 71, e máximo secundário de 105 em outubro

metros (ζ_{10}), dada pela equação:

$$\zeta_{10} = \frac{\partial v_{10}}{\partial x} - \frac{\partial u_{10}}{\partial y} \quad (2.13)$$

Onde v_{10} e u_{10} são as componentes meridional e zonal do vento a 10 metros. A duração mínima estipulada foi de 24 horas e foram utilizados dois limiares: abaixo de $-1,5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ para o caso geral, e abaixo de $-2,5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ para captar os ciclones mais intensos³. REBOITA (2008) identificou três regiões principais de ciclogênese sobre o oceano, vistas na figura 2.4(b). A primeira, mais ao norte, em torno do sul/sudeste brasileiro entre 25° e 30°S, intitulada RG1. A segunda situa-se na desembocadura do Rio da Prata no Uruguai, em 35°S, denominada RG2. Finalmente a terceira é posicionada ao sul da Argentina, aproximadamente em 48°S, chamada RG3.

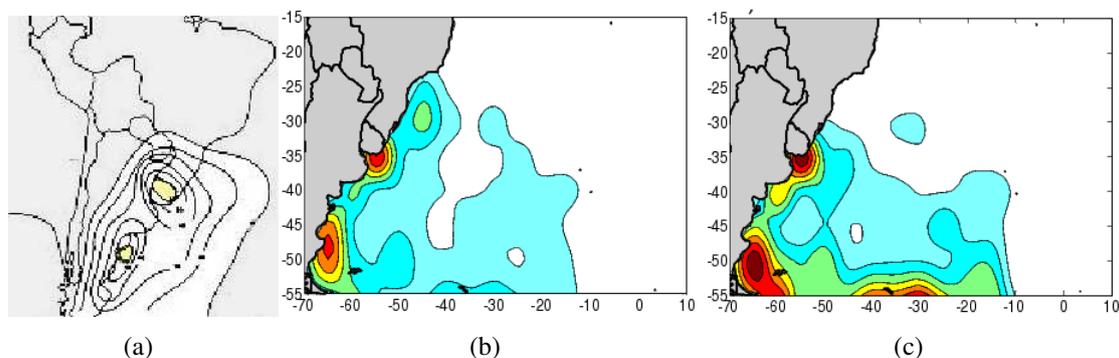


Figura 2.4: Zonas preferenciais de ciclogênese: (a) Adaptação de GAN & RAO (1991). (b) Resultado de REBOITA (2008) para ciclones menos intensos. (c) Resultado de REBOITA (2008) para ciclones mais intensos.

REBOITA (2008) analisa a fundo as possíveis fontes de variação da ciclogênese nessas regiões. Destaca-se a topografia como fundamental nos três máximos da figura 2.4(b). A ausência dos fluxos de calor latente e sensível na interface ar-mar reduz a atividade ciclogenética em RG1 e RG3 e na parte central do Atlântico Sul, porém não afeta diretamente RG2. Essas questões são importantes para as futuras análises de ocorrência e distribuição espacial das ondulações geradas por ciclones.

Climatologia dos ciclones

BEU (2003) realizou uma climatologia detalhada de ciclones e trajetórias, utilizando o programa de identificação de ciclones de MURRAY e SIMMONDS (1991). Alguns cuidados devem ser tomados na análise destas informações, principalmente em baixas latitudes, onde grande parte da detecção é referente à sistemas de baixa pressão sobre o

³Lembrar que a vorticidade ciclônica no Hemisfério Sul é negativa.

continente, de curta duração e que não geram ondas para o Rio de Janeiro. Inúmeros são os resultados em função da latitude, sazonalidade e variação interanual relacionada a eventos de ENOS. Como o primeiro deles, é observada uma queda no número de ciclones com a latitude, sendo a região entre 20° a 40°S com ocorrência bem menor (praticamente a metade) do que entre 50° a 70°S. O inverno é a época que apresenta os menores números em baixas latitudes, em torno de 30°S. Na primavera e outono a diferença entre a incidência de trajetórias entre 60° e 70°S e latitudes mais altas se torna maior. Entre 30° e 40°S o número aparece com poucas modificações, com máximo no inverno, seguido pela primavera e verão com valores praticamente iguais, e o outono com menor número.

Ao considerar todo o Hemisfério Sul, de 20° a 70°S, a média de ciclones é maior nas estações de transição e menor no verão: 155 no outono, 152 na primavera, 141 no inverno e 135 no verão. A partir de trabalhos anteriores, BEU (2003) também destaca a região de 50°S como a de maior concentração de ciclones, entretanto, a área de atuação se estende para norte no inverno, principalmente entre 30° e 50°S nas áreas oceânicas, concordando com o máximo de geração das ondas descrito em CAMPOS (2005). O verão, então, é a época em que os ciclones se encontram mais próximos da Antártica.

Analisando as variações anuais de 1970 a 2000, houve queda no número de ciclones no inverno até a década de 80, de aproximadamente 160 para 140, quando então volta a crescer. No verão e outono a ocorrência é decrescente ao longo dos 30 anos, mas bem pouco significativa, com 10 a 15 ciclones a menos em 2000 do que em 1970. Na primavera há uma diminuição até a década de 80, quando permanece estável pelos anos seguintes.

Até aqui foi falado apenas em ocorrências de ciclones, ainda não abordando questões relacionadas à intensidade. BEU (2003) e PEZZA (2003) analisam-a selecionando sistemas com pressões no centro abaixo de 1000 hPa (fracos), 990 hPa (moderados) e 980 hPa (fortes). Essas informações devem ser usadas com cautela, pois em termos de vento em superfície, o parâmetro que quantifica a intensidade do ciclone não é a pressão central, mas o gradiente de pressão entre o ciclone e a região de alta pressão adjacente. Entre os resultados, BEU (2003) observa que o número de ciclones com as menores pressões no centro aumenta conforme se aproxima do pólo, não ocorrendo ciclones abaixo de 990 hPa acima de 40°S. Mesmo aqueles abaixo de 1000 hPa estão em número muito pequeno, por volta de 20° a 30°S. As latitudes mais altas, portanto, possuem os ciclones mais intensos.

Considerando as variações interanuais em todas as latitudes, os anos de EN apresentam ligeiramente maiores ocorrências de ciclones (5%), com exceção do verão, quando os anos de LN têm maiores quantidades de ciclones (7% a mais); entretanto este resultado pode estar relacionado à baixas térmicas continentais comentadas anteriormente. Entre 40° e 70°S o número de ciclones é máximo no outono e mínimo na primavera, tanto em anos de EN como neutros, concordando com o máximo citado por GAN e RAO (1991)

em maio. Em anos de LN a incidência no outono diminui, assim como a amplitude entre ocorrências máximas e mínimas. As variações devido ao ENSO é pequena, por volta de 5%, entretanto maior variabilidade devido a esse fenômeno ocorre nos ciclones abaixo de 980 hPa. No inverno o aumento na média desses casos, chamados “mais intensos”, em anos de LN é um pouco superior a 16% comparado aos anos neutros, enquanto em anos de EN é 16% inferior. A variabilidade aumenta no verão, quando a média de ciclones abaixo de 980 hPa em LN é 27% maior do que em anos neutros, com EN 17% menor. Para os outros limiares (1000 e 990 hPa) a oscilação devido ao ENSO é pequena, de 1 a 8%.

BEU (2003) comenta, baseado em trabalhos anteriores, que na fase quente do ENOS as ondas atmosféricas possuem um ciclo de vida de caráter mais explosivo devido ao aumento da baroclinicidade e do jato em altos níveis. Em contrapartida os ciclones não crescem o suficiente para irradiar energia para os níveis mais altos e, como consequência, não atingem um desenvolvimento tão robusto como na fase positiva da Oscilação Sul, refletindo em maior quantidade de ciclones intensos em anos de LN.

PEZZA (2003) realiza uma climatologia completa de ciclones e anticiclones em todo o Hemisfério Sul. Para a América do Sul destaca-se a importância do relevo na formação dos ciclones no núcleo mais ao norte da figura 2.4(a), com importância da manutenção da baroclinia associada aos ciclones a leste dos Andes; mesmo resultado de GAN e RAO (1991), com grande número de trajetórias iniciando no litoral do Uruguai e Rio Grande de Sul, e abrupta transição para ausência desses sistemas no litoral de Santa Catarina.

Estudando o posicionamento típico dos sistemas, PEZZA (2003) encontra dominância de anticiclones acima de 27°S, enquanto abaixo de 50°S há predomínio de ciclones. Entre os dois limiares ambos atuam em conjunto. Ao longo dos inúmeros resultados, o trabalho também destaca que as trajetórias dos ciclones e anticiclones tendem a migrar no mesmo sentido da variação sazonal da área do gelo.

Assim como PARENTE (1999), PEZZA (2003) identifica anticiclones subtropicais após a passagem de frentes frias, prioritariamente sobre o continente em 40°S, migrando sobre o oceano Atlântico descrevendo caminhos preferencias em torno de 30° e 35°S. Analisando a tendência de incidência entre os anos de 1970 a 2000, foi verificado uma queda na ocorrência de ciclones e anticiclones; entretanto, há um aumento no número de ciclones abaixo de 980 hPa ao longo dos anos. Nenhuma variação foi constatada com anticiclones intensos acima de 1035 hPa. A partir de outros trabalhos o autor comenta que a diminuição do número total de ciclones e aumento dos mais intensos pode estar associado ao aquecimento global, presente nas reanálises do NCEP/NCAR. Entre os resultados mais importantes ao observar variações devido ao ENSO, PEZZA (2003) encontra o padrão geral de anticiclones muito semelhante em anos de EN e LN, enquanto obtém maior

número de ciclones em latitudes mais baixas em invernos de LN.

Como pôde ser visto, existem pequenas divergências entre os resultados dos trabalhos citados, consequência das diferentes metodologias empregadas e das limitações do método numérico de MURRAY e SIMMONDS (1991). REBOITA (2008) oferece grande vantagem para as analogias com o presente estudo em relação a outros trabalhos, pois utiliza a vorticidade do vento em superfície na detecção. O consequente critério relacionado à ciclones mais ou menos intensos também é privilegiado usando esse cálculo, já que as pistas de geração das ondas mais intensas estão associadas a ζ menores. O mesmo não se pode afirmar ao utilizar o valor absoluto da pressão no centro.

Tomando as ciclogênese no caso geral, REBOITA (2008) identifica como estações de maior ocorrência o outono seguido pelo inverno, verão e primavera. Para os eventos com $\zeta_{10} \leq -2,5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$, considerados mais intensos, a distribuição é maior no inverno, seguido pelo outono, primavera e verão. Comparando com GAN e RAO (1991), percebe-se grande coerência das regiões RG2 e RG3 com os núcleos mais ao norte e ao sul da figura 2.4(a). Adicionalmente REBOITA (2008) identifica a importante ciclogênese em RG1, associada a sistemas mais fracos, entretanto com maior proximidade do Rio de Janeiro. REBOITA (2008) confirma novamente alguns trabalhos anteriores que afirmam que os ciclones mais intensos se dão em torno de 50°S, gerados em RG3. No inverno há tendência desses casos se estenderem a latitudes um pouco mais baixas (latitudes médias), fato minimizado no verão. Assim como GAN e RAO (1991), esse trabalho encontra o mês de maio como o de maior ocorrência de ciclones no Atlântico Sul. Comparando as duas estações de maior incidência e as regiões RG1 e RG2, chega-se ao resultado que no outono RG1 é relativamente mais ciclogênica, enquanto no inverno RG2 aumenta bastante a ciclogênese⁴.

Tomando os resultados comuns entre os trabalhos mais importantes citados, em termos de ocorrência de ciclones com a latitude, conclui-se que as trajetórias ocorrem preferencialmente mais ao sul, diminuindo progressivamente até os trópicos. A distribuição sazonal dos ciclones destaca os meses de outono e inverno como mais importantes, sendo o verão menos ativo. Na média o fenômeno ENSO apresentou poucas modificações no padrão de ocorrência dos sistemas. Em termos quantitativos novamente houve maior incidência de ciclones em anos de EN, com os mais intensos preferencialmente em LN. De forma geral há uma pequena queda no número de ciclones entre as décadas de 70, 80 e 90.

ROCHA *et al.* (2004) analisa seis ciclones no ano de 1999 associados a mares severos junto a costa sul e sudeste brasileira. Em cinco casos a ciclogênese ocorre junto a

⁴No inverno os ciclones se distribuem em latitudes mais baixas que a média, entretanto essa característica não é válida acima de 30°S, onde o outono é a estação de maior incidência.

RG2, variando entre 35° e 30°S. Retomando a questão da intensidade dos sistemas, o trabalho encontrou dois eventos responsáveis por extremos de onda no Rio de Janeiro com vorticidade inferior a $-7 \cdot 10^{-5} s^{-1}$.

2.5.3 Reanálise II do NCEP/NCAR

Os campos de vento e pressão em superfície deste trabalho foram fornecidos pelo NCEP/NCAR. As componentes zonal e meridional do vento são usadas como entrada na simulação das ondas no modelo WAVEWATCH III e na detecção dos ciclones. Para essa última também é utilizada a pressão no nível do mar.

As reanálises do NCEP/NCAR são resultado do mais moderno sistema de assimilação de dados existente, o qual inclui estações em superfície, radiossondas, navios, aeronaves, satélites, entre outras fontes. As informações passam por rigoroso controle de qualidade até serem utilizadas pelo modelo, mantendo o mesmo critério e processo ao longo dos anos. Ao manter inalterado o sistema de assimilação e controle dos dados de entrada, é assegurado que não haja saltos climáticos no produto final; porém, as reanálises são muito afetadas pelos sistemas observacionais e pela qualidade e quantidade das medições (KISTRER *et al.*, 2001).

O NCEP/NCAR vem fornecendo diversas variáveis, atendendo as necessidades de diferentes grupos. Os produtos finais são divididos em classes, variando entre “A” e “D”. De “A” a “C” a mudança depende do grau de influência dos dados observados nos resultados (KALNAY *et al.*, 1996). A letra “D” representa campos fixados com valores climatológicos, não dependentes do modelo. Quanto menor a quantidade de dados e influência no produto final (“C”) maior devem ser os cuidados nas análises. Como recíproca, as variáveis de classe “A” apresentam as informações mais reais, sendo fortemente influenciadas pelas medições assimiladas. As componentes zonal e meridional do vento a dez metros tem classificação “B” e a pressão ao nível do mar “A”.

A mais longa reanálise, do tipo I, fornece os resultados desde 1/1/1948. Como a quantidade e qualidade dos dados coletados aumentaram muito no final da década de 70, acompanhando algumas modificações no modelo e sistema de assimilação de dados, foi desenvolvida a reanálise II. Essa está disponível a partir de 1/1/1979 e as implementações e avanços em relação a outra base pode ser vista através da página na internet:

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis2/kana/reanl2-1.htm>

Os dados assimilados para esse período consistem nos mesmos da reanálise I, com a diferença que a reanálise II elimina alguns erros, utiliza capacidade computacional maior e propõe inúmeros melhoramentos explicados no endereço eletrônico citado.

Alguns cuidados devem ser tomados ao utilizar tais campos. O principal deles está relacionado à escala em que as reanálises trabalham. A resolução em torno de 210 km e

os dados assimilados muitas vezes espacialmente esparsos indicam que o foco é a grande escala. Isso significa por exemplo, que ao utilizar o vento em superfície, serão observados grandes anticiclones, ciclones e sistemas sinóticos equivalentes, não sendo evidentes fenômenos de mesoescala, como brisa e CCMs. Interferências associadas à nuances no relevo ou de caráter local são praticamente desconsiderados. A resolução temporal máxima de seis horas corrobora com a discussão, favorecendo sistemas com duração da ordem de dias. Soma-se a isso a questão da classe do vento a dez metros igual a “B”, com problemas relacionados a poucos dados influenciando o produto final. Essa carência é ainda maior no Atlântico Sul, onde as medições ocorrem em número muito pequeno comparado com o Hemisfério Norte (INNOCENTINI e CAETANO NETO, 1996). KALNAY *et al.* (1996) e KISTLER *et al.* (2001) descrevem os problemas do impacto da quantidade de dados de entrada no modelo de reanálise do NCEP/NCAR.

As questões citadas são importantes para compreender as limitações nos resultados finais ao longo dessa dissertação, que utiliza a reanálise II do NCEP. ROCHA *et al.* (2004) avalia o campo de vento em casos de ciclones gerando extremos de onda. O trabalho compara com os dados do TOPEX/Poseidon a 19,5 m de altura. Uma das intenções é avaliar a qualidade do vento em situações que geraram ondas significativas acima e abaixo de cinco metros. A tabela 2.1 mostra a qualidade da reanálise em situações de ventos moderados e intensos. Inicialmente pode-se observar pelo EM negativo, que o vento do NCEP/NCAR subestima as intensidades nos dois casos. É possível perceber o aumento do EM e EMQ, e queda do CC, para os eventos mais severos. Conclui-se pelo artigo, que a qualidade da reanálise cai em situações meteorológicas severas.

Tabela 2.1: Resultados de ROCHA *et al.* (2004) para avaliação do vento da reanálise do NCEP/NCAR gerador de ondas significativas acima e abaixo de cinco metros. EM= Erro Médio, EMQ= Erro Médio Quadrático, CC=Coefficiente de Correlação.

Vento gerador de Hs:	EM (m)	EMQ (m)	CC
abaixo de 5 m	-0,66	2,56	0,71
acima de 5 m	-3,41	4,51	0,69

Capítulo 3

Detecção e Parâmetros dos Ciclones

Esta etapa do trabalho tem o objetivo de apresentar a metodologia numérica do programa utilizado para as análises envolvendo ciclones geradores das grandes ondulações estudadas. A seguir é feita uma divisão em dois itens. A seção 3.1 relata a detecção dos ciclones, trajetórias e pistas, a partir dos campos de pressão e vento em superfície, enquanto a seção 3.2 explica os cálculos dos parâmetros relacionados a cada ciclone. O anexo A apresenta a subrotina do critério de seleção.

Desde a década de 90 esquemas numéricos de detecção de trajetórias de ciclones vem sendo desenvolvidos com sucesso. O principal trabalho foi feito na universidade de Melbourne, na Austrália, pelos doutores Ross J. Murray e Ian Simmonds tendo em vista a grande dificuldade e consumo de tempo do trabalho manual com cartas sinóticas. O programa de detecção fora aplicado em diversas partes do globo, exigindo uma calibração adequada atendendo às características típicas de cada região. MURRAY e SIMMONDS (1991) foi adaptado por PEZZA (2003) e BEU (2003) para o estudo da propagação de massas de ar frio na América do Sul, os quais também descrevem de maneira clara os métodos de detecção desenvolvido pelos australianos. Operacionalmente e aberto à consulta de toda a população, encontra-se o esquema de identificação do laboratório MASTER (www.master.iag.usp.br/ind.php?inic=00&prod=energetica&pos=2), criado por Wladimir José de Santis Junior e Fábio Cabral, com as previsões das trajetórias e monitoramento energético de cada ciclone para todo o oceano Atlântico.

O princípio dos trabalhos citados consiste na procura de centros de baixa pressão e cálculo do gradiente e laplaciano. Os esquemas numéricos permitem manipular grande quantidade de dados em curto período de tempo, eliminando a subjetividade de outras metodologias. O código do programa de identificação de ciclones do MASTER foi gentilmente cedido para colaboração na presente pesquisa, o qual foi modificado para atender as necessidades e objetivos da identificação dos ciclones e pistas que geram ondulações extremas. As principais mudanças consistem na inclusão do vento a oeste do ciclone

como condição adicional para caracterizar os eventos e na utilização dos critérios em função da latitude (não mais estáticos como nos trabalhos citados), conforme a descrição a seguir.

3.1 Detecção dos eventos

O presente programa foi desenvolvido em linguagem Fortran 90 com pós processamento no software Grads, ambos em ambiente Linux. As entradas correspondem aos arquivos binários de pressão e componentes zonal e meridional do vento, todos em superfície (a 10 m). O campo de pressão possui resolução espacial de $2,5^\circ$ latitude/longitude enquanto o vento $1,90459^\circ \times 1,87500^\circ$. Todas as variáveis apresentam resolução temporal de 6 horas. O programa é aplicado na região entre 85° e 5° W e 75° e 10° S (chamada GRADE1), para o período de 1/1/1986 06Z a 31/12/2005 18Z. Com objetivo de manter a mesma grade para todos os arquivos de entrada, as componentes do vento foram interpoladas para $2,5^\circ$. Decidiu-se manter o campo de pressão na resolução original para não propagar nenhum erro adicional típico dos processos de interpolação; já que, para o procedimento de identificação de ciclones do presente trabalho, a pressão tem maior relevância, como pode ser visto a seguir.

Primeiramente o processo de detecção em cada passo de tempo procura valores mínimos de pressão em superfície. Ao encontrar, considera-os como centros de baixa pressão candidatos a ciclone, os quais são submetidos a três critérios:

1. A pressão no centro do ciclone (P_c) deve ser menor ou igual a um valor pré-estabelecido, denominado p_{max} .
2. Calcula-se a média da pressão em quatro pontos adjacentes (representando os vértices de um quadrado com centro no ponto candidato a ciclone), o qual é chamado $borda$. Se $borda$ menos a pressão no centro (G_p) for maior ou igual a um limiar pré-determinado (bc_{min}), o critério é aceito. A distância dos quatro pontos ao centro também é variável (lb_x meridional e lb_y zonal), sendo determinante no tamanho dos ciclones detectados.
3. Calcula-se a média da intensidade do vento nos pontos correspondentes ao retângulo de 10° de latitude por 20° de longitude a oeste do centro do possível ciclone. Se este valor for maior ou igual a v_{min} , o critério é aceito. O tamanho desse retângulo e a distância ao centro também podem ser ajustados no programa, detectando pistas com áreas e intensidades variáveis.

De acordo com PEZZA e AMBRIZZI (2003), o critério 1 tem a função de eliminar baixas térmicas e sistemas muito fracos que não representam ciclones extratropicais, gerando resultados mais consistentes. O critério 2 seleciona os valores do gradiente de pressão na área fixada, analisando a baixa pressão central do ciclone em relação à pressão no entorno, a qual depende de outros sistemas sinóticos adjacentes, como anticiclones e cristas por exemplo. O terceiro critério relaciona-se fisicamente com o segundo, uma vez que maiores gradientes de pressão tendem a gerar ventos mais intensos. É importante destacar que, para os cálculos das médias do vento no retângulo fixado, foram excluídos valores negativos da componente meridional, as quais representariam direções do quadrante norte. A figura 3.1 ilustra os três parâmetros citados.

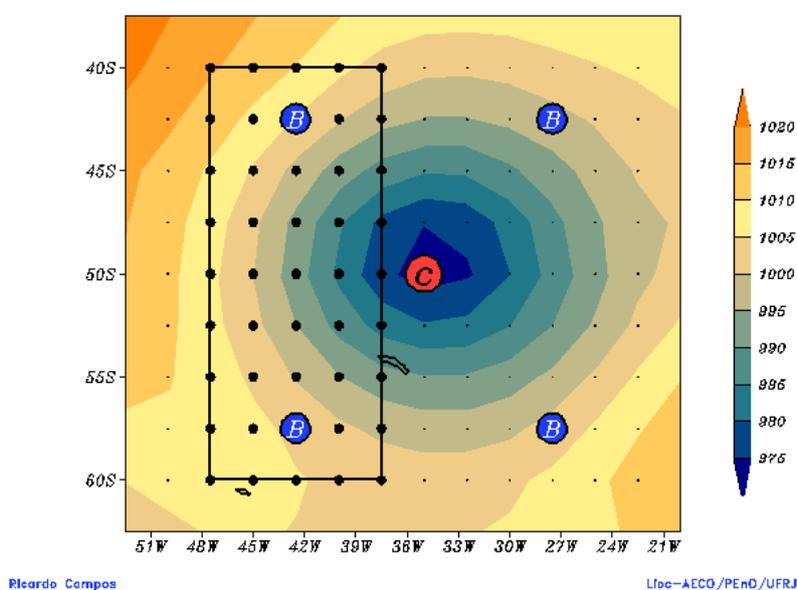


Figura 3.1: Representação dos critérios de seleção do programa. Em azul (B) o parâmetro borda, em vermelho (C) o centro, enquanto a grade em preto mostra os pontos usados para a média do vento. O campo colorido ao fundo é a pressão em superfície (em hPa) exemplificando um centro de baixa pressão.

Até então o procedimento é aplicado em instantes de tempo individuais, selecionando posições em que os critérios foram satisfeitos. O próximo passo agrupa esses resultados de acordo com dois outros critérios envolvendo a evolução do fenômeno:

- Para classificar dois instantes detectados como o mesmo evento de ciclone os tempos devem ser sequenciais, não havendo períodos em que o ciclone deixou de ser registrado e em seguida voltou a existir;

- A posição do ciclone no tempo seguinte não deve distar além de uma janela pré-ajustada do tempo anterior. É criado então o parâmetro '*busca*'. Se a latitude do ponto detectado no instante $t + 1$ estiver dentro de $\text{latitude} + \text{busca}$ no instante t , e o mesmo ocorrer com a longitude, o critério é aceito e considera-se $t + 1$ como a evolução temporal do ciclone em t (mesmo evento).

Os dois últimos permitem agrupar eventos de ciclones ao longo do tempo, determinar as trajetórias e a duração. O parâmetro *busca* restringe também velocidades máximas de propagação dos ciclones; uma vez que, ao se propagar com velocidade grande o suficiente para distanciar além de *busca* do instante anterior, o ciclone passa a ser considerado como outro evento. Foi imposta também uma duração mínima para os ciclones, fixada pelo programa como '*tempomin*'. Em geral ciclones com vida curta tendem a ser menos intensos e não geram grandes ondulações devido à breve atuação do vento sobre a superfície do mar. Verifica-se o fato na seção 2.3.

Crítérios adaptativos

Após inúmeros testes e verificações não tão bem sucedidas de detecção dos ciclones que geraram ressacas de interesse, surgiu uma questão crucial para a montagem do esquema numérico: as características dos ciclones (como tamanho, gradiente de pressão, pressão central e ventos) variam bastante com a latitude, mesmo se tratando de determinada região como é o caso do Atlântico Sul. Foi constatado por exemplo, que em torno de 60°S os ciclones são muito mais intensos e com diâmetro maior dos que aqueles em 30°S , fato já conhecido pela comunidade científica. Entretanto o posicionamento da pista é de fundamental importância para as ondas que atingem o Rio de Janeiro, fazendo com que ciclones pequenos e pouco intensos em 30°S sejam muitas vezes mais importantes do que aqueles extremamente severos em 60°S . Usando os critérios de detecção estáticos (iguais para todas as latitudes) privilegia-se os ciclones de latitudes mais altas e, ao tornar o critério mais exigente, deixa-se de identificar aqueles em latitudes mais baixas¹. PEZZA (2003) explica as limitações do esquema numérico de Murray e Simmonds para baixas latitudes.

Para solucionar tal problema decidiu-se criar $pc(\text{lat})$, $bcmin(\text{lat})$ e $vmin(\text{lat})$; ou seja, cada latitude tem seu próprio critério para detecção, surgindo agora três novas funções. Para determiná-las primeiramente foram estipulados critérios pouco exigentes; o programa foi rodado e as saídas analisadas e certificadas quanto à detecção e trajetória. Com

¹ A recíproca também é problemática. Ao tornar os critérios pouco exigentes consegue-se detectar ciclones em baixas latitudes, mas ao mesmo tempo são selecionados centros de baixa pressão próximos ao pólo que não representam necessariamente ciclones formados.

os resultados foi calculada a média em cada latitude das pressões no centro, do gradiente de pressão e do vento médio a oeste do centro. O procedimento foi feito para todos os ciclones em vinte anos (1986 a 2005) de reanálise II do NCEP/NCAR. Utilizando o software MatLab foram ajustadas funções de segundo grau às curvas das médias em função da latitude. A figura 3.2 apresenta o resultado.

É possível notar o bom ajuste da função de segundo grau aos três casos. Os valores dos coeficientes da função são expostos na tabela 3.1.

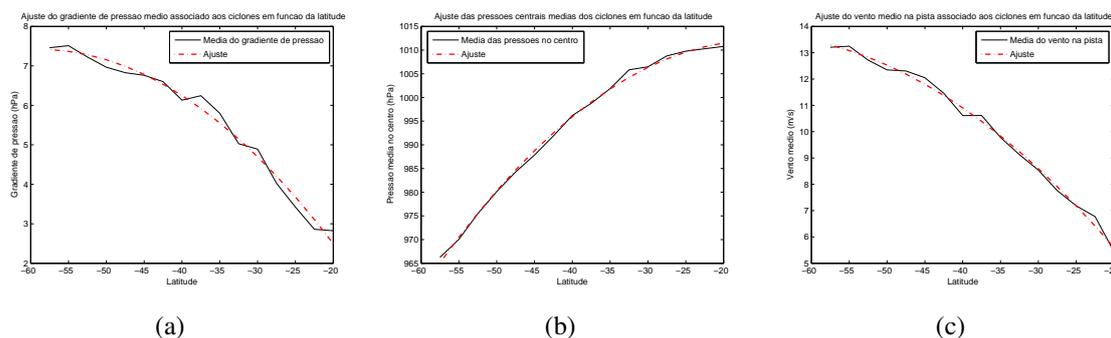


Figura 3.2: Ajuste das funções para o gradiente de pressão (a), pressão no centro (b) e velocidade média do vento (c) em função da latitude.

Tabela 3.1: Coeficientes da função de segundo grau $ax^2 + bx + c$ ajustada para a pressão no centro, gradiente de pressão e vento médio em cada latitude.

	a	b	c
pc (hPa)	-0,0262	-0,7959	1006,1
$bcmin$ (hPa)	-0,0032	-0,3811	-3,8335
$vmin$ (m/s)	-0,0262	-0,7959	1006,1

Após essa implementação no código foram detectados muito mais ciclones próximos ao Rio de Janeiro, satisfazendo as exigências iniciais. *busca*, *tempomin*, *lbx* e *lby* foram mantidas constantes, sem alterações com a latitude.

Com os parâmetros citados até aqui é possível detectar ciclones e pistas (a oeste dos ciclones) com diferentes tamanhos, intensidades e velocidades de propagação. Essas opções, então, permitem ajustar a detecção às características dos processos de geração das ondas, como intensidade dos ventos, tamanho da pista e persistência temporal em determinada região. Inúmeros testes foram feitos analisando e comparando as imagens dos campos de pressão e vento em superfície com os resultados do programa. Isso permitiu testar a sensibilidade à qual os parâmetros devem ser ajustados.

3.2 Cálculo dos parâmetros adicionais de análise

Para a melhor compreensão dos fenômenos detectados na seção anterior, foram feitos alguns cálculos adicionais no programa inicial com os seguintes objetivos:

a) determinar as distâncias dos centros e os ângulos dos ciclones até um ponto de interesse, no caso o ponto 42°W e 25°S (ao sul do Rio de Janeiro);

b) classificar o tamanho das pistas a oeste dos ciclones a partir das variações espaciais do gradiente de pressão;

c) calcular a intensidade dos ventos nas pistas de tamanhos definidos em b). Esse cálculo também é dividido em dois setores: a noroeste e a sudoeste dos centros detectados.

O cálculo das distâncias e ângulos lê a posição do centro do ciclone detectado na grade e transforma em latitude/longitude. Utilizando coordenadas esféricas e considerando o ângulo como aquele entre o norte do ponto de interesse e a posição do centro detectado, os cálculos em quilômetros e graus são realizados. Para estipular o tamanho foram feitas cinco médias, cada uma relativa a três pontos referentes aos valores da pressão em superfície a oeste do ciclone. As tríades de pontos se equidistam e são apresentadas na figura 3.3. Aquela mais próxima do centro é a de número 0, seguido por 1, 2, 3 e 4 (média da tríade mais distante). A classificação do tamanho ocorre analisando as diferenças entre as médias. Se a diferença entre a tríade 1 e a tríade 0 for maior que as diferenças entre as tríades 2 e 1, 3 e 2, e 4 e 3, o ciclone (ou pista a oeste deste) é classificado como de tamanho 1. Nesse caso a queda da pressão com a distância é maior próxima do centro do ciclone. Se a maior diferença ocorrer entre as tríades 2 e 1, *tamanho=2*, assim por diante.

As médias das intensidades dos ventos são sempre relativas à cada tamanho estipulado. Se o ciclone é de tamanho 3 por exemplo, os pontos de grade utilizados para os cálculos correspondem àqueles dentro dos limites do retângulo verde na figura 3.3; se o ciclone é de tamanho 1, somente os pontos pertencentes ao retângulo branco e assim sucessivamente. É feita uma divisão final desses retângulos em dois setores, calculando as médias a noroeste do centro (c) e a sudoeste de (c). Se o setor noroeste tem intensidade do vento superior ao sudoeste, o ciclone é do Tipo 1. Se o setor sudoeste for o mais intenso, então o Tipo é igual a 2. Como resultado, o programa fornece o parâmetro '*tamanho.tipo*' (daqui em diante somente '*Tipo*'). Quando este é igual a 21 por exemplo, o ciclone é de tamanho 2 com o setor noroeste mais intenso (caso encontrando frequentemente).

Os parâmetros de saída do programa são: *Tipo*, *Vmed* e *Vmax* (vento médio e máximo na pista), *Gp* (gradiente de pressão), *Pc* (pressão no centro), *D* e *Ang* (distância e ângulo do centro do ciclone ao Rio de Janeiro), em cada instante de tempo de todos os ciclones com duração mínima fixada de 1986 a 2005².

²Em geral os ciclones de tamanho 4 são pouco encontrados, com os de tamanho 1 e 2 mais frequentes. A maioria dos casos apresentou o setor noroeste com ventos mais intensos.

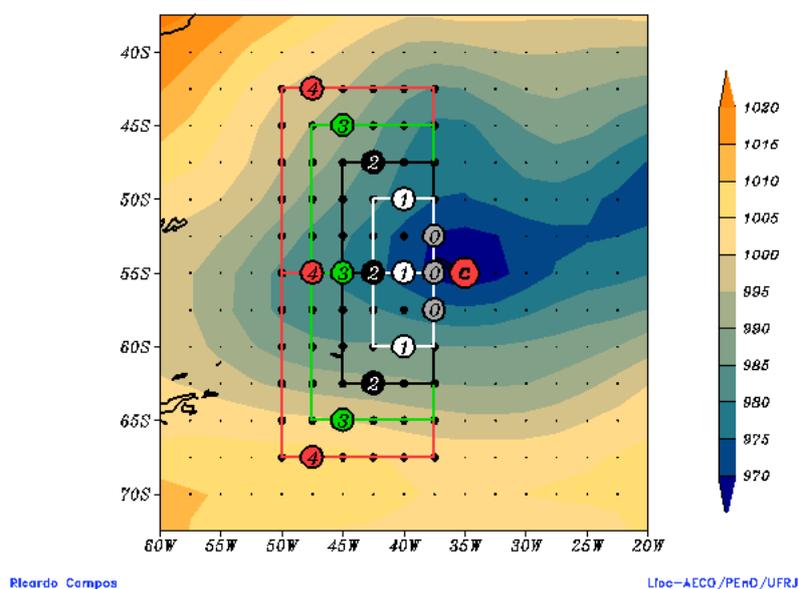


Figura 3.3: Figura representativa dos cálculos dos parâmetros explicados. O círculo vermelho (c) corresponde ao centro do ciclone detectado. Os círculos coloridos são as triângulos numeradas (pontos de grade de pressão em superfície) e os retângulos demonstram as áreas dos pontos usados para os cálculos do vento médio relativo à cada tamanho. O campo colorido ao fundo é a pressão em superfície (em hPa) exemplificando um centro de baixa pressão.

Capítulo 4

Modelagem das Ondas

Devido à pequena duração das séries de ondas medidas na Baía de Campos, torna-se interessante o uso da modelagem numérica para estimar situações pretéritas da agitação marítima, as quais podem contribuir para as futuras análises de extremos. O objetivo desse trabalho não se encontra especificamente na simulação das ondas ou avaliação do modelo, sendo o maior enfoque das discussões finais sobre os resultados trabalhados com a série da bóia. Entretanto, a grande expansão temporal e espacial que a modelagem fornece, permite o avanço em análises antes impossíveis. As questões envolvendo a física do modelo são explicitados no apêndice B.

4.1 Introdução à modelagem de ondas

Até a década de 40, praticamente a única forma de descrever o estado do mar era a escala Beaufort (WMO, 1989 citado por CANDELLA, 1997). O grande interesse no estudo das ondas, em especial na previsão, aumentou durante a Segunda Guerra Mundial devido à importância das operações navais. SVERDRUP e MUNK (1947) criaram o Método da Onda Significativa desenvolvendo um modelo paramétrico que descreve o mar a partir de equações empíricas, fazendo as primeiras previsões em 1943. Pierson em 1955 avançou na temática introduzindo o conceito de espectro de ondas (BRANCO, 2004). A partir de então, diversos outros trabalhos importantes foram desenvolvidos relacionando a evolução do espectro a partir do vento em superfície, com destaque ao projeto JONSWAP, já citado.

Esses trabalhos, junto com o avanço matemático dos métodos numéricos e, principalmente, acampanhado da evolução computacional, permitiram o desenvolvimento de modelos de previsão de onda operacionais em diversas instituições no mundo. Alguns exemplos atuais são: *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC - EUA), *National Cen-*

ters for Environmental Prediction (NCEP - EUA), *British Meteorological Office* (Reino Unido), *Royal Netherlands Meteorological Institute* (RNMI - Holanda), *Scripps Institution of Oceanography* (EUA), *Instituto per lo Studio della Dinamica delle Grande Masse* (Itália), *Max Planck Institute of Meteorology* (MPIM - Alemanha) e o *Geophysical Institute Tokohu University* (GITU - Japão). Em caráter nacional destacam-se: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC - INPE), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM - Marinha do Brasil), Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais (MASTER - IAG/USP), Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos (LAMMA - UFRJ), Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR - UFSC), entre outros.

A modelagem das ondas se aplica em diversas áreas e interesses. A previsão disponibilizada pelos laboratórios e institutos citados são fundamentais para: a navegação (desde pequenas embarcações pesqueiras próximas à costa até o planejamento das rotas de grandes navios); atividades petrolíferas sobre o oceano (como operações de transporte de óleo entre as embarcações do tipo FPSO, armazenadoras, e os navios aliviadores); planejamento de obras costeiras (construção de molhes, espigões e píeres); atividades portuárias; lazer (em esportes como o surf, bodyboarding, windsurf e vela) e para sistemas de alerta de eventos extremos junto à marinha, defesa civil e bombeiros. Além da previsão, a modelagem pode ser utilizada para os *hindcasts*, inserindo condições de contorno pretéritas para simular a agitação marítima em determinado período e região (como é feito na metodologia do presente trabalho). Esse tipo de procedimento é extremamente útil para se conhecer o clima de ondas e as características da distribuição de eventos extremos em grandes áreas sem medições. Ganha-se em abrangência temporal e espacial ao se comparar com medições pontuais. Tratando de águas rasas e intermediárias, esse procedimento serve ainda em estudos de erosão costeira, transporte de sedimentos, estimativa de energia, projetos de portos e estruturas oceânicas.

4.2 Simulação da agitação marítima - *Hindcast*

O modelo utilizado para este trabalho é o modelo espectral de terceira geração WAVEWATCH III versão 2.22, desenvolvido pelo *Marine Modeling and Analysis Branch*, do *Environmental Modeling Center* pertencente ao NCEP. O desenvolvimento teórico, trabalho prático, bem como a escrita desta seção foi baseada no manual técnico, em TOLMAN (2002). No apêndice B foi desenvolvido um resumo simplificado sobre a física do modelo, contendo as principais equações.

A modelagem realizada tem o objetivo de representar as grandes ondulações do **quadrante sul** geradas por situações meteorológica severas no Atlântico Sul e suas variações

sazonais e interanuais. Foge do escopo simular com melhor veracidade possível as características ondulatórias como um todo¹, sendo o foco destinado às ondas em águas profundas², geradas por tempestades presentes na grade fixada.

Foram utilizados como entrada no modelo a batimetria e o vento em superfície. A primeira foi adquirida através do banco de dados geofísicos GEODAS (*Geophysical Data System*) do *National Geophysical Data Center* (NGDC) da NOAA, na resolução de 10 minutos de grau, com limites na GRADE2 (70°S a 15°S, 70°W a 20°E). Esses dados foram interpolados no software MatLab para 1° X 1° de resolução para entrada no modelo. A figura 4.1 ilustra a batimetria.

O campo de vento utilizado corresponde às componentes zonal e meridional em superfície (10 metros), da reanálise II do NCEP/NCAR, no período de 00Z de 1/1/1986 a 18Z de 31/12/2005. A resolução temporal é igual a 6 horas e espacial de 1,9045° de latitude por 1,8750° de longitude. Os limites são os da GRADE2 expandida, ou seja, latitudes e longitudes próximas a GRADE2 (uma vez que a resolução não permite a sobreposição dos pontos de fronteira) e exteriores a esta. Mais especificamente 71,4262°S a 14,2911°S, e 71,2500°W a 20,6250°E. O campo de vento foi interpolado pelo próprio WAVEWATCH para a resolução 1° X 1°.

Os inúmeros parâmetros de entrada foram utilizados no modo *default*. O termo Γ (constante de interação com o fundo - da equação B.27) foi fixado igual a -0,038, relacionado a fricção associada a marulhos. A profundidade mínima estipulada foi vinte e cinco metros, considerando as limitações do modelo em representar processos envolvendo águas rasas e os comprimentos de onda típicos das ondulações incidentes na costa do Rio de Janeiro. Os passos de tempo (descrito em B.2.3) foram utilizados com os seguintes valores:

1. passo de tempo global = 2700 s;
2. passo de tempo de tempo de propagação espacial = 900 s;
3. passo de tempo referente às propagações interespectrais = 2700 s;
4. passo de tempo referente à integração dos termos fonte = 270 s.

¹Uma vez que já existem os dados da bóia na Baía de Campos utilizados nesse trabalho.

²Razão entre a profundidade e comprimento de onda: $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$.

O vetor de frequências utiliza 25 valores variando de 0,0418 a 0,4110 Hz, com incremento $X_{\sigma} = 1,1$ conforme a equação B.28. O vetor de direções possui resolução de 15° , variando de 0° a 360° , no total de 24. O espectro direcional bidimensional utilizado no modelo corresponde então à matriz 24 X 25.

A simulação tem início em 00Z de 1/1/1986 e fim às 21Z de 31/12/2005, somando 20 anos, e resolução temporal de 3 horas (ao todo 58440 tempos). O modelo foi inicializado dez dias antes da data de começo para simular as condições iniciais (“aquecimento”). A seguir as saídas fixadas:

- Campos de altura significativa, direção de pico e frequência de pico, com limites na GRADE2 e resolução $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;
- Espectros direcionais (24 direções por 25 frequências) nos pontos 23°S e 38°W (PONTO2) e 25°S e 42°W (PONTO3).

A decisão e posição dos dois pontos de saída espectral foi pensada a partir de dois objetivos. Primeiramente o de abranger o estado do Rio de Janeiro e poder representar as principais ondulações que afetam as cidades costeiras do estado. É intenção também ter um ponto com saídas espectrais próximas à Baía de Campos, em que foram efetuadas medições no Campo de Marlim e Barracuda, permitindo avaliar o modelo (vide próximo capítulo), principal motivo para a escolha da posição do PONTO2. Foi levada em conta também a profundidade: o PONTO2 está a 3675 m e o PONTO3 a 2258 m, não invadindo a região costeira, com águas demasiadamente rasas para a simulação da forma como está sendo desenvolvida. Outra questão é a variação brusca de profundidade entre os pontos da malha. Como foi fixado uma grade com $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolução, possíveis erros podem ser introduzidos em situações de grandes mudanças na batimetria, pelo fato da resolução (e dos passos de tempo) ser pouco resoluto (e grandes), adequados para águas profundas fora da plataforma continental, conforme a teoria descrita no apêndice B. A figura 4.2 apresenta a posição dos três pontos: PONTO1 (bóia), PONTO2 e PONTO3 (saídas espectrais do modelo).

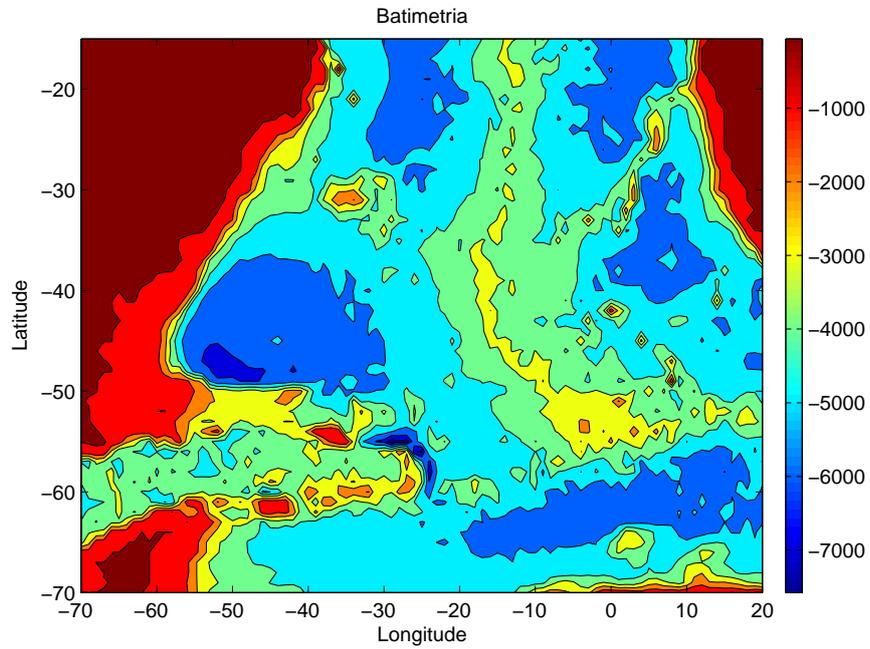


Figura 4.1: Batimetria usada para a simulação. O campo colorido representa a profundidade $\cdot(-1)$ em metros.

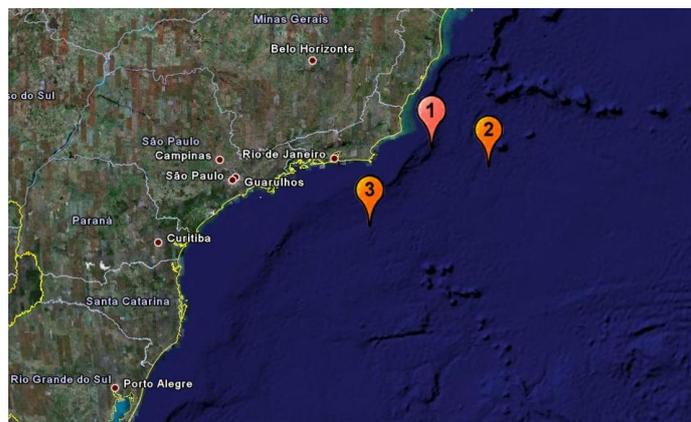


Figura 4.2: Posição dos pontos de saída do WAVEWATCH e da bóia. Fonte: Google Maps.

Capítulo 5

Avaliação dos Resultados do Modelo

Este capítulo tem como objetivo avaliar os resultados da modelagem realizada anteriormente, estudando o comportamento do modelo em condições restritas da agitação marítima. Tal avaliação se torna importante para entender os futuros comportamentos da simulação nas análises de extremos e estudos relacionados à meteorologia. A metodologia desenvolvida nas seções 5.3 e 5.6 também é utilizada em outras ocasiões neste trabalho.

A presente avaliação do WAVEWATCH será feita selecionando eventos de interesse específicos, e não de forma geral considerando diversas condições de mar, como é realizado na maioria dos trabalhos citados sobre o assunto. A comparação dos resultados das simulações com os dados medidos é realizada primeiramente através dos parâmetros altura significativa, direção de pico e período de pico; em seguida dividindo o espectro em faixas de frequência, avaliando-as separadamente. Esse procedimento permite detalhar melhor onde estão as deficiências da modelagem, em especial em simular grandes ondulações do quadrante sul.

5.1 Estatística básica empregada

Baseado em trabalhos anteriores de avaliação de modelos de onda, como CANDELLA (1997), ROCHA *et al.* (2004) e OSTRITZ (2008), as análises estatísticas são feitas utilizando as seguintes ferramentas:

- Diagramas de espalhamento com as retas de regressão linear simples (ajustadas por $y = coefang \cdot x + coeflin$), calculadas pelo software MatLab, o qual fornece os dois coeficientes da reta associada aos dados;
- Coeficientes de correlação linear (CC);
- Erro médio ou bias (EM);

- Erro médio quadrático (EMQ);
- Índice de espalhamento (IE).

Os quatro últimos ítems citados são calculados da seguinte forma respectivamente:

$$CC(B, W) = \frac{cov(B, W)}{\delta_B \cdot \delta_W} = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \mu_B)(W_i - \mu_W)}{\delta_B \cdot \delta_W} \quad (5.1)$$

$$EM(B, W) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i - B_i) \quad (5.2)$$

$$EMQ(B, W) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - B_i)^2} \quad (5.3)$$

$$IE(B, W) = \frac{EMQ}{\mu_B} \quad (5.4)$$

Onde B e W são as séries da bóia e do WAVEWATCH, cov a covariância, δ o desvio padrão, μ a média e n é o número de pontos. O diagrama de espalhamento aponta tendências de subestimação e superestimação entre as variáveis, identificando entre quais valores ocorrem comparando a reta $y = coefang * x + coeflin$, ajustada, e a reta $y = x$ de concordância perfeita. O CC, entre -1 e 1, permite entender o grau de associação entre as variáveis. Com o cálculo do EM é possível saber as diferenças entre as duas séries de maneira mais abrangente: se $EM < 0$ a variável da bóia possui maiores valores que a mesma do WAVEWATCH (subestimação do modelo), enquanto $EM > 0$ ocorre o contrário, e superestimação da simulação. O EMQ quantifica as diferenças (tanto positivas quanto negativas) entre o modelado e o medido, sendo sempre positivo. O IE pondera o EMQ com a média da variável da bóia, pois determinados EMQ podem ser grandes para Hs, por exemplo, e para Tp não (pois este possui em geral valores absolutos maiores).

Uma simulação perfeita resultaria em $CC=1$ e EM, EMQ e IE nulos.

5.2 Período e base de dados

Os dados usados para a avaliação dos resultados da modelagem consistem nas medições realizadas pela bóia do tipo heave-pitch-roll na Baía de Campos, fornecidos pela PETROBRAS. Esta ficou fundeada de 1991 a 1993 no Campo de Marlim, posição $22,52^\circ S$ e $39,97^\circ W$, a uma profundidade de 1250 metros. Posteriormente a mesma foi fundeada no Campo de Barracuda, em $22,63^\circ S$ e $40,20^\circ W$, com profundidade de 1050

metros, permanecendo de janeiro de 1994 a junho de 1995 (PINHO, 2003). Os dados disponíveis consistem então do período de 1991 a 1995 (42 meses não regulares, com alguns instantes sem medições), com resolução temporal de três horas, os quais são utilizados neste capítulo de avaliação bem como para as análises de extremos (capítulos 6 e 8) e meteorológicas (capítulo 7).

5.3 Seleção dos eventos

A seleção dos eventos a serem avaliados possui basicamente dois objetivos: (1) assegurar a independência estatística entre os casos e (2) selecionar eventos do quadrante sul. Para tanto foi construído um programa que “varre” toda a série de dados procurando instantes de valores máximos de Hs distando de uma janela temporal JT , assegurando que cada ondulação selecionada não foi gerada pelo mesmo sistema meteorológico que as demais¹. Os selecionados são então verificados (pelo mesmo programa) quanto às respectivas direções de pico; se forem superiores a uma direção mínima pré-fixada $Dpmin$, o segundo critério então é aceito. No caso do máximo durar mais de um instante com mesma altura significativa, é selecionado aquele com maior período de pico.

Os instantes de tempo em que (1) e (2) são satisfeitos são armazenados em um vetor temporal, o qual serve para selecionar os valores correspondentes nas séries das variáveis desejadas (Hs, Tp, Dp, ou relativo às faixas de frequência) e montar um grupo com os eventos de interesse. Como o grande objetivo do trabalho está associado a ondulações extremas geradas por ciclones, os valores de JT e $Dpmin$ foram escolhidos a partir das características desses sistemas, descritos nos capítulos 2 e 3. JT foi estipulado como a duração do ciclone mais longo analisado, assegurando que ondulações que distem temporalmente desse valor sejam necessariamente geradas por sistemas meteorológicos diferentes, confirmando a independência estatística. $Dpmin$ foi determinado como o ângulo entre o centro do ciclone detectado mais ao norte e o Rio de Janeiro, assegurando que todas as direções das ondulações geradas por ciclones têm valor maior que $Dpmin$.

Para os ciclones analisados ao longo dos vinte anos, de acordo com a identificação do capítulo 3:

Tabela 5.1: Valores de JT e $Dpmin$.

JT	234 horas
$Dpmin$	90°

¹Ou seja, somente um valor para cada ondulação gerada por um ciclone ou anticiclone por exemplo.

O grande valor de JT exclui os casos de ondas geradas em ciclogênese secundária ou extremos que ocorrem muito próximos uns dos outros, selecionando sempre o mais intenso. Deixar de lado esses casos pode parecer um grande infortúnio, entretanto é importante para assegurar a independência estatística e aplicação da técnica de análise de extremos (capítulos 6 e 8). IWABE (2008) mostra a grande dependência da ciclogênese secundária, a qual ocorre na maioria das vezes na retaguarda do ciclone principal, com a configuração sinótica inicial geradora do primeiro centro de baixa pressão. Naturalmente essa questão é retomada nas análises das PLEDS, onde esses casos apresentam maior duração, pois a pista persiste intensa e semi-estacionária por mais tempo, com algumas vezes apresentando aparente deslocamento das ondas de sudeste para sudoeste. ROCHA *et al.* (2004) encontra alguns casos de ciclones longos gerando grandes ondulações no Rio de Janeiro, e chega a utilizar o WAVEWATCH com duração de 216 horas influenciando eventos extremos individuais², valor próximo a JT fixado.

5.4 Avaliação inicial - Hs, Tp, Dp

A avaliação do modelo pode ser feita selecionando os eventos da simulação, com os critérios descritos na seção anterior, comparando-os com os respectivos dados medidos (a partir da seleção usando o vetor temporal); ou então, no caso contrário, selecionando os eventos da bóia e comparando-os com os respectivos dados do modelo. O primeiro procedimento será chamado “ww3Xbóia” e o segundo “bóiaXww3”³. Em termos de eventos extremos, o primeiro é importante para entender quais as possíveis falhas (ou viés) do modelo em previsões e sistemas de alerta, em que o foco é o resultado do WAVEWATCH operacional⁴. O segundo tem a função de compreender o quanto a modelagem é capaz de representar determinadas situações de mares severos medidos, sendo o foco os dados da bóia em que houveram grandes ondulações. A diferença dos dois procedimentos se dá pelo fato das imperfeições na simulação resultarem em extremos diferenciados detectados entre os resultados do WAVEWATCH e os dados do ondógrafo.

5.4.1 ww3Xbóia

Para esta etapa são selecionadas as séries de Hs, Tp e Dp, de 1991 a 1995, dos resultados do modelo. Os eventos de interesse são agrupados numericamente segundo o item 5.3 e comparados com os dados da bóia. Para os valores de JT e $Dpmin$ fixados (tabela

²Ou seja, os autores consideram um único evento iid abrangendo 216 horas.

³Lê-se WAVEWATCH versus bóia e bóia versus WAVEWATCH.

⁴Lembrando que, tipicamente, a metodologia de simulação do WAVEWATCH em laboratórios de previsão costuma ser um tanto diferente da realizada nesse trabalho, apesar da física do modelo ser a mesma.

5.1), o programa forneceu sessenta e oito casos, dos quais apenas trinta e cinco possuem os respectivos dados concomitantes do ondógrafo⁵. A seguir são expostos os resultados.

Altura Significativa

Na figura 5.1 é possível notar até o valor $H_s=2,8$ m as alturas do modelo tendendo a superar o ondógrafo, enquanto acima desse, o modelo em geral apresenta alturas inferiores. Destacam-se dois eventos na figura 5.1(b) com grande discordância entre o modelo e a bóia, que são respectivamente os valores máximos das duas séries (H_s em torno de 6 metros). A nuvem de pontos apresenta grande dispersão, principalmente nos casos de maiores alturas do ondógrafo.

Direção de Pico

O diagrama do gráfico de 5.2 aponta superestimação geral do modelo até $D_p=190,6^\circ$ e subestimação acima deste valor. Destaca-se a grande diferença nas D_p do ondógrafo abaixo de 120° . A melhor concordância entre os resultados se dá entre 180° e 250° , com ligeira subestimação do WAVEWATCH. Uma suposição para explicar o fato pode estar nos limites estipulados na simulação do modelo, o qual se estende somente até 20° S, eliminando grande parte da pista de nordeste associada ao AAS. Como consequência, em mares bimodais a energia das ondas geradas pelo AAS pode ser, em alguns casos, superior aos marulhos de sul, deslocando D_p da bóia para nordeste. Como os limites da GRADE2 do modelo praticamente eliminam essa situação bimodal e energia do AAS, raramente D_p simulato tem valores abaixo de 90° .

Período de Pico

Novamente há superestimação do modelo nos valores menos elevados na figura 5.3. Acima de 9,7 s os T_p do ondógrafo tendem a ser maiores. Chama-se atenção aqui à questão discutida na direção de pico. Casos bimodais com grande energia de nordeste deslocam o pico de maior intensidade para outro pico do espectro relativo à D_p mais baixas. De acordo com PARENTE (1999), esses eventos são associados a vagas (“sea” ou “quasi-sea”) com T_p menores. O fato referido pode interferir nas comparações presentes. Ligeiras diferenças de energia entre o marulho de sul e a vaga de nordeste podem gerar grandes saltos nos valores desses parâmetros, alterando significativamente a avaliação.

⁵Devido ao grande número de períodos sem dados na série, em que ocorreram problemas com a bóia.

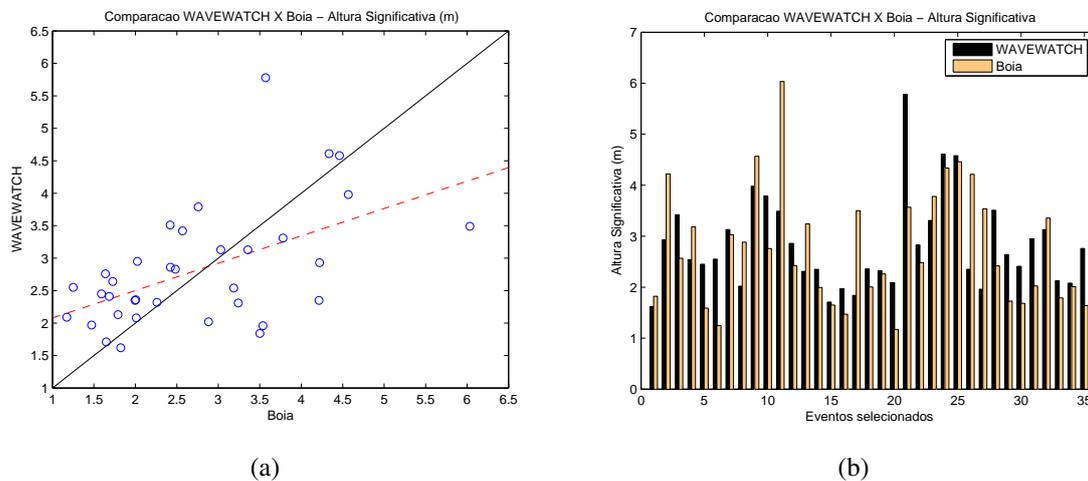


Figura 5.1: Comparação dos eventos selecionados da série de altura significativa do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.

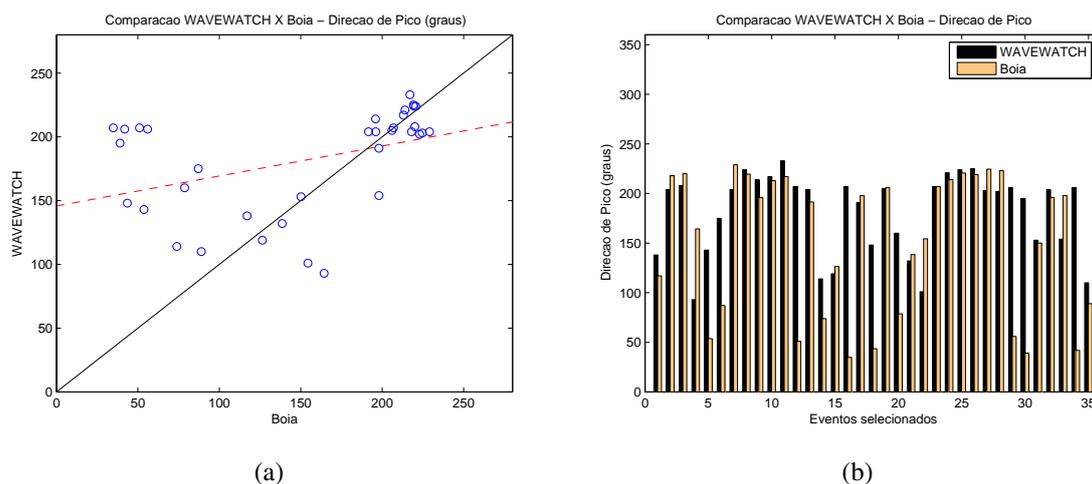


Figura 5.2: Comparação dos eventos selecionados da série de direção de pico do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.

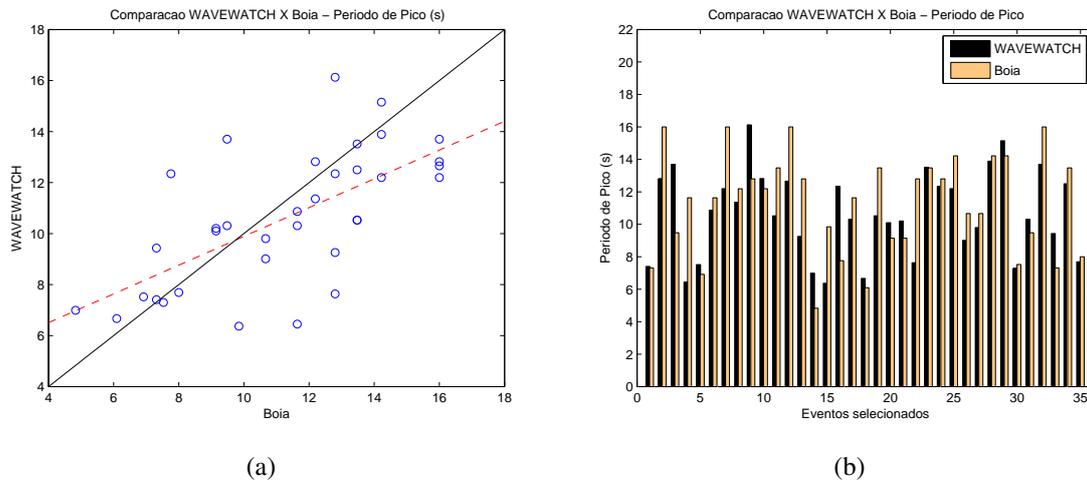


Figura 5.3: Comparação dos eventos selecionados da série de período de pico do modelo com os valores concomitantes da bóia. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.

Coeficientes da reta ajustada, CC, EM, EMQ e IE

Na tabela 5.2 os coeficientes angulares distantes de um, juntamente com os coeficientes lineares muito acima de zero, apontam grandes diferenças entre as regressões lineares e as retas de concordância perfeita. Nos três parâmetros (H_s , D_p e T_p) o modelo superestima valores menores enquanto o ondógrafo é superior para os eventos mais elevados. O CC é maior em T_p e menor em D_p ; no entanto, nas direções de pico da bóia acima de 180° (intervalo importante, pois representa tipicamente as D_p das ondas que invadem o Rio de Janeiro junto com a chegada de frentes frias associadas a ciclones), o modelo simulou relativamente bem.

O EM de H_s próximo a zero informa que a nuvem de pontos, apesar de ter muita dispersão e EMQ elevado, é distribuída ao longo da reta $y = x$. De acordo com o grande EM de D_p , o modelo em geral superestima as direções em quase 30° , principalmente nos casos de menor valor de D_p , como foi visto no ajuste linear. O EMQ desse parâmetro também parece elevado, mas deve-se levar em conta que a discretização direcional da simulação é de 15° . O EM do T_p igual a $-0,44$ s mostra que as medições tendem a superar bem pouco a modelagem. O maior CC e *coefang*, e menor IE de T_p , indicam que o período de pico foi a variável melhor simulada pelo modelo, seguida por H_s e por último D_p .

Tabela 5.2: Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação ww3Xbóia.

	<i>coefang</i>	<i>coeflin</i>	CC	EM	EMQ	IE
Hs	0,42	1,66	0,53	0,06 m	1,00 m	0,36
Dp	0,24	145,76	0,41	29,76°	70,97°	0,47
Tp	0,56	4,25	0,65	-0,44 s	2,78 s	0,25

5.4.2 bóiaXww3

Aqui são selecionadas as séries de Hs, Tp e Dp dos resultados da bóia. Os eventos de interesse são agrupados numericamente (segundo o item 5.3) e comparados com as simulações do WAVEWATCH.

Altura Significativa

É possível notar na figura 5.4 os resultados do modelo inferiores aos do ondógrafo para todos os registros, com nenhum caso acima da linha preta de concordância perfeita. Essa subestimação do WAVEWATCH é maior para valores mais elevados de Hs, com o coeficiente angular da reta de regressão linear menor que um. Observam-se alguns casos em que Hs da bóia é superior a 4 m enquanto o modelo apresenta valores em torno de 1 m, indicando grande diferença entre as séries. Pode parecer repetitivo, entretanto é importante comentar sobre a questão dos limites da GRADE2 do modelo também influenciando Hs. Sabe-se que esse parâmetro leva em conta a energia total do espectro, oriunda de todas as direções. Ao praticamente eliminar a influência do AAS naturalmente diminui-se a entrada de energia, mesmo em casos de Dp do quadrante sul, pois não se pode afirmar que não há incidência de nenhuma onda de nordeste durante a chegada de marulhos de sul. Tal fato é sutil em casos de extremos com $Dp > 90^\circ$, pois em geral estão associados à passagem de frentes frias que deslocam o AAS para leste, desfazendo a pista de nordeste; entretanto, não se pode descartar a chegada de alguma energia nessa direção. Esse fato não explica totalmente a grande subestimação do WAVEWATCH, que pode estar ligada a inúmeros fatores comentados mais adiante, mas é responsável por alguma contribuição no viés encontrado.

Direção de Pico

Na figura 5.5, em vinte e nove dos trinta e seis casos, a direção de pico do modelo representa bem o registro da bóia, com a regressão linear próxima à reta de concordância

perfeita. Tanto em valores de D_p próximos a 250° quanto em torno de 120° é possível notar concordância entre as séries. Devido aos sete eventos da bóia mal simulados pelo modelo, o coeficiente da reta de regressão se torna menor que um (vide tabela 5.3), indicando uma pequena subestimação do WAVEWATCH para D_p maiores que $107,5^\circ$. Comparando com o procedimento *ww3Xbóia*, com excessão dos seis eventos citados, pode-se dizer que a simulação é satisfatória e tem melhores resultados.

Período de Pico

Na figura 5.6, dos trinta e seis casos, apenas cinco o WAVEWATCH apresentou valores de T_p superiores ao ondógrafo, indicando novamente que o modelo resulta em valores menores desse parâmetro. A reta de regressão linear aponta subestimação para T_p acima de 5,7 s e superestimação para valores inferiores; entretanto, como não houve nenhum caso selecionado da bóia com T_p menor que esse, não é possível confirmar pelos dados essa afirmação. Em verdade, com o aumento de T_p é observado um distanciamento entre a reta de ajuste linear e a reta de concordância perfeita, indicando que a subestimação citada tende a ser maior em T_p mais elevados.

A figura 5.7 exemplifica o caso de mares com energia em mais de uma direção. Nela se vê três picos, sendo dois deles com bastante energia: um com direção S/SE e outro de E/NE. Ao falar de D_p e T_p nesse evento, a referência está no maior pico. No gráfico D_p é S/SE e T_p tem o período relacionado a esse. Se, por algum motivo, o modelo subestima sutilmente a ondulação de sul, naturalmente D_p e T_p passam a se referir ao outro pico, de E/NE, mudando completamente de valores. Problema maior ocorre quando se aborda H_s , T_p e D_p em conjunto, pois H_s leva em consideração a energia de todo o espectro e não somente do pico a que T_p e D_p estão se referindo (máximo). Na figura 5.7 H_s é relativamente alta, entretanto esse valor não é oriundo somente de D_p com período T_p , fornecendo uma idéia irreal da situação do mar. Tal problema é resolvido avaliando o modelo por faixas de frequência, ou então analisando os eventos com o auxílio da PLEDS, explicada a seguir. Essa questão é importante também para as futuras análises de extremos dos capítulos 6 e 8. Costumeiramente as técnicas utilizam o parâmetro H_s , o que exige cuidado, pois casos unimodais com ondas muito grandes podem ter alturas significativas menores que eventos trimodais com ondas moderadas, em que a soma total da energia do espectro se torna maior.

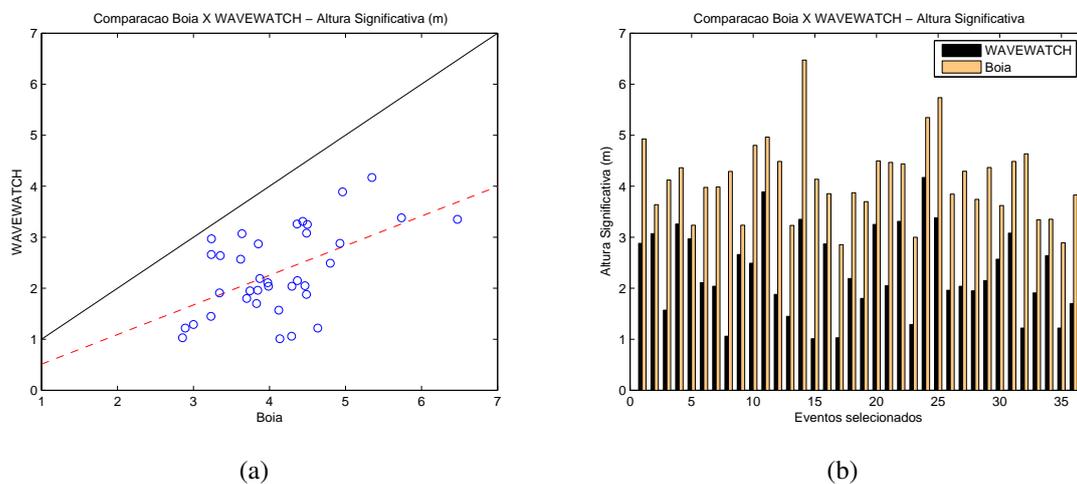


Figura 5.4: Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de altura significativa do modelo. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos.

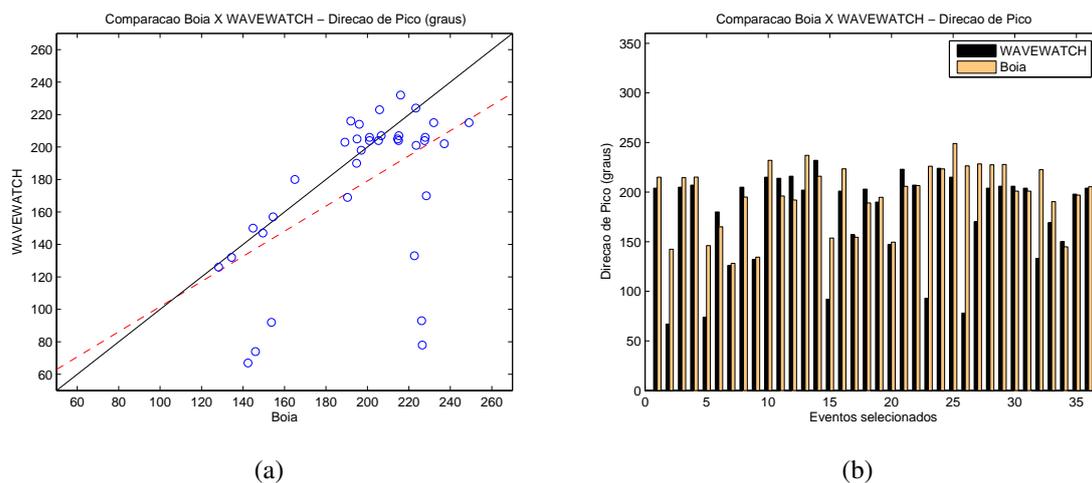


Figura 5.5: Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de direção de pico do modelo. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos selecionados.

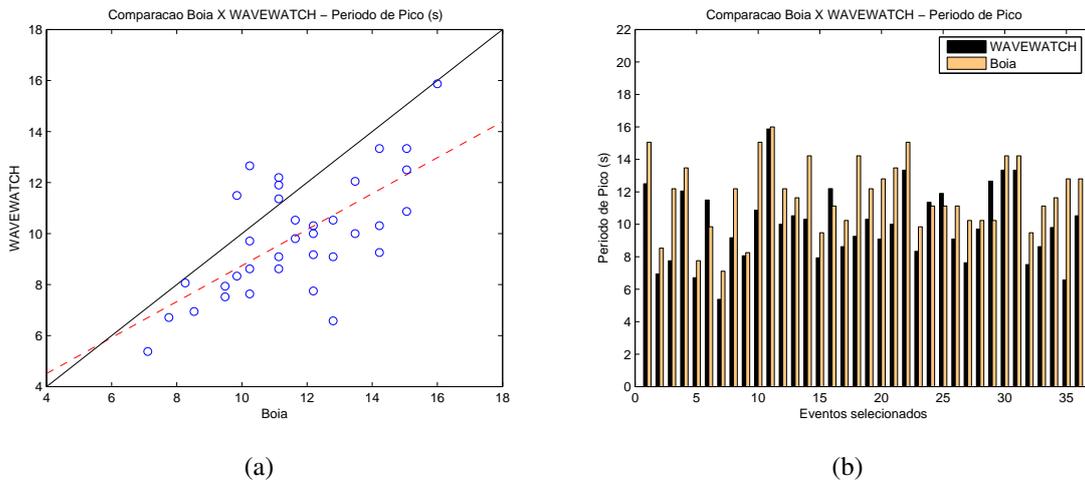


Figura 5.6: Comparação dos eventos selecionados da bóia com a série de período de pico. (a) Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (b) Gráfico de barras comparando os eventos selecionados.

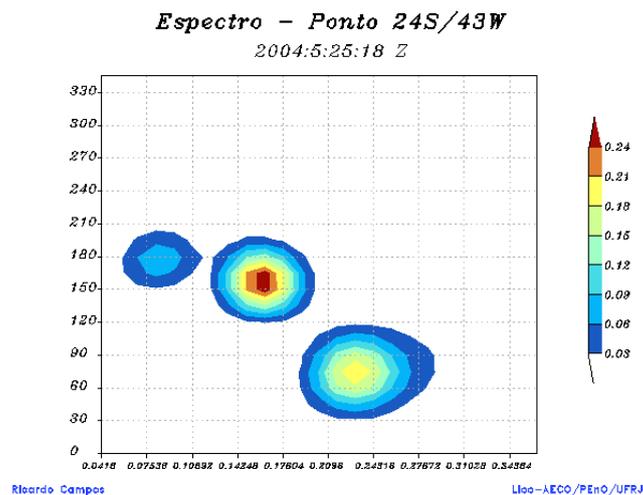


Figura 5.7: Exemplo de espectro direcional ao largo do Rio de Janeiro. No eixo das abscissas a frequência em Hz e na ordenada a direção em graus. O campo colorido apresenta a variância (energia).

Coefficientes da reta ajustada, CC, EM, EMQ e IE

Analisando a tabela 5.3 é possível perceber CC muito semelhante para os parâmetros Hs e Dp. Novamente a melhor correlação é relacionada ao período de pico, com menor IE. Os coeficientes angulares apontam Dp como o caso de maior proximidade entre a reta de regressão e a de concordância perfeita; todavia, o EM e EMQ aparecem com valores altos, inferindo quando incerteza direcional nos resultados da simulação. Fica evidente a maior

subestimação da simulação do modelo para a altura significativa, em que o coeficiente angular está em torno de 0,58 e o linear é menor que zero, apresentando o maior IE. O EM e EMQ desse parâmetro se mostram elevados, maiores inclusive que o caso ww3Xbóia (vide tabela 5.2). Conclui-se que o procedimento de tomar os extremos da bóia e comparar com a simulação tende a apresentar maior subestimação do WAVEWATCH do que o contrário.

O EM menor que zero para Hs, Dp e Tp aponta que, nos três parâmetros, os valores medidos pela bóia superam os modelados. O EMQ de Dp do presente caso é menor que em ww3Xbóia (e o EM entre eles possui sinal contrário), ou seja, em ww3Xbóia as direções do modelo tendem a ser maiores que as medições, com EMQ mais elevado, enquanto em bóiaXww3 ambos são menores. No caso de Tp, o EM aparece maior (o módulo) em bóiaXww3 do que em ww3Xbóia, enquanto o contrário ocorre com EMQ e IE. Conclui-se que o Tp, novamente com bons resultados relativos, é melhor simulado em bóiaXww3 do que ww3Xbóia, apesar do viés mais expressivo.

Tabela 5.3: Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação bóiaXww3.

	<i>coefang</i>	<i>coeflin</i>	CC	EM	EMQ	IE
Hs	0,58	-0,07	0,54	-1,79 m	1,95 m	0,47
Dp	0,77	24,26	0,54	-20,13°	45,01°	0,23
Tp	0,71	1.69	0,68	-1,77 s	2,51 s	0,21

5.4.3 Comentários e discussões

MARQUES DA CRUZ (2004) desenvolveu trabalho semelhante ao apresentado nesse capítulo, realizando uma simulação com o modelo WAVEWATCH para os meses de abril, maio e junho de 1997, na grade 100°W a 20°E, 80°S a 0°, utilizando como entrada o vento da reanálise do NCEP/NCAR. Esse comparou os resultados com os dados do ondógrafo direcional (*Directional Waverider - Mark II*) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM - Marinha do Brasil) em Arraial do Cabo. É importante lembrar que a análise utilizou todos os resultados da simulação, não selecionado eventos específicos.

É possível perceber as maiores diferenças em relação ao presente trabalho nas alturas significativas: enquanto MARQUES DA CRUZ (2004) encontrou CC=0,86, as tabelas 5.2 e 5.3 colocam 0,53 e 0,54 respectivamente; indicando grande diminuição da correlações. A proximidade entre os valores 0,53 e 0,54 sugere que a correlação entre a avaliação ww3Xbóia e bóiaXww3 é praticamente a mesma; entretanto, ao observar os gráficos de dispersão e os outros índices estatísticos, nota-se a maior subestimação no procedimento

bóiaXww3, com grande aumento do módulo do EM e EMQ, fazendo com que IE consequentemente seja maior. Para o EMQ, MARQUES DA CRUZ (2004) encontrou 0,73 m contra 1,00 e 1,95 m de ww3Xbóia e bóiaXww3. O aumento das diferenças entre simulação e medição fica mais evidente principalmente no caso bóiaXww3.

O período de pico se comporta de maneira contrária aos outros parâmetros quando é comparado o CC de MARQUES DA CRUZ (2004) com a avaliação deste capítulo. Enquanto o autor encontra $CC=0,46$, em 5.2 e 5.3 se vê $CC=0,65$ e $0,68$ e maior correlação. Tal fato não é verificado no EMQ, o qual possui valores menores em MARQUES DA CRUZ (2004). É possível afirmar que a perda na qualidade da modelagem do período de pico no procedimento realizado é menor do que os parâmetros Hs e Dp. O trabalho também mostra a série da bóia em geral superando aos resultados da modelagem, característica encontrada na presente simulação, principalmente no procedimento bóiaXww3.

O trabalho mais significativa de avaliação do WAVEWATCH associado a ciclones no Atlântico Sul corresponde a ROCHA *et al.* (2004), outrora comentado rapidamente. Os autores avaliam o modelo usando como entrada a reanálise do NCEP/NCAR (domínio 60°S a 10°N , 75°W a 15°E) para seis casos de ciclones no ano de 1999. A comparação é feita com os dados do TOPEX/Poseidon. A identificação dos sistemas foi baseada em SINCLAIR (1995), procurando máximos de vorticidade no vento a dez metros. Como os dados do satélite fornecem grande distribuição espacial, o que não é possível com a bóia, o trabalho utiliza a média de Hs em pequenos retângulos dos campos do modelo e dos dados do TOPEX.

As maiores ondas significativas encontradas em ROCHA *et al.* (2003) foram de 7 m associadas à pista do ciclone, chegando ao largo do Rio de Janeiro com 5,5 m. Nessa mesma região a maioria das ondas geradas pelos sistemas estiveram em torno ou abaixo de 4 m. Os resultados desse trabalho em geral são relativamente bons, com 80% dos instantes com erro (WAVEWATCH - TOPEX) entre -1,0 e 0,5 m. Destaca-se aqui a subestimação do modelo encontrada para a maioria dos casos, com média de 0,47 m. Apesar da satisfação com a simulação, foi encontrado um ciclone que gerou subestimação do WAVEWATCH superior a 100%. Essas características são verificadas pela figura 5.8. O histograma mostra o deslocamento dos maiores valores para a esquerda do zero, confirmando a subestimação do modelo. Alguns casos importantes são verificados abaixo de -1 m, em que Hs do TOPEX se torna bastante superior ao WAVEWATCH.

Um dos resultados mais interessantes de ROCHA *et al.* (2004) é a comparação entre eventos moderados e intensos. Os autores dividem os casos em ciclones que geraram ondas superiores e inferiores a 5 m, para então avaliar a qualidade da simulação comparando com os dados do TOPEX. Os valores são vistos na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resultados de ROCHA *et al.* (2004) para avaliação do WAVEWATCH III em ondas significativas acima e abaixo de 5 m. EM= Erro Médio, EMQ= Erro Médio Quadrático, CC=Coeficiente de Correlação.

Qualidade de Hs:	EM (m)	EMQ (m)	CC
abaixo de 5 m	-0,41	0,66	0,86
acima de 5 m	-1,05	1,59	0,70

Primeiramente observam-se os EM negativos em ambos os casos, evidenciando a subestimação do WAVEWATCH em Hs. As diferenças se referem a eventos intensos, com aumento em módulo do EM e EMQ, e diminuição de CC. A tabela 5.4 prova o que tem sido comentado ao longo dessa avaliação relativo à simulação de ondas com grandes alturas. Comparando ROCHA *et al.* (2004) com o presente trabalho, observam-se as maiores diferenças em CC. As tabelas 5.2 e 5.3 referentes aos procedimentos ww3Xbóia e bóiaXww3 possuem CC igual a 0,53 e 0,54, enquanto ROCHA *et al.* (2004) chega a CC=0,70. Para o EM e EMQ os resultados são bem parecidos (com viés um pouco menor em ROCHA *et al.* (2004)) e expressam os problemas associados aos extremos de onda simulados. O EMQ de ww3Xbóia e bóiaXww3 são 1,00 e 1,95, enquanto a tabela 5.4 fornece CC=1,59.

A tabela 2.1 apresentada na subseção 2.5.3, relativa às reanálises do NCEP, vem explicar tal característica verificada. ROCHA *et al.* (2004) conclui que a perda na qualidade de Hs do modelo em situações de ciclones severos é devido a típica **subestimação dos ventos da reanálise do NCEP/NCAR**, que aumenta com o crescimento da intensidade.

A partir dos resultados e comparações com outros trabalhos, como MARQUES DA CRUZ (2004) e ROCHA *et al.* (2004), é possível concluir que há considerável perda de qualidade nos resultados do WAVEWATCH na simulação de grandes ondulações do quadrante sul, ao se comparar com mares calmos ou em condições de pouca agitação. No presente trabalho, parte dessa diferença é consequência da GRADE2 utilizada, onde a energia de nordeste não é bem simulada. Outra grande parte é devido às características das reanálises do NCEP/NCAR, que perde qualidade em algumas situações restritas de eventos extremos.

É importante destacar que algumas pequenas divergências entre medição e simulação nascem com a questão da resolução. No WAVEWATCH foram usadas 24 direções, apresentando $res=15^\circ$. Sabe-se que a DAAT aplicada para as análises dos dados da bóia fornece resultados mais resolutos. O mesmo ocorre com o T_p , fixado com 25 períodos para o WAVEWATCH, enquanto a bóia tem resolução 1/256, pois utiliza 128 frequências para o cálculo do espectro final. Essas pequenas diferenças já inferem algum erro, por

menores que sejam, nos parâmetros estatísticos utilizados. ROCHA *et al.* (2004) também aborda esse assunto na comparação entre os resultado do WAVEWATCH e os dados do TOPEX, os quais possuem resolução diferentes, pondendo aumentar ligeiramente o valor do EMQ e diminuir o CC.

Adicionalmente foi feita uma avaliação das possíveis diferenças de Hs entre a bóia e o modelo em função das direções e períodos de pico. Essa verificação informa se ocorre alguma tendência de subestimação ou superestimação da energia em função dos parâmetros. No caso de Tp foi encontrado apenas um sutil crescimento em módulo do EM com o aumento dos períodos, mas muito pouco evidente. Já na figura 5.9 observa-se a tendência de aumento do viés com a direção. Foram analisadas tanto diferenças absolutas quanto normalizadas (igual a $\frac{Hs_{boia} - Hs_{modelo}}{Hs_{boia}}$, em 5.9(b)).

Tanto 5.9(a) quanto 5.9(b) mostram que existe alguma preferência das maiores diferenças entre a energia medida e modelada acontecerem com Dp de sudoeste. Observando o procedimento ww3Xbóia, da figura 5.10, essa característica fica mais evidente. Há um grande aumento no viés em alguns eventos quando Dp é superior que 180°. Nesse caso a diferença normalizada enfatiza ainda mais o fato.

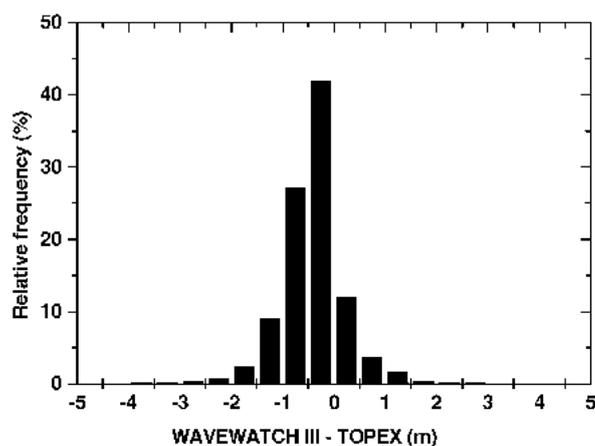


Figura 5.8: Histograma da frequência relativa do erro do modelo. Figura extraída de ROCHA *et al.* (2004).

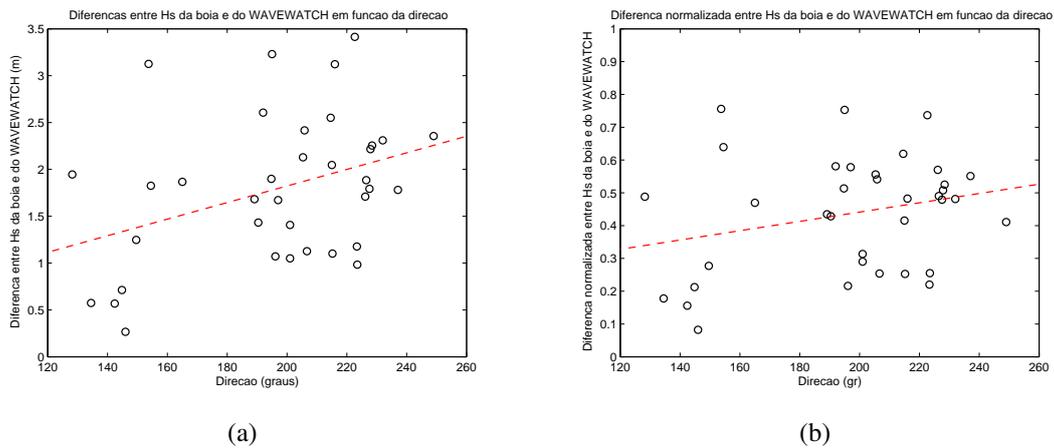


Figura 5.9: Avaliação do viés entre bóia e modelo em função da direção para o procedimento bóiaXww3. (a) Diferenças absolutas versus Dp. (b) Diferenças normalizadas versus Dp.

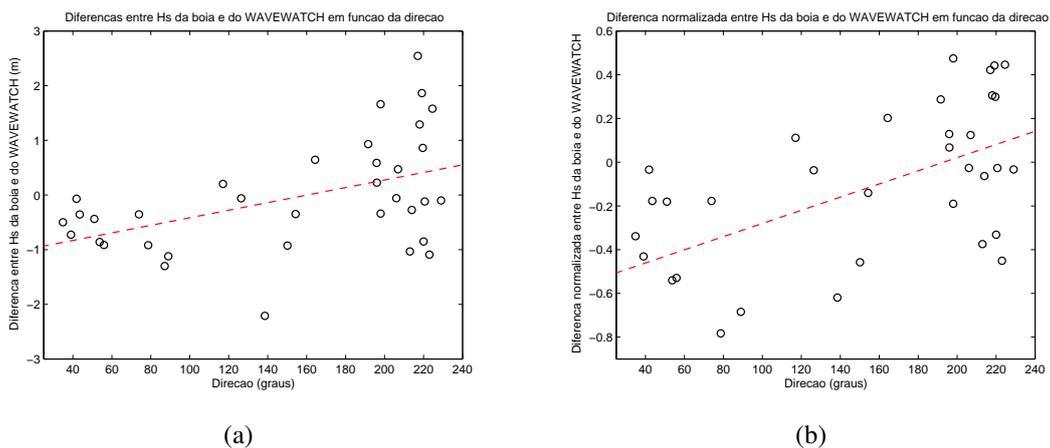


Figura 5.10: Avaliação do viés entre bóia e modelo em função da direção para o procedimento ww3Xbóia. (a) Diferenças absolutas versus Dp. (b) Diferenças normalizadas versus Dp.

5.5 Divisão do espectro em faixas de frequências

Essa parte da avaliação foi inspirada na filosofia proposta por PARENTE (1999). No trabalho o autor propõe a análise da agitação marítima na Baía de Campos baseada em intervalos de frequência, estudando o comportamento das ondas (através da energia e direção) em determinadas faixas. Essa metodologia permite analisar o comportamento de diferentes ondulações que atingem o Rio de Janeiro de maneira independente, sendo excelente para o estudo em casos de mares bimodais, trimodais e até multimodais. A técnica de PARENTE (1999) permitiu o melhor entendimento do clima de ondas na Baía

de Campos, onde ocorrem vagas (ou “sea”) de alta frequência incidindo de nordeste, gerada pelo AAS, e marulhos de sul gerados pelos ciclones e anticiclones extratropicais, conforme explicado na seção 2.4.

Pensando em avaliar o modelo em função da frequência, foi feita uma divisão do espectro resultante da simulação do WAVEWATCH. PARENTE (1999) utilizou 5 faixas com intervalos determinados para identificar ondas geradas por sistemas meteorológicos típicos. Com o objetivo de comparar faixa-a-faixa, o espectro do modelo foi dividido de maneira similar, de acordo com a tabela 5.5.

Tabela 5.5: Limiares das faixas de frequência (e período): divisão do espectro do WAVEWATCH e da bóia.

faixas	WAVEWATCH			Bóia		
	f inicial (Hz)	f final (Hz)	$\Delta freq$ (Hz)	f inicial (Hz)	f final (Hz)	$\Delta freq$ (Hz)
1	0,0418	0,0895	0,0477	0,0538	0,0893	0,0355
2	0,0895	0,1310	0,0415	0,0893	0,1250	0,0357
3	0,1310	0,2320	0,1010	0,1250	0,2083	0,0833
4	0,2320	0,2810	0,0490	0,2083	0,2941	0,0858
5	0,2810	0,4109	0,1299	0,2941	0,3759	0,0818
.....	T inicial (s)	T final (s)	$\Delta periodo$ (s)	T inicial (s)	T final (s)	$\Delta periodo$ (s)
1	23,92	11,17	12,75	18,60	11,20	7,40
2	11,17	7,63	3,54	11,20	8,00	3,20
3	7,63	4,31	3,32	8,00	4,80	3,20
4	4,31	3,55	0,76	4,80	3,40	1,40
5	3,55	2,43	1,12	3,40	2,66	0,74

Algumas diferenças surgiram nos intervalos dessas divisões pelo fato das frequências iniciais, finais e as resoluções não serem as mesmas entre o WAVEWATCH e a bóia. O restante da metodologia segue o desenvolvido da seção 5.4, com a seleção dos eventos proposta em 5.3; ou seja, foram comparadas faixa por faixa do modelo e da bóia, para eventos estatisticamente independentes do quadrante sul. A seguir a avaliação ww3Xbóia e bóiaXww3 para Hs.

5.5.1 ww3Xbóia

A figura 5.11 contém os diagramas de espalhamento e a tabela 5.6 os parâmetros estatísticos para cada faixa de frequência.

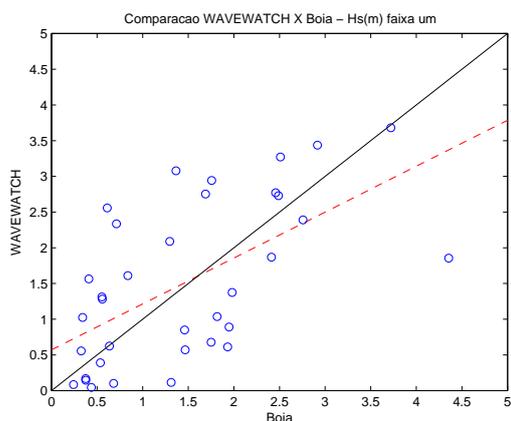
Tabela 5.6: Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação ww3Xbóia por faixa de frequência.

Hs	<i>coefang</i>	<i>coeflin</i>	CC	EM (m)	EMQ (m)	IE
faixa 1	0,64	0,57	0,60	0,05	0,96	0,66
faixa 2	0,50	0,93	0,55	0,27	0,69	0,53
faixa 3	0,30	0,95	0,23	0,03	0,53	0,40
faixa 4	0,15	0,35	0,12	-0,11	0,24	0,44
faixa 5	0,08	0,35	0,05	-0,02	0,21	0,50

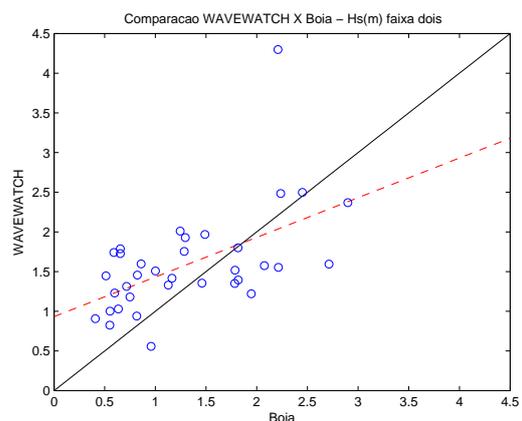
Observando inicialmente o EM, pode-se notar que na média o WAVEWATCH supera os dados da bóia nas faixas um, dois e três, passando a subestimar Hs em quatro e cinco. Esse viés é maior na faixa dois, com grande superestimação do modelo principalmente em pequenas alturas de onda, e na quatro, onde as medições superam o resultado da simulação. O valor do EM então muda rapidamente entre as faixas dois e quatro, invertendo o sinal e padrão do viés. Ao analisar o *coefang* percebe-se a maioria deles distante de um, com apenas a faixa um apresentando a reta do ajuste linear próxima a de concordância perfeita. Nesse intervalo de frequência, entretanto, o EMQ e IE são os mais altos, com os pontos distantes da reta $y = x$.

A evolução do *coefang* aponta a reta de regressão linear variando de maneira gradual entre os gráficos 5.11(a) a 5.11(e), assim como o EMQ, que diminui com o aumento da frequência. O CC concorda com isso, com maiores valores para a faixa um, decaindo gradualmente até a faixa cinco. Em todos os gráficos se tem superestimação do modelo para Hs baixas e subestimação para alturas maiores, sendo essas diferenças menores em 5.11(a), aumentando até 5.11(e). O IE tem mínimo na frequência central (faixa três), aumentando em direção às faixas um e cinco.

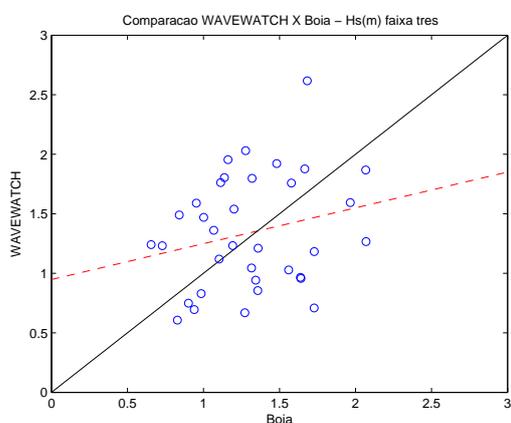
Conclui-se então que, para a metodologia empregada nesse procedimento ww3Xbóia, as baixas frequências apresentam melhor CC, maior proximidade entre a reta de regressão e a reta de concordância perfeita e pior EMQ. Em altas frequências o CC e *coefang* é menor, mas o EMQ tem melhor resultado.



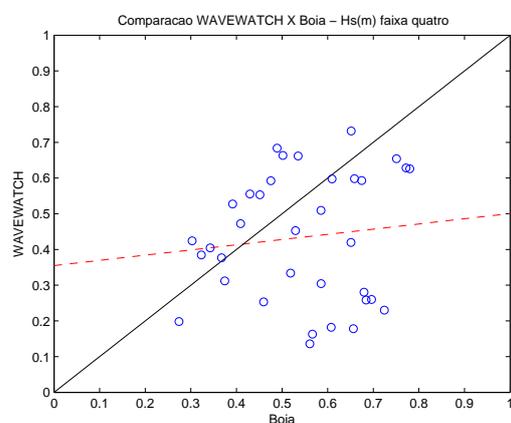
(a) Faixa de frequência 1



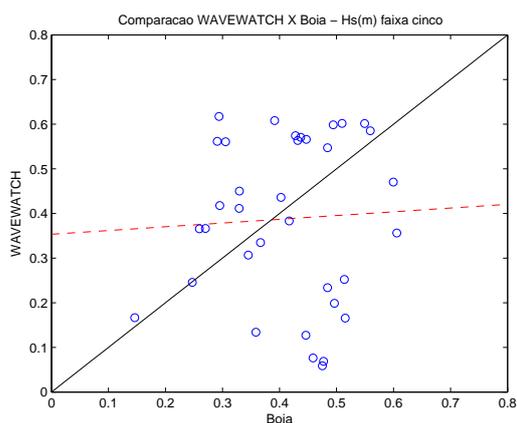
(b) Faixa de frequência 2



(c) Faixa de frequência 3



(d) Faixa de frequência 4



(e) Faixa de frequência 5

Figura 5.11: Comparação dos eventos selecionados da série de altura significativa do modelo com os valores concomitantes da bóia, por faixa de frequência. Diagramas de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (a) Faixa 1, (b) Faixa 2, (c) Faixa 3, (d) Faixa 4, (e) Faixa 5.

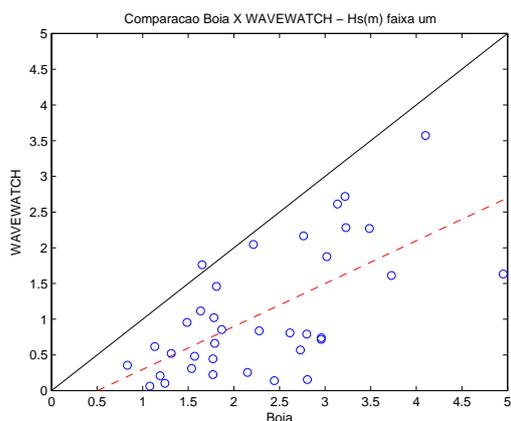
5.5.2 bóiaXww3

Os resultados para o procedimento se encontram na tabela 5.7 e figura 5.12. Nessa metodologia é possível perceber a grande subestimação geral de Hs do modelo, a qual se torna maior com valores mais elevados, confirmado pelos EM negativos. As faixas um e dois apontam fortemente essa característica, com apenas um ponto acima da reta de concordância perfeita, quando Hs do WAVEWATCH é superior ao ondógrafo. A faixa cinco, de altas frequências, é onde se tem o quadro mais ameno da subestimação com a reta de regressão mais próxima à reta de concordância perfeita e menor EM em módulo. Destaca-se a faixa dois como a mais problemática, pois possui baixo CC e *coefang*, e altos EM, EMQ e IE. As mais baixas frequências (faixa um) apresentaram CC e *coefang* elevados (ponto positivo), mas grandes EM e EMQ, resultando no valor de IE também muito alto. Bem diferente da tabela 5.6, do caso ww3Xbóia, as faixas quatro e cinco mostram agora CC relativamente maiores.

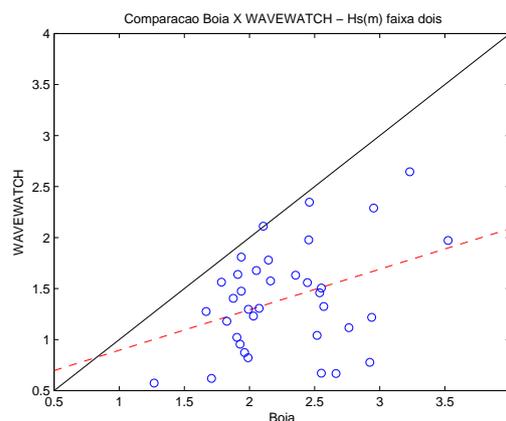
Ao contrário do encontrado em 5.5.1, as altas frequências (faixas quatro e cinco) apresentaram comportamento mais próximos aos dados da bóia, com pouca subestimação e correlação maior que as faixas dois e três. Nota-se o desequilíbrio da equação B.10 e a energia em alta frequência não sendo suficientemente transferida para as baixas, gerando um déficit que causa subestimação e grandes EM e EMQ nas faixas um e dois. Esse fato pode ser resposta da dissipação demasiadamente grande ou de falhas nas interações não lineares. A equação B.15 descreve o processo de dissipação, com possíveis problemas em ρ (parâmetro adimensional de interação onda-vento). Já as equações B.12, B.13 e B.14 apresentam as interações não lineares, responsáveis pela transferência de energia através do espectro. Como consequência, a altura significativa final do WAVEWATCH é muito menor que as medições do ondógrafo.

Tabela 5.7: Coeficientes do ajuste linear, CC, EM, EMQ e IE para a avaliação bóiaXww3 por faixa de frequência.

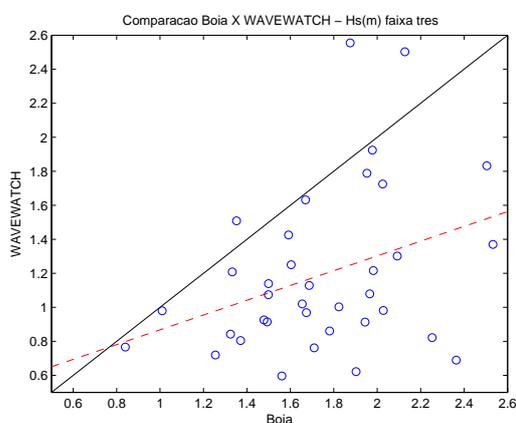
Hs	<i>coefang</i>	<i>coeflin</i>	CC	EM (m)	EMQ (m)	IE
faixa 1	0,60	-0,30	0,64	-1,22	1,44	0,63
faixa 2	0,40	0,50	0,37	-0,87	1,03	0,45
faixa 3	0,43	0,43	0,35	-0,55	0,74	0,42
faixa 4	0,62	0,02	0,56	-0,21	0,26	0,43
faixa 5	0,76	0,03	0,47	-0,07	0,17	0,42



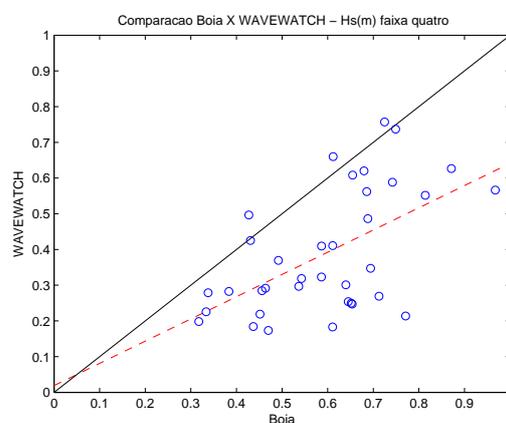
(a) Faixa de frequência 1



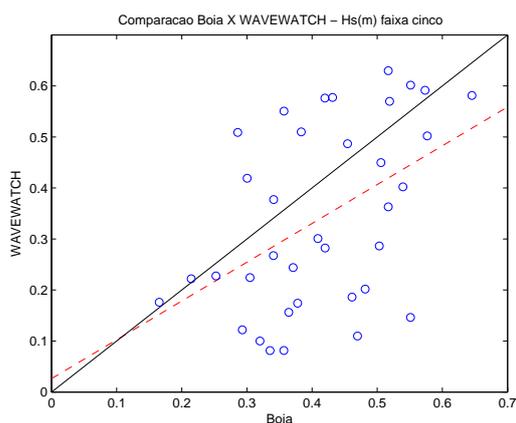
(b) Faixa de frequência 2



(c) Faixa de frequência 3



(d) Faixa de frequência 4



(e) Faixa de frequência 5

Figura 5.12: Comparação dos eventos seleccionados da bóia com a série de altura significativa do modelo, por faixa de frequência. Diagrama de espalhamento. Linha vermelha pontilhada - regressão linear. Linha preta contínua - concordância perfeita. (a) Faixa 1, (b) Faixa 2, (c) Faixa 3, (d) Faixa 4, (e) Faixa 5.

5.5.3 Comentários e discussões

Algumas diferenças ficaram bem evidentes comparando a avaliação ww3Xbóia e bóiaXww3. As correlações de Hs têm valores semelhantes, mas a subestimação em bóiaXww3 foi sensivelmente maior. As direções de pico em bóiaXww3 se apresentaram melhores do que em ww3Xbóia e ambos mostraram bons resultados entre 180° e 250°. A questão da Dp ter tido grandes diferenças entre simulação e medição foi longamente discutida e em parte é resultado da pequena abrangência da GRADE2 e dos casos bimodais em que as duas séries podem se referir a picos de energia distintos. De maneira contrária o Tp em ww3Xbóia se mostrou melhor correlacionado com os dados do ondógrafo que a metodologia bóiaXww3.

Avaliando a simulação somente por Hs, Dp e Tp poderia se pensar que o procedimento ww3Xbóia representou melhor Hs, com viés menor. Entretanto essa conclusão é precipitada. Como é visto na análise por faixas, a relativa coerência não é vista em todas as frequências, mas a subestimação em parte do espectro é compensada pela superestimação, fazendo com que a integração final não apresente grandes diferenças. No caso bóiaXww3 as faixas quatro e cinco apresentaram boa correlação e baixo EM e EMQ, porém as faixas um e dois do modelo passaram a receber menos energia, provocando a grande queda do valor final de Hs.

Ao escolher as alturas máximas da série do modelo, naturalmente se está selecionando os campos de vento do NCEP/NCAR com maior intensidade. As possíveis questões de superestimação da reanálise são eliminadas com os problemas de balanço de energia do espectro no WAVEWATCH, fazendo com que na média Hs do modelo e bóia estejam coerentes.

5.6 PLEDSWW3

O termo PLEDS é um acrônimo para “*Plotting Evolution of the Directional Spectrum*”, desenvolvido por PARENTE (1999) para complementar a técnica DAAT. Essa plotagem apresenta a evolução ao longo de um mês das energias e direções associadas a cada intervalo de frequência. Neste trabalho optou-se utilizá-la para analisar a evolução temporal das faixas de frequência do modelo, observando entradas de frentes frias, chegadas de ondulações distantes, bem como o comportamento do mar em situações sinóticas complexas, como é o caso de diferentes pistas de geração de onda atuando em conjunto. É plotado também o vento em superfície.

Explicando a figura, cada cor representa uma faixa de frequência e as barras correspondem ao vento em superfície (em escala de cinza). As posições no eixo das abcissas indicam a direção. O eixo das ordenadas contém diversas divisões que representam o in-

teval de 6 horas (4 divisões por dia) e também serve como escala de altura para indicar a energia/Hs para cada faixa de frequência, assim como a intensidade do vento (conforme escala indicada na figura).

A preparação para a PLEDS com os resultados do modelo (PLEDSWW3) consiste na divisão do espectro em intervalos de frequência desejados, somando o total de energia em cada banda, seguido do cálculo da direção de pico das respectivas faixas. A PLEDS pode ser feita em termos de energia ou de altura significativa, calculada como $4,01\sqrt{m_0 \cdot \Delta f}$, onde m_0 é a área do espectro dividido e res a resolução da frequência. Ao utilizar a energia evidenciam-se as diferenças entre as faixas e os extremos, uma vez que o cálculo da raiz quadrada de m_0 suaviza as variações. Por esse motivo, optou-se por utilizar a PLEDSWW3-energia.

Na figura 5.13 encontra-se uma demonstração para maio de 2001, em que dois ciclones se desenvolveram sobre o Atlântico Sul gerando duas frentes frias: uma no começo do mês (por volta do dia 7), outra no final (por volta do dia 19), as quais são possíveis de identificar na PLEDSWW3. A figura 5.14 apresenta as trajetórias, durações, pressões no centro e ventos máximos nas pista associadas a cada ciclone detectado, de acordo com a metodologia do capítulo 3. A análise conjunta desses dois tipos de imagem (PLEDSWW3 e a plotagem do ciclone) torna-se uma ótima ferramenta para compreender a evolução da agitação marítima gerada por ciclones no Atlântico Sul, em especial para eventos extremos.

A figura 5.15 mostra um outro exemplo ocorrido no final do mês de maio de 1997. Analisando o caso é possível observar a virada do vento para sudoeste no dia 29 devido à entrada da frente fria gerada pelo ciclone. As ondas acompanham essa virada, principalmente a alta frequência. No dia 30 praticamente toda a energia do espectro tem direção sudoeste. A baixa frequência se move para sul e depois sudeste acompanhando o deslocamento do ciclone para leste. De acordo com a reanálise do NCEP/NCAR, essa ondulação foi gerada por ventos em torno de 20 m/s que persistiram por alguns dias sobre o Atlântico Sul. Observando a PLEDSWW3, é possível perceber nos dias 24 e 25 a chegada de uma ondulação de sul/sudoeste distante em baixa frequência, enquanto o vento e os períodos curtos encontram-se sob domínio do Anticiclone do Atlântico Sul, com direção NE/E. A questão do vento na análise conjunta das duas figuras se torna completa, pois em 5.15(a) é exposto aquele relativo ao ciclone, associado à pista a oeste do centro, e em 5.15(b) a PLEDSWW3 contém o vento no Rio de Janeiro (vento local). É possível identificar então o vento que gera as maiores ondulações de sul (também relacionado à baixa frequência) e também o vento local, com maior influência sobre as altas frequências; mapeando de forma completa as pistas de geração mesmo em mares complexos.

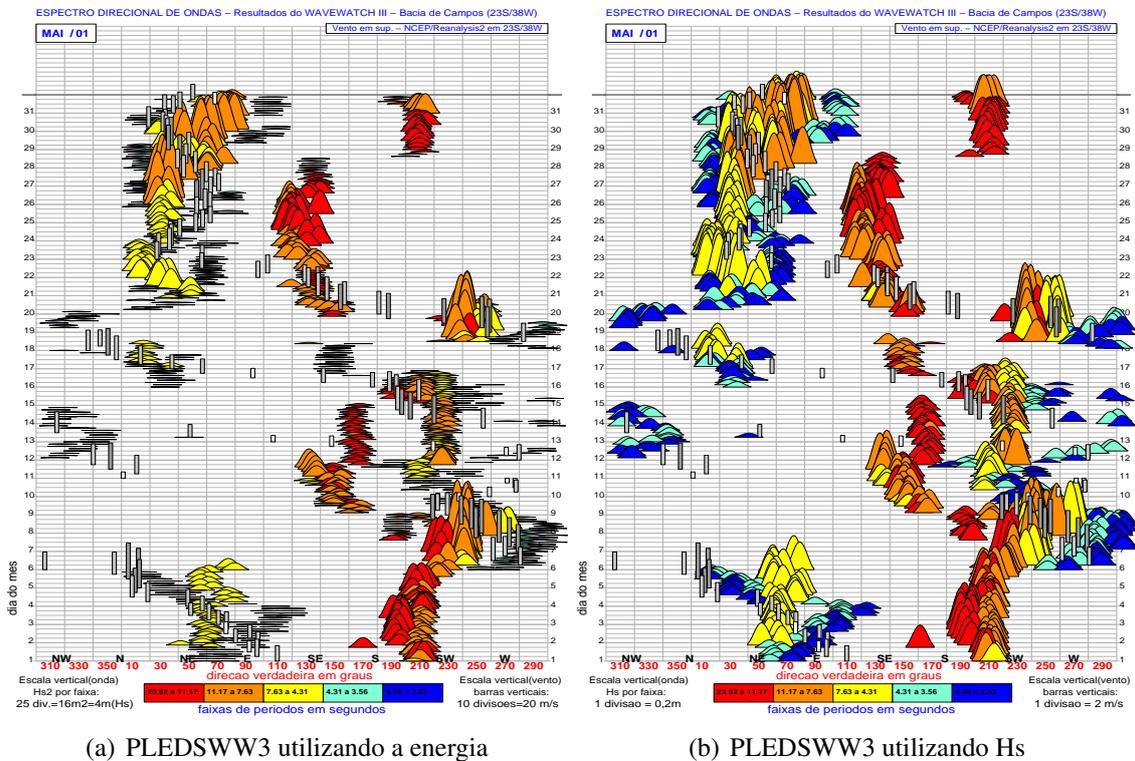


Figura 5.13: Exemplo da PLEDS aplicada aos resultados do modelo em maio de 2001. (a) Plotagem utilizando a energia como entrada e (b) Altura significativa como entrada.

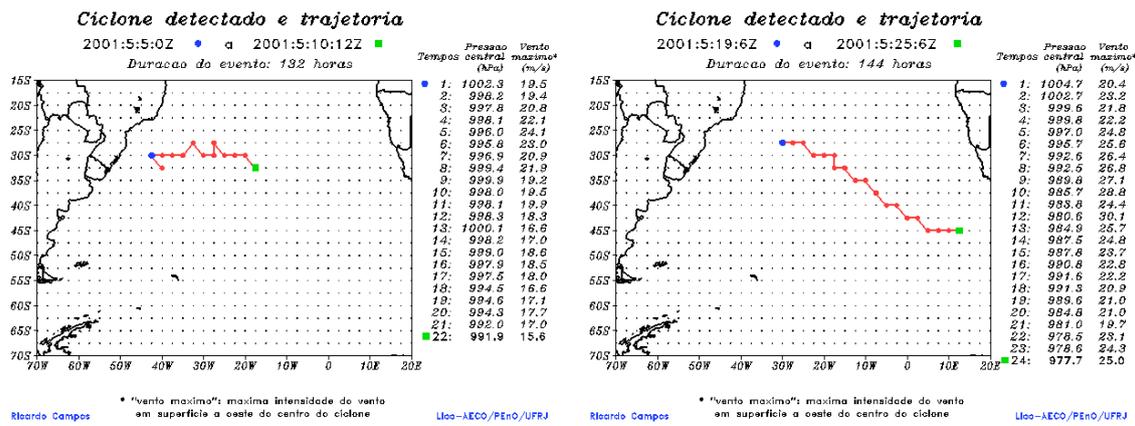
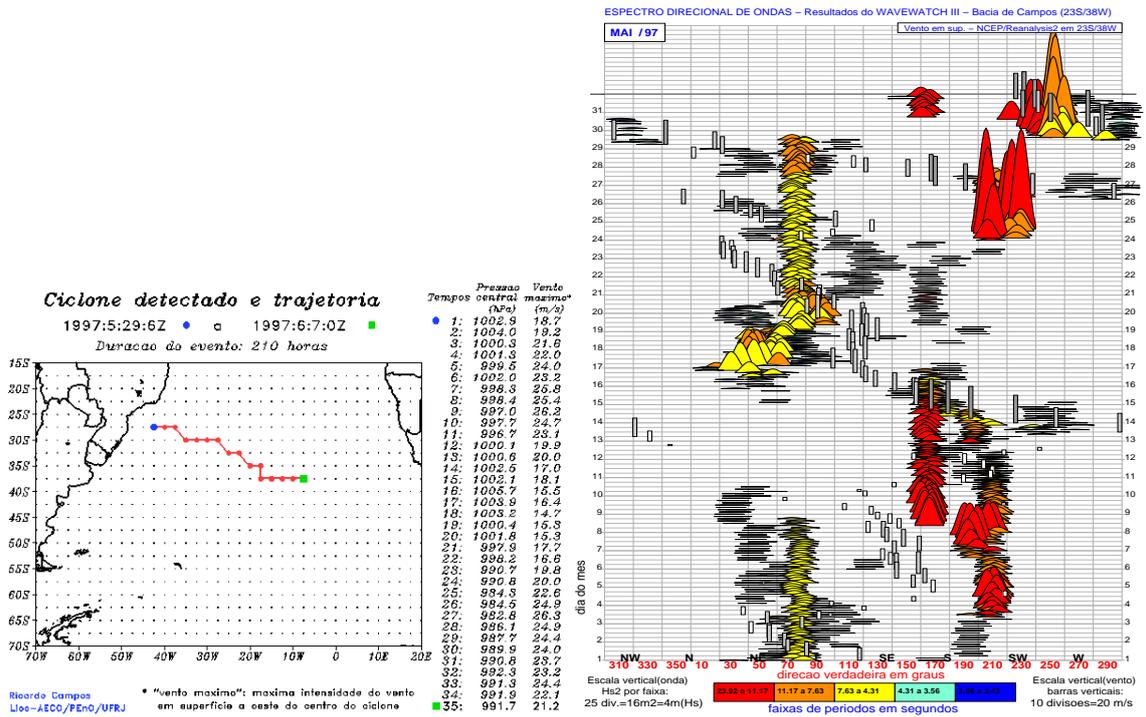


Figura 5.14: Ciclones detectados no mês de maio de 2005. A ondulação gerada por eles pode ser observada na figura 5.13.



(a) Ciclone detectado em maio de 1997. (b) PLEDSWW3 apontando o efeito do ciclone nas ondas no Rio de Janeiro.

Figura 5.15: Exemplo de ferramenta de análise para a ocorrência de grandes ondulações do quadrante sul, para maio de 1997. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) PLEDSWW3

5.7 Casos selecionados

Neste capítulo de avaliação da simulação, a PLEDS será usada para comparar a evolução temporal de alguns eventos selecionados simulados pelo WAVEWATCH. É construída então a PLEDSWW3 com a mesma escala da PLEDSBóia. O vento em superfície da PLEDSWW3 corresponde à reanálise II do NCEP no PONTO2, enquanto a PLEDSBóia possui o vento medido próximo ao ondógrafo.

Como seria inviável a análise de cinco anos (42 meses de dados) de plotagem mensal, foram selecionados alguns casos de maior relevância, dividindo em: eventos em que o modelo subestimou a medição do ondógrafo (mais comum), casos em que o modelo superestimou o ondógrafo e casos de relativa coerência (em que Hs, Dp e Tp do WAVEWATCH se tornaram muito próximos ao medido pela bóia).

5.7.1 Caso 1 - Agosto de 1992 - Subestimação do modelo

A subestimação aqui ocorre nos dias 25 e 26, referente a figura 5.16. Até o dia 24 é possível notar o vento do NCEP/NCAR com relativa concordância com o vento medido. As variações direcionais das faixas de frequência do modelo apresentam um dinamismo muito menor do que os dados da bóia. No dia 24 para 25 uma frente fria entra com a virada do vento para sul. O vento da reanálise nesses instantes apresenta intensidade em torno de 10 m/s, enquanto o medido é próximo a 20 m/s. Esse fato resulta em menor energia das ondas para os resultados do WAVEWATCH. No final do dia 25 e 26 a subestimação da ondulação se dá principalmente em baixa frequência (cor vermelha na figura). A direção e instante de crescimento do mar são bem representados pelo modelo.

Retomando a questão discutida na seção 5.5.3, pode-se dizer que, nesse caso, a menor energia das ondas modeladas é resultado da baixa intensidade do vento do NCEP/NCAR, discutido em ROCHA *et al.* (2004). Adicionalmente é observado também o problema da transferência de energia através do espectro do WAVEWATCH. Na PLEDSBóia se vê a baixa frequência com grandes alturas de onda, enquanto na PLEDSWW3 pouca energia é encontrada nos períodos maiores, concordando com as discussões de 5.5.3. As faixas dois e três (laranja e amarelo) estão muito coerentes entre as figuras 5.16(a) e 5.16(b), entretanto a faixa um (em vermelho - baixa frequência) mostra a grande diferença.

5.7.2 Caso 2 - Março de 1994 - Superestimação do modelo

O foco dessa análise se encontra entre os dias 8 e 12 da figura 5.17. Logo no começo do mês é possível perceber algumas diferenças no campo de vento. Naquele medido há uma virada para sul no dia 4 enquanto o NCEP/NCAR coloca a mudança entre os dias 5 e 6, com grande diminuição da intensidade. Após o dia 8 ocorre o contrário, com intensificação do vento da reanálise e mudanças gradativas da direção para leste, caracterizando a evolução de um anticiclone deslocando-se para nordeste. A persistência dos fortes ventos fazem com que a faixa dois (com T_p de 7,63 a 11,17 s) do modelo superestime a energia entre os dias 8 e 11. A grande divergência modelo/bóia se dá nessa faixa e um pouco na faixa um, estando as faixas cinco, quatro e três próximas aos dados do ondógrafo. Comparando as figuras pode ser visto nesse evento, assim como no caso anterior, que as direções são bem simuladas pelo modelo. Por volta do dia 15 ocorre outra virada do vento para sul, não mostrada pela reanálise do NCEP/NCAR.

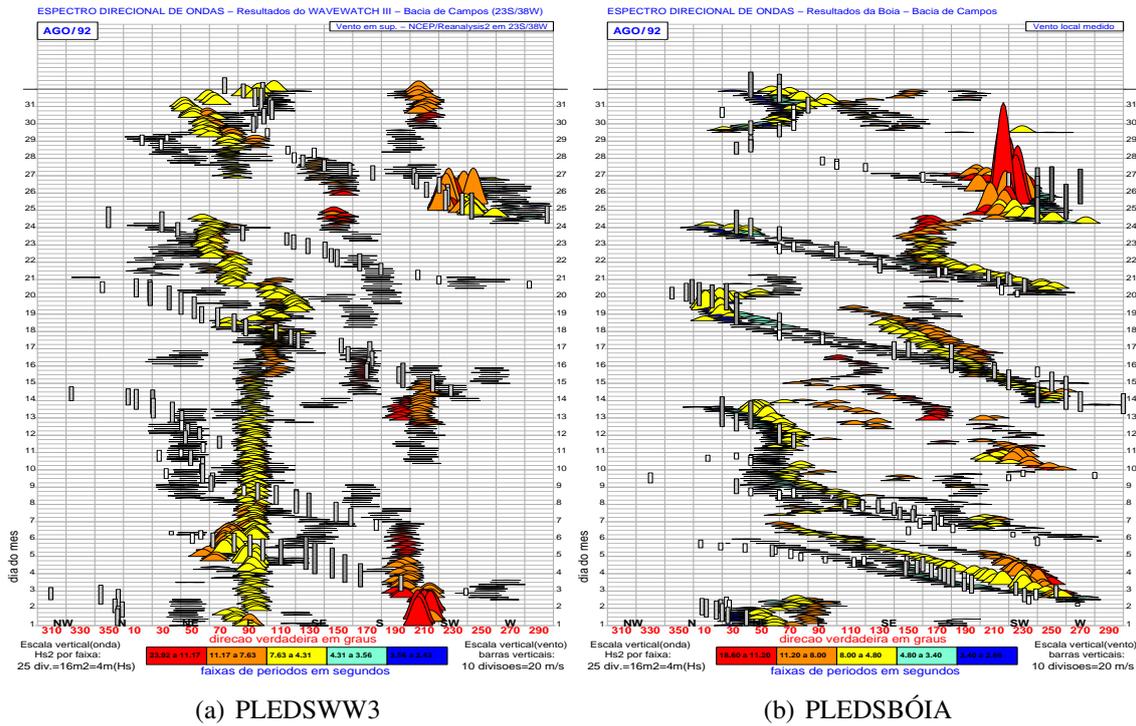


Figura 5.16: Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para agosto de 1992.

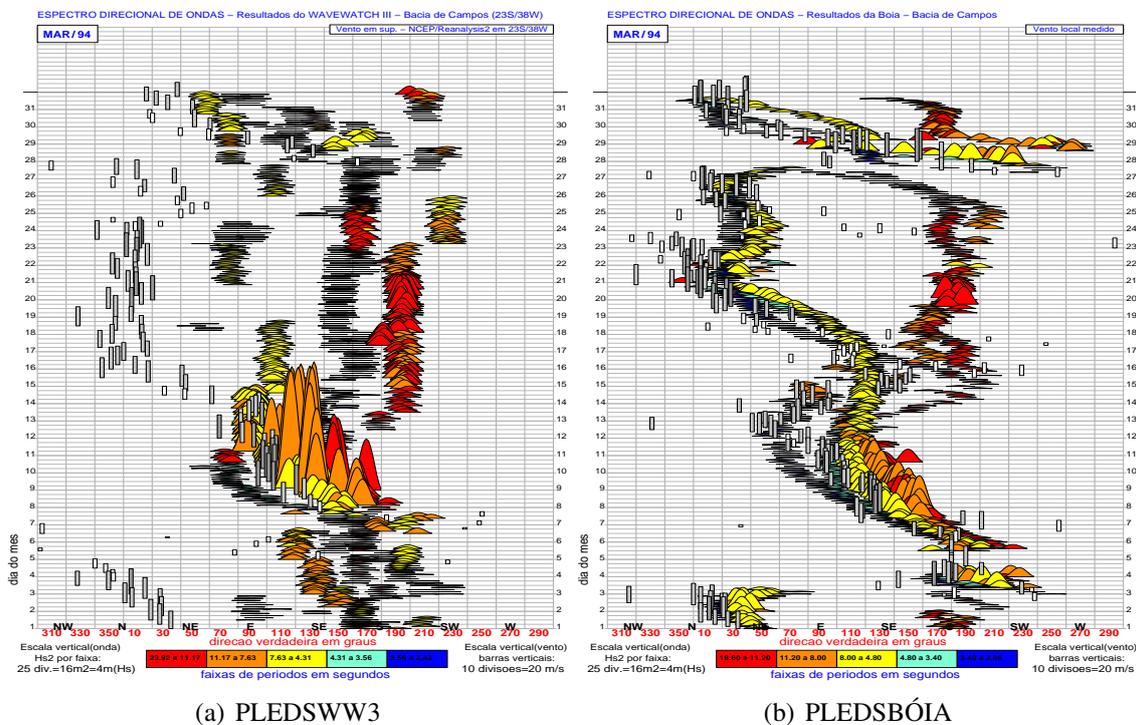


Figura 5.17: Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para março de 1994.

5.7.3 Caso 3 - Setembro de 1992 e Junho de 1994 - Coerência relativa entre modelo e bóia

Primeiramente será analisado o caso de setembro de 1992, da figura 5.18. É dito “coerência relativa” pois a energia total do espectro e Hs estão muito próximas entre a simulação e a medição. Do dia 9 ao dia 20 percebe-se a mudança gradual do vento de sul para nordeste. Houve subestimação em alta frequência dos resultados do WAVEWATCH, com o vento do NCEP/NCAR também um pouco inferior. As direções também são relativamente bem representadas, acompanhando a virada do vento. No começo do mês (cinco primeiros dias) também pode-se considerar a simulação relativamente boa, com pequena subestimação da alta frequência, mas coerência das energias e direções das baixas e médias frequências, representando bem a ondulação distante de sul que incidirá durante o caso de BOM TEMPO. Ainda nesses primeiros dias do mês, destaca-se a variação na direção da baixa frequência de sudeste para sul, que não foi representada na PLEDSWW3. O final do mês já não é tão bem simulado pelo modelo, com grandes diferenças da bóia.

No caso de junho de 1994 (figura 5.19) é observado um evento extremo de S/SO nos dias 28 e 29 bem representado pelo modelo. É possível ver a virada do vento para sul do dia 26 para 27 em ambas as séries de vento (NCEP/NCAR e medido), com mudança lenta da direção, retornando para leste ao longo dos dias. Do dia 27 em diante a reanálise superestima a intensidade do vento. Há um crescimento grande na energia das ondas na faixa um em ambas as PLEDS, sendo bem coerente também a energia nas outras faixas de frequência, assim como a evolução temporal do mar. A direção das ondas, inicialmente 220° que se desloca até 190°, resultado da migração do ciclone para leste e mudança do posicionamento da pista, também é bem simulada pelo WAVEWATCH.

Nesse evento as ondas em baixas frequências são bem representadas e o vento do NCEP/NCAR apresenta proximidade daquele medido, com ligeira superestimação da intensidade e algumas diferenças na direção.

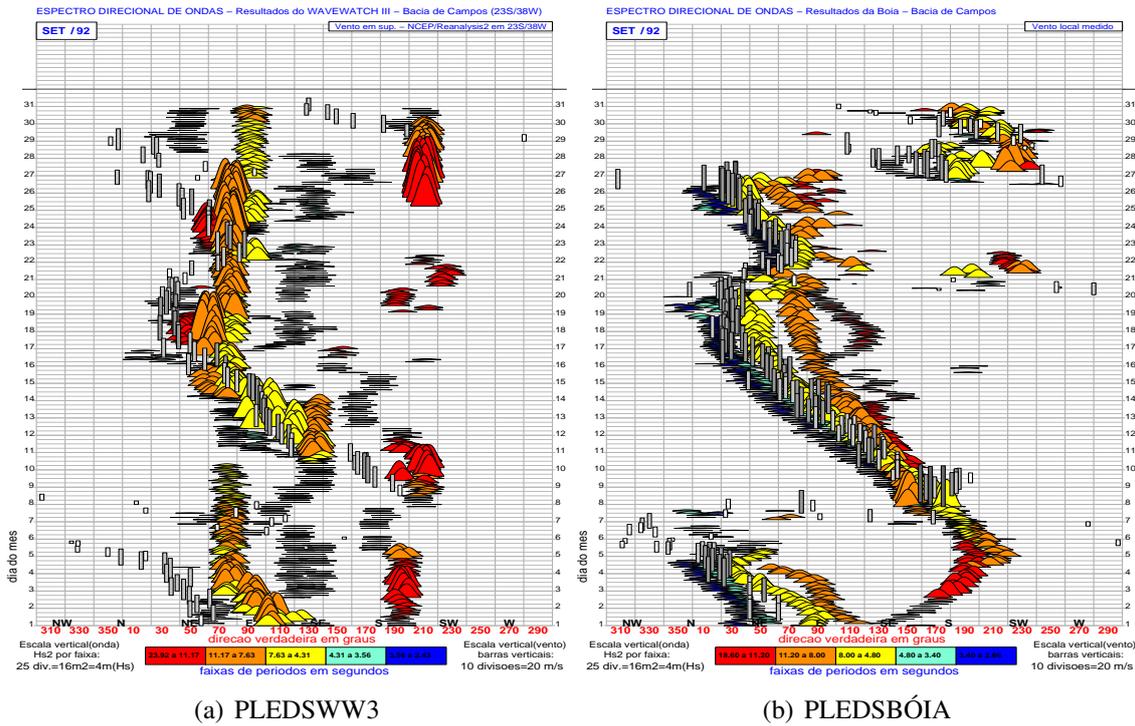


Figura 5.18: Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para setembro de 1992.

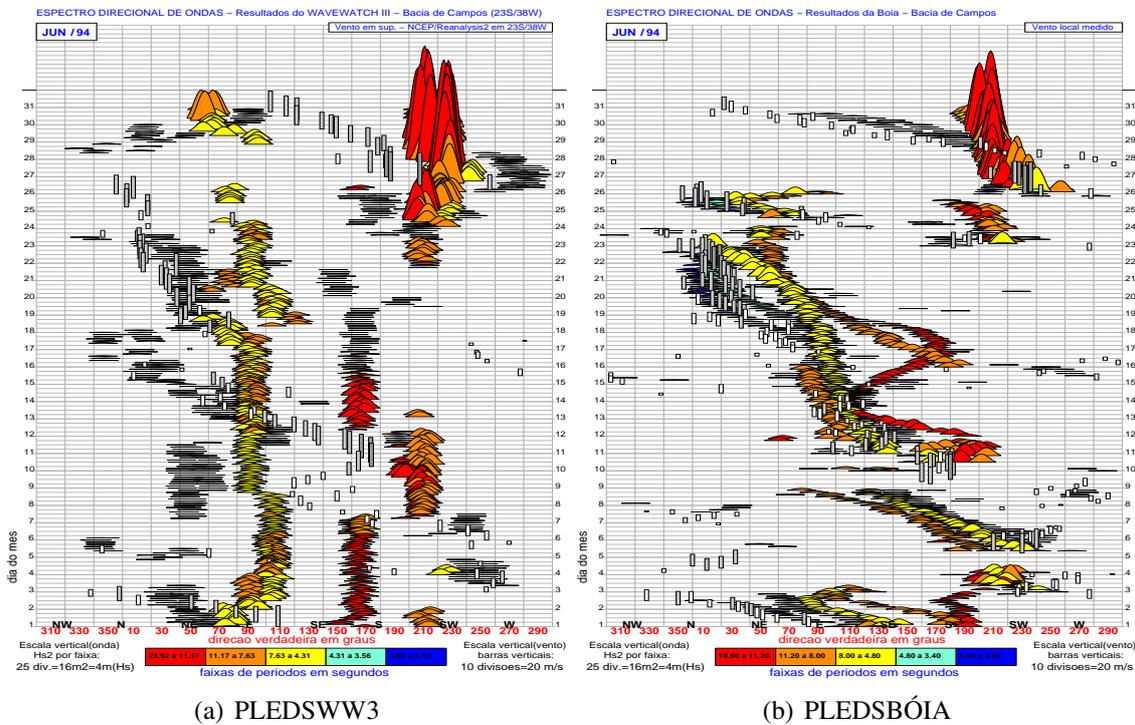


Figura 5.19: Comparação das PLEDS com resultados do modelo e dados da bóia para junho de 1994.

5.7.4 Comentários e discussões

Das análises dos casos é possível perceber a relação direta e dependência da energia das ondas com a intensidade do vento, a qual ocorre primeiramente nas altas e posteriormente nas baixas frequências, com a migração ao longo do espectro. As questões discutidas na avaliação do modelo por faixa de frequência (seção 5.5) são claramente visualizadas na PLEDS, podendo estudar o comportamento do modelo de maneira detalhada em termos de frequência, direção e intensidade de cada ondulação incidente.

Os casos selecionados indicam que as principais diferenças entre os resultados do modelo se devem primeiro às divergências entre o vento em superfície do NCEP/NCAR e o medido junto a bóia (visto na PLEDSWW3 e PLEDSbóia). Esse fato se relaciona principalmente com a intensidade, onde a reanálise possui, em geral, ventos menos intensos que as medições, resultando na simulação subestimada das ondas do WAVEWATCH em relação ao ondógrafo. Tal característica vem sendo observada ao longo de toda a avaliação e foi melhor interpretada usando a PLEDS. É importante destacar que as reanálises também são resultados de modelo, ainda que baseadas em uma metodologia avançada de assimilação de dados. Os erros do modelo do NCEP/NCAR são então propagados através do WAVEWATCH, prejudicando o resultado.

É comprovado que as maiores divergências da reanálise ocorrem nos casos de grande aumento na intensidade do vento medido, concordando com as tabelas 2.1 e 5.4 do trabalho de ROCHA *et al.* (2004), explicado anteriormente. Esse fato ocorre quando há entrada de frentes frias e intensificação das pistas associadas aos ciclones, e o resultado são simulações do WAVEWATCH que subestimam a energia das ondas nessas situações. Como consequência, o que se vê é o campo de ondas menos dinâmico (sem variações rápidas) e com extremos suavizados.

Tanto na avaliação por Hs, Tp e Dp, quanto pelas faixas de frequência, e por fim utilizando a PLEDS, foi comprovada a subestimação de Hs do WAVEWATCH em eventos extremos. Resumindo todas as discussões e sintetizando as conclusões, são enumerados a seguir as quatro principais causas e questões que levam a esse fato, discutidas em ordem de importância:

1. Subestimação das intensidades do vento da reanálise do NCEP/NCAR, que se torna maior em eventos mais severos;
2. Limites da GRADE2 utilizada, que diminui a energia incidente da direção nordeste/leste;
3. Resolução diferenciada entre o WAVEWATCH e os dados da bóia. Não é causa da subestimação de Hs, mas interfere negativamente nos parâmetros estatísticos de avaliação.

Capítulo 6

Análise Geral dos Eventos Extremos

6.1 Introdução

Os capítulos anteriores forneceram o conhecimento dos processos meteoceanográficos e de modelagem numérica necessários para o bom entendimento das questões envolvendo as alturas significativas da bóia e da simulação do WAVEWATCH. O presente capítulo tem o objetivo de analisar o comportamento dos extremos univariados de ondas¹ das séries. Atenção especial é focada na questão do tamanho da base de dados e comportamento da cauda da distribuição. Ao fim pretende-se fornecer as ondas máximas associadas a períodos de retorno até 100 anos no Rio de Janeiro e entender estatisticamente a capacidade de simular extremos através da modelagem numérica, pesando os benefícios de se trabalhar com séries mais longas e deficiências da simulação numérica de ondas geradas por sistemas meteorológicos severos. Mais do que uma modelagem estatística, é objetivo também propor ferramentas e procedimentos que permitam a trabalhos futuros, com outras bases de dados, realizarem estimativas de extremos no oceano Atlântico Sul, tema infelizmente ainda pouco explorado no Brasil.

Há um longo tempo a Teoria de Valores Extremos (TVE) tem despertado interesse em diferentes áreas. Entender o comportamento e ocorrência de eventos raros tem se demonstrado cada vez mais importante em problemas que envolvem: finanças, estimando grandes quedas na bolsa de valores e avaliações de risco para empresas de seguros; meteorologia, analisando riscos de ocorrência de chuvas intensas e inundações; e engenharia, estudando extremos de onda para planejamento de projetos e atividades envolvendo plataformas de petróleo e obras costeiras.

A TVE é o ramo da probabilidade que estuda o comportamento estocástico dos extremos associados a um conjunto de variáveis aleatórias com distribuição comum. As características e propriedades das distribuições dos extremos são determinadas pelas cau-

¹Serão exploradas somente as características das séries de altura significativa.

das extremas (MENDES, 2004). Focando a atenção sobre elas é possível a aplicação de diversos modelos estatísticos, baseados em máximos coletados em blocos ou excessos acima de um limiar.

Envolvendo o cálculo do valor de retorno de H_s (valor extremo para dado período longo), alguns autores trabalharam ajustando distribuições (log-normal, Weibull, Gumbel, Fréchet etc) tradicionais a todos os dados disponíveis, e então extrapolando-as para se obter a probabilidade de ocorrência de eventos raros ou nunca observados. Outros propõem a aplicação da TVE para registros máximos anuais². Ambos os casos apresentam problemas, os quais são discutidos em FERREIRA e GUEDES SOARES (1998), e são minimizados com uma nova técnica desenvolvida na área de hidrologia nos anos 80, denominada *Peaks Over Threshold* (POT). FERREIRA e GUEDES SOARES (1998) apontam a POT como a mais moderna e confiável para a solução de problemas de extrapolação. BELITSKY e MOREIRA (2007) colocam essa técnica como uma das principais ferramentas estatísticas empregadas na estimativa de probabilidade de eventos raros.

Inúmeros trabalhos envolvendo a POT foram desenvolvidos nos últimos anos. Para a descrição teórica destacam-se EMBRECHTS *et al.* (1997), MENDES (2004), COLES (2007) e BELITSKY e MOREIRA (2007)³. Na aplicação a dados de onda medidos podem ser citados FERREIRA e GUEDES SOARES (1998) em Figueira da Foz - Portugal; e PARENTE *et al.* (2001), CARDOSO JÚNIOR (2004) e SILVA (2008) na Bacia de Campos.

6.2 Teoria da técnica POT

Genericamente a POT é utilizada para problemas de estimação da cauda⁴ de uma distribuição probabilística com base na sua amostra. O método é ajustado para problemas particulares de processos estocásticos que podem ser considerados aproximadamente estacionários ou divididos em partes estacionárias. Esse consiste no ajuste da distribuição generalizada de Pareto (GPD) para os excessos acima de um limiar (u) (FERREIRA e GUEDES SOARES, 1998).

Considerando X_1, X_2, \dots, X_N variáveis independentes e indenticamente distribuídas⁵ (iid) com função de distribuição F_X , e x_{F_X} o limite superior da distribuição F_X , considere-se o limiar u como um valor alto perto de x_{F_X} . Denomina-se “excedentes” ou “excessos” os X_i tais que $X_i > u$, e N_u o número de eventos acima de u . Os excessos trabalhados pela

²O que não deixa de ser uma forma de se trabalhar com a cauda da distribuição, entretando com pouco volume de dados em séries curtas.

³O qual sugere um passo-a-passo bem didático de aplicação da POT.

⁴Cauda = parte do gráfico da distribuição F onde as abscissas são maiores que um limiar u .

⁵Essas duas restrições são descritas detalhadamente no decorrer do apanhado teórico da técnica.

POT denotados por Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_u} são os valores $X_i - u \geq 0$. N_u também é uma variável aleatória e é função (decrecente) de u , ou seja, quanto maior u , menor N_u . É possível afirmar também que N_u tem distribuição Binomial e o número de excessos acima de u é o valor esperado de:

$$E[N_u] = N(1 - F_x(u)) \quad (6.1)$$

Para u perto de x_{F_x} , pré-requisito para aplicação da POT, é possível substituir a distribuição Binomial pela de Poisson (MENDES, 2004). Uma maneira de verificar essa característica é dividir os dados em intervalos iguais e contar o número de excessos em cada um e então testar o resultado com a distribuição de Poisson observada. Naturalmente há uma perda dessa característica em limiares muito baixos e em séries que não podem ser aproximadas como identicamente distribuídas. EMBRECHTS *et al.* (1997) descreve todas essas propriedades de forma detalhada e formula o caso para o qual o modelo estatístico é proposto:

- Os excessos iid acima de um limiar u se aproximam da distribuição de Poisson;
- Excessos acima de u são independentes e possuem uma GPD;
- Excessos acima de u são independentes uns dos outros no tempo;

É difícil assegurar que uma seleção é perfeitamente identicamente distribuída⁶. Ao invés disso costuma-se aproximar os dados a essa definição, procedimento que diversos autores sugerem para tornar viável a aplicação da POT. Caso semelhante ocorre com a independência estatística. Pela definição, um evento A é considerado independente de outro evento B se a probabilidade de A é igual a probabilidade condicional de A dado B , isto é: $P(A) = P(A/B)$, ou $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$. No caso de “n” eventos X_1, X_2, \dots, X_N diz-se que eles são independentes se o forem 2 a 2; 3 a 3; ... ; n a n (FONSECA e MARTINS, 1995). Tratando de ondas, é difícil afirmar com certeza essa formulação, já que são geradas por ventos sobre a superfície do mar, os quais são resultantes de diferentes fenômenos com escalas temporais diversas. O procedimento adotado, descrito no capítulo 5, foi o de identificar o ciclone de maior duração e estabelecer uma janela temporal, assegurando que não mais que um valor de H_s é utilizado para cada sistema meteorológico gerador.

⁶Como exemplo as figuras 6.30 e 6.42, em que os anos possuem número de excessos diferentes.

A Distribuição de Pareto Generalizada (GPD)

A GPD padrão pode ser descrita por (EMBRECHTS *et al.*, 1997) :

$$G_{\xi}(y) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi y)^{-1/\xi}, & \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-y}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

Onde $y \geq 0$ se $\xi \geq 0$ e $0 \leq y \leq -1/\xi$ se $\xi < 0$, cuja densidade é dada por

$$g_{\xi}(y) = (1 + \xi y)^{-(1+1/\xi)} \text{ para } \begin{cases} 0 \leq y, & \xi \geq 0 \\ 0 \leq y \leq \frac{1}{|\xi|}, & \xi < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

Em que ξ é o parâmetro de forma e β o parâmetro de escala. Substituindo y por $\frac{(y-v)}{\beta}$, considerando⁷ $v = 0$, o modelo final utilizado para a cauda é:

$$\bar{G}_{\xi,\beta}(y) = \begin{cases} \left(1 + \xi \frac{y}{\beta}\right)^{-1/\xi}, & \text{se } \xi \neq 0, \\ e^{-y/\beta} & \text{se } \xi = 0, \end{cases} \quad (6.4)$$

onde

$$D(\xi, \beta) = \begin{cases} [0, \infty) & \text{se } \xi \geq 0, \\ [0, -\beta/\xi], & \text{se } \xi < 0, \end{cases}$$

Os parâmetros ξ e β podem ser calculados por vários estimadores. Foram utilizados nesse trabalho: *Maximum Likelihood Method* (ML), *Moment Method* (MOM), *Probability Weighted Moments* (PWM) e *Pickands' Estimator* (PKD). Não cabe aqui uma descrição matemática detalhada dos métodos, a qual pode ser encontrada na literatura citada inicialmente. A escolha se baseou na variância dos parâmetros calculados e na correlação entre os dados modelados pela GPD e empíricos, conforme descrito na metodologia. Estimados os parâmetros, a distribuição para a cauda (distribuição de excessos acima do limiar) é dada por:

$$\bar{F}(y+u) = \frac{N_u}{n} \left(1 + \xi \frac{y}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (6.5)$$

Com n o número total de eventos e N_u o número de excessos acima do limiar u . SILVA (2008) deduz de maneira clara e detalhada a equação 6.5.

⁷Proposto em EMBRECHTS *et al.* (1997) e descrito por MENDES (2004) como aplicável para problemas práticos.

Escolha do Limiar

A escolha do limiar ótimo é o primeiro passo para aplicação da POT, porém esse procedimento exige cautela. Pequenas mudanças de u resultam em variações nos parâmetros ξ e β calculados pelos estimadores. Inúmeros trabalhos indicam estratégias de determinação de tal valor, destacando como critério importante a análise do gráfico da média de excessos acima do limiar (“*Mean Excess Plot*”, MEP). A construção se baseia na equação (EMBRECHTS *et al.*, 1997):

$$e(u) = \frac{1}{N_u} \sum_{i \in \Delta_n(u)} (X_i - u) \quad (6.6)$$

O gráfico parece com uma serra, cujos dentes crescem para a direita. Baseado nas propriedades da GPD:

$$e(u) = E(X - u | X > u) = \frac{\beta + \xi u}{1 - \xi}, \quad \beta + u\xi > 0 \quad (6.7)$$

A equação 6.6 se refere ao MEP empírico enquanto 6.7 relativo à GPD. Pela última conclui-se que os dados acima de um limiar, para a GPD, têm comportamento linear. O procedimento consiste então em analisar o MEP empírico, procurando um limiar u em que, a partir dele, seja possível ajustar “aproximadamente” uma reta. EMBRECHTS *et al.* (1997) destaca que essa tarefa muitas vezes pode se tornar complicada, pois é difícil dizer o que pode ser considerado “aproximadamente” uma reta ou não, sendo importante a experiência.

Nesse contexto surge ainda a questão do Domínio de Atração e identificação dos casos em que a POT pode ser aplicada. BELITSKY e MOREIRA (2007) apontam que a distribuição dos dados deve satisfazer certas condições de aplicação da técnica, para que o ajuste da GPD à região da cauda seja legítimo. Esta condição é o pressuposto do Resultado de Pickands, em que a função F deve estar no domínio de atração de uma das distribuições de valores extremos (EVD)⁸. Para verificar tal fato, os autores propõem justamente a observação do MEP empírico. Ou seja: “O fato de ter identificado u ótimo, à direita do qual a função MEP é linear, serve de comprovação que a função F está no domínio de atração de uma EVD” (BELITSKY e MOREIRA, 2007). Portanto a escolha do limiar tem a função de determinar a cauda para ajuste da GPD e comprovar que a POT é aplicável aos dados utilizados.

Outro cuidado constante na fixação do limiar é o monitoramento do número de excessos N_u . Quando u é muito alto N_u se torna pequeno e a variância dos parâmetros de forma e escala muito grande, perdendo qualidade no ajuste da GPD. A recíproca tam-

⁸Abordagem matemática completa descrita em EMBRECHTS *et al.* (1997).

bém é problemática; se u é demasiadamente baixo os estimadores resultam em viés nos parâmetros, perdendo também a característica de linearidade do MEP. A situação ideal é aquela de menor valor de u em que ainda é possível aproximar o gráfico de MEP acima de u como uma reta. BELITSKY e MOREIRA (2007), a partir de um apanhado de diversos outros trabalhos sobre a POT, informam que a porcentagem de dados da cauda, ou seja $(N_u/n) * 100$, deve estar em torno de 10 a 15% .

BELITSKY e MOREIRA (2007) explicam também a análise do gráfico do parâmetro de forma em função do limiar. É possível prever a posição aproximada do limiar ótimo procurando uma região no gráfico $\xi X u$ de estabilidade⁹, em que ξ não dê grandes saltos. Esse procedimento se baseia no mesmo princípio que rege o método de análise do MEP e serve como auxílio em casos mais difíceis de determinação do limiar. Outra ajuda para estipular u são os testes entre a modelagem estatística (ajuste da GPD) e os dados, ou seja, variar u em busca do melhor ajuste entre empírico e modelado. FERREIRA e GUEDES SOARES (1998) realizam os dois últimos de maneira elaborada, com comparação entre gráficos com diferentes limiares. O teste que quantifica a qualidade do ajuste no presente trabalho se baseia na correlação entre empírico e modelo estatístico, fornecidos pela equação:

$$\left(\frac{n\bar{F}(u+y)}{N_u} \right)^{-\xi} = 1 + \frac{\xi}{\beta} y \quad (6.8)$$

Em que n é o tamanho da série total utilizada. Essa equação nada mais é do que a manipulação de 6.5 desenvolvida em CARDOSO JÚNIOR (2004).

Extrapolção da distribuição e cálculo dos valores extremos

Os valores extremos (ou valores de retorno) rv são resultados da extrapolção da GPD para períodos de retorno longos. A equação a seguir descreve o cálculo (CARDOSO JÚNIOR 2004):

$$rv = u + \frac{\beta}{\xi} \left[\left(\frac{n}{N_u} (1-p) \right)^{-\xi} - 1 \right] \quad (6.9)$$

$$p = 1 - \bar{F} = \left(1 - \frac{1}{n_e} \right)$$

Onde p é a probabilidade de não excedência e n_e o número de dados esperado para cada período de retorno. Basicamente $n_e = pr \cdot (n/n_{anos})$, em que pr é o período de retorno, n o número total de dados da série e n_{anos} o número de anos. Ou seja, se em n_{anos} se tem

⁹O mesmo não pode ser feito com $\beta X u$.

n dados, em pr anos ocorrem n_e . Esse cálculo deve ser revisto em séries não completas ao longo do ano¹⁰, conforme será colocado na respectiva seção. O procedimento, porém, considera o número de excessos nos n_{anos} constante ao longo de todo o pr de interesse. Na prática isso pode ser válido para pequenas extrapolações, por exemplo ajustando uma série de 20 anos e calculando o valor extremo para pr de 30 ou 40 anos. Para pr muito grandes, como 100 anos, uma análise mais rigorosa deve ser feita a respeito de n_e . FERREIRA e GUEDES SOARES (1998) descrevem a necessidade de se analisar o número de excessos em cada ano. Tratando-se de ondas geradas por vento, em geral ocorrem variações em diversas escalas na ocorrência de eventos extremos, o qual pode inferir valores errôneos de n_e no cálculo em 6.9.

6.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho se baseia na aplicação da teoria da seção anterior e análise dos gráficos resultantes. O procedimento foi desenvolvido no software MatLab com os pacotes do WAFO (*Wave Analysis for Fatigue and Oceanography*). Ao todo são quatro séries de altura significativa para aplicação da POT:

- DB1: Dados da bóia - PONTO1 - 1991 a 1995 (não completos, contendo 42 meses);
- WW3/2/9195: Resultado do WAVEWATCH no PONTO2 - 38°W/23°S, de 1991 a 1995 (chamado de controle) para comparação com os dados da bóia;
- WW3/2/8605: Resultado do WAVEWATCH no PONTO2 - 38°W/23°S, de 1986 a 2005;
- WW3/3/8605: Resultado do WAVEWATCH no PONTO3 - 42°W/25°S, de 1986 a 2005.

Antes de começar qualquer procedimento, EMBRECHTS *et al.* (1997) sugere uma análise básica dos dados. Para tanto, inicialmente são plotados os gráficos, histogramas e tabelas com valores máximos, mínimos, médias, desvios padrão e tamanhos totais (n) de cada série. Após uma pequena apresentação das características dos dados, inicia-se o procedimento de determinação do estimador e do limiar. Basicamente é determinada uma região que contenha u ; decide-se qual estimador se comporta melhor nesse intervalo e então é fixado o limiar para o posterior ajuste da GPD, de acordo com a sequência:

¹⁰Como é o caso dos dados da bóia na Baía de Campos.

1. Análise do MEP para determinar um intervalo que contenha o limiar.
2. Observa-se ao longo de todo o processo os gráficos de N_u versus u , e $\%N_u$ versus u , com atenção sobre a região em torno de 10 e 15 %.
3. Plotagem do gráfico $\xi \times u$ calculado por todos os estimadores (PWM, PKD, MOM e ML). Aqui o interesse é buscar uma região de estabilidade de ξ e ao mesmo tempo comparar o comportamento entre eles.
4. Análise do gráfico de correlação entre empírico e modelado (correlação entre lado esquerdo e direito da equação 6.8) em função do limiar para os quatro estimadores, ajudando na escolha daquele que mais se adequa à região do limiar a ser escolhido e fornecendo indícios adicionais para a decisão de u .
5. Estudo da variância dos parâmetros de forma e escala em função do limiar, com determinação final do estimador a ser usado e análise da variância para os candidatos a limiar.
6. Após a decisão do estimador, plota-se novamente $\xi \times u$, agora com intervalo de confiança, para ajudar na decisão final de u .
7. Construção do gráfico dos valores extremos rv em função do limiar para períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos para ajuste fino do limiar final.

Pode ser visto que u não é fixado a partir da análise de um só gráfico, mas pela determinação de um intervalo que se estreita com sucessivas análises até convergir no limiar ótimo de interesse. É importante destacar que a escolha de u e do estimador caminham juntas até metade do procedimento, já que a eficiência dos estimadores varia também com u . O próprio WAFO, por exemplo, indica a partir de quais valores de ξ cada estimador passa a não ser mais válido, e sugere o uso do PWM e MOM para o ajuste em casos com poucos pontos de amostragem. No método ML a variância costuma ser menor, mas em contrapartida não pode ser usada quando N_u é pequeno. Essas características são naturalmente observadas nos gráficos e são importantes na escolha do estimador.

Resumidamente, busca-se um limiar que prioritariamente atenda ao requisito de linearidade do MEP, apresente estabilidade de ξ e resulte em um ajuste com boa correlação e baixa variância dos parâmetros. O estimador escolhido é aquele com melhor correlação empírico X modelado, menor variância para a região de u e que seja compatível com os requisitos de aplicação do WAFO.

A idéia do item 7 está no ajuste final mais sutil do limiar, já que através dos gráficos não é possível determinar, por exemplo, se u ótimo é igual a 4,57 ou 4,56. Esse

detalhismo pode parecer desnecessário, entretanto é observado que pequenas mudanças podem resultar em grandes variações no ajuste, o que é agravado quando se extrapola a GPD para períodos de retorno muito longos. Ajusta-se então o limiar u aproximando o valor extremo rv , relativo ao pr igual a duração da série, do valor máximo registrado (mostrado nas tabelas iniciais). Por exemplo: no caso da série WW3/2/8605, olhando o gráfico de $rv \times u$ para pr igual a 20 anos, é escolhido o limiar que resulte no valor extremo rv que mais se aproxime do valor máximo registrado. Por esse motivo os gráficos $rv \times u$ foram construídos para pr de 5 (WW3/2/9195), 20 (WW3/2/8605 e WW3/3/8605), 50 e 100 anos.

A partir da determinação do estimador e de u , o ajuste da GPD se torna simples com o auxílio do MatLab. A função *wgpdfit* calcula ξ e β para a cauda, fornecendo também as respectivas variâncias. O intervalo de confiança dos parâmetros é calculado pela curva da gaussiana onde as caudas possuem nível de significância de 95%. A função é construída tendo o valor de ξ e β (resultante da *wgpdfit*) como central e o desvio padrão igual à raiz quadrada da variância.

$$\text{intervalo de confianca} = \text{valor central} \pm 1,96 \cdot \frac{\sqrt{\text{variância}}}{\sqrt{\text{número de dados}}} \quad (6.10)$$

O cálculo dos valores extremos rv foram desenvolvidos seguindo a equação 6.9. O intervalo de confiança de rv foi calculado com o mesmo princípio de 6.10, estimando primeiramente a variância dos valores extremos, para depois calcular o intervalo de 95% de significância. Para as séries de 5 anos não foi feito um estudo sobre as possíveis tendências de n ao longo dos anos devido à pequena duração. Como os resultados do WAVEWATCH são completos no tempo, o número estimado de eventos em pr anos é calculado conforme a seção 6.2. No caso dos dados da bóia, com alguns meses sem dados, foi utilizada a seguinte equação:

$$n_e^b = \left(\frac{n}{n_{\text{meses}}} \right) \cdot 12 \cdot pr \quad (6.11)$$

Com n o número total de eventos selecionados, n_{meses} o número de meses e n_e^b o número esperado para determinado período de retorno em anos (pr). Dessa maneira é considerado que o número de eventos em n_{meses} permanecerá constante ao longo de pr . Nas séries de 20 anos foram construídos gráficos com o número de eventos por ano, para analisar tendências e variações de baixas frequências que interferem em n_e .

A apresentação do procedimento através de gráficos pode parecer desgastante devido às inúmeras figuras geradas, entretanto se faz necessária para ser coerente com a metodologia e análises propostas.

6.4 Análise dos dados da bóia - 1991 a 1995

Nesta seção é desenvolvida a análise correspondente aos 42 meses dos dados de altura significativa de onda da bóia fundeada na Bacia de Campos (série DB1).

6.4.1 Conhecendo os dados

A seleção dos eventos iid do quadrante sul resultou na série apresentada na figura 6.1, com $n = 42$. Grande parte das alturas estão em torno de 3 a 5 metros, as quais são consideradas elevadas para a região. O processo de seleção naturalmente já exclui pequenas ondulações associadas a sistemas sinóticos menos intensos e curtos. Apesar disso a tabela 6.1 aponta grande desvio em torno da média 4,01 m. O valor máximo, $H_s=6,47$ m, ocorreu em 06/08/1992, e outros quatro eventos estiveram entre 5 e 6 m. Uma questão importante que torna a aplicação da POT complicada é o pequeno número de eventos. Se o total n é igual a 42, com certeza a cauda da distribuição terá N_u muito baixo. Apesar disso estatisticamente ser um problema, intuitivamente é bem coerente, já que grandes ondulações não atingem frequentemente a costa do estado do Rio de Janeiro, sendo bem pequeno o número de ressacas por ano.

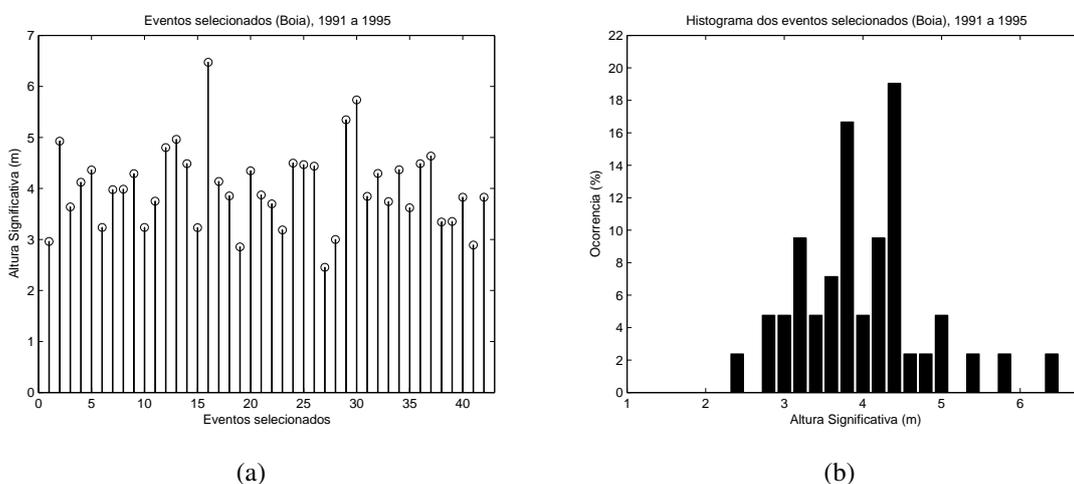


Figura 6.1: Apresentação dos dados da bóia. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.

Tabela 6.1: Parâmetros estatísticos básicos dos dados da altura significativa da bóia.

Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Tamanho
6,47	2,45	4,01	0,80	42

6.4.2 Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD

Na figura 6.2 é possível perceber a distribuição de N_u com o limiar. As probabilidades de ocorrência (figura 6.2(b)) entre 10 e 15 % correspondem a u entre 4,5 e 5 m, com N_u entre 7 e 5. O acompanhamento constante desse gráfico é importante na escolha do limiar para saber o tamanho da cauda, característica que influencia na variância e decisão do estimador a ser usado.

Em 6.3 está a base para a análise mais importante na decisão do limiar. Em 6.3(a) (série em ordem crescente), os sete últimos valores apontam uma “quebra” no crescimento. Voltando para 6.2 é possível perceber que, para $N_u = 7$, o limiar situa-se por volta de 4,6 m. Em 6.3(b), até 4,5 m é possível notar um decrescimento no valor da ordenada e comportamento côncavo, não indicando aproximar bem uma reta. A partir de 4,5 m o comportamento curvilíneo perde evidência. Há uma dificuldade de análise neste MEP devido ao pequeno número de pontos, fazendo com que os saltos (ou “dentes” do que parece uma “serra”) se tornem maiores. A princípio a região entre 4,5 e 4,7 m pode representar uma boa escolha de u .

Na figura 6.4 observa-se $\xi \times u$ calculado pelos estimadores. PWM, MOM e ML se comportam de maneira semelhante, com pequenas variações, enquanto PKD diverge dos anteriores. Para u maior que 4,7 m o ML já não calcula os parâmetros. Importante destacar o salto em torno de 4,5 m, valor que deve ser evitado por não apresentar estabilidade de ξ .

Observando os gráficos de correlação (figura 6.5) é evidente a grande diminuição dos valores pouco abaixo de 4,6 m em PWM, ML e principalmente PKD. O estimador que se comporta melhor é o MOM. Fora essa queda súbita em uma pequena faixa de u , os estimadores tem correlações praticamente iguais, fornecendo bons resultados, acima de 0,85.

A figura 6.6 apresenta as variâncias dos estimadores já excluindo PKD por divergir dos demais e apresentar os piores resultados de correlação. Conforme apontado pelo WAFO, o ML tem as menores variâncias, seguido por MOM e PWM; porém, para N_u pequeno como é o caso, a escolha deve ser entre MOM e PWM. Como MOM mostrou as melhores correlações e menores variâncias, os cálculos finais de ξ e β serão feitos por este estimador. A variância ao redor do limiar a ser escolhido é superior comparado a valores menores de u , entretanto não é possível fixar u para essa região pois estaria indo contra a linearidade do MEP.

De acordo com as consecutivas análises pode-se apontar o intervalo entre 4,55 e 4,65 m como região de início da cauda.

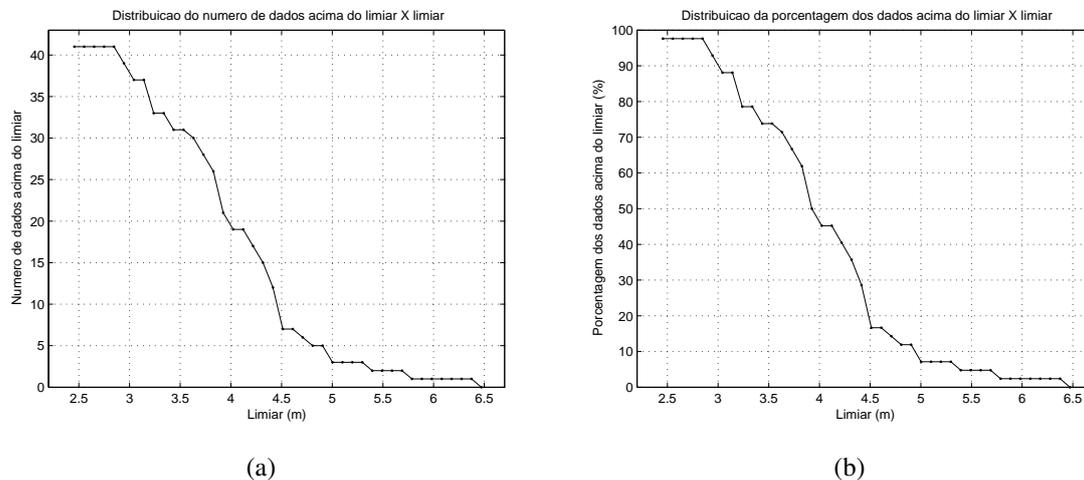


Figura 6.2: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os dados da bóia - 1991 a 1995. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Percentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

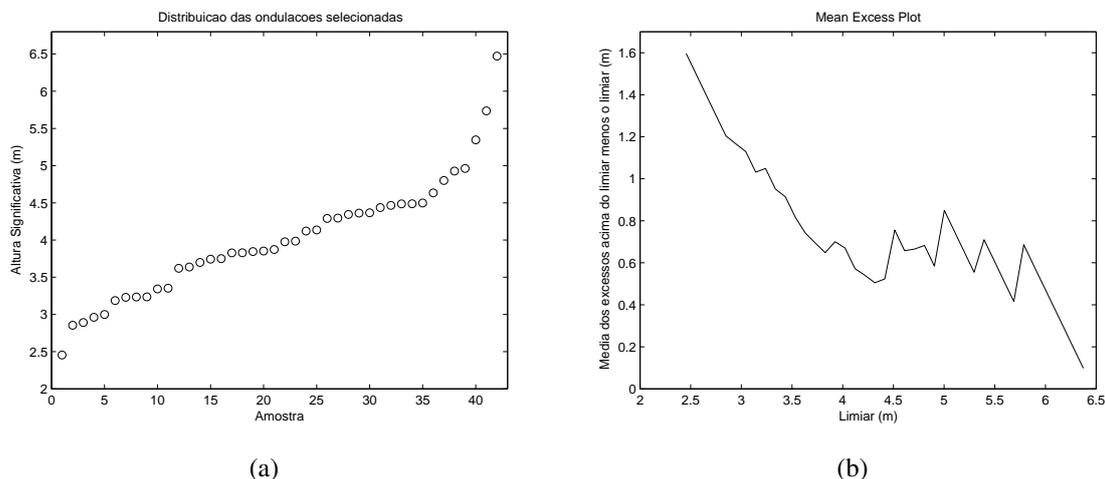


Figura 6.3: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os dados da bóia selecionados. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.

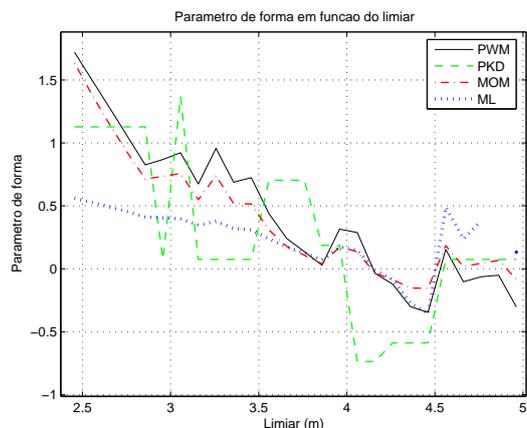
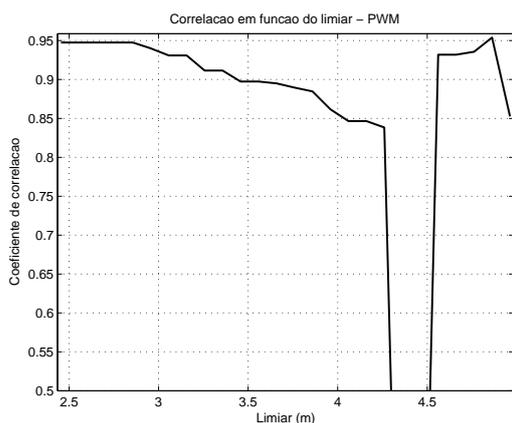
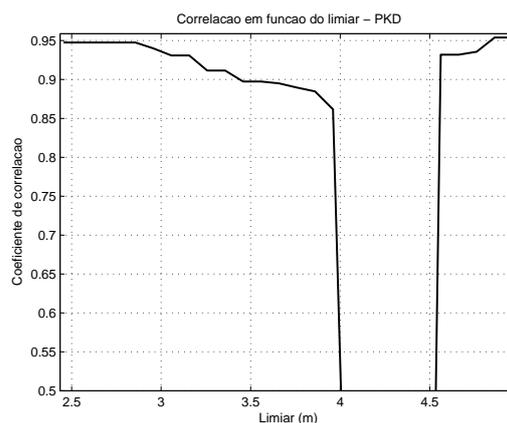


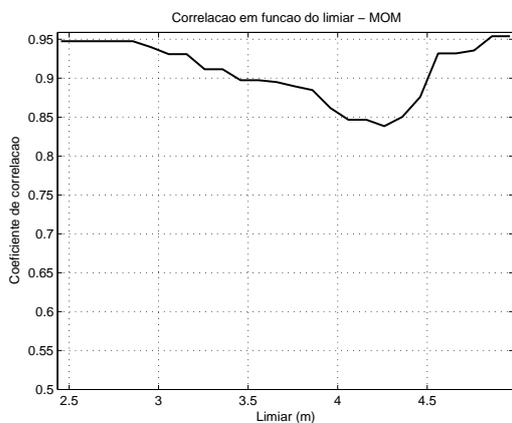
Figura 6.4: Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os dados da bóia selecionados. Diferentes métodos empregados: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).



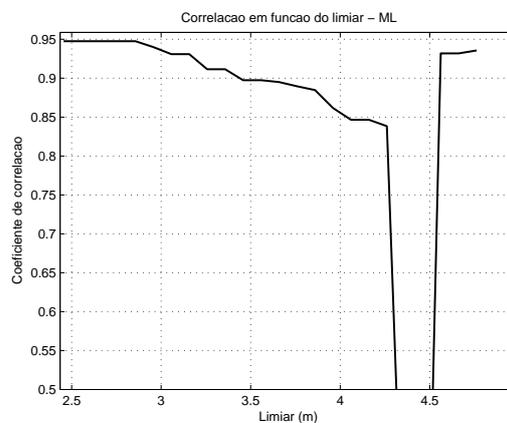
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.5: Comparação entre os estimadores para os dados da bóia - 1991 a 1995. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.

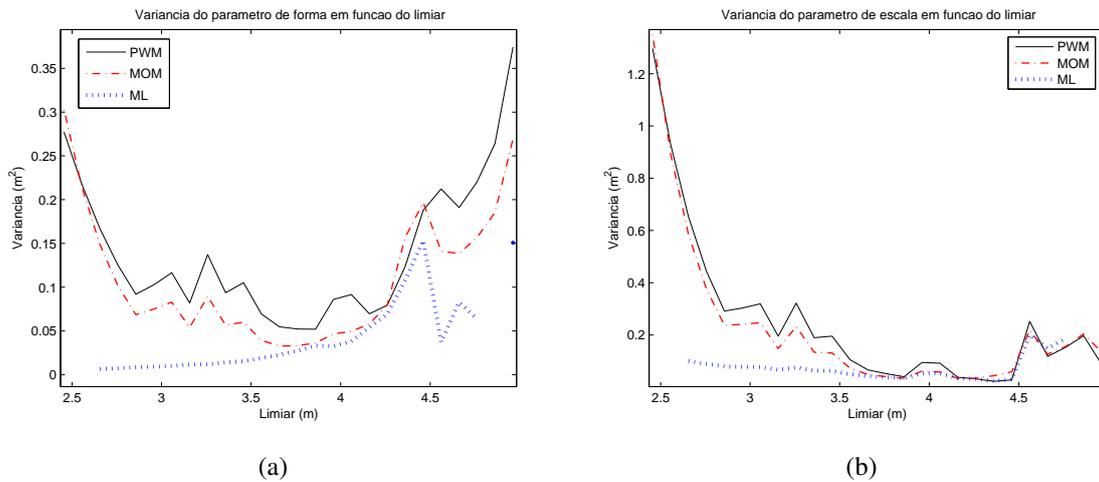


Figura 6.6: Variância dos parâmetros em função do limiar para os dados da bóia - 1991 a 1995. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

6.4.3 Fixação do limiar

A figura 6.7 apresenta de forma mais clara a evolução de ξ e β com u . Se torna evidente o início da cauda para u superior a 4,5 m, região em que ocorre também o aumento da variância, como pode ser visto pela curva tracejada representando o intervalo de confiança de 95%.

O ajuste fino é feito pela figura 6.8. Nela é possível notar o que foi exposto na teoria, relativo à grande variação de r_v com pequenas mudanças no limiar. Diversos valores de u fornecem extremos totalmente incoerentes, com H_s acima de 14 metros, os quais são excluídos de qualquer possibilidade de escolha. Buscando o menor valor entre 4,55 e 4,65 m que represente o melhor ajuste, conforme o item 7 da sequência proposta na metodologia, finalmente $u = 4,572$ m.

A tabela 6.2 expõe o resultado da escolha do limiar e cálculo dos parâmetros de forma e escala. Realmente o ajuste da GPD será feito com apenas sete pontos, o que não pode ser revertido por manter a concordância com os requisitos da POT.

Tabela 6.2: Ajuste da GPD aos dados (bóia) acima do limiar (*a.l.*) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{a.l.} (m)	d.p. _{a.l.} (m)	método	ξ	β	corr
4,572	7	16,67	5,27	0,65	MOM	0,0804 (-0,1888; 0,3497)	0,7523 (0,4610; 1,0437)	0,935

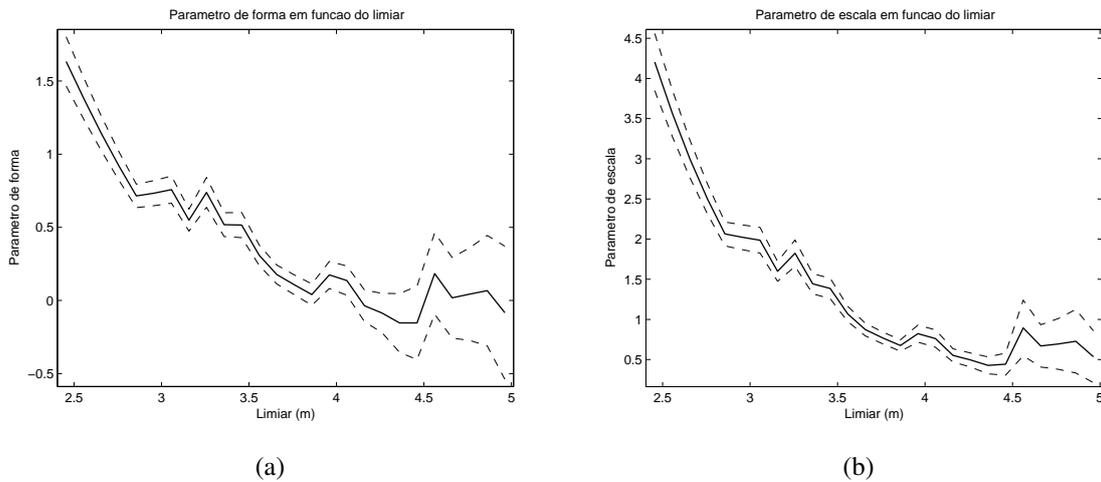


Figura 6.7: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os dados da bóia - 1991 a 1995. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

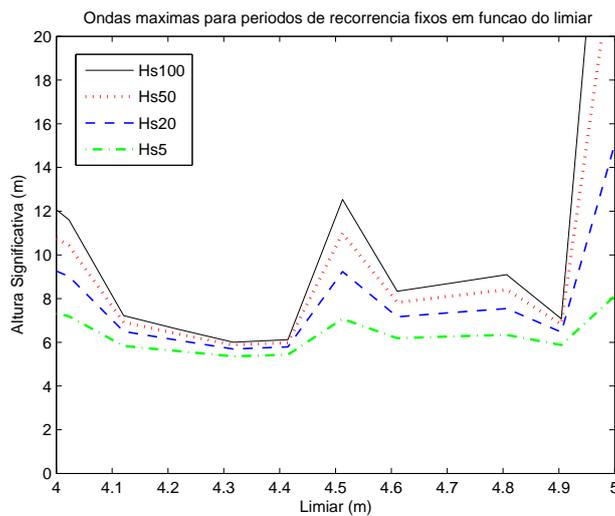


Figura 6.8: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Dados da bóia - 1991 a 1995.

6.4.4 Ajuste da GPD aos valores acima do limiar

É possível notar o bom ajuste da GPD à cauda da distribuição apesar de N_u muito pequeno. A figura 6.9(c) apresenta ainda uma ligeira curvatura devido aos três últimos pontos se comportarem de maneira um pouco diferente dos quatro primeiros¹¹. Esse fato

¹¹No caso de uma amostragem maior, com medição mais longa e mais pontos nessa região, seria justificável o estudo de um novo ajuste da GPD com u mais alto, podendo indicar um comportamento físico de crescimento diferenciado para valores próximos a x_{F_X} .

indica subestimação dos valores da GPD modelada para os três pontos de maiores ondas da distribuição, confirmado por 6.9(d), em que as duas maiores alturas possuem valores medidos superando a modelagem estatística.

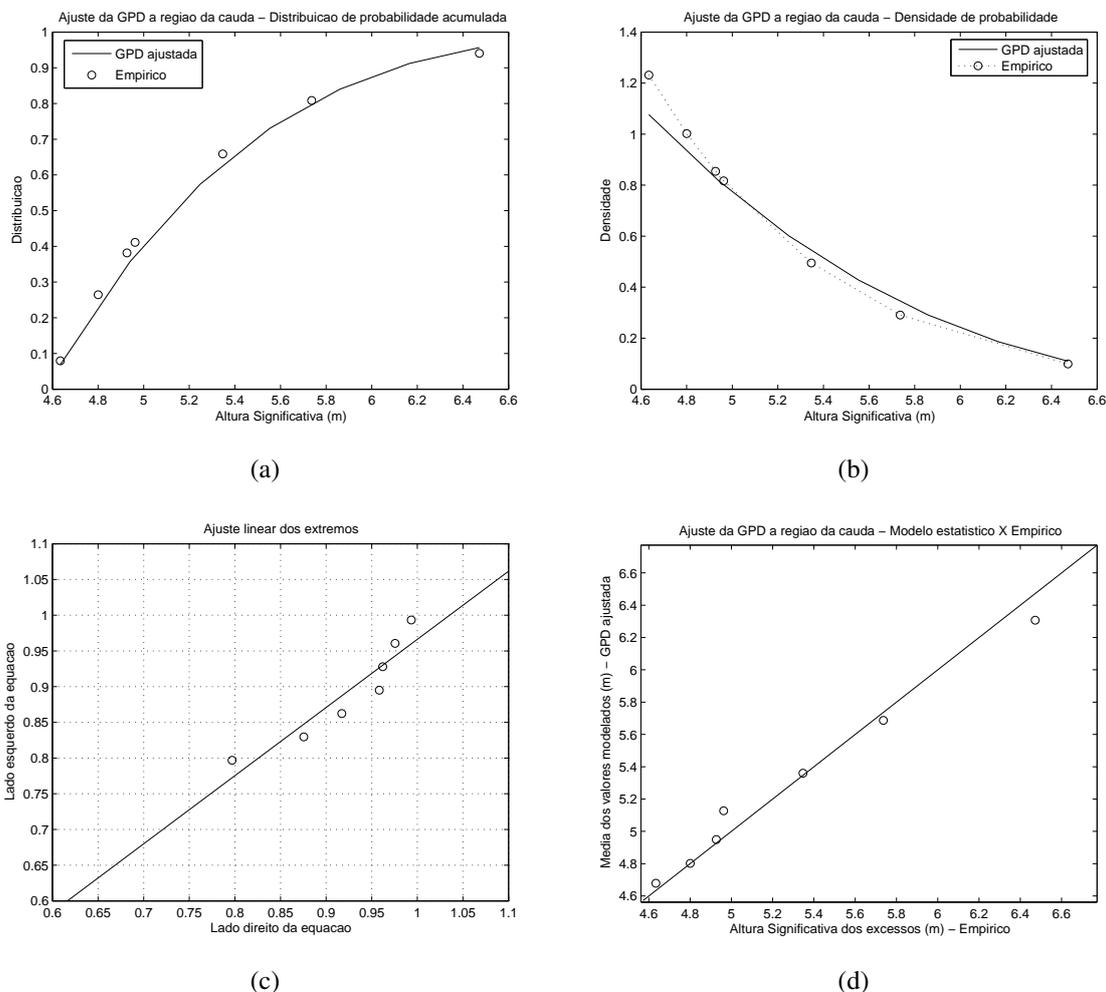


Figura 6.9: Apresentação dos resultados do ajuste da GPD aos dados da bóia - 1991 a 1995. Comparação GPD versus empírico, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,572 m.

Importante destacar a dificuldade na determinação do limiar ótimo para séries com poucos pontos, sendo essa suscetível a erros, já que comportamentos físicos dos eventos próximos a x_{F_X} podem ser interpretados erroneamente devido à pequena amostragem.

6.4.5 Valores extremos

A equação 6.9 foi então aplicada para o cálculo dos valores de retorno. O número estimado de eventos para cada período de retorno é descrito pela equação 6.9. A figura 6.10 apresenta o resultado juntamente com a tabela 6.3.

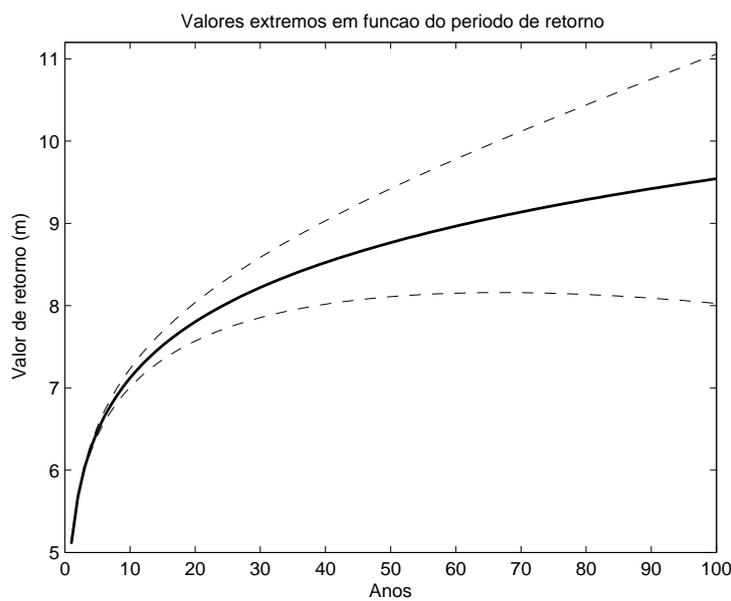


Figura 6.10: Resultado dos valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. A linha tracejada indica o intervalo de confiança de 95%. Dados da bóia - 1991 a 1995.

Tabela 6.3: Resultado dos valores extremos r_v para aplicação da POT aos dados da bóia. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5	20	50	100
Valor extremo (m)	6,47 (6,42; 6,53)	7,80 (7,57; 8,04)	8,77 (8,11; 9,42)	9,54 (8,03; 11,06)

É possível perceber o rápido crescimento dos valores extremos em períodos de retorno até por volta de 20 ou 30 anos, quando o aumento se torna gradativamente mais suave. A altura de onda associada a cinco anos, de acordo com a tabela, foi perfeitamente coerente com o máximo da série analisada ($H_s=6,47$ m). As curvas tracejadas do intervalo de confiança distanciam-se conforme se caminha no eixo das abcissas, resultado das incertezas na estimação dos extremos em períodos de retorno muito grandes. Tendo os dados disponíveis em 42 meses, pode-se dizer que a previsão dos extremos possui intervalo de confiança pequeno até em torno de 30 ou 40 anos. Períodos de retorno próximos a 100

anos têm amplitudes grandes, tornando a estimativa muito incerta. Essa característica é resultado da variância dos parâmetros ξ e β , que está intimamente ligada a N_u .

De acordo com a equação 6.10 pode-se afirmar com 97,5% de certeza que os valores extremos associados aos respectivos períodos de retorno estão abaixo da curva de intervalo de confiança superior. Por exemplo, para 20 anos, com segurança de 97,5% é possível dizer que os extremos não ultrapassam $H_s=8,04$ m.

6.4.6 Comentários e discussões

Inicialmente é possível afirmar que o passo-a-passo de aplicação da POT proposto pela metodologia foi importante para a boa determinação do estimador e do limiar, em especial sobre essa etapa em que o número de eventos é pequeno e o gráfico MEP torna a decisão de u difícil. A análise de extremos de eventos raros naturalmente tenderá a envolver esse tipo de dificuldade. Entretanto, a técnica POT se mostrou capaz de realizar um bom ajuste ao pequeno número de pontos acima do limiar.

A confiança dos valores extremos está diretamente ligada à variância resultante do ajuste da GPD, a qual, como foi visto nas figuras, depende diretamente de N_u . Medições com pouca duração podem resultar em ajuste razoável da GPD, porém o intervalo de confiança denuncia as incertezas associadas às estimativas de rv em períodos de retorno muito grandes. Problema adicional está no cálculo do número de eventos esperado para esse período (n_e , equação 6.11). Se a medição é realizada em época de intensa atividade dos sistemas geradores de onda por exemplo, grande número de eventos estarão na série, e a extrapolação (considerando essa taxa constante) e cálculo de n_e resultará em valores distantes do real. Esse tipo de erro pode alterar significativamente a estimativa dos extremos e só é minimizado com o aumento da duração da série ou então realizando a amostragem em uma época onde $n/\text{duração}$ é próximo a $n_e/\text{duração}$ (ou seja, quando a densidade dos extremos é próxima àquela associada ao período de retorno ¹²).

A figura 6.9(c) apresenta uma pequena curvatura onde se espera comportamento linear, característica que indica maior complexidade no comportamento entre os extremos. Foi comentado que as três maiores alturas da distribuição possuem evolução diferenciada das demais, o que pode representar processos físicos distintos de formação. Infelizmente não é possível ir a fundo nessa investigação devido à pequena amostragem dos dados. Contudo, pode-se esperar valores modelados pela GPD inferiores aos empíricos para os casos mais extremos. O resultado disso são rv da GPD menores que o esperado real.

¹²O que na prática é impossível de afirmar, já que não se conhece precisamente a densidade dos extremos em períodos de retorno longos.

6.5 Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W 23°S - 1991 a 1995 (controle)

A função da presente seção é realizar a análise de extremos para o resultado do modelo no mesmo período de medição da bóia, a fim de comparar estatisticamente os ajustes e valores extremos. Exatamente a mesma metodologia e sequência são aplicadas.

6.5.1 Conhecendo os dados

A seleção dos eventos iid do quadrante sul resultou em $n = 35$, apresentados na figura 6.11. Este número é ainda menor que n da bóia, apontando novamente as dificuldades estatísticas a serem enfrentadas com a pequena amostra. Grande parte das alturas de onda estão entre 2 e 4 m, com poucos valores acima deste intervalo. A tabela 6.4 informa o máximo igual a 5,78 m, o qual é bem superior aos demais eventos, podendo representar futuros problemas no ajuste da cauda.

Pela tabela 6.4 é possível notar a média dos eventos em 2,82 m, muito inferior aos 4,01 m da bóia, expondo a subestimação do WAVEWATCH tão comentada no capítulo 5. O mínimo em 1,62 m e o desvio padrão em 0,91 indicam dispersão em torno da média ainda maior que a bóia e com número menor de pontos. Aparentemente já são visíveis grandes diferenças entre as séries, evidente na comparação entre os histogramas.

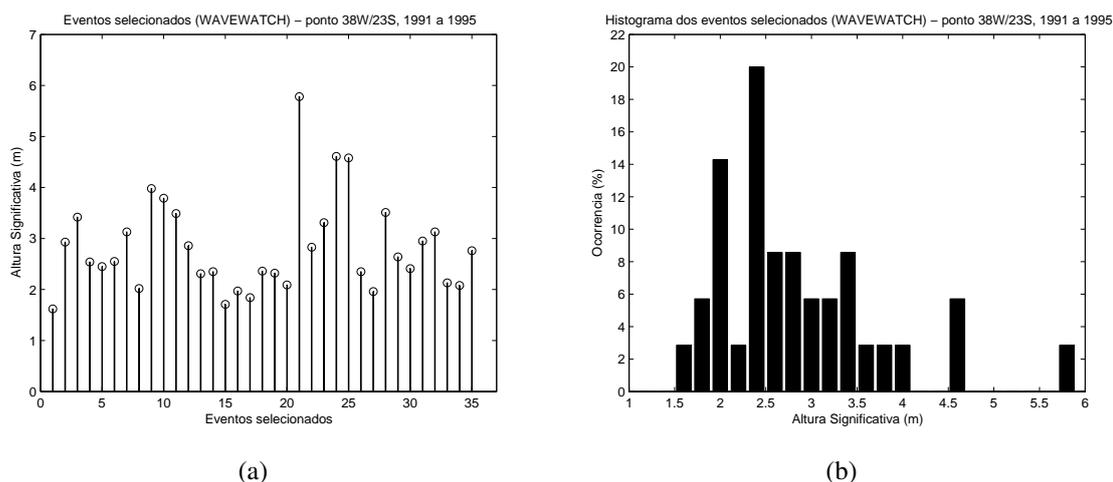


Figura 6.11: Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.

Tabela 6.4: Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WA-VEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.

Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Tamanho
5,78	1,62	2,82	0,91	35

6.5.2 Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD

A figura 6.12 apresenta o comportamento de N_u ao variar u . Valores entre 10 e 15% de N_u representam limiares entre 3,5 e 4 m, com apenas 3 a 5 pontos.

Observando 6.13(a) é confirmado o descrito na análise do histograma, com o extremo da distribuição distante dos demais pontos, resultando no grande salto no final do MEP de 6.13(b). Ainda em 6.13(a) é visível dois pontos de quebra e mudança no crescimento: o primeiro um pouco acima de 3,5 m e o segundo em 3,2 m, dignos de investigação. Novamente o MEP é de difícil análise devido ao pequeno número de pontos. Até 3,5 m se observa uma concavidade não muito evidente, e a evolução sugere o ajuste da reta a partir desse valor. Essa incerteza é problemática não somente para selecionar o limiar mas para assegurar a aplicação da POT, colocando em risco a validade do procedimento. Como a intenção é comparar duas séries, continuar-se-á a sequência metodológica.

O comportamento dos estimadores no gráfico de 6.14 mantém o que foi colocado na seção anterior, com PWM, MOM e ML muito próximos, enquanto PKD diverge dos demais. Diversos saltos e perda de estabilidade de ξ são visíveis, inclusive sobre $u = 3,5$ m, modificando um pouco o que seria a escolha do limiar inicial. Acima de 3,5 m o estimador ML não mais calcula os parâmetros.

As correlações de 6.15 confirmam a figura anterior, com ML indo até 3,5 m. Pouco abaixo desse valor ocorre grande queda da correlação de PKD, excluindo-o da escolha para o ajuste da GPD. MOM e PWM têm valores iguais de correlação em função de u . Ambos possuem bom comportamento em limiares pouco acima de 3,5 m, com queda em 3,7 m.

Na figura 6.16 observa-se grande aumento da variância na região da cauda, acima de 3,5 m, com MOM apresentando as menores. Comparando com as variâncias da bóia (figuras 6.16 e 6.6) observam-se valores muito maiores no primeiro do que no segundo, indicando as diferenças de ajustes entre as duas séries.

Por apresentar as menores variâncias, melhores correlações, se adequar às condições de aplicação do WAFO e por questões de comparação com a análise de extremos da bóia, foi escolhido o MOM como estimador dos parâmetros para ajuste da GPD. Observando

detalhadamente o MEP e análises da variância poderia se pensar no limiar próximo a 3 ou 2,9 m, fornecendo um ajuste relativamente bom. Entretanto, este teria $\%N_u$ em 30%, também muito distante de x_{F_X} , deixando de lado o objetivo de simular a cauda da distribuição com os pontos mais extremos, além de apresentar instabilidade do gráfico ξ versus u , confirmando a exclusão da possibilidade. Definitivamente u deve estar de alguma forma entre 3,6 e 3,7 m.

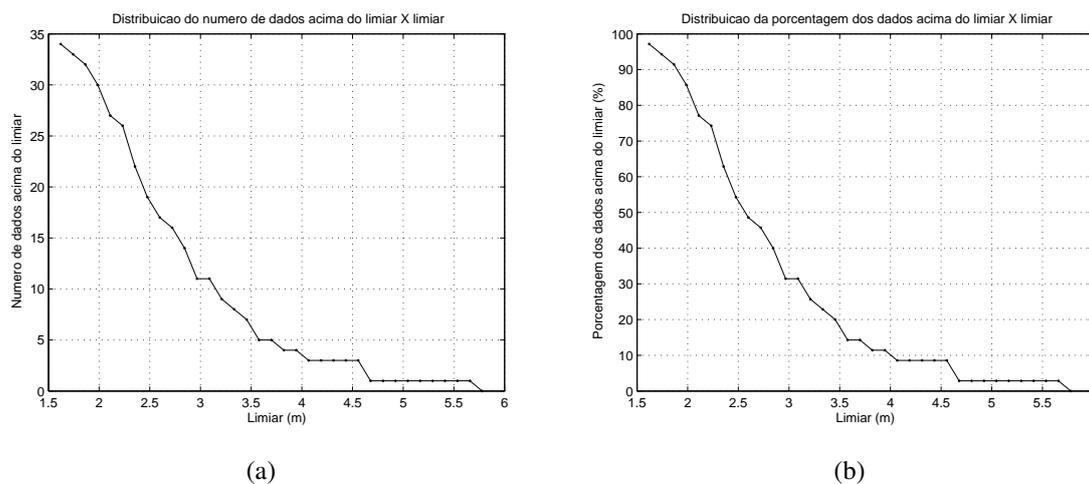


Figura 6.12: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

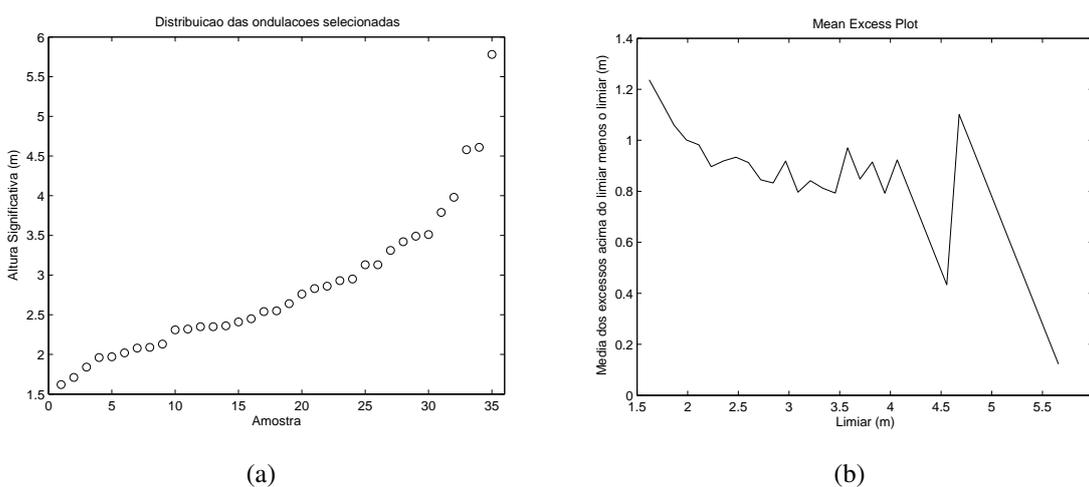


Figura 6.13: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.

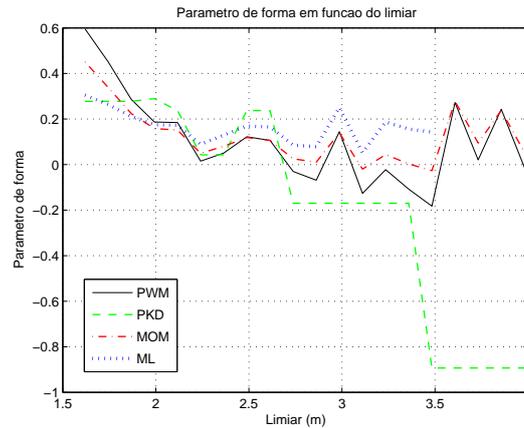
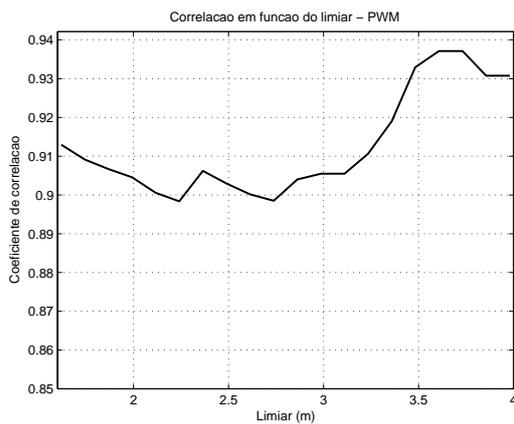
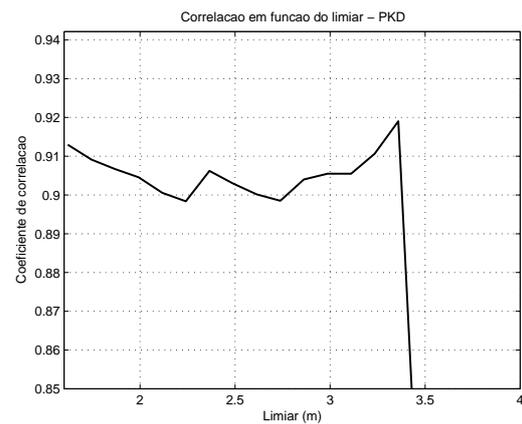


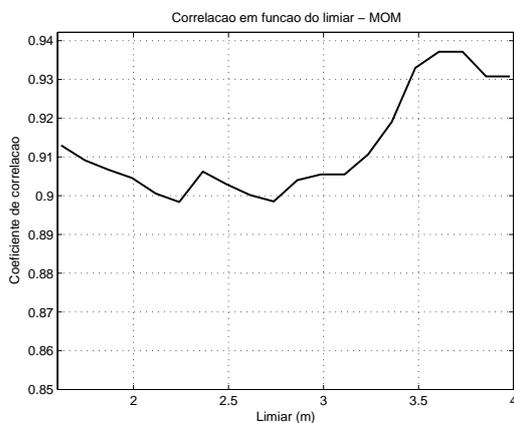
Figura 6.14: Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto $38^\circ\text{W}/23^\circ\text{S}$ - 1991 a 1995, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).



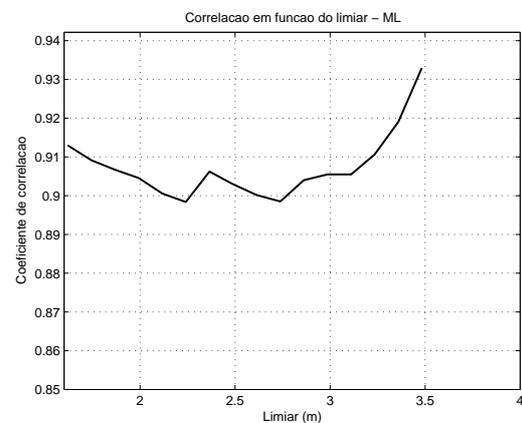
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.15: Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto $38^\circ\text{W}/23^\circ\text{S}$ - 1991 a 1995. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.

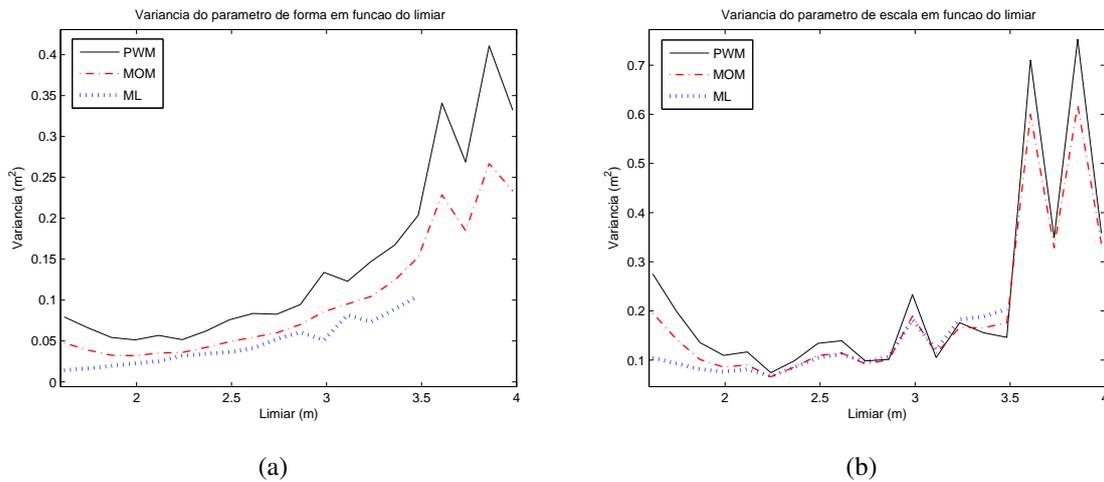


Figura 6.16: Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1991 a 1995. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

6.5.3 Fixação do limiar

A figura 6.17 expõe os parâmetros ξ e β calculados em função do limiar, juntamente com o intervalo de confiança, o qual apresenta grande amplitude, resultado da alta variância¹³. Para a escolha final do limiar deve ser evitado o valor 3,5 m por não estar em região de estabilidade de ξ , sendo 3,6 m a menor escolha (ainda com $N_u = 5$) que atenda todos os requisitos de fixação de u .

Resta agora a investigação final realizada pela análise da figura 6.18. Para a linha tracejada (-) verde ($pr = 5$ anos), a ordenada se aproxima de 5,78 m quando $u = 3,632$ m. As grandes variações dos valores extremos em função do limiar aqui ainda são maiores que o mesmo na bóia, indicando maior instabilidade na decisão do limiar.

A tabela 6.5 mostra os resultados dos parâmetros de forma e escala calculados pelo estimador e limiar escolhidos. O ajuste é feito por cinco pontos, com média da cauda igual a 4,55 m, bem menor que 5,27 m série da bóia. Caso contrário ocorre com o desvio padrão, maior que o da seção anterior (0,78 contra 0,65), devido ao distanciamento entre os extremos, principalmente próximos a x_{F_X} . Apesar dos problemas enfrentados na análise, a correlação entre modelo estatístico e empírico¹⁴ é boa, com 0,937.

¹³É de grande valia a comparação nesse momento das figuras 6.17 e 6.7, mostrando a consequência da maior variância em 6.17 no intervalo de confiança para a região da cauda.

¹⁴É chamado "empírico" apesar de tratar dos resultados do WAVEWATCH para deixar o termo "modelo" se referindo à modelagem estatística de extremos.

Tabela 6.5: Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995) acima do limiar (*a.l.*) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{<i>a.l.</i>} (m)	d.p. _{<i>a.l.</i>} (m)	método	ξ	β	corr
3,632	5	14,29	4,55	0,78	MOM	0,1935 (-0,1984; 0,5853)	1,0932 (0,5006; 1,6858)	0,937

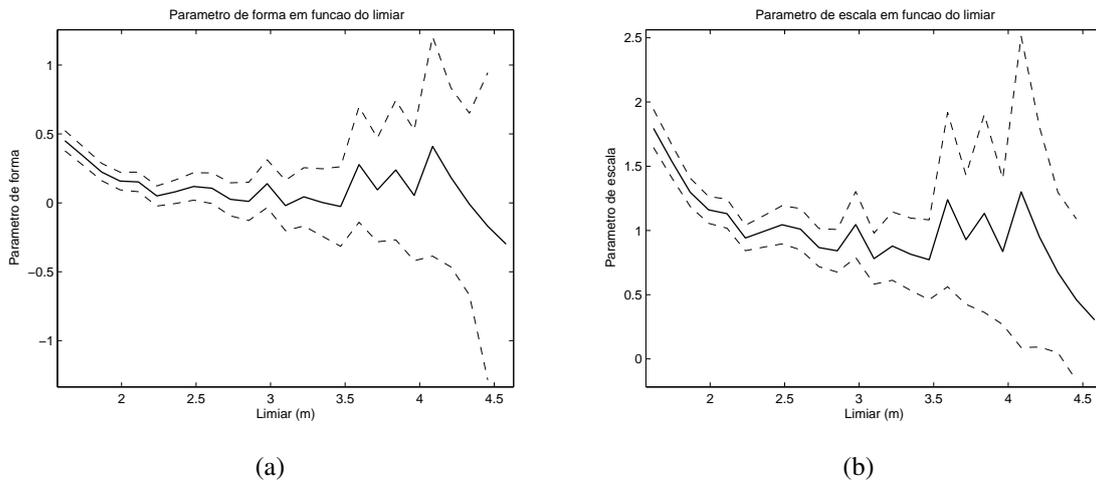


Figura 6.17: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

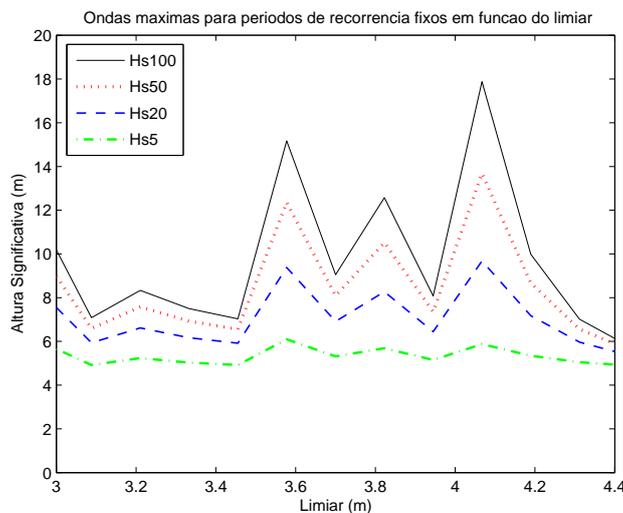


Figura 6.18: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.

6.5.4 Ajuste da GPD aos valores acima do limiar

É possível notar na figura 6.19 que a GPD tem boa capacidade de se ajustar até mesmo à amostras muito pequenas. Alguns desvios significativos entre modelagem estatística e empírico são observados em certos pontos, resultado coerente com a grande variância dos parâmetros.

Apesar da boa correlação e da qualidade da GPD em séries de poucos pontos, o ajuste apresenta grande incerteza e a extrapolação da distribuição modelada pode representar valores incoerentes com a realidade, especialmente em períodos de retorno elevados, como é exposto a seguir.

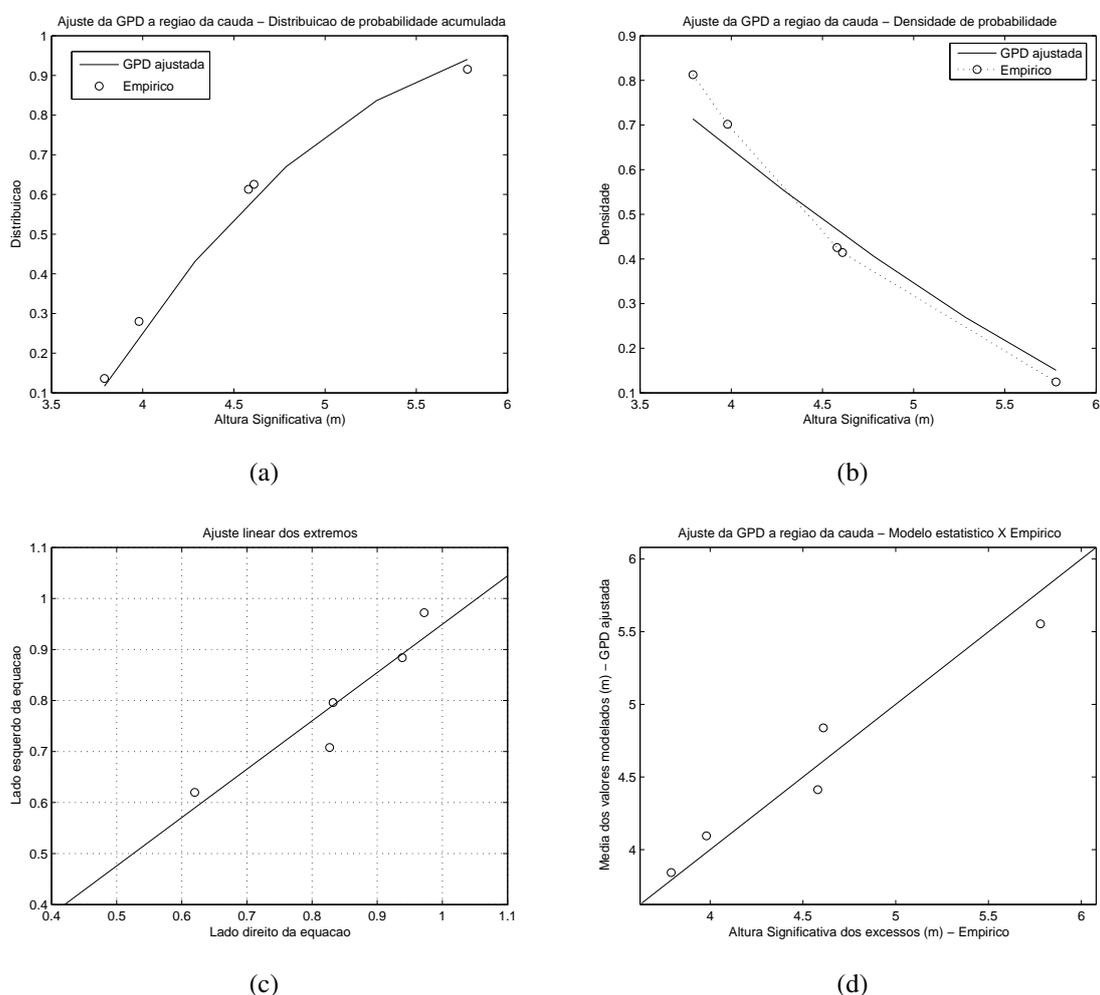


Figura 6.19: Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,572 m.

6.5.5 Valores extremos

A figura 6.20 expõe os resultados dos valores de retorno em função dos anos. Primeiramente já é visível a superestimação das alturas de onda da GPD, com rv chegando a quase 12 m de altura significativa, o que é bem improvável para a Baía de Campos. A forma da curva é diferente da seção anterior, resultado das diferenças dos parâmetros da GPD entre DB1 e WW3/2/91915.

Há coerência entre rv relativo a $pr = 5$ anos e o máximo da série, com valores próximos (5,70 m e 5,78 m respectivamente); ou seja, para períodos de retorno pequenos os respectivos extremos não são tão distantes da realidade. O mesmo pensamento serve para o intervalo de confiança. Como a variância do ajuste foi alta (bem maior que o ajuste da bóia), a diferença entre as curvas do intervalo de confiança e rv tornam-se grandes quanto maior pr , resultando em estimativas acima de 30 ou 40 anos muito incertas.

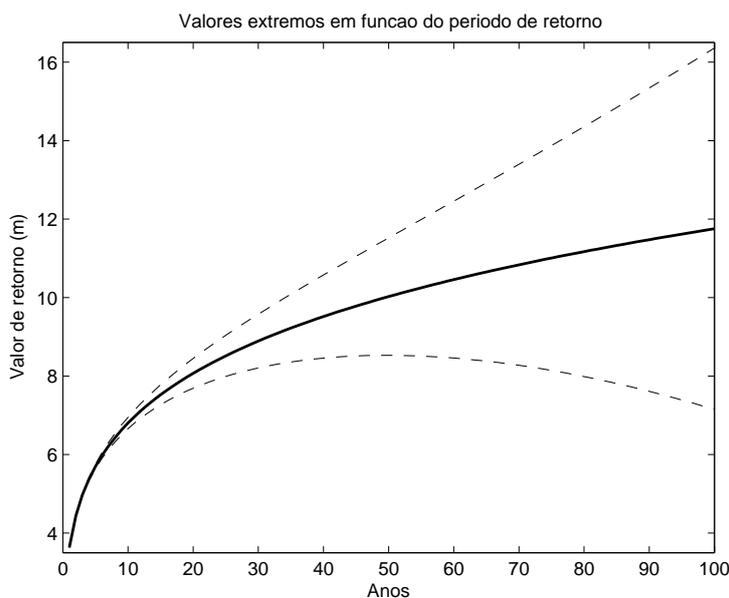


Figura 6.20: Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995.

Tabela 6.6: Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1991 a 1995. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5	20	50	100
Valor extremo (m)	5,70 (5,64; 5,75)	8,07 (7,70; 8,45)	10,03 (8,53; 11,52)	11,75 (7,15; 16,36)

6.5.6 Comentários e discussões

Observando os resultados dessa seção pode-se dizer no mínimo que a presente análise de extremos da série WW3/2/9195 é duvidosa. A justificativa se deve primeiramente por n muito pequeno, resultando no MEP de difícil análise. Não foi possível inclusive afirmar com clareza a possibilidade do ajuste de uma reta para os dados acima do limiar pelo MEP, ameaçando as exigências de aplicação da POT. As variâncias dos parâmetros se mostraram demasiadamente altas para todas as possibilidades de escolha de u . Consequentemente, o intervalo de confiança aparece com grande amplitude, divergindo bastante com o aumento do período de retorno, destacando as grandes incertezas dos valores extremos.

Os parâmetros ξ e β se mostraram bem diferentes da GPD da série da bóia, podendo ser visto pela forma diferenciada da curva na figura 6.20, gerando resultados pouco aceitáveis, como altura significativa próxima a 12 m. Não somente o número pequeno de pontos usados no ajuste ($N_u = 5$) conduz a tais incertezas, mas também o comportamento entre os eventos de maiores alturas de onda (visto no histograma inicial). É importante comentar que a subestimação do WAVEWATCH em simular casos de grandes ondulações não necessariamente implica em menores estimativas dos valores de retorno, já que este é resultado do ajuste da GPD à cauda da distribuição, e não depende somente dos valores absolutos dos eventos. Avalia-se então a capacidade do WAVEWATCH em captar o comportamento entre os extremos de onda que, neste caso de 5 anos de simulação, não apresentou resultados coerentes com a análise dos eventos selecionados da medição da bóia.

FERREIRA e GUEDES SOARES (1998) citam o trabalho de ELSINGHORST *et al.* (1996), o qual realiza uma análise de extremos para resultados da modelagem numérica de onda no Pacífico Norte, e aponta a incapacidade dos modelos em simular os aspectos mais detalhados das características dos extremos. Inicialmente, a análise da série WW3/2/9195 concorda com essa incapacidade.

6.6 Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W 23°S - 1986 a 2005

A partir daqui o procedimento é realizado com séries relativamente grandes, de vinte anos, com n e N_u não se tornando mais um problema como nos casos anteriores. Especialmente as duas últimas análises e a presente estão em regiões relativamente próximas (PONTO1 e PONTO2 - Baía de Campos, nordeste do Rio de Janeiro), permitindo comparações e discussões adicionais.

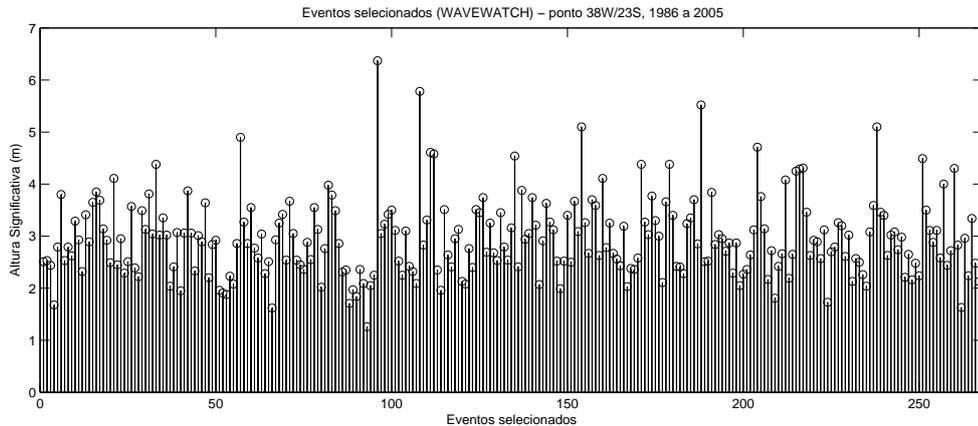
6.6.1 Conhecendo os dados

O resultado da seleção gerou 267 eventos iid de 1986 a 2005. Da mesma forma que a série do WW3/2/9195 anterior, a figura 6.21 indica grande parte das alturas de onda entre 2 e 4 m, entretanto o histograma mostra quantidade razoável de pontos acima desse intervalo. Entre 4 e 5 m é possível ver um pequeno crescimento até ocorrências por volta de 4,5 m, e então uma diminuição até o final do gráfico, semelhante ao que ocorre no histograma de DB1 (figura 6.1) entre 4,5 e 5,5 m.

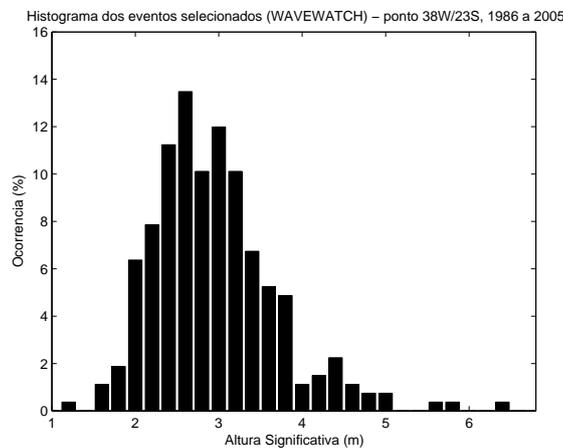
À primeira vista não é perceptível nenhuma tendência em 6.21(a), característica importante de ser observada em séries de maior duração. A tabela 6.7 fornece os cálculos elementares iniciais. Pode ser visto o máximo igual a 6,37 m, bem superior a 5,78 m da série WW3/2/9195 e próximo ao máximo registrado pela bóia, 6,47 m. Esse fato não diz que a amostra possui relativamente altura maiores, já que a média é 2,95 m (concordando com a subestimação do WAVEWATCH), mas é resultado do maior número de casos selecionados, com mínimo inferior a WW3/2/9195 e DB1.

Tabela 6.7: Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.

Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Tamanho
6,37	1,26	2,95	0,75	267



(a)



(b)

Figura 6.21: Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.

6.6.2 Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD

A figura 6.22 aponta uma quantidade grande de pontos quando $\%N_u$ está entre 10 e 15%. Essa característica permite maior liberdade na escolha do limiar e do estimador. É possível notar também o que parece ser uma cauda no final do gráfico, com início em valores um pouco abaixo de 4 m.

Analisando o MEP, figura 6.23(b), surgem duas regiões que permitem o ajuste de uma reta. A primeira em torno de 3,8 m (observada também em 6.22) quando o comportamento côncavo termina e outra em 4,6 m. Na figura 6.23(a) o segundo valor não é tão evidente, sendo mais claro o início da cauda em torno de 3,8 m.

A evolução de ξ com u para os quatro estimadores (em 6.25) se apresenta um pouco

mais poluída, tornando a busca por estabilidade do parâmetro mais difícil. Novamente é possível notar PWM, MOM e ML caminhando juntos, enquanto PKD diverge dos demais. ML realiza os cálculos para limiares até 4,6 m. Por enquanto PWM, MOM e ML seriam boas escolhas para estimar os parâmetros da GPD.

Observando as correlações da figura 6.26 é possível descartar definitivamente PKD de qualquer possibilidade de escolha, possuindo grandes quedas dos valores ao longo de u . PWM também desenvolve problema semelhante, entretanto confinado entre u igual 4,5 e 5 m. Para limiares em torno de 3,8 m os três métodos citados (PWM, MOM e ML) fornecem boas correlações entre empírico e modelado, acima de 0,85. Destaca-se o intervalo de 3,6 a 3,8 m com pequeno aumento da correlação, dentro do qual se está procurando u ótimo.

A análise das variâncias (figura 6.24) coloca PWM com valores mais altos, excluindo-o da escolha do estimador. MOM e ML são praticamente iguais ao longo de u , deixando a dúvida de qual utilizar para o ajuste final. Para efeitos de comparação com as seções anteriores é escolhido o estimador MOM no cálculo de ξ e β . Preparando para as futuras discussões entre as séries, é interessante a comparação entre as figuras 6.24, 6.16 e 6.6. Percebe-se que 6.24, da série WW3/2/8605, apresenta valores muito menores. Além disso, o grande salto onde a variância cresce rapidamente ocorre em $u = 3,8$ m, ou seja, o limiar pensado entre 3,7 e 3,8 m ainda está em uma região em que os estimadores fornecem variâncias pequenas para os parâmetros de forma e escala, resultado de N_u maior.

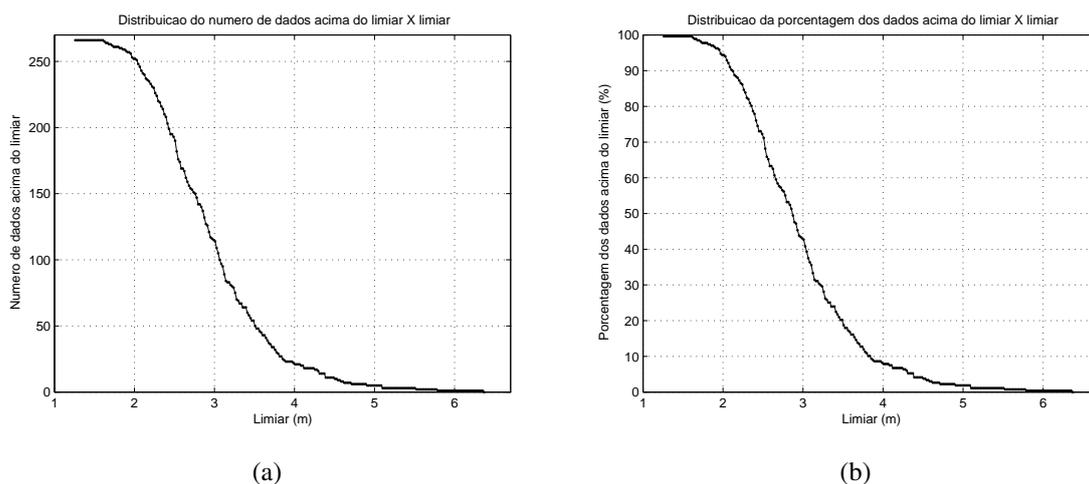


Figura 6.22: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

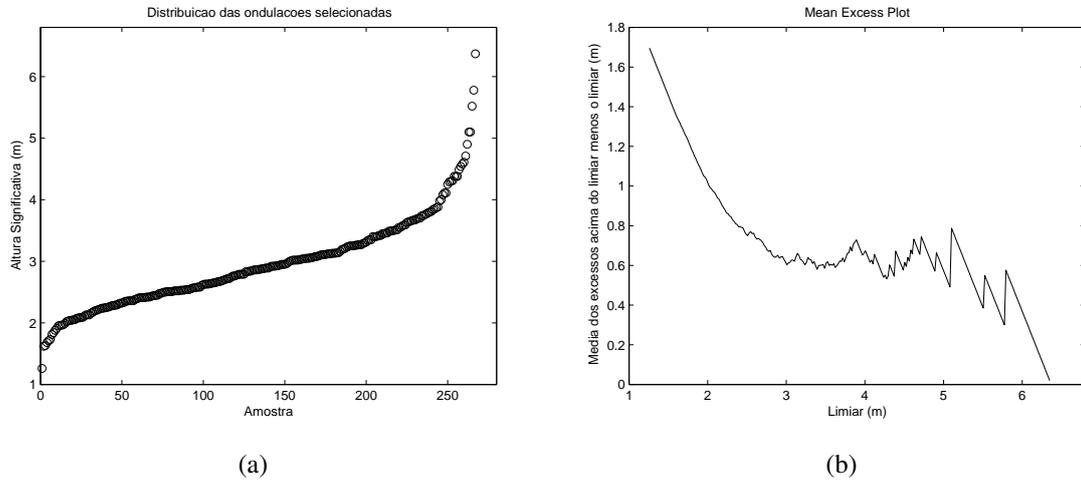


Figura 6.23: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.

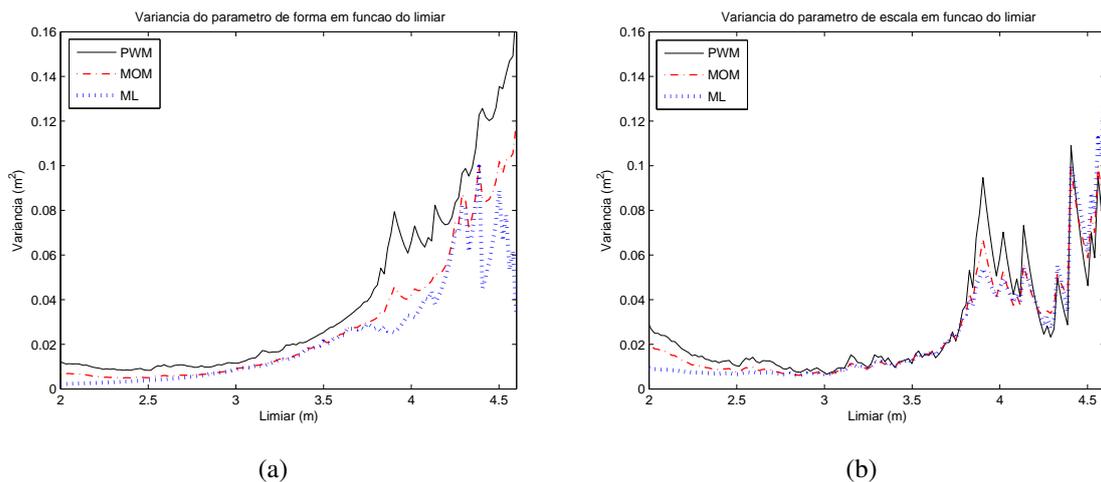


Figura 6.24: Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

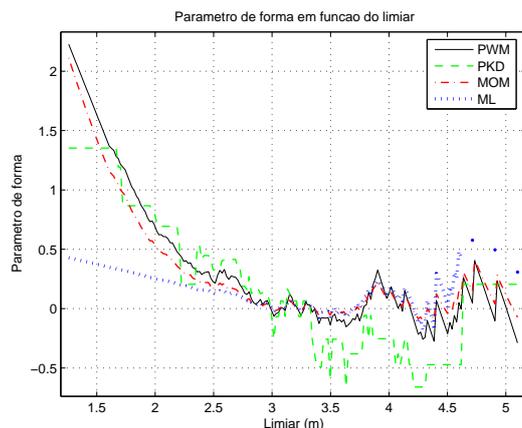


Figura 6.25: Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto $38^\circ\text{W}/23^\circ\text{S}$ - 1986 a 2005, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).

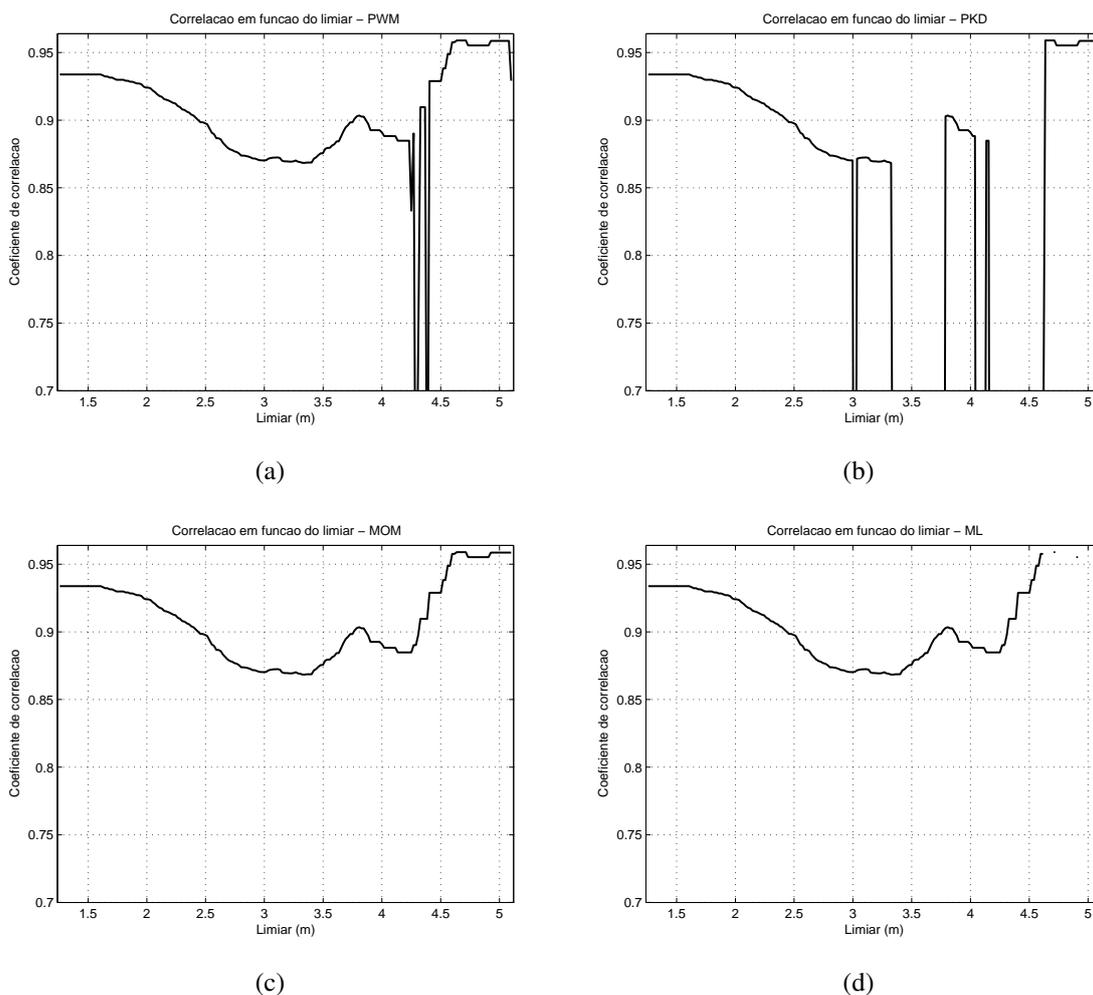


Figura 6.26: Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto $38^\circ\text{W}/23^\circ\text{S}$ - 1986 a 2005. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.

6.6.3 Fixação do limiar

Na figura 6.27 estão os gráficos de ξ e β em função de u . Nota-se o intervalo de confiança (curva tracejada) caminhando próximo aos valores dos parâmetros, confirmando a pequena variância discutida. As grandes quebras de estabilidade em ξ ocorrem principalmente quando u é superior a 4,3 m.

Recaptulando, pelo MEP os valores próximos a 3,8 m seriam boas escolhas de limiar. As análises posteriores indicaram o intervalo entre 3,7 e 3,8 m, evitando grande proximidade de 3,8 m onde ocorre aumento da variância. Com o gráfico de 6.28, aproximando o valor de retorno de vinte anos calculado pela GPD ao máximo da série WW3/2/8605 (vide tabela 6.7), é possível finalmente determinar $u = 3,775$ m.

A tabela 6.8 mostra o resultado do ajuste para o limiar estabelecido. O valor de $\%N_u$ em 11,23% fornece $N_u = 30$, apresentando, pela primeira vez nas análises até então, quantidade razoável de pontos para a GPD. A média dos excessos se manteve semelhante à seção anterior (WW3/2/9195) e naturalmente menor que os excessos da série da bóia (DB1). O desvio padrão ainda é um pouco menor que em WW3/2/9195 e próximo a DB1. A correlação entre empírico e modelado é boa, confirmado nos gráficos da próxima subseção. O valor do limiar é semelhante ao da série de cinco anos (WW3/2/9195) e novamente distante de $u = 4,572$ m dos eventos selecionados da bóia.

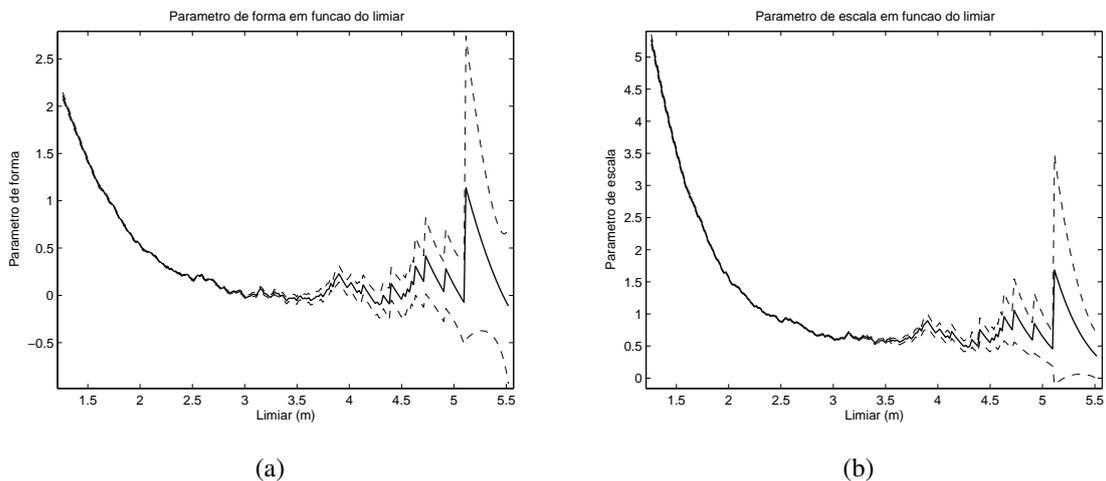


Figura 6.27: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

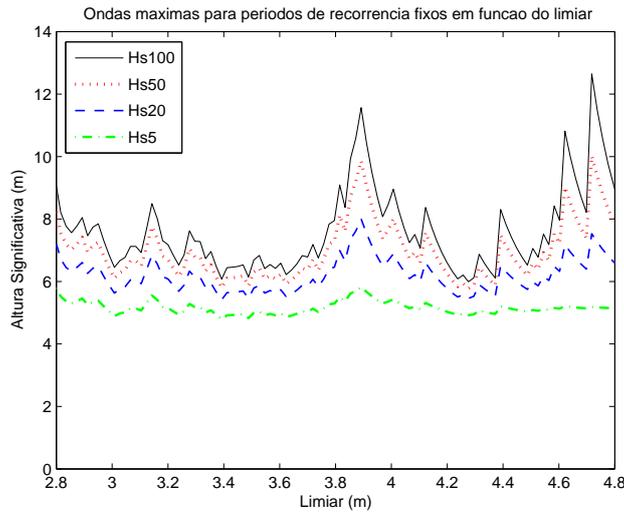


Figura 6.28: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.

Tabela 6.8: Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (*a.l.*) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{a.l.} (m)	d.p. _{a.l.} (m)	método	ξ	β	corr
3,775	30	11,23	4,44	0,62	MOM	0,0605 (-0,0025; 0,1235)	0,7020 (0,6384; 0,7657)	0,902

6.6.4 Ajuste da GPD aos valores acima do limiar

A figura 6.29 apresenta o ajuste da GPD aos trinta pontos da cauda da distribuição. É possível perceber a ótima coerência entre empírico e modelado, com poucos valores distantes dessa característica. Em 6.29(c) e 6.29(d) pode ser visto o comportamento curvilíneo de evolução dos extremos, com as alturas de onda próximas a x_{F_X} maiores do que o calculado pelo modelo estatístico. Isso indica que a extrapolação da GPD pode estar novamente subestimando os valores de retorno rv , especialmente aqueles associados a períodos de retorno mais altos, próximos a 100 anos. Interessante notar a semelhança entre a figura analisada (6.29) e a relativa aos eventos da bóia (figura 6.2). Guardadas as devidas diferenças de N_u e valores absolutos das ondas (menores na série do WAVEWATCH), observa-se a mesma curva e tendência a aumento do empírico em relação ao modelado pela GPD; inclusive com a cauda contida entre os mesmos valores da abcissa e ordenada nos gráficos de 6.29(c) e 6.2(c).

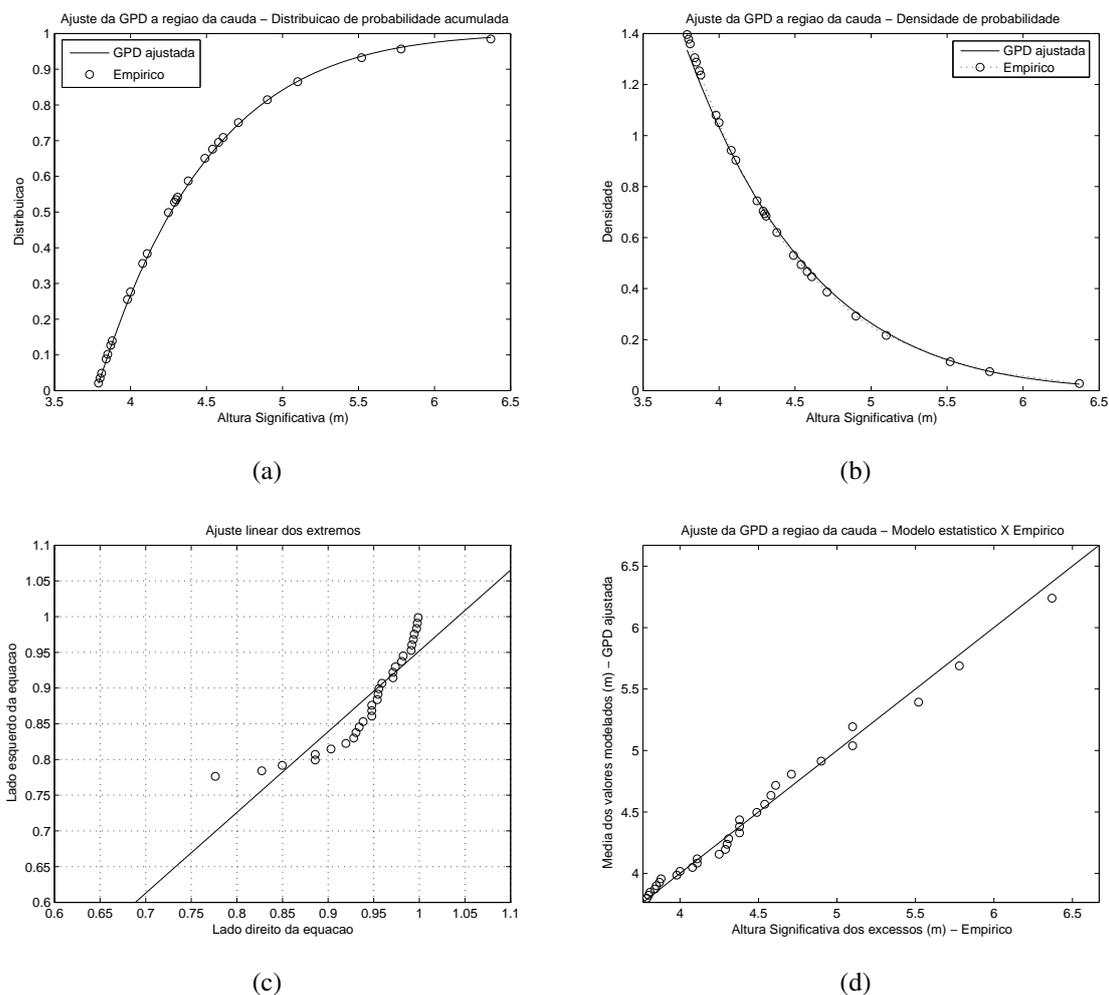


Figura 6.29: Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 3,775 m.

6.6.5 Valores extremos

Neste item é aplicada a metodologia conforme as seções anteriores, com investigação adicional sobre n_e . Na intenção de calcular o número de eventos para cada período de retorno de maneira mais precisa, foi construída a figura 6.30 com o número de eventos por ano, para analisar as possíveis tendências de aumento ou diminuição de ocorrência de grandes ondulações. Foi feito o ajuste linear do gráfico utilizando o MatLab, o qual forneceu coeficiente angular da reta de tendência igual a -0,06. Visualmente também observa-se tal fato. É possível notar alguns ciclos ao invés de uma tendência de crescimento. Por conta disso o cálculo do número de eventos estimado para os períodos de retorno (n_e) não foi modificado, utilizando o número médio de eventos por ano nos vinte anos como

constante para as extrapolações, conforme a metodologia proposta ($n_e = pr \cdot (n/n_{anos})$).

Pela figura 6.30 é possível verificar também se o cálculo de n_e realizado nas seções anteriores é coerente. Como o período analisado em WW3/2/9195 e DB1 foi de 1991 a 1995, não se espera que n_e esteja muito fora do real pelo fato de não corresponder a um período anômalo de ocorrência dos eventos; ou seja, a média do número de eventos por ano de 1991 a 1995 é muito próxima à mesma entre 1986 a 2005. Tal afirmação não pode ser dita se os dados da bóia, por exemplo, fossem amostrados de 1995 a 1999, período em que houve aumento dos casos.

Na verdade 1986 a 2005 pode compreender um intervalo de tempo pertencente a algum outro ciclo de frequência mais baixa, o qual resulta em n_e incoerente com a realidade, entretando essa verificação só pode ser comprovada simulando o WAVEWATCH por mais tempo.

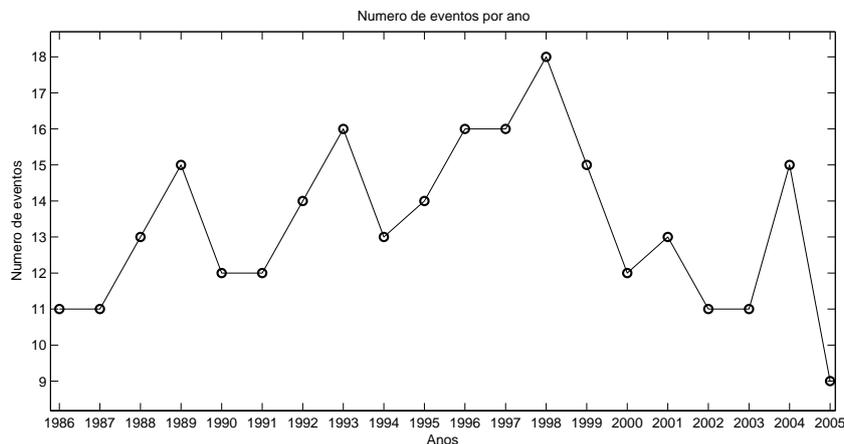


Figura 6.30: Número de eventos em cada ano para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.

A figura 6.31 apresenta o resultado dos cálculos da equação 6.9. A primeira vista é possível perceber a coerência da forma com a figura 6.10 da bóia, resultado da proximidade dos parâmetros ξ e β entre os ajustes. A tabela 6.9 expõe também os resultados, inclusive com $pr = 5$ anos, para comparação com WW3/2/9195. Em vinte anos o valor extremo fornecido pela POT é 6,426 m, bem próximo a 6,37 m do evento máximo. Em cinco anos o mesmo é 5,279 m, também semelhante a WW3/2/9195.

A diferença entre as outras seções é grande quando se compara a linha tracejada do intervalo de confiança. Como foi visto, o maior número de pontos da cauda forneceu variância muito menor dos parâmetros da GPD, resultando no intervalo de confiança de amplitude bem pequena, caminhando muito próximo à curva do r_v . Esse resultado apresenta menor incerteza nos valores extremos, até mesmo àqueles associados a períodos de retorno próximos a 100 anos. Segundo a análise, com 97,5% de certeza pode-se afirmar

que a maior altura significativa em 100 anos não ultrapassa 7,973 m.

Tabela 6.9: Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}W/23^{\circ}S$ - 1986 a 2005. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5 *	20	50	100
Valor extremo (m)	5,279 (5,265; 5,293)	6,426 (6,390; 6,462)	7,239 (7,178; 7,299)	7,884 (7,795; 7,973)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que a série a que se refere a tabela possui 20 anos de duração, e não teria sentido $pr = 5$.

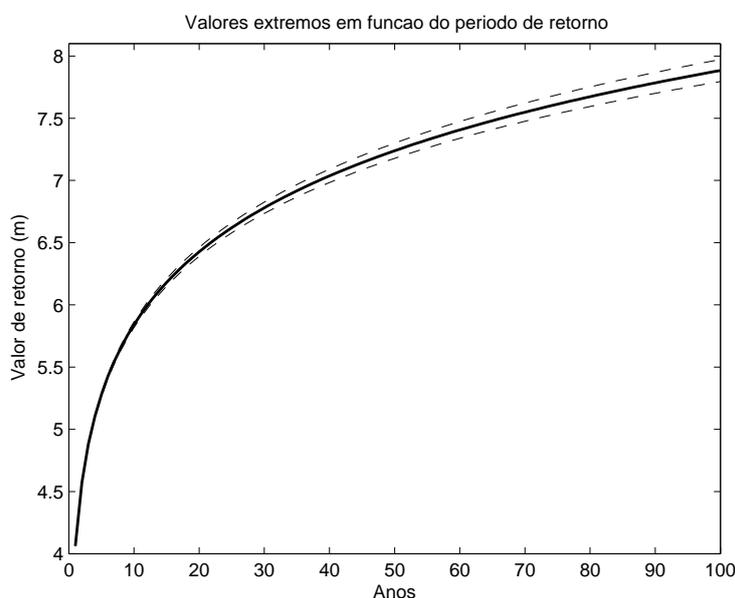


Figura 6.31: Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}W/23^{\circ}S$ - 1986 a 2005.

6.6.6 Comentários e discussões

Pela primeira vez nesse trabalho foi ajustada a GPD a uma grande quantidade de pontos. Essa característica, resultante da simulação do WAVEWATCH para maior período, é a chave das grandes diferenças entre as análises, oferecendo instrumentos mais confiáveis para aplicação da POT. Como exemplo, o MEP se mostrou de maneira mais clara, facilitando a determinação do limiar, resultado do n maior. As correlações entre empírico e ajustado se mostraram boas, mantendo o que já vinha sendo observado. Grande vantagem se dá nas variâncias (figura 6.24), com valores muito baixos e o limiar presente na região onde ainda não ocorre o salto e crescimento abrupto da ordenada. A consequência disso

é o intervalo de confiança estreito, o que diminui muito a incerteza principalmente para extremos em períodos de retorno longos (o qual foi problemático para as análises de DB1 e WW3/2/9195).

A proximidade entre empírico e modelado pela GPD aparece em grande parte da figura 6.29. O maior número de pontos confirma também, de maneira mais segura, esse ajuste, inclusive atendendo as exigências de aplicação da POT. O grande destaque inesperado ocorre ao comparar os resultados dessa seção com aqueles da bóia (figuras 6.1(b) com 6.21, e 6.29(c) com 6.2(c)). Os histogramas aparecem com forma muito semelhante, diferindo apenas de um deslocamento por conta da subestimação do WAVEWATCH. As figuras dos ajustes fortalecem ainda mais essa proximidade, com características muito parecidas na forma (mesma curvatura nas figuras 6.29(c) e 6.2(c)) e tendência de subestimação da GPD em relação aos dados para as alturas de onda mais elevadas. Essa característica releva o que foi colocado por ELSINGHORST *et al.* (1996), ou seja, o resultado de vinte anos de *hindcast* do WAVEWATCH, utilizando a metodologia descrita, foi capaz de fornecer um ajuste da GPD muito semelhante ao mesmo procedimento com os dados da bóia, apesar da grande subestimação da simulação do modelo de onda em casos de marulhos com muita energia. O modelo WAVEWATCH conseguiu, portanto, capturar o comportamento de crescimento entre os extremos, com adicional vantagem das baixas variâncias dos parâmetros da GPD, diminuindo as incertezas dos valores de retorno.

A figura 6.32 apresenta as três curvas referentes às séries (DB1, WW3/2/9195 e WW3/2/8605). Nitidamente WW3/2/9195 difere bastante das demais, apresentando o pior resultado. A linha contínua (preta) e tracejada (azul), referentes à bóia e WW3/2/8605 respectivamente, caminham praticamente juntas, com a mesma forma e diferenças quase constantes nos valores da ordenada, confirmando a proximidade de ξ e β , e do ajuste da GPD.

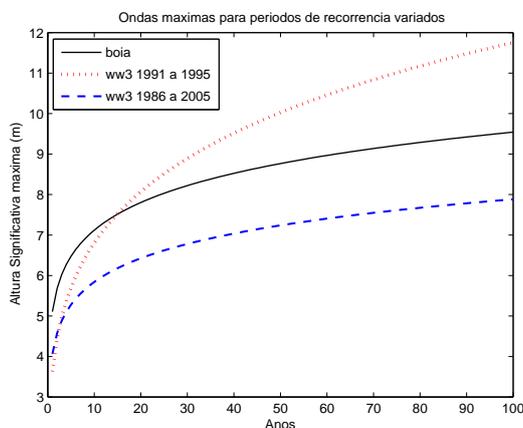


Figura 6.32: Comparação entre a análise de extremos da bóia e do WAVEWATCH. Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos.

Outra vantagem de trabalhar com a série de vinte anos é a possibilidade de análise do número de excessos por ano e melhor acurácia no cálculo de n_e . Como foi visto na figura 6.30, a densidade dos extremos pode variar bastante no tempo, colocando em dúvida os cálculos de n_e em séries muito curtas. Questão que é minimizada quanto maior a duração da série, como é o caso de *hindcasts* longos. O maior problema da presente análise de WW3/2/8605 é a dupla subestimação, primeiro referente aos valores de Hs simulados pelo WAVEWATCH e segundo devido à forma da GPD e superação do empírico em relação ao modelo estatístico. Devem ser esperados, então, extremos de onda maiores do que os estimados pela POT dessa seção.

6.7 Análise dos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W 25°S - 1986 a 2005

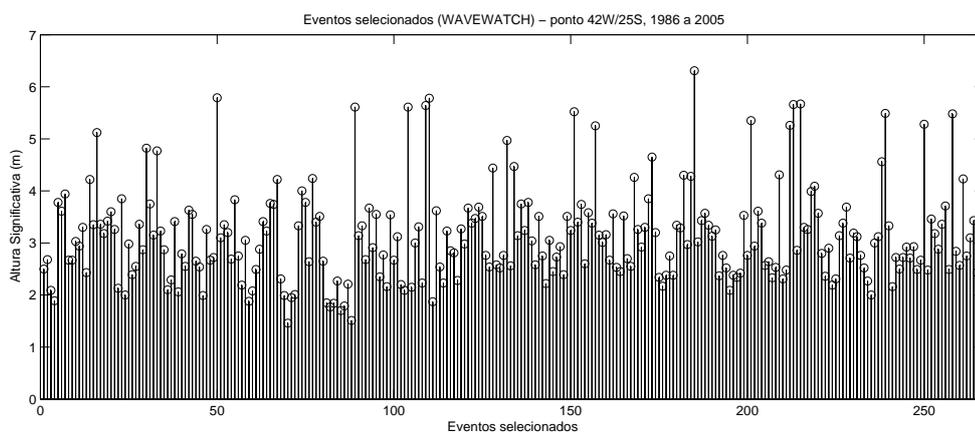
A mesma análise anterior é realizada com vinte anos de resultados do WAVEWATCH, agora no PONTO3 (42°W/25°S). Diferentemente das três últimas seções, o estudo não é realizado na Bacia de Campos, mas ao sul do estado do Rio de Janeiro, apontado na figura 4.2.

6.7.1 Conhecendo os dados

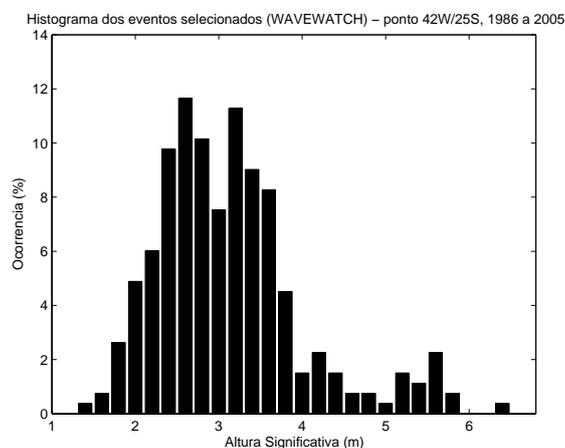
Novamente foi utilizado o mesmo critério de seleção dos eventos iid do quadrante sul, resultando na série de 266 pontos da figura 6.33. Não é perceptível nenhuma tendência e aparentemente os valores mais altos de altura parecem distribuídos homogeneamente na série. Pela figura 6.33(a) é possível notar maior quantidade entre 5 e 6 m, confirmado em 6.33(b). O histograma possui a maioria dos eventos entre 2 e 4 m, concordando com os correspondentes histogramas de WW3/2/9195 e WW3/2/8605; entretanto o comportamento dos valores mais altos é diferenciado. Existem dois momentos de crescimento e queda nas ocorrências: primeiramente perto de 4,2 m seguida por diminuição, e novamente o aumento por volta de 5,7 m.

A tabela 6.10 aponta o valor máximo igual a 6,31 m, menor que DB1 e WW3/2/8605. Esse fato vem contra o que naturalmente se espera observando a cauda da distribuição. Existe maior quantidade de alturas entre 4 e 6 m, porém o máximo é menor que as outras séries. A princípio pode-se prever comportamento um pouco diferenciado dos extremos e ajuste da GPD. A média aparece superior a WW3/2/9195 e WW3/2/8605, se aproximando de DB1, apresentando um clima de ondas com alturas relativamente maiores que o PONTO2 na Bacia de Campos. A dispersão em torno da média é grande, com desvio padrão 0,89. O número total de eventos iid n é 266, um a menos que WW3/2/8605, o

que é meteorologicamente esperado, já que os sistemas e pistas que geram ondas desta magnitude são muito maiores que a distância entre o PONTO2 e o PONTO3; ou seja, dificilmente ocorrerá uma grande ondulação ao sul do Rio de Janeiro sem provocar distúrbios significativos no nordeste do estado¹⁵. ROCHA *et al.* (2004) aborda esse assunto calculando inclusive o tempo que os eventos extremos de onda levam para se propagar do sul do Brasil até o Rio de Janeiro.



(a)



(b)

Figura 6.33: Apresentação dos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Altura Significativa dos eventos selecionados, (b) Histograma correspondente.

¹⁵A recíproca só é verdadeira para casos de ondas vindas do quadrante sul, já que as ondas que atingem a Baía de Campos podem ter geração diferenciada, como explicado em PARENTE (1999).

Tabela 6.10: Parâmetros estatísticos básicos dos resultados da altura significativa do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.

Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Tamanho
6,31	1,46	3,12	0,89	266

6.7.2 Determinação de um intervalo que contenha o limiar e escolha do método para o cálculo dos parâmetros da GPD

A figura 6.34 apresenta N_u em função de u . É possível notar uma quebra no decréscimo em u entre 3,5 e 4 m. Outra região que chama atenção é por volta de 5,5 m, com diminuição brusca da ordenada, mudando inclusive a concavidade da cauda.

Observando o MEP surge dois intervalos de possíveis limiares. O primeiro entre 3,5 e 3,9 m, e o segundo entre 4,2 e 4,4 m. No gráfico de 6.35 é mais evidente a primeira sugestão, porém essa decisão exige investigação.

A figura 6.37, de ξ versus u , aponta grandes diferenças entre os estimadores. PKD novamente se mostra muito distante dos demais. PWM e MOM se comportam de maneira semelhante como outrora, e ML diverge principalmente abaixo de 2 e acima de 4,3 m. O intervalo de u entre 3,5 e 4 m apresenta estabilidade de PWM e MOM somente entre 3,5 e 3,7 m, com grandes saltos em valores superiores.

As correlações da figura 6.38 entre modelado e empírico mostram resultados praticamente iguais para PWM, ML e MOM. PKD possui grandes perdas ao longo de u e é eliminado da escolha. Para o limiar entre 3,5 e 3,7 m as correlações são altas, com valores acima de 0,94.

As variâncias em função do limiar (figura 6.36) indicam novamente PWM um pouco superior a MOM e ML. MOM e ML têm variâncias similares, todavia ML não é calculado acima de 3,6 m. Por esses motivos e para priorizar o estimador escolhido nas outras seções, os cálculos dos parâmetros serão novamente efetuados por MOM. Olhando para o limiar a ser investigado é possível notar as variâncias bem pequenas perto de 3,5 m, próximo do qual será fixado u .

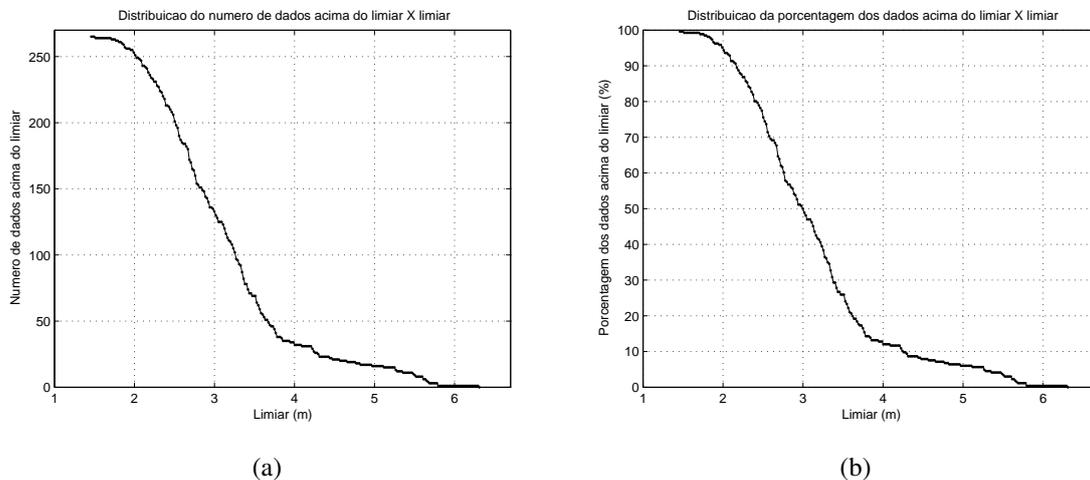


Figura 6.34: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto $42^{\circ}W/25^{\circ}S$ - 1986 a 2005. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

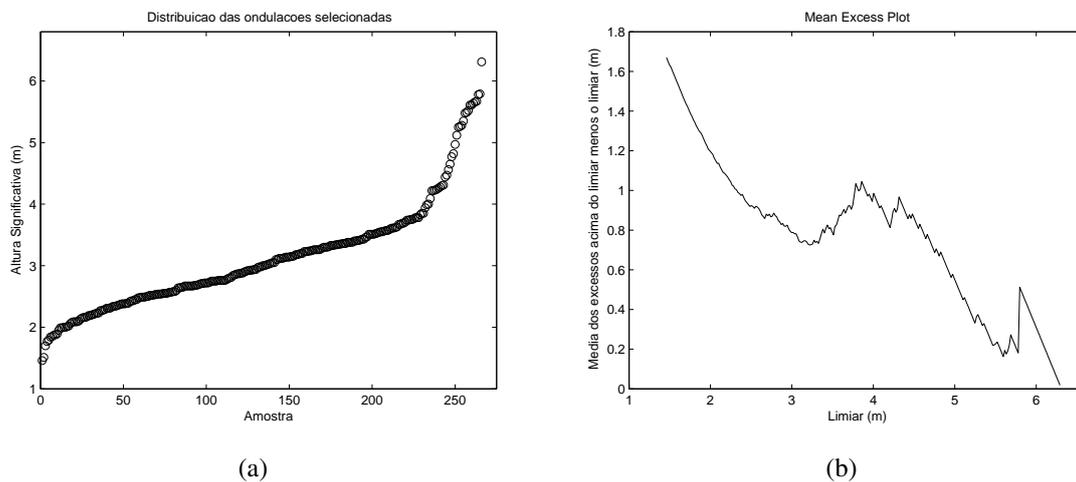


Figura 6.35: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto $42^{\circ}W/25^{\circ}S$ - 1986 a 2005. (a) Distribuição em ordem crescente da série (b) Média dos excessos acima do limiar.

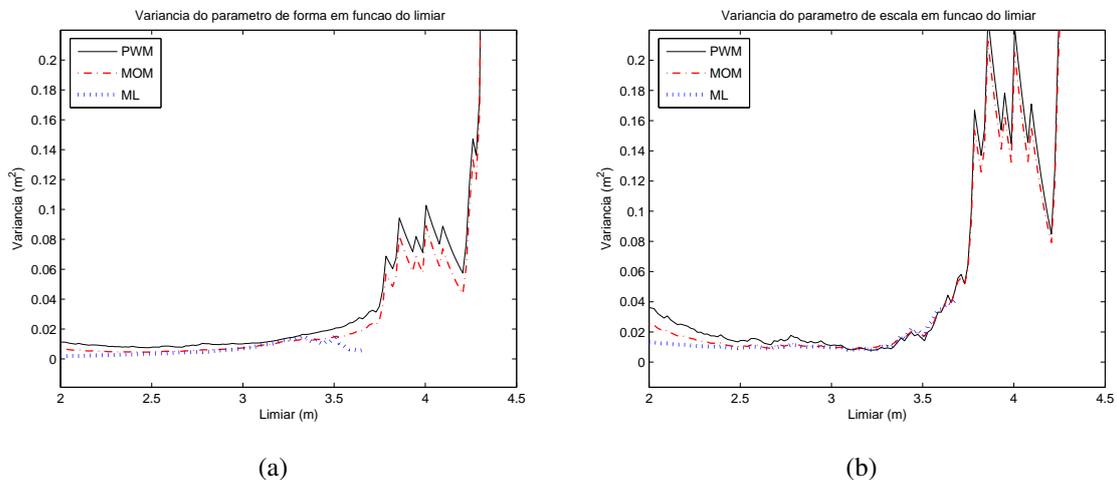


Figura 6.36: Variância dos parâmetros em função do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

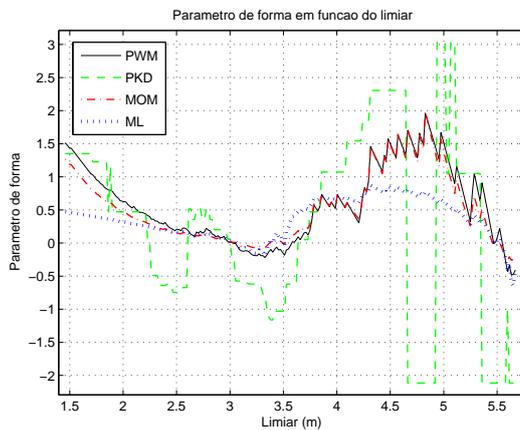


Figura 6.37: Variação do parâmetro ξ em função do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005, usando diferentes estimadores: PWM (preto, linha contínua), PKD (verde, - -), MOM (vermelho, - .) e ML (azul, ..).

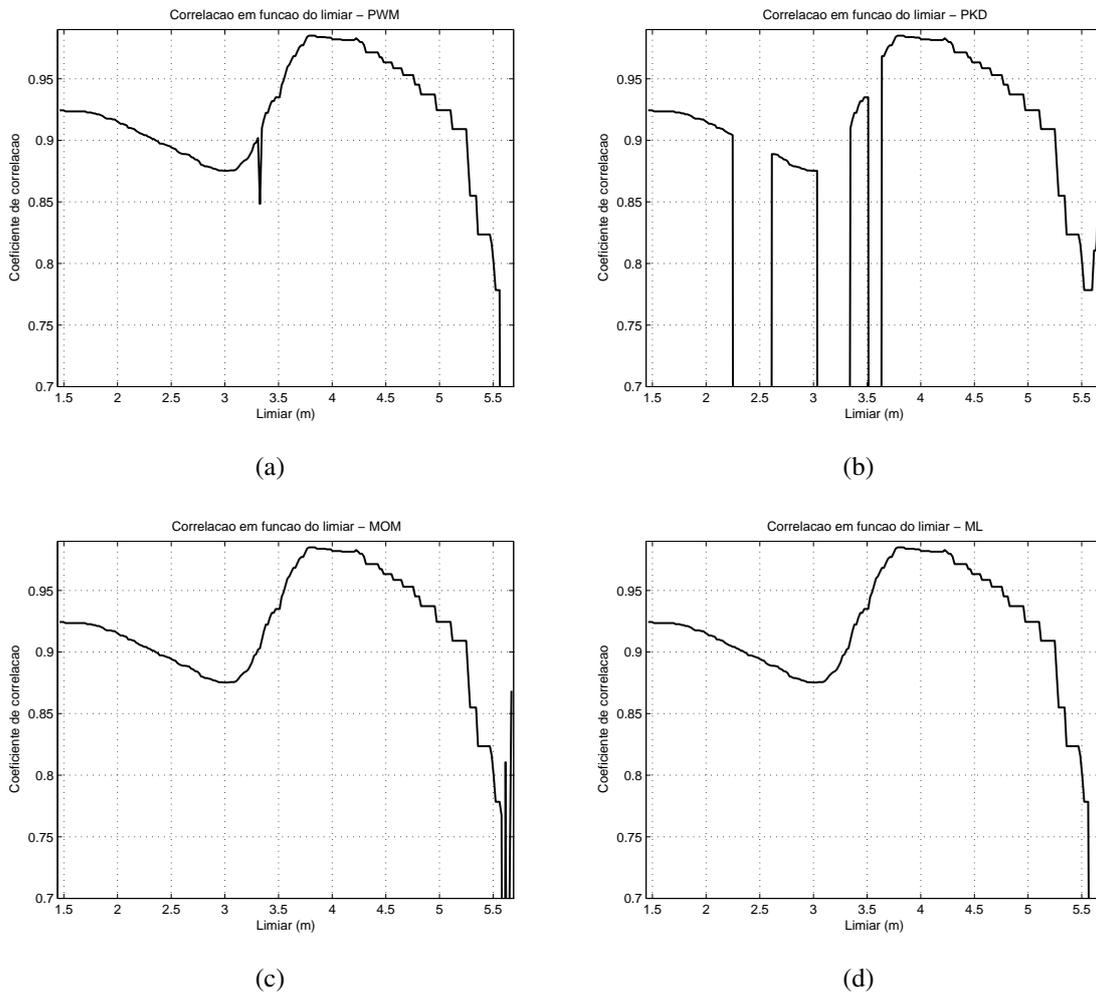


Figura 6.38: Comparação entre os estimadores para a simulação, ponto $42^{\circ}\text{W}/25^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005. Gráficos de correlação versus limiar. (a) PWM, (b) PKD, (c) MOM, (d) ML.

6.7.3 Fixação do limiar

Observando os gráficos de ξ e β em função de u (figura 6.39) é possível notar o intervalo de confiança (linha tracejada) bem próximo aos valores dos parâmetros no intervalo investigado (3,5 a 3,7 m), resultado da baixa variância. Olhando atentamente ξ conclui-se que o limiar deve estar em torno de 3,6 m ou abaixo deste, procurando o menor u em que MEP pode ser ajustado com uma reta, e conseqüentemente maior N_u .

O ajuste final é feito pela figura 6.40, buscando o limiar em que o valor de retorno para vinte anos é próximo a 6,31 m (máximo da série). Finalmente $u = 3,510$ m é a escolha que melhor atende a todos os requisitos propostos pela metodologia. Ainda analisando esse gráfico é possível constatar os valores extremos demasiadamente altos para u maior que

3,6 m, como por exemplo ondas extremas em vinte anos em torno de 25 m. Intuitivamente esse resultado parece fora da realidade e elimina qualquer chance de escolha do limiar nessa região. Essa característica pode ser consequência do comportamento da cauda da distribuição, discutido na subseção 6.7.1, em que aparecem diversos pontos entre 5 e 6 m e apenas um caso acima de 6 m (que é o máximo 6,31 m), sendo visível também pelo salto (ou “degrau”) mais pronunciado no final do MEP da figura 6.35.

A tabela 6.11 apresenta o resultado do ajuste para o limiar fixado. Destaca-se o grande valor de N_u , igual a 65 (mais que o dobro de WW3/2/8605), com $\%N_u$ superior ao indicado na metodologia, porém com menor grau de relevância para estipular u . A média dos excessos da cauda é semelhante às outras análises dos resultados do WAVEWATCH e menor que a análise de DB1 (5,27 m). Novamente a correlação do ajuste é boa, acima de 0,90, e superior a respectiva em WW3/2/8605.

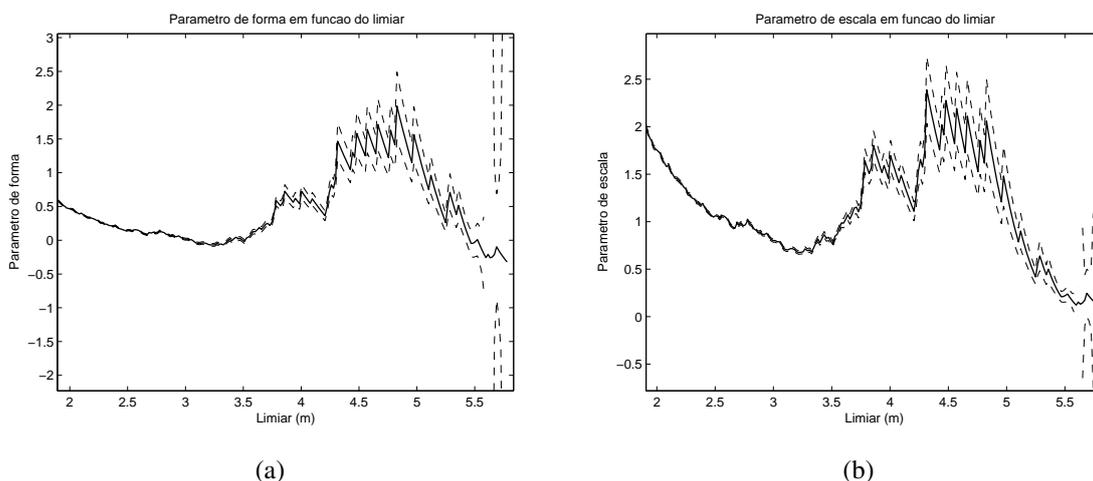


Figura 6.39: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

Tabela 6.11: Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005) acima do limiar (*a.l.*) fixado. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{a.l.} (m)	d.p. _{a.l.} (m)	método	ξ	β	corr
3,510	65	24,44	4,33	0,79	MOM	0,0423 (0,0131; 0,0716)	0,8581 (0,8221; 0,8941)	0,935

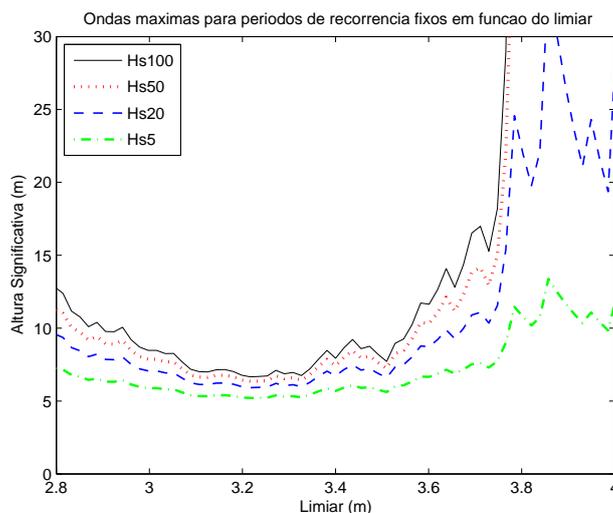


Figura 6.40: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto $42^{\circ}\text{W}/25^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005.

6.7.4 Ajuste da GPD aos valores acima do limiar

O ajuste do modelo estatístico proposto é apresentado na figura 6.41. Primeiramente é possível perceber a grande quantidade de pontos (65) nos gráficos. De forma sutil, esses aparecem em 6.41(a) e 6.41(b) com tendência a formar pequenos grupos, como é observado em torno de 4,3 m, concordando com o histograma inicial. O valor máximo ($H_s=6,31\text{m}$) confirma a distância dos demais pontos, se mostrando isolado ao fim da distribuição. A forma de 6.41(c) e 6.41(d) tem comportamento semelhante a WW3/2/8605 e DB1, e formato curvilíneo, dessa vez com duas pequenas concavidades. Diferentemente dos outros casos, os valores mais extremos modelados pela GPD tendem a superestimar as alturas de onda, visto pelos três pontos de maior H_s da figura 6.41(d).

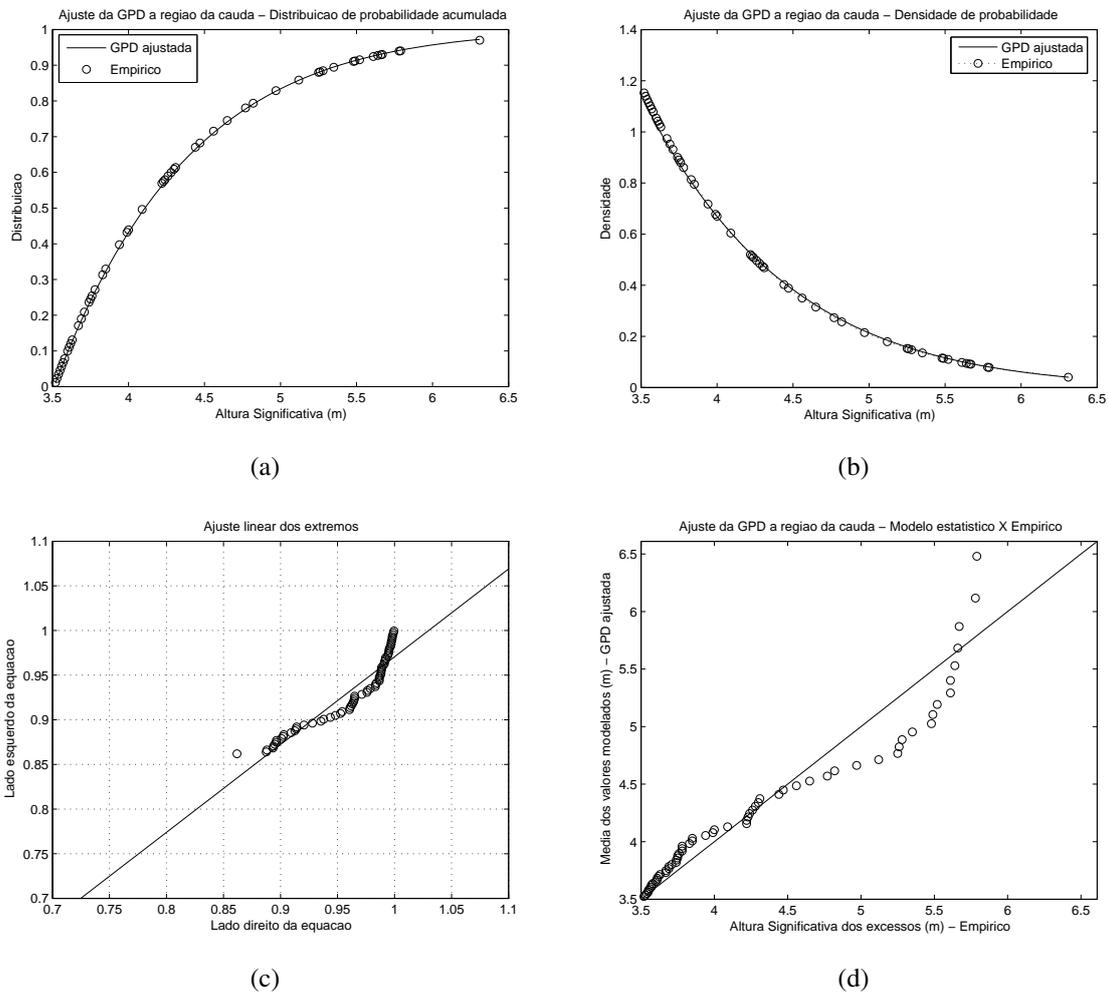


Figura 6.41: Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 3,510 m.

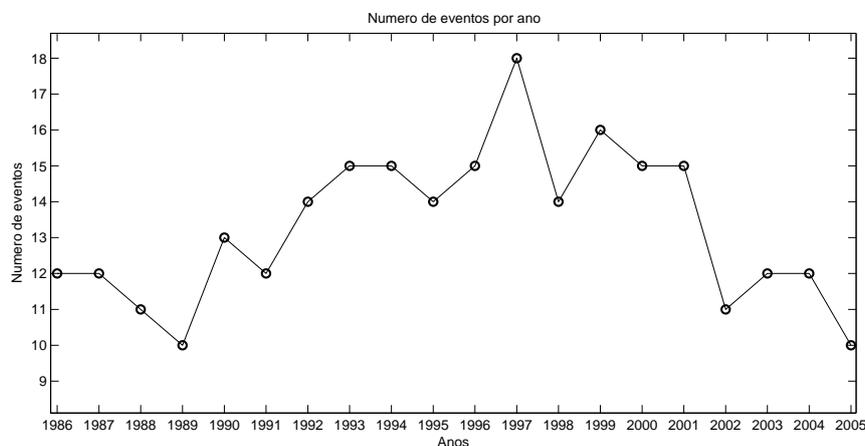
6.7.5 Valores extremos

Primeiramente, assim como foi feito na série WW3/2/8605 da seção anterior, é realizada uma verificação sobre o número de eventos por ano, exposto na figura 6.42. Novamente não é encontrada nenhuma tendência evidente, com coeficiente angular da reta ajustada ao gráfico próximo de zero. Alguns ciclos são perceptíveis, o mais claro aparece entre 1989 e 2002. Naturalmente as figuras 6.42 e 6.30 possuem grande semelhança, com os anos em torno de 1997 com maior atividade de eventos extremos de onda.

Conforme a seção anterior, a equação 6.9 é aplicada considerando a densidade de extremos constante para a extrapolação, com $n_e = pr \cdot (n/n_{anos})$. A figura 6.43 mostra os resultados. A superestimação mais evidente da GPD, comentada na análise do ajuste (sub-

seção 6.7.4, figura 6.41(d)), provoca o deslocamento da curva dos valores de retorno para extremos com maiores alturas, fazendo com que H_s associado a $pr = 100$ anos seja 9,133 m, valor alto para a região. Este efeito é resultado dos parâmetros ξ e β , que neste caso são bem diferentes das seções 6.4 e 6.6, consequência do comportamento diferenciado da cauda da distribuição, comentado no início das análises.

A tabela 6.12 apresenta os mesmos resultados. Novamente se destaca o intervalo de confiança muito próximo aos valores de rv , resultado da baixa variância dos parâmetros. O valor extremo em cinco anos já aparece um pouco acima do esperado, e nos extremos de 50 e 100 anos essa questão da superestimação da GPD fica mais evidente.



(a)

Figura 6.42: Número de eventos em cada ano para os resultados do modelo no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.

Tabela 6.12: Valores extremos rv para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5 *	20	50	100
Valor extremo (m)	6,049 (6,031; 6,068)	7,428 (7,390; 7,466)	8,385 (8,328; 8,442)	9,133 (9,057; 9,209)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que a série a que se refere a tabela possui 20 anos de duração e não teria sentido $pr = 5$.

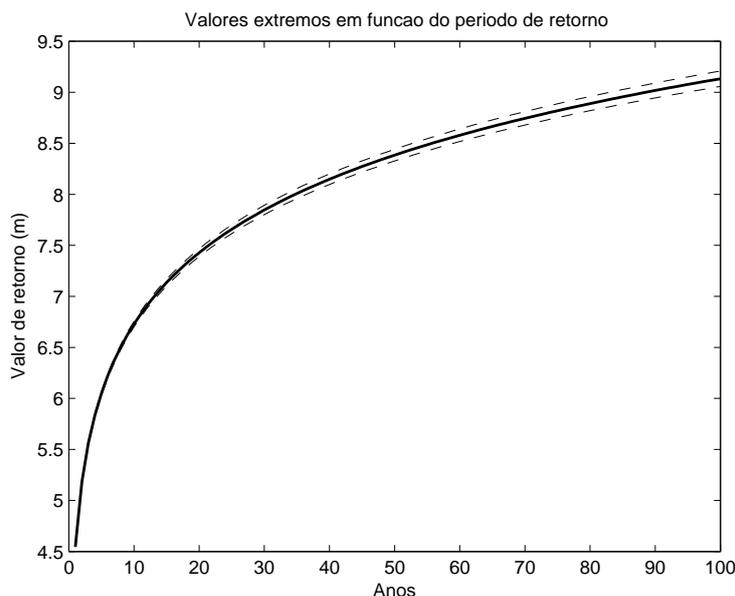


Figura 6.43: Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto $42^{\circ}\text{W}/25^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005.

6.7.6 Comentários e discussões

O procedimento apresentou resultados satisfatórios nas análises dos gráficos e determinação dos estimadores e do limiar. Nas quatro aplicações da POT o MOM provou ser de mesma capacidade ou melhor que os demais, seguido por PWM também com boa correlação empírico/modelado no geral, perdendo um pouco na variância¹⁶. Novamente o grande número de eventos permitiu a investigação do MEP de maneira mais clara, assim como nos gráficos de busca de estabilidade de ξ . Conforme em WW3/2/8605, as variâncias dos parâmetros se mostraram muito pequenas, resultando na maior confiança do rv .

A questão problemática é justamente relacionada ao comportamento diferenciado da cauda, que foi impactante em todos os gráficos. A figura 6.40 mostrou que a escolha do limiar acima de 3,6 m resulta em extremos muito grandes para o clima de ondas na região, fazendo com que u , atendendo à linearidade no MEP, fosse fixado em 3,510 m. A figura 6.44 consiste na mesma 6.40 com foco nos extremos. Nela é possível perceber rv retornando a valores mais coerentes em u acima de 5,4 m. Mais precisamente 5,424 m seria um limiar que possivelmente renderia bons resultados, entretanto este não apresenta linearidade do MEP nem estabilidade de ξ ; estando também em região de baixa correlação e variância alta, induzindo ao descarte do mesmo na escolha do limiar.

¹⁶SILVA (2008) utilizou o PWM em seu trabalho, também sobre a Baía de Campos, e obteve bons resultados, confirmando a boa capacidade do estimador.

A queda do empírico em relação ao modelado no fim da distribuição sugere uma análise meteorológica dos processos de geração dos extremos mais intensos, já que o PONTO3 tem o clima de ondas com Hs maiores que o PONTO2, porém com extremos menores. A questão é se essa característica (o que parece ser um “filtro” que praticamente exclui a chegada de ondas acima de 6 m) é real ou é resultado de alguma deficiência adicional no WAVEWATCH ainda não investigada. Se for real, ou seja, se o clima de ondas no ponto apresenta essa característica, então deve-se pensar em algum outro procedimento estatístico para modelar a cauda, diferente da metodologia proposta. No caso de problemas na simulação do WAVEWATCH, então, fica a concordância com ELSINGHORST *et al.* (1996) sobre as limitações da análise de extremos com resultados de modelos de onda.

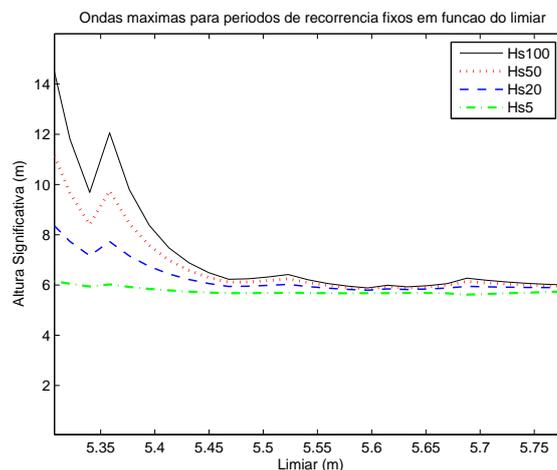


Figura 6.44: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Foco nos limiares mais altos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 42°W/25°S - 1986 a 2005.

Capítulo 7

Meteorologia dos Extremos de Onda

Este capítulo tem como objetivo o estudo dos sistemas atmosféricos geradores das grandes ondulações estudadas no capítulo 6. Tratam-se de ciclones, anticiclones e cavados em superfície. A prioridade está associada aos eventos extremos¹ (cerne do trabalho), ou seja, à ocorrência de Hs acima do limiar fixado na análise estatística anterior. Basicamente maior enfoque é dado para a compreensão dos casos registrados pela bóia, já que são resultados de medições com baixa incerteza, que representam melhor as condições do mar comparado com a modelagem numérica, a qual serve como auxílio para os estudos climatológicos que exigem uma série regular (sem registros faltantes) e de longa duração. Inicialmente são investigadas as características das maiores ondulações em termos de Hs, Dp, Tp, para a classificação segundo PARENTE (1999) (situações de BOM TEMPO ou MAU TEMPO) e também com algumas estatísticas básicas relacionadas à sazonalidade e sistemas meteorológicos de geração.

Pelo fato do presente trabalho tratar de ondulações do quadrante sul, a grande maioria dos extremos que ocorrem no PONTO1 e 2, mais ao norte, também são sentidos no PONTO3, ao sul do Rio de Janeiro. Além de ter sido verificado inicialmente, tal característica pode ser notada pelos histogramas iniciais das séries de Hs da bóia e do WAVEWATCH, das figuras 6.1 e 6.21. Juntamente essa verificação com o melhor desempenho do modelo no PONTO 2, foi decidido usar somente a região da Bacia de Campos (PONTO1 da bóia e PONTO2 do WAVEWATCH) para a investigação meteorológica dos processos de geração das ondas.

¹Pois o clima de ondas fora descrito nos trabalhos citados na seção 2.4.

7.1 Definição do sistema meteorológico gerador da ondulação

A decisão de qual sistema formou a pista de vento para geração das ondas está entre ciclones, anticiclones e cavados²; e foi baseado em dois procedimentos:

1. Análise visual da evolução dos campos de pressão e vento em superfície;
2. Resultado do programa de identificação de ciclones.

Ambos os casos para períodos que precedem o instante de máximo Hs correspondente ao extremo. De acordo com capítulo 3, foram fixados os seguintes valores das constantes que constroem o critério de detecção:

Tabela 7.1: Critérios de entrada para o programa de identificação dos ciclones.

<i>busca</i> (°)	<i>llx/lly</i> (°)	<i>bcmin</i> (hpa)	<i>pmax</i> (hpa)	<i>vmin</i> (m/s)	<i>tempomin</i> (h)
7,5	7,5/7,5	4	1016	6	48

Estes foram escolhidos por melhor identificar os ciclones de interesse. Adicionalmente foram feitas pequenas modificações, tornando menos rigorosa a seleção para poder acompanhar todo o processo de ciclogênese, evolução e dispersão dos sistemas. BEU e AMBRIZZI (2006) e BEU (2003) propuseram $p_{max}=1010$ hPa para impedir que baixas órfãs e sistemas transientes de mesoescala contaminassem a detecção³; entretanto, foram verificados ciclones importantes com 1015 e 1016 hPa próximos ao Rio de Janeiro, principalmente quando ocorre aumento da pressão no anticiclone extratropical da retaguarda para valores como 1030 e 1035 hPa. O problema das baixas pressões que não representam ciclones foi solucionado aumentando o gradiente de pressão mínimo *bcmin* e o vento mínimo *vmin*, obrigando a manutenção dessas condições por pelo menos 48 h, características atendidas somente por ciclones.

É sabido que o programa de indentificação não é capaz de definir sozinho qual configuração meteorológica gerou certa ondulação. Isso se deve primeiramente por detectar somente ciclones e, como ponto importante, a formação e evolução das pistas ocorre de maneira complexa o suficiente que não dispensa a análise visual e experiência do meteorologista, tornando necessário o ítem 1 citado. Apesar dessa limitação, o programa é

²Não foi verificado nenhum caso de pista associada a crista gerando grandes alturas de onda.

³SINCLAIR (1994) mostrou que cerca de 50% dos ciclones detectados pelo programa de Murray e Simmonds correspondem a baixas órfãs.

ferramenta fundamental para os cálculos dos parâmetros, como vento médio e máximo na pista, gradiente de pressão, posicionamento e trajetória, duração e distância do Rio de Janeiro. Menor atenção é dada para os anticiclones e cavados pelo fato de, na grande maioria das vezes, não estarem associados aos eventos mais extremos. As análises em conjunto da PLEDS, dos resultados do programa de identificação (figuras com as trajetórias e tabelas com os parâmetros) e dos campos de pressão e vento em superfície permitem um estudo completo dos casos.

Por fim, é importante destacar que essa definição de qual sistema gerou a ondulação de interesse não é absoluta. Em muitos eventos a pista se encontra entre ciclones e anticiclones, ou cavados e cristas. O julgamento nesse caso se refere a qual fenômeno é mais importante para a intensificação dos ventos. Pelo que foi visto ao longo das inúmeras análises, os casos mais extremos são de simples definição, com o ciclone muito bem formado e característico, ou anticiclone abrangendo uma grande área, eliminando qualquer possível dúvida. Em outros, com Hs menor, essa facilidade é perdida, ocorrendo a propagação do anticiclone junto de um cavado que hora se fecha em um ciclone, hora permanece como cavado. Tais situações de ondulações com baixa energia, entretanto, são de menor interesse para o trabalho.

7.2 Eventos iid selecionados da bóia

Inicialmente são analisados nesta seção os eventos iid selecionados da bóia. Apesar de expor todos os 42 casos e não somente as sete maiores alturas representantes da cauda da distribuição, pode-se dizer que, para a Baía de Campos, estes possuem grande energia, resultado da metodologia de seleção dos eventos que naturalmente exclui as menores ondulações, conforme comentado anteriormente. Para facilitar a apresentação dos resultados foi construída a tabela 7.2 com a data, estação, Hs, Dp, Tp e sistema gerador.

Dos 42 registros, 23 (54,8%) são associados a ciclones, 10 (23,8%) a anticiclones e 9 (21,4%) a cavados. Dos casos gerados por ciclones, a grande maioria ocorre no outono e inverno, seguido pela primavera e por último o verão, concordando com a climatologia de incidência de ciclones de GAN e RAO (1991) e REBOITA (2008). Não é possível apresentar com precisão as ocorrências relativas a cada estação pois a série da bóia não é contínua de 1991 a 1995, tendo estações do ano com maior número de dados do que outras, alterando a estatística⁴.

Padrão semelhante é possível perceber na severidade do mar. No verão as ondulações possuem Hs menor, com Dp entre sudeste e sul, e Dp máximo igual a 203°. O outono e inverno possuem as maiores ondas, com Dp de sudoeste. A distribuição dos anticiclo-

⁴Este objetivo será atendido com os eventos resultantes da simulação do WAVEWATCH.

nes se dá prioritariamente nas estações de transição (outono e primavera), tendo poucos casos no inverno e verão. Nenhum anticiclone gerou ondulação de sudoeste, estando Dp nesses casos confinado entre 130° e 170° (sudeste), resultado que aparece nas análises de PARENTE (1999).

O período de pico atende também a algumas tendências. Em geral anticiclones possuem Tp menores, associados fisicamente à menor energia total do mar e posicionamento da pista, na maioria dos casos, próximas ao Rio de Janeiro. A figura 7.1 apresenta os 42 eventos iid, com Hs em função de Dp e Tp. A resolução da frequência é 1/256, com o espectro calculado com 128 pontos.

Tabela 7.2: Eventos iid de onda registrados pela bóia. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone (anticicl) ou cavado).

Data - estação	Hs (m)	Dp (°)	Tp (s)	Sistema
23/09/1991 - P	2,96	182	5,9	ciclone
21/04/1991 - O	4,93	215	15,1	ciclone
15/05/1991 - O	3,64	142	8,5	anticicl
12/07/1991 - I	4,12	215	12,2	ciclone
03/08/1991 - I	4,36	215	13,5	cavado
14/08/1991 - I	3,24	146	7,8	anticicl
02/09/1991 - P	3,98	165	9,8	anticicl
03/11/1991 - P	3,99	128	7,1	anticicl*
28/12/1991 - V	4,29	195	12,2	ciclone
03/03/1992 - O	3,23	134	8,3	anticicl*
24/03/1992 - O	3,75	225	17,1	ciclone
21/05/1992 - O	4,80	232	15,1	ciclone
12/06/1992 - I	4,96	196	16,0	ciclone
17/07/1992 - I	4,49	192	12,2	cavado
03/08/1992 - I	3,23	237	11,6	ciclone
25/08/1992 - I	6,47	216	14,2	ciclone
08/08/1992 - I	4,14	154	9,5	anticicl
27/09/1992 - P	3,85	223	11,1	ciclone
09/10/1992 - P	2,85	154	10,2	anticicl*
06/11/1992 - P	4,34	229	9,5	cavado
19/11/1992 - P	3,87	189	14,2	ciclone
20/01/1993 - V	3,70	195	12,2	cavado
23/02/1993 - V	3,19	189	11,1	ciclone
09/03/1994 - O	4,50	150	12,8	anticicl
09/04/1994 - O	4,47	206	13,5	ciclone
24/04/1994 - O	4,44	207	15,1	ciclone
14/05/1994 - O	2,45	166	8,5	anticicl
30/05/1994 - O	3,00	226	9,8	ciclone
27/06/1994 - I	5,35	223	11,1	ciclone
10/07/1994 - I	5,74	249	11,1	ciclone
24/07/1994 - I	3,84	226	11,1	cavado
04/08/1994 - I	4,29	228	10,2	ciclone
25/08/1994 - I	3,74	228	10,2	cavado
09/09/1994 - P	4,37	228	10,2	cavado
28/09/1994 - P	3,62	201	14,2	cavado
30/10/1994 - P	4,49	201	14,2	ciclone
20/11/1994 - P	4,63	223	9,5	ciclone
20/12/1994 - V	3,34	190	11,1	ciclone
24/01/1995 - V	3,35	145	11,6	anticicl
21/02/1995 - V	3,83	203	16,0	ciclone
14/05/1995 - O	2,89	197	12,8	ciclone
27/05/1995 - O	3,83	205	12,8	cavado

*Casos onde o anticiclone se desloca acompanhado de intenso cavado a leste, podendo inclusive fechar um pequeno ciclone por curto período.

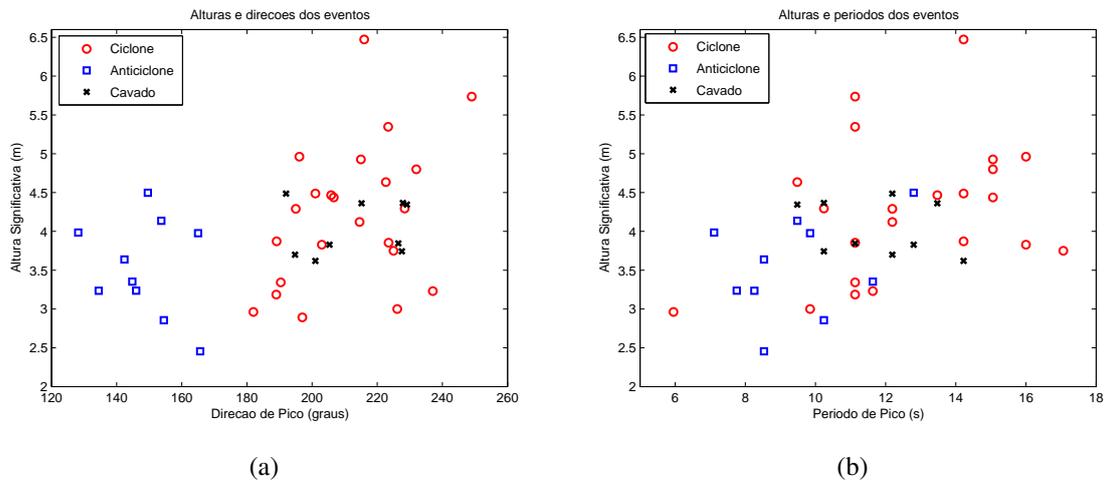


Figura 7.1: Demonstração dos casos iid selecionados quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) D_p e H_s , (b) T_p e H_s .

É possível perceber a clara divisão direcional dos sistemas meteorológicos. As ondulações com máximo de sudeste ocorrem relacionadas a anticiclones, enquanto as de sudoeste a ciclones e cavados. Poucos casos aparecem com D_p entre 170° e 190° . A maior onda significativa ocorre com D_p igual a 216° e T_p de 14,2 s. A segunda maior ($H_s=5,74\text{m}$) apresenta a mais elevada direção de pico, igual a 249° , destacando a importância da direção SW/W, resultado do posicionamento do ciclone conforme será estudado mais adiante. O período de pico (figura 7.1(b)) não possui divisão tão evidente entre os sistemas, mas observa-se a tendência dos maiores estarem ligados a ciclones, menores a anticiclones, e para os cavados T_p entre 9 e 15 s.

Importante lembrar que nestas análises o olhar está sobre os instantes de máxima altura de cada evento. Sabe-se que as pistas dos sistemas meteorológicos citados perduram por alguns dias, mudando de posição e, em geral, migrando para leste. As ondulações de sudoeste citadas em muitos casos mudam para sul no decorrer das horas, podendo apresentar grande energia entre 170° e 190° , apesar do máximo ter ocorrido nos instantes anteriores, entre 190° e 250° . Este padrão é muito bem observado na PLEDS.

Outro resultado importante visto na figura 7.1 é a questão da limitação do crescimento das ondas nos casos de anticiclones e cavados. Nitidamente se vê que H_s gerados por esses sistemas não ultrapassa 4,5 m, com a região do gráfico de 7.1(a) em que as alturas superam os 5 m restrita a ciclones com D_p de sudoeste. Essa característica é resultado da intensidade limitada do vento, consequência dos menores gradientes de pressão.

7.3 Geração e evolução dos casos extremos

A partir daqui serão estudados somente os eventos extremos, ou seja, aqueles em que $H_s > 4,572$ m para a série da bóia e $H_s > 3,775$ m para a série do WAVEWATCH. O olhar está então sobre as caudas das distribuições das figuras 6.2 e 6.22 do capítulo 6. A divisão sazonal foi realizada agrupando os meses da seguinte maneira: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto), primavera (setembro, outubro e novembro).

7.3.1 Características das ondulações

Bóia

A tabela 7.3 apresenta as sete ondulações de maiores alturas medidas pela bóia. Todos os casos foram gerados por ciclones. As direções de pico estão entre 196° e 249° , ou seja, em torno de sudoeste. Os períodos de pico ocorrem entre 9,5 e 16,0 s, não havendo intervalo específico onde os valores se concentram. Mais do nunca destaca-se o inverno seguido pelo outono como estações de ocorrência de ondulações extremas e nenhum caso identificado no verão. Dos sete eventos, três também foram selecionados como extremos pelo WAVEWATCH.

Tabela 7.3: Eventos extremos registrados pela bóia. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone ou cavado).

Evento	Data - estação	Hs (m)	Dp ($^\circ$)	Tp (s)	sistema
1	21/04/1991 - O	4,93	215	15,1	ciclone
2	21/05/1992 - O	4,80	232	15,1	ciclone
3	12/06/1992* - I	4,96	196	16,0	ciclone
4	25/08/1992 - I	6,47	216	14,2	ciclone
5	27/06/1994* - I	5,35	223	11,1	ciclone
6	10/07/1994* - I	5,74	249	11,1	ciclone
7	20/11/1994 - P	4,63	222	9,5	ciclone

*Extremos em ambas as séries: bóia e WAVEWATCH.

A figura 7.2 apresenta H_s em função de D_p e T_p para os extremos, que nada mais é do que um foco na figura 7.1 anterior. Nota-se que, em termos de extremos, não há mais ocorrência de cavados e anticiclones ou ondas de sul e sudeste, nem de períodos de pico pequenos. Conclui-se, pela análise dos dados do ondógrafo, que **as maiores ondulações que atingem a Baía de Campos são aquelas oriundas de sudoeste, com T_p acima de**

11 segundos, geradas por ciclones, incidindo prioritariamente no inverno e outono. Interessante notar que, para os dados analisados, ao selecionar $H_s > 4,572$ m a estação de maior incidência não é mais o outono como na análise para todos os casos da tabela 7.2, passando o inverno a conter maior número de eventos severos.

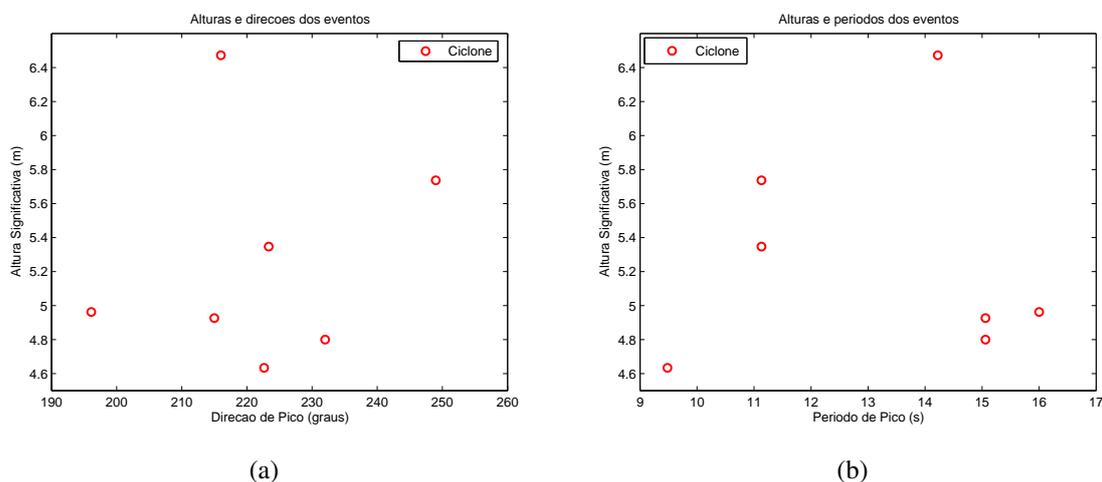


Figura 7.2: Demonstração dos eventos extremos da bóia quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) D_p e H_s , (b) T_p e H_s .

Foi feito um estudo do vento local no instante dos extremos para realizar a classificação proposta por PARENTE (1999) para o clima de ondas na Bacia de Campos. **Todos os sete eventos se enquadram no caso MAU TEMPO com ondas de sudoeste**, com avanço da frente fria sobre o litoral fluminense e Bacia de Campos junto com a incidência das ondulações de alta energia, ou seja, o vento esteve com direção sul e sudoeste durante a chegada do máximo de H_s .

WAVEWATCH

O mesmo procedimento é repetido agora para os resultados do WAVEWATCH, apresentados na tabela 7.4. A grande extensão da série de vinte anos, sem períodos faltantes, permitiu a realização de uma climatologia muito mais completa. Apesar de se tratar da cauda da distribuição, os extremos simulados pelo modelo apresentam ondulações geradas por anticiclones e um caso por cavado, diferentemente dos extremos registrados pela bóia. Essa característica pode ser resultado da maior amostragem, que estatisticamente favorece a ocorrência de fenômenos raros, ou por tendências de superestimação ou subestimação da energia modelada em diferentes sistemas meteorológicos, que serão analisados a seguir.

Dos trinta extremos da tabela, 17 (57%) são gerados por ciclones, 12 (40%) por anticiclones e 1 (3%) por cavado; destacando a importância dos anticiclones nos resultados.

Observando somente os 17 ciclones, 10 (59%) ocorreram no outono enquanto 7 (41%) no inverno. Nenhum caso de ciclone gerador de ondas extremas foi verificado na primavera ou verão. Importante comentar a incidência no mês de maio. Dos 30, 12 (40%) ocorreram nesse mês, sendo 10 deles ciclones⁵. GAN e RAO (1991) e REBOITA (2008) encontraram tal característica, com ocorrência máxima de ciclones no outono, seguido pelo inverno, primavera e verão.

Conforme será visto na análise sinótica dos campos de pressão e vento em superfície, a presença de um cavado gerando grande ondulação se deve à extensão e permanência da pista, fator tão importante quanto a intensidade do vento, explicado na formulação espectral do JONSWAP da seção 2.3. O que ocorreu nesse caso, então, foi a manutenção do quadro sinótico oferecendo condições de transferência de energia do vento às ondas tendendo ao desenvolvimento quase completo do mar para aquela intensidade, situação também descrita em CAMPOS (2006) como importante para o aumento do nível do mar no litoral sudeste.

Para sintetizar as estatísticas de sazonalidade e sistemas geradores foi construída a tabela 7.5, também expondo as alturas significativas, direções de pico e períodos de pico médios. Nessa seção o número de casos no outono em relação ao inverno é bem maior do que na estatística dos extremos da bóia, em que o inverno aparece com os maiores índices, fato resultante da grande ocorrência no mês de maio descrita.

A média dos parâmetros permite identificar características importantes. \bar{H}_s no verão aparece com o menor valor, sendo máxima no mês do outono. Surpreendentemente \bar{H}_s no inverno é relativamente baixo, 4,16 m, enquanto o respectivo \bar{T}_p é o maior entre as estações. Seguindo a linha de raciocínio, de maneira contrária, a primavera possui o menor \bar{T}_p e grande concentração de anticiclones (confirmado por $\bar{D}p=117^\circ$) o qual se sabe que possuem as pistas de geração mais próximas à Bacia de Campos.

⁵Do total de 17 ciclones, 10 (59%) ocorreram no mesmo mês!

Tabela 7.4: Eventos extremos resultantes da simulação do WAVEWATCH. Estações do ano: P = primavera, V = verão, O = outono, I = inverno. A última coluna aponta o sistema meteorológico ao qual a pista está associada (ciclone, anticiclone ou cavado).

Evento	Data - estação	Hs (m)	Dp ($^{\circ}$)	Tp (s)	sistema
1	04/08/1986 - I	3,80	206	14,92	cavado
2	23/05/1987 - O	3,85	227	10,87	ciclone
3	13/11/1987 - P	4,11	121	7,69	anticiclone
4	27/08/1988 - I	3,81	200	13,89	ciclone
5	14/10/1988 - P	4,38	118	8,55	anticiclone
6	07/05/1989 - O	3,87	259	8,40	ciclone
7	20/05/1990 - O	4,90	242	10,87	ciclone
8	12/06/1992* - I	3,98	214	16,13	ciclone
9	21/07/1992 - I	3,79	217	12,82	ciclone
10	25/05/1993 - O	6,37	111	10,64	anticiclone
11	09/03/1994 - O	5,78	132	10,20	anticiclone
12	27/06/1994* - I	4,61	221	12,35	ciclone
13	10/07/1994* - I	4,58	224	12,19	ciclone
14	24/03/1996 - O	4,54	114	9,26	anticiclone
15	03/05/1996 - O	3,80	108	9,90	anticiclone
16	30/05/1997 - O	5,10	254	10,00	ciclone
17	22/10/1997 - P	4,11	116	10,20	anticiclone
18	31/05/1998 - O	4,38	248	8,70	ciclone
19	14/11/1998 - P	4,38	111	8,55	anticiclone
20	31/05/1999 - O	5,52	223	13,70	ciclone
21	13/07/1999 - I	3,84	94	9,09	anticiclone
22	18/07/2000 - I	4,71	225	12,50	ciclone
23	01/03/2001 - O	4,08	144	11,24	anticiclone
24	07/05/2001 - O	4,25	241	10,20	ciclone
25	19/05/2001 - O	4,29	244	10,53	ciclone
26	22/06/2001 - I	4,31	229	12,19	ciclone
27	26/05/2003 - O	5,10	220	14,71	ciclone
28	28/05/2004 - O	4,49	221	12,99	ciclone
29	04/12/2004 - V	4,00	106	8,47	anticiclone
30	31/01/2005 - V	4,30	128	11,36	anticiclone

*Extremos em ambas as séries: bóia e WAVEWATCH.

Analisando as ocorrências dos sistemas em cada estação é possível perceber diferenças muito grandes. Todos os extremos de onda nos meses de verão e primavera foram gerados por anticiclones, com $\bar{D}p = 117^{\circ}$, e $\bar{T}p$ pequenos (8,7 e 9,9 s). Pela tabela, olhando

$\bar{H}s$, os anticiclones na primavera parecem mais intensos⁶, resultando em ondulações mais energéticas que o verão. O inverno, de forma contrária, tem a maior ocorrência relativa de ciclones, com 88% dos extremos gerados por esse tipo de sistema. O fato resulta na grande mudança de $\bar{D}p$, agora em 220°. O único anticiclone presente nesse período é relativamente menos intenso, com $\bar{H}s=3,84$ m; porém, com posicionamento mais ao norte, resultando em $\bar{D}p=94^\circ$ (ondas praticamente de leste). Ao contrário do inverno, o outono possui em média as maiores ondas geradas por anticiclones (maior média), com posicionamento mais ao sul entre as estações, obtendo $\bar{D}p=122^\circ$ e $\bar{T}p=10,2$ s (maior entre os anticiclones). Nota-se pelos anticiclones que aqueles que apresentam maiores Dp e Tp possuem as maiores alturas de onda; enquanto aqueles com menor Dp têm menores Hs e Tp . Ainda tratando do outono, os ciclones geram as ondas que mais se aproximam da direção oeste, devido ao posicionamento mais ao norte desses sistemas, produzindo $\bar{D}p=238^\circ$ (maior entre os ciclones) e $\bar{T}p=11,1$ s (menor entre os ciclones), com a pista mais próxima do Rio de Janeiro e maior $\bar{H}s$. As questões de posicionamento serão melhor estudadas ao analisar a trajetória dos sistemas na seção a seguir.

Tabela 7.5: Divisão sazonal dos extremos de onda associados a ciclones e anticiclones. $\%_{est}$ é a porcentagem associada à estação e $\%_{total}$ a porcentagem no total. A média de Hs , Dp e Tp é representada respectivamente por $\bar{H}s$, $\bar{D}p$ e $\bar{T}p$.

	Ciclones						Anticiclones					
	n°	$\%_{est}$	$\%_{total}$	$\bar{H}s$	$\bar{D}p$	$\bar{T}p$	n°	$\%_{est}$	$\%_{total}$	$\bar{H}s$	$\bar{D}p$	$\bar{T}p$
Primavera	0	0	0	-	-	-	4	100	13	4,25	117	8,7
Verão	0	0	0	-	-	-	2	100	7	4,15	117	9,9
Outono	10	67	33	4,53	238	11,1	5	33	17	4,91	122	10,2
Inverno	7	88	23	4,25	220	13,1	1	12	3	3,84	94	9,1

	Eventos nas estações				
	n°	$\%_{total}$	$\bar{H}s$	$\bar{D}p$	$\bar{T}p$
Primavera	4	13	4.25	117	8.7
Verão	2	7	4.15	117	9.9
Outono	15	50	4.69	199	10.8
Inverno	9	30	4.16	203	12.9

A figura 7.3 apresenta Hs em função de Dp e Tp , da mesma maneira que 7.1 e 7.2. Observando 7.3(a) é possível perceber padrão semelhante à figura 7.1 de eventos iid da bóia. Os anticiclones são confinados em Dp entre 90° e 150°, enquanto os ciclones entre 200° e 260°. A diminuição dos extremos com direção próxima a 180° aqui é mais abrupta, com nenhum máximo registrado por volta de 150° a 190°. Assim como na seção 7.2, em

⁶Devido a grande ocorrência de bloqueios sobre o Atlântico Sul nesse período.

geral percebe-se as maiores alturas associadas a ciclones, com um limite de crescimento dos anticiclones até $H_s=4,5$ m. Dois eventos fogem bastante dessa afirmação, justamente as duas maiores ondas significativas, em 25/05/1993 ($H_s=6,37$ m) e 09/03/1994 ($H_s=5,78$ m), visto nos casos 10 e 11 do anexo D. Apesar do comportamento anômalo, os dois casos não podem ser simplesmente descartados como erro na modelagem, mas devem ser investigados junto aos dados medidos. Infelizmente o período de maio de 1993 não possui registros do ondógrafo e esse procedimento não poderá ser feito por enquanto. No caso 09/03/1994 foi registrada grande ondulação de 150° pela bóia, com altura significativa de 4,5 m, de acordo com a tabela 7.2. O valor $H_s=5,78$ m do WAVEWATCH foi então uma superestimação do modelo, resultado do campo de vento em superfície da reanálise do NCEP/NCAR, como pode ser visto na figura D.11.

A figura 7.3(b) se mostra com padrão semelhante a 7.1(b), com preferência dos menores períodos em eventos gerados por anticiclones enquanto os maiores, na maior parte, por ciclones. Alguns casos fogem dessa característica, sendo a divisão entre os sistemas meteorológicos associados a T_p não tão evidente quanto D_p . Destaca-se valores acima de 12 s com ocorrência somente de ciclones. O único cavado teve $T_p=15$ s (bem elevado), característico da distância da pista ao Rio de Janeiro, visto na figura D.1 do anexo D.

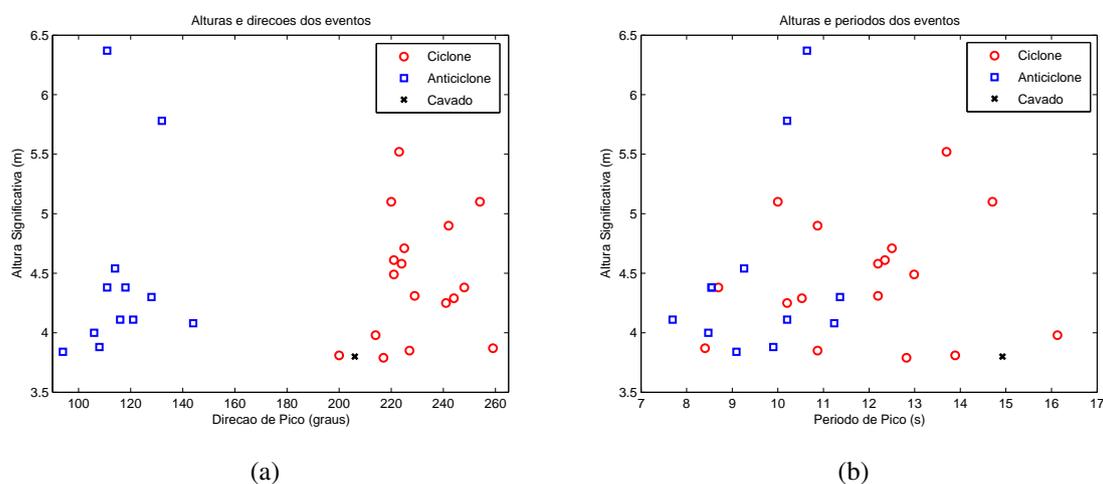


Figura 7.3: Demonstração dos eventos extremos do WAVEWATCH quanto aos processos de geração: ciclone, anticiclone ou cavado. (a) D_p e H_s , (b) T_p e H_s .

7.3.2 Análise dos processos de geração - extremos registrados pela bóia

Nesta etapa as análises dos extremos serão individuais, estudando o processo de geração das ondas em cada evento. As tabelas, através dos parâmetros, auxiliam na compreensão do que ocorre com a evolução e trajetória dos ciclones. Deve-se ter cuidado ao

interpretar *Ang*, parâmetro que representa o ângulo entre o centro do sistema e o norte do Rio de Janeiro. Este representa a *Dp* da ondulação que é gerada naquele instante e atinge a Bacia de Campos nas horas seguintes. O cuidado se dá pelo fato da pista não se posicionar junto do centro do ciclone e sim a oeste do mesmo; ou seja, a ondulação gerada por tal pista deve ser em torno de 20° a mais que *Ang* (esse valor varia de acordo com cada ciclone e distância do Rio de Janeiro).

Por questão de organização do trabalho, primeiro são expostos os textos sobre cada caso e, em seguida, as figuras (PLEDS, trajetórias e campos de pressão e vento em superfície) e tabelas.

Caso 1 - 21 de abril de 1991

Neste primeiro caso é possível ver na PLEDS a entrada da ondulação de sudoeste no dia 20. O vento nos dias anteriores rondava de leste para nordeste, seguindo para noroeste rapidamente, ocorrendo logo a entrada da frente fria com ventos fortes de sudoeste no dia 20, junto com a ondulação. Durante o máximo de energia, no dia 21, o mar apresenta somente um modo, com todas as frequências praticamente no mesmo intervalo de direção, entre sul e sudoeste.

O ciclone que originou a ressaca surge no dia 18, em $35,5^\circ\text{S}$, próximo ao litoral do Uruguai (região RG2 comentada na subseção 2.5.2). Nos primeiros momentos o gradiente de pressão é pequeno, assim como o vento. A trajetória e a tabela nesse caso, indicam que ele rapidamente se distanciou do Rio de Janeiro, migrando para o sul/sudeste. No dia 19 há intensificação do sistema (*Gp* chega a 12,33 hPa e *Vmax* a 26,74 m/s), com grande área de atuação do vento, como pode ser visto na figura 7.5(b). A pista mantém a grande intensidade nos dias 20 e 21, aumentando bastante de tamanho, notado pela evolução do parâmetro *Tipo*. A distância do Rio de Janeiro aumenta ainda mais, entretanto o ângulo (*Ang*) possui poucas alterações, destacando o caráter quase estacionário da pista⁷. A pressão no centro caiu até o dia 20, quando então volta a subir ao mesmo tempo que o sistema perde intensidade e morre em torno de 60°S . Durante todo o caso, o ciclone apresentou o setor noroeste mais intenso, visto em 7.5(b).

Pode-se dizer, nesse evento, que a geração das ondas aconteceu um pouco distante do sudeste do Brasil, com pista de grande extensão e ventos em torno de 14m/s. Pela trajetória do ciclone não se espera a migração de *Dp* para sul e sudeste, o que não pode ser verificado devido à interrupção na medição da bóia. Interessante perceber pela PLEDS que entre os dias 14 e 19 outro ciclone atuava sobre o Atlântico Sul, gerando o marulho

⁷Ou seja, o ciclone se desloca mas a pista continua atuando aproximadamente na mesma região do oceano.

com baixa frequência que migra de sul para sudeste observado em vermelho.

Caso 2 - 21 de maio de 1992

Observa-se pela PLEDS o grande número de frentes frias que passam pela região ao longo desse mês. A mais intensa delas incide no dia 20 de maio, após três dias de permanência do vento noroeste. Ao contrário do caso anterior, o vento local não é tão forte e possui direção sul, enquanto as ondas têm Dp sudoeste, resultado da influência da alta pressão da retaguarda sobre o continente, que desloca o vento no litoral do Rio de Janeiro para sul. O máximo de Hs ocorre dia 21, mantendo-se com muita energia também no dia 22. No dia 21 o vento local começa a mudar para leste e para nordeste nos dias 22 e 23, acompanhando o deslocamento da alta pressão para nordeste até encontrar o AAS; trajetória diferente daquela descrita pelo ciclone.

O ciclone responsável pela ondulação nasce no final do dia 18, em 37,5°S (região RG2), a 1415 km do Rio de Janeiro. No dia 19 ele se intensifica e migra para leste, sem grandes mudanças na latitude. O distanciamento e aumento de D acontece junto da diminuição de Ang . A pressão no centro (P_c) continua caindo com o passar das horas, voltando a subir somente às 12h do dia 21, quando o ciclone começa a enfraquecer. O vento médio (V_{med}) possui valores aproximadamente constantes ao longo do caso, com ligeiro aumento no dia 19. Esses são mantidos também por influência do anticiclone da retaguarda, com 1020 hPa, estacionado sobre o Rio Grande do Sul. Novamente a pista possui grande extensão, visto em 7.7(b), apesar do ciclone se apresentar sempre pequeno (vide parâmetro $Tipo$), a qual migra lentamente para leste até perder força no final do dia 21. A curta duração do sistema fez com que a energia total do espectro no Rio de Janeiro caísse rapidamente no dia 23, apresentado na PLEDS. Novamente não pôde ser vista a evolução das ondas nos dias seguintes ao máximo por causa da interrupção das medições.

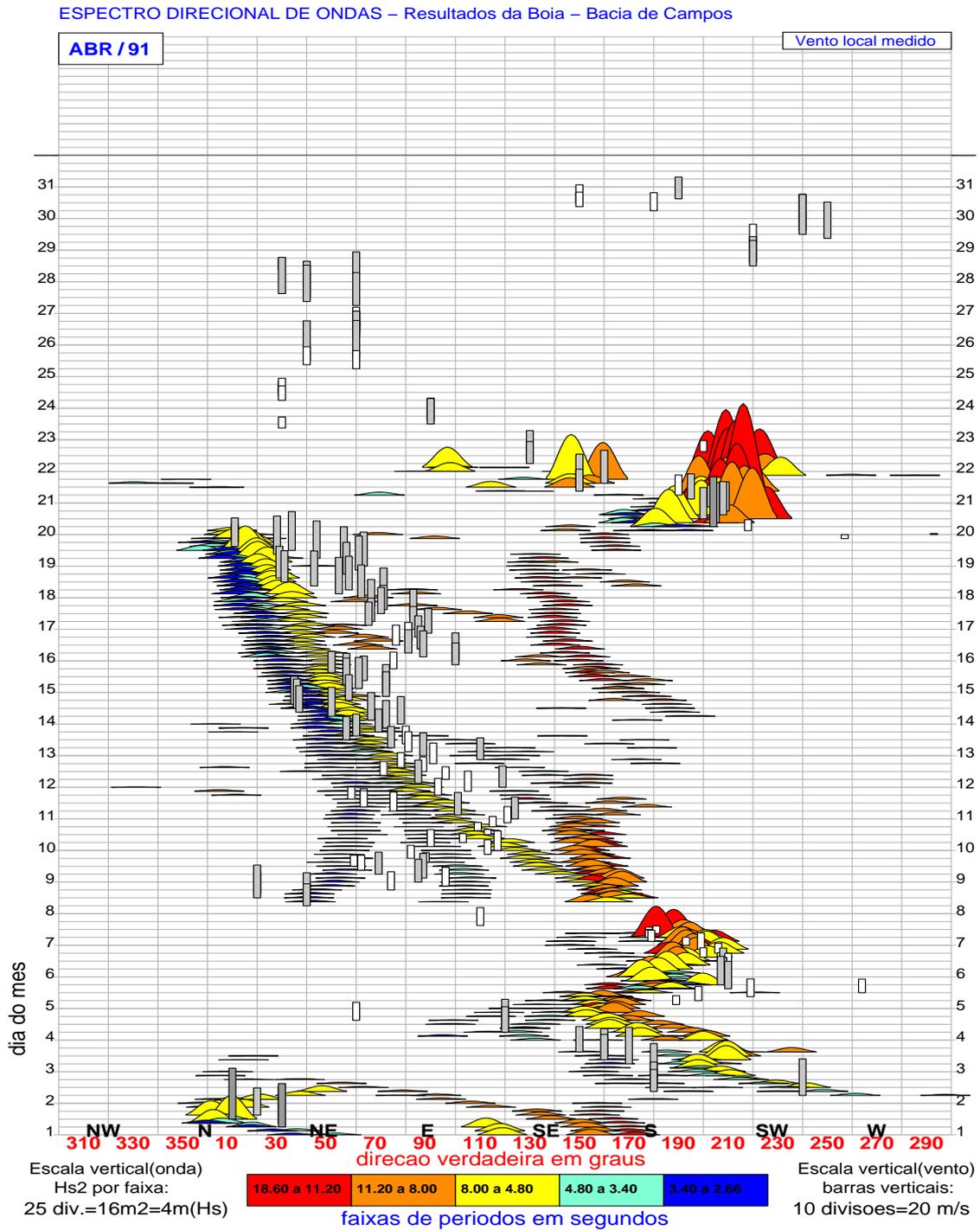


Figura 7.4: Caso 1, máximo dia 21/04/1991. PLEDSWW3 do mês correspondente.

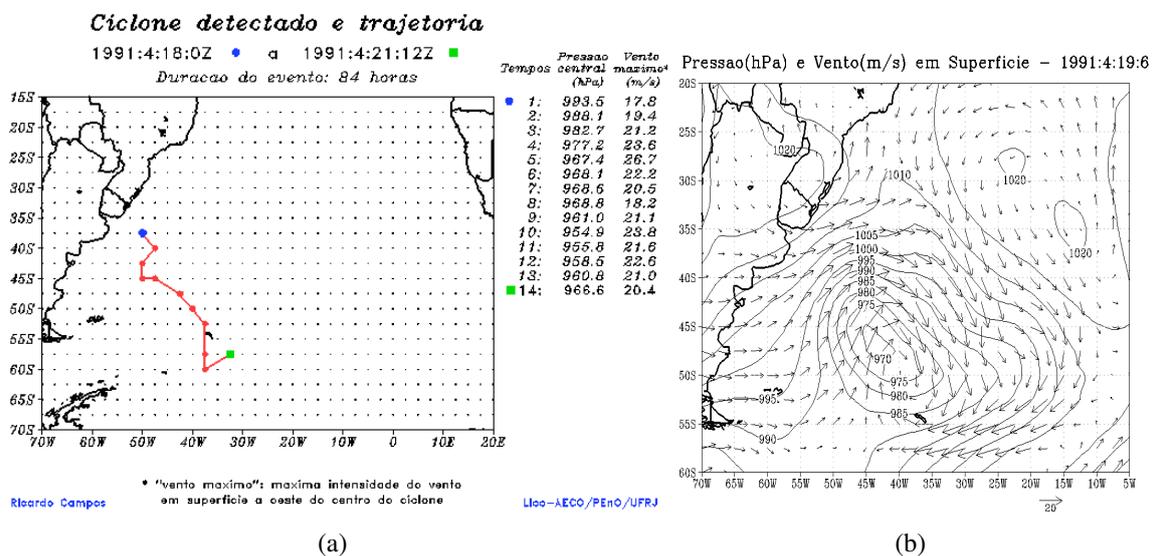


Figura 7.5: Caso 1, máximo dia 21/04/1991. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.6: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 1.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	18/04/1991 06Z	-37,50	-50,00	1558,84	206,92	993,50	2,83	11	9,49	17,83
2	18/04/1991 12Z	-40,00	-47,50	1732,47	195,69	988,10	4,07	11	12,39	19,44
3	18/04/1991 18Z	-42,50	-50,00	2053,46	198,63	982,70	6,70	11	14,17	21,21
4	19/04/1991 00Z	-45,00	-50,00	2311,14	195,79	977,20	8,33	11	13,89	23,68
5	19/04/1991 06Z	-45,00	-47,50	2265,56	191,00	967,40	12,33	11	15,88	26,74
6	19/04/1991 12Z	-47,50	-42,50	2502,17	180,86	968,10	8,23	21	15,68	22,29
7	19/04/1991 18Z	-50,00	-40,00	2783,55	177,06	968,60	7,20	11	13,29	20,57
8	20/04/1991 00Z	-52,50	-37,50	3073,00	174,31	968,80	5,63	11	11,98	18,28
9	20/04/1991 06Z	-57,50	-37,50	3623,82	175,75	961,00	5,30	11	11,74	21,18
10	20/04/1991 12Z	-57,50	-37,50	3623,82	175,75	954,90	6,87	41	14,24	23,82
11	20/04/1991 18Z	-60,00	-37,50	3899,86	176,32	955,80	7,57	41	14,88	21,61
12	21/04/1991 00Z	-60,00	-37,50	3899,86	176,32	958,50	7,97	31	15,41	22,69
13	21/04/1991 06Z	-60,00	-37,50	3899,86	176,32	960,80	7,27	31	13,19	21,08
14	21/04/1991 12Z	-57,50	-32,50	3658,14	171,07	966,60	6,17	21	12,78	20,42

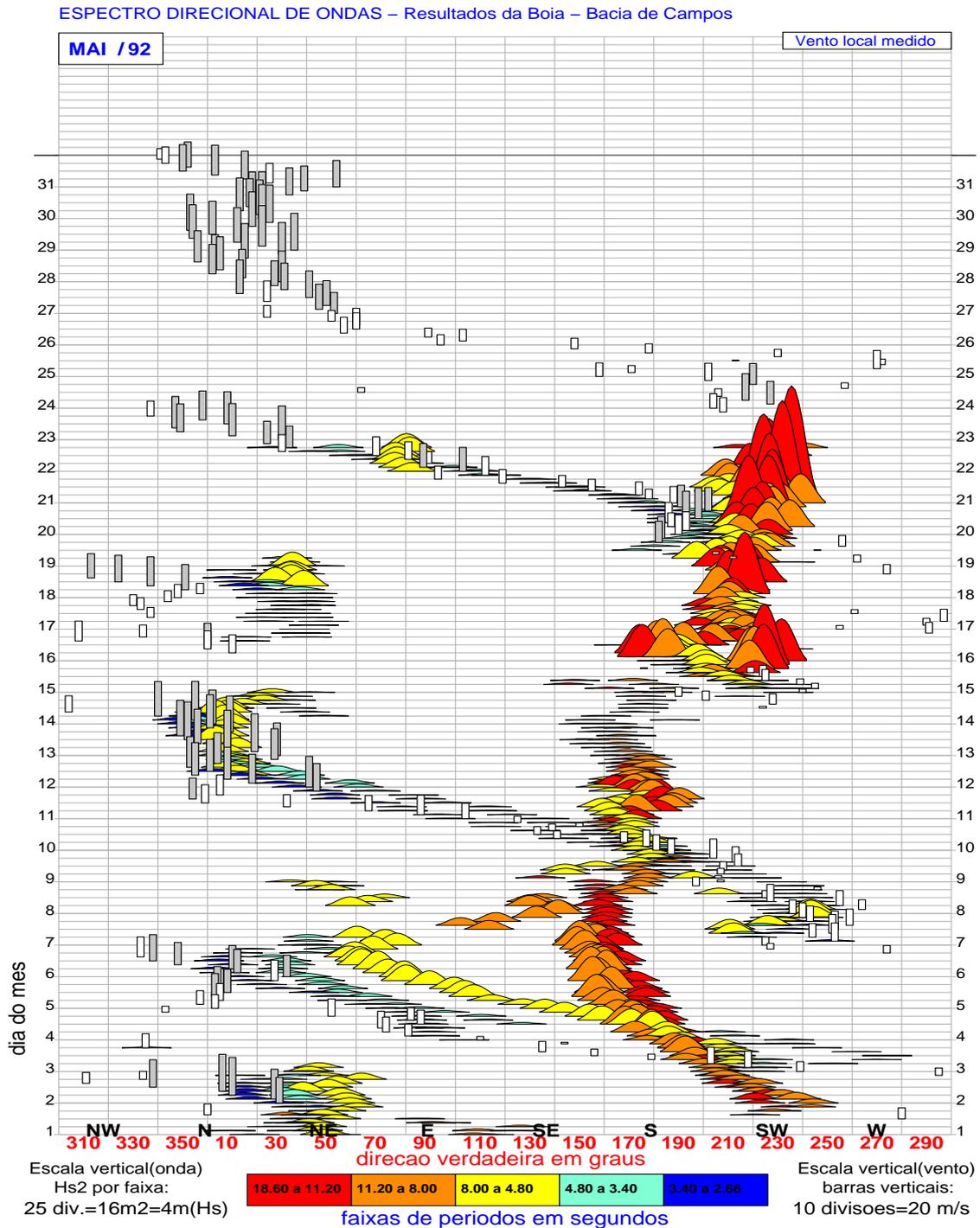


Figura 7.6: Caso 2, máximo dia 21/05/1992. PLEDSWW3 do mês correspondente.

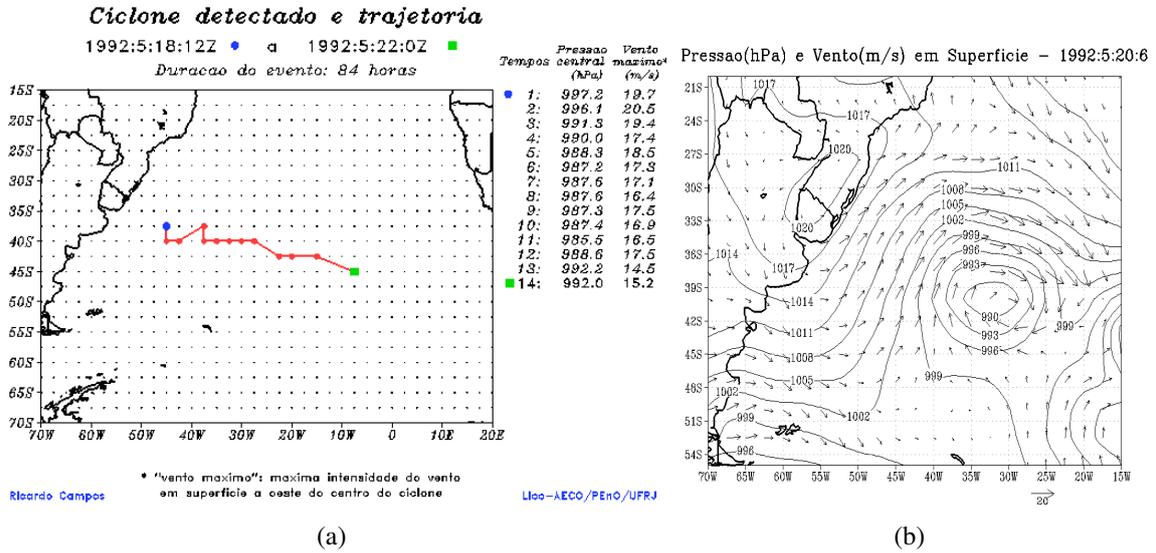


Figura 7.7: Caso 2, máximo dia 21/05/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.7: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 2.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	18/05/1992 18Z	-37,50	-45,00	1414,91	190,78	997,20	4,57	11	11,89	19,74
2	19/05/1992 00Z	-37,50	-45,00	1414,91	190,78	996,10	5,70	11	13,02	20,59
3	19/05/1992 06Z	-40,00	-45,00	1687,39	188,71	991,30	6,07	11	13,25	19,41
4	19/05/1992 12Z	-40,00	-42,50	1668,47	181,46	990,00	5,60	11	13,17	17,44
5	19/05/1992 18Z	-37,50	-37,50	1445,52	164,06	988,30	5,33	11	12,30	18,53
6	20/05/1992 00Z	-40,00	-37,50	1711,40	167,06	987,20	4,63	11	11,76	17,31
7	20/05/1992 06Z	-40,00	-35,00	1771,30	160,33	987,60	4,90	11	11,16	17,15
8	20/05/1992 12Z	-40,00	-32,50	1853,86	154,12	987,60	4,77	11	10,52	16,43
9	20/05/1992 18Z	-40,00	-30,00	1956,22	148,50	987,30	5,67	11	10,64	17,58
10	21/05/1992 00Z	-40,00	-27,50	2075,45	143,48	987,40	7,13	11	10,08	16,97
11	21/05/1992 06Z	-42,50	-22,50	2518,38	140,60	985,50	6,93	11	10,63	16,59
12	21/05/1992 12Z	-42,50	-20,00	2653,21	137,17	988,60	6,80	11	10,85	17,56
13	21/05/1992 18Z	-42,50	-15,00	2947,23	131,32	992,20	5,90	11	10,64	14,58
14	22/05/1992 00Z	-45,00	-7,50	3507,71	129,35	992,00	4,33	21	11,76	15,23

Caso 3 - 12 de junho de 1992

Esse caso apresenta o desenvolvimento de um ciclone de longa duração. A PLEDS até o dia 11 se mostra com situação de BOM TEMPO, vento local nordeste e ondulação distante que persiste por vários dias; em parte devido ao pequeno ciclone visto a leste do ciclone principal na figura 7.9(b). No dia 11 o vento ronda rapidamente até fixar-se na direção sul. No dia 12 a bimodalidade do mar se desfaz e as cinco faixas de frequência ocorrem entre as direções sul e sudoeste. Os dias seguintes mostram a migração das ondas e do vento fraco lentamente para sudeste. Por volta dos dias 14 e 15 as faixas de frequência voltam a se separar em termos de direção e o vento se posiciona mais a leste das ondas que atingem a Baía de Campos.

No dia 8 o ciclone se fecha sobre o Uruguai (centro da região RG2), com pressão mais alta que os casos anteriores, 1002 hPa. Nas primeiras 36 horas se propaga lentamente para sul, aumentando Gp , $Vmed$ e $Vmax$, e diminuindo Pc . Durante as 30 horas iniciais o ciclone possuiu o setor sudoeste com maior intensidade ($Tipo = 12$ e 22), fato que não favorece tanto a geração das ondas que atingem o Rio de Janeiro devido ao ângulo do vento que atua sobre o oceano. Em 18Z do dia 9, o setor noroeste volta a ser o mais forte. No dia 10 o ciclone passa a se deslocar para leste, aumentando o tamanho da pista (entre o centro do ciclone e o litoral do continente), intensificando os ventos que chegam a 28 m/s com Gp de 15,63 hPa, iniciando de maneira mais efetiva a geração das ondas de grande energia que atingem a Baía de Campos. No dia 11 ocorre uma pequena diminuição de intensidade, mas os ventos continuam fortes e a pista com grande área, conforme a figura 7.9(b). Ainda nesse dia, as distâncias D , que só aumentavam, passam a diminuir devido à propagação anômala do ciclone para nordeste. Às 06Z do dia 12 a distância que havia chegado a 2128 km até então cai para 1446 km e a pista se aproxima gradativamente, agora não tão de sudoeste, mais próxima da direção sul. No dia 10, na PLEDS, é possível ver o aumento da energia em baixa frequência ainda com situação de BOM TEMPO, já mostrando a influência do ciclone.

Nos dias 11 e 12, Gp , $Vmed$ e $Vmax$ vão diminuindo até se tornarem relativamente estáveis nos dias 13 e 14, período em que o ciclone está mais fraco. O posicionamento mais a nordeste nesses últimos dois dias, mostrado com Ang com valores baixos em torno 105° , junto com a migração do anticiclone da retaguarda a oeste do ciclone, fazem com que a pista desenvolva ventos de sudeste, visto na PLEDS no dia 15.

Devido à longa duração e trajetória diferenciada do ciclone nesse caso, a pista associada ao sistema meteorológico foi capaz de gerar ondas com direções desde 210° até 150° . O fato da fase inicial ter sido fraca, com o setor sudoeste mais forte ($Tipo = 12$ e 22), fez com que a pista se tornasse mais intensa quando estava posicionada um pouco mais para leste, gerando Dp das ondas máximas que atingiram o Rio de Janeiro igual a 196° , menor

direção entre os extremos (próximo de sul).

Caso 4 - 25 de agosto de 1992

O quarto evento corresponde à máxima onda registrada pela bóia e foi responsável pela morte de um pescador dia 26 no “Caminho dos Pescadores” no Leme - Rio de Janeiro. Como esperado para a época do ano, esse mês de agosto apresentou muitas frentes frias, sendo duas importantes precedendo a grande ondulação do dia 25. A direção do vento muda rapidamente do dia 21, com vento sudoeste⁸, ao dia 24, com vento nordeste, o qual ronda para oeste até a entrada da frente dia 25, com vento sudoeste novamente. A intensidade nos dias 24 e 25 é muito grande, chegando a 16 m/s, persistindo por quase dois dias na região. Novamente é possível ver as cinco faixas de frequência em torno da mesma direção, entre sudoeste e sul, o que potencializa a severidade do evento. Grande parte da energia está na faixa entre 18,6 e 11,2 s. No dia 26 há um pequeno enfraquecimento do mar e nos dias 27 e 28 não é mais possível acompanhar a evolução do caso devido à falta de medições.

O ciclone que formou as ondas se fecha no final do dia 23 bem ao norte, em 30°S, no litoral do Rio Grande do Sul (bem no centro de RG1). O início é de pouca intensidade, que vai aumentando rapidamente durante o dia 24, junto com a grande diminuição de P_c com o tempo. Nesse dia o centro se desloca para leste e a distância D diminui de 950 km para apenas 558 km, com o vento alcançando 20 m/s. Por 18 horas o ciclone apresentou o setor sudoeste com ventos mais intensos. O deslocamento para leste se dá até o dia 25, quando então passa a avançar para sudeste lentamente. À 00Z do dia 25 P_c atinge 999 hPa, valor baixo para a latitude que se encontra. Nos dias 25 e 26 as condições não se alteram tanto em termos do vento médio quanto máximo, enquanto P_c aumenta e G_p cai, enfraquecendo o sistema. No dia 26 o ciclone se distancia bastante, chegando a 2045 km no início do dia 27. Importante destacar o centro de alta pressão sobre o continente com 1030 hPa estacionado sobre o sul do Brasil, mantendo o gradiente de pressão com o ciclone grande o suficiente para forçar os ventos sobre o oceano por bastante tempo.

A figura 7.11(b) apresenta o posicionamento importante do ciclone e da pista, que se estende sobre o litoral sul e sudeste do Brasil e termina justamente por volta de 23°S, em torno do estado do Rio de Janeiro. A tabela aponta ainda o pequeno tamanho do sistema ao longo de todo o período, visto com $Tipo=11$ e alguns poucos momentos $Tipo=12$, confirmado por 7.11(b). Analisando de maneira geral, o ciclone não possuiu P_c muito baixa, nem G_p , V_{med} e V_{max} altos; entretanto foi capaz de gerar $H_s=6,47$ m na Baía de Campos. A explicação para esse caso em grande parte se dá pelo posicionamento mais ao norte, próximo ao Rio de Janeiro, fazendo com que as ondas geradas na pista logo

⁸Resultado de outra frente fria que passou pelo Rio de Janeiro.

atingissem a bóia de medição, sem ter muito tempo nem distância para que a energia total do espectro pudesse dispersar. A menor distância da pista ao Rio de Janeiro implica em menor dissipação em alta frequência, fazendo com que a energia total do espectro se mantenha elevada. Destaca-se também a rapidez em que o ciclone foi formado até o registro máximo de Hs, também consequência da posição, fato que pode dificultar a previsão de extremos e sistemas de alerta.

Caso 5 - 27 de junho de 1994

Observando a PLEDS nota-se uma curta virada do vento nos dias 23 e 24 devido a um pequeno ciclone. No dia 25 o vento moderado retorna à direção nordeste, mudando para norte e oeste até a entrada da frente fria associada ao extremo de onda, no dia 26. Os ventos de sudoeste incidem fortes junto das ondas com grande energia, que crescem ainda mais dia 27 enquanto o vento desintensifica e começa a mudar rapidamente de direção. A situação de mar severo permanece até o dia 30, quando Hs volta a diminuir. O evento pode então ser caracterizado como de longa duração, já que o máximo não veio acompanhado de grande queda na energia das ondas como nos casos anteriores, mas houve a manutenção por três dias da situação extrema.

O ciclone gerador nasce no litoral argentino, em 40°S (mais ao sul que os outros eventos, entre RG2 e RG3) com 985 hPa. Até o dia 25 o mesmo se desloca para leste, quando muda bruscamente de direção passando a caminhar para o sul lentamente. Até às 12Z do dia 25 o sistema apresenta ventos em torno de 13 m/s. A partir desse instante adquire maior intensidade, que se mantém até o final com algumas variações. O ciclone surge como *Tipo 21*, com raio de tamanho mediano, permanecendo em seguida praticamente constante como *Tipo 11* até o dia 27, quando retorna à categoria 21. Apesar de ter passado a maior parte do tempo com pequeno diâmetro, a pista associada ao ciclone tem grande extensão, principalmente em direção às latitudes mais baixas, visto na figura 7.13(b). Durante todo tempo o ciclone apresentou o setor noroeste mais intenso, comprovado pela mesma figura. Destaca-se o caráter assimétrico desse caso, em que o centro se encontra bem ao sul, enquanto a pista alcança as baixas latitudes. A manutenção dos fortes gradientes de pressão e do vento fazem com que a frente fria, associada ao ciclone entre 45° e 50°S, avance para nordeste até o litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo. O fato citado corresponde ao principal motivo da grande transferência de energia do vento para as ondas, com ciclone confinado a um intervalo de longitude pequeno (quase estacionário), mantendo os ventos de sudoeste fortes, que permanecem por três dias sobre praticamente as mesmas condições.

Como não houve grande deslocamento do ciclone para leste e este encontra-se mais ao sul, não ocorreu mudança sensível de Dp para sudeste na PLEDS. Ao contrário, as

características citadas fizeram a ondulação gerada permanecer com grande intensidade do dia 27 até o dia 30.

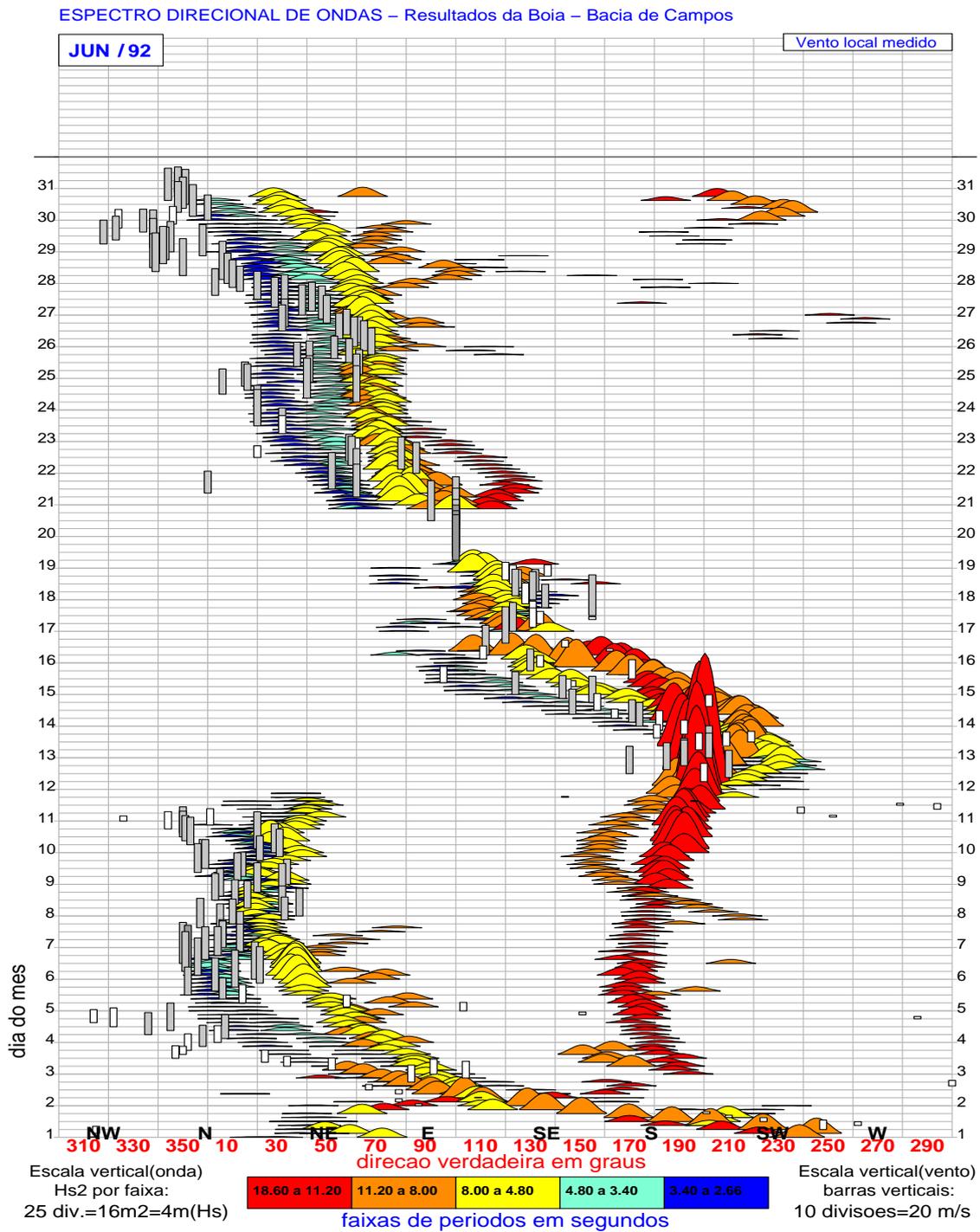


Figura 7.8: Caso 3, máximo dia 12/06/1992. PLEDs do mês correspondente.

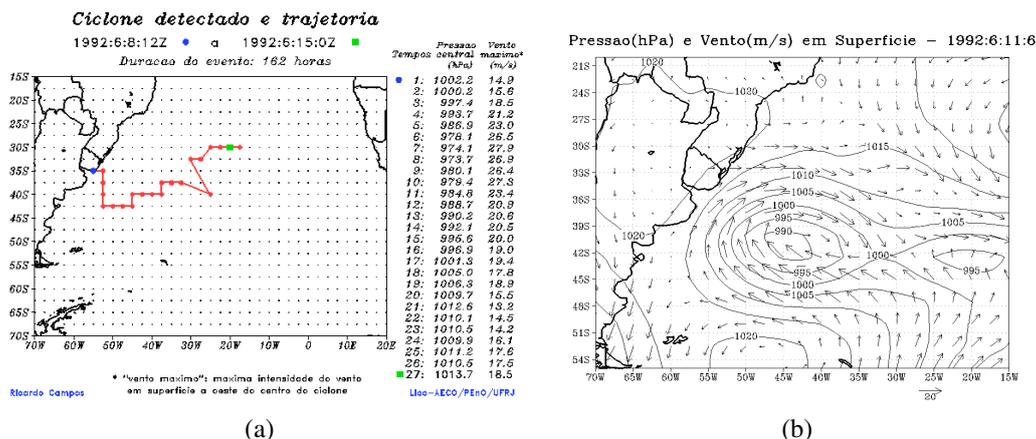


Figura 7.9: Caso 3, dia 12/06/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.8: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 3.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	08/06/1992 12Z	-35,00	-55,00	1624,36	226,80	1002,20	4,33	12	7,92	14,98
2	08/06/1992 18Z	-35,00	-52,50	1466,67	220,70	1000,20	4,27	22	8,96	15,61
3	09/06/1992 00Z	-37,50	-52,50	1670,30	213,68	997,40	6,90	12	11,30	18,52
4	09/06/1992 06Z	-40,00	-52,50	1892,59	208,20	993,70	9,30	12	12,74	21,21
5	09/06/1992 12Z	-40,00	-52,50	1892,59	208,20	986,90	11,10	12	14,33	23,07
6	09/06/1992 18Z	-42,50	-52,50	2127,81	203,86	978,10	13,67	11	15,39	26,57
7	10/06/1992 00Z	-42,50	-52,50	2127,81	203,86	974,10	15,63	11	14,30	27,97
8	10/06/1992 06Z	-42,50	-50,00	2053,46	198,63	973,70	15,40	11	16,89	26,92
9	10/06/1992 12Z	-42,50	-50,00	2053,46	198,63	980,10	12,87	11	14,99	26,40
10	10/06/1992 18Z	-42,50	-47,50	1997,47	193,05	979,40	11,67	11	17,27	27,34
11	11/06/1992 00Z	-42,50	-45,00	1961,39	187,20	984,80	9,63	21	16,86	23,41
12	11/06/1992 06Z	-40,00	-45,00	1687,39	188,71	988,70	9,73	11	15,41	20,95
13	11/06/1992 12Z	-40,00	-42,50	1668,47	181,46	990,20	8,87	11	14,45	20,64
14	11/06/1992 18Z	-40,00	-40,00	1676,60	174,17	992,10	7,73	11	14,01	20,56
15	12/06/1992 00Z	-40,00	-37,50	1711,40	167,06	995,60	7,00	12	12,96	20,08
16	12/06/1992 06Z	-37,50	-37,50	1445,52	164,06	996,90	8,40	11	12,72	19,08
17	12/06/1992 12Z	-37,50	-35,00	1520,94	156,05	1001,30	7,57	11	11,84	19,41
18	12/06/1992 18Z	-37,50	-32,50	1623,04	148,91	1005,00	5,87	11	10,73	17,84
19	13/06/1992 00Z	-40,00	-25,00	2208,82	139,04	1006,30	4,73	12	10,47	18,99
20	13/06/1992 06Z	-32,50	-30,00	1400,70	126,54	1009,70	5,60	12	10,54	15,56
21	13/06/1992 12Z	-32,50	-27,50	1595,18	121,52	1012,60	4,97	11	9,74	13,26
22	13/06/1992 18Z	-30,00	-25,00	1728,89	108,76	1010,10	5,03	12	10,95	14,53
23	14/06/1992 00Z	-30,00	-22,50	1958,38	106,49	1010,50	4,50	12	11,12	14,29
24	14/06/1992 06Z	-30,00	-20,00	2190,29	104,70	1009,90	5,00	12	11,18	16,10
25	14/06/1992 12Z	-30,00	-20,00	2190,29	104,70	1011,20	5,20	12	10,29	17,67
26	14/06/1992 18Z	-30,00	-17,50	2423,92	103,26	1010,50	4,77	12	9,04	17,59
27	15/06/1992 00Z	-30,00	-20,00	2190,29	104,70	1013,70	4,00	12	8,58	18,57

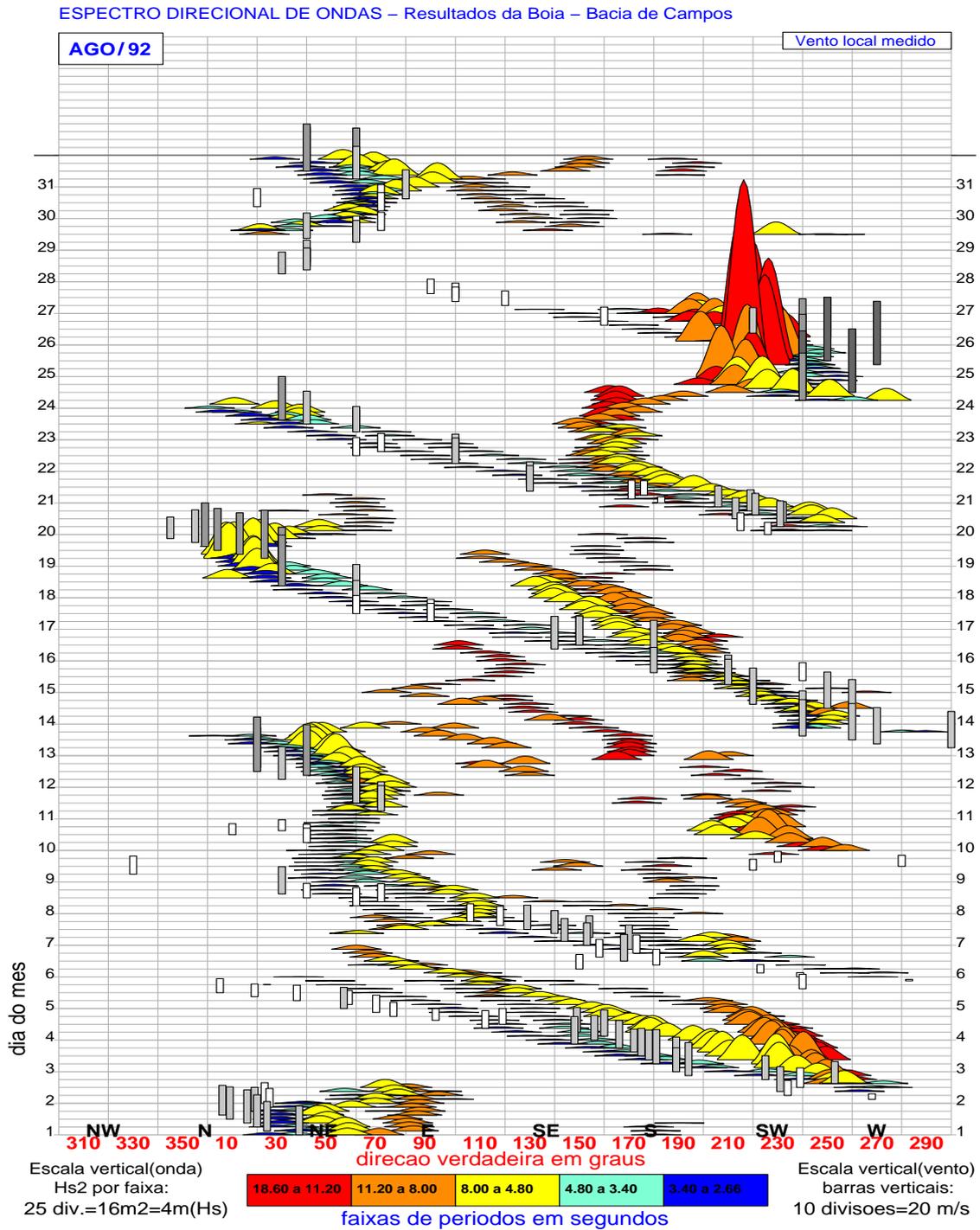


Figura 7.10: Caso 4, máximo dia 25/08/1992. PLEDs do mês correspondente.

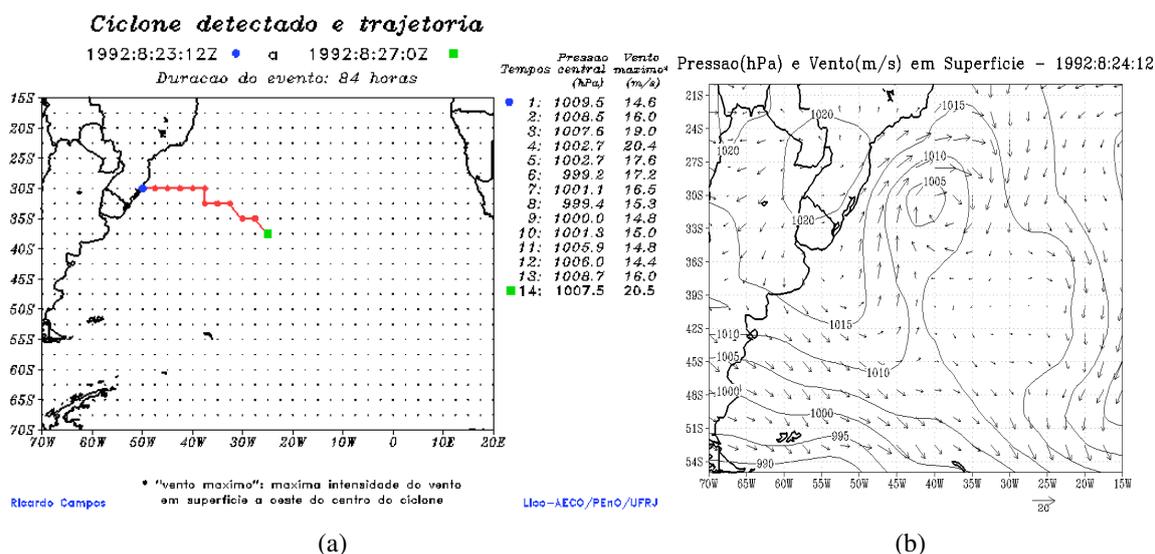


Figura 7.11: Caso 4, máximo dia 25/08/1992. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.9: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 4.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	23/08/1992 18Z	-30,00	-50,00	950,05	234,18	1009,50	4,93	11	6,38	14,69
2	24/08/1992 00Z	-30,00	-47,50	767,87	223,61	1008,50	4,70	12	6,52	16,02
3	24/08/1992 06Z	-30,00	-45,00	626,55	207,46	1007,60	5,07	12	6,91	19,03
4	24/08/1992 12Z	-30,00	-42,50	558,06	184,95	1002,70	6,50	12	8,86	20,47
5	24/08/1992 18Z	-30,00	-40,00	588,39	160,89	1002,70	5,83	11	9,90	17,65
6	25/08/1992 00Z	-30,00	-37,50	704,91	142,07	999,20	6,60	11	11,47	17,21
7	25/08/1992 06Z	-32,50	-37,50	934,66	153,16	1001,10	5,87	11	9,73	16,52
8	25/08/1992 12Z	-32,50	-35,00	1061,34	141,79	999,40	7,17	11	10,13	15,30
9	25/08/1992 18Z	-32,50	-32,50	1220,34	133,11	1000,00	7,33	11	10,62	14,86
10	26/08/1992 00Z	-32,50	-32,50	1220,34	133,11	1001,30	6,53	11	9,72	15,06
11	26/08/1992 06Z	-35,00	-30,00	1559,21	135,49	1005,90	4,80	11	9,54	14,81
12	26/08/1992 12Z	-35,00	-27,50	1726,50	130,09	1006,00	4,73	11	9,40	14,45
13	26/08/1992 18Z	-35,00	-27,50	1726,50	130,09	1008,70	4,23	11	8,86	16,05
14	27/08/1992 00Z	-37,50	-25,00	2044,75	132,82	1007,50	2,77	11	9,47	20,55

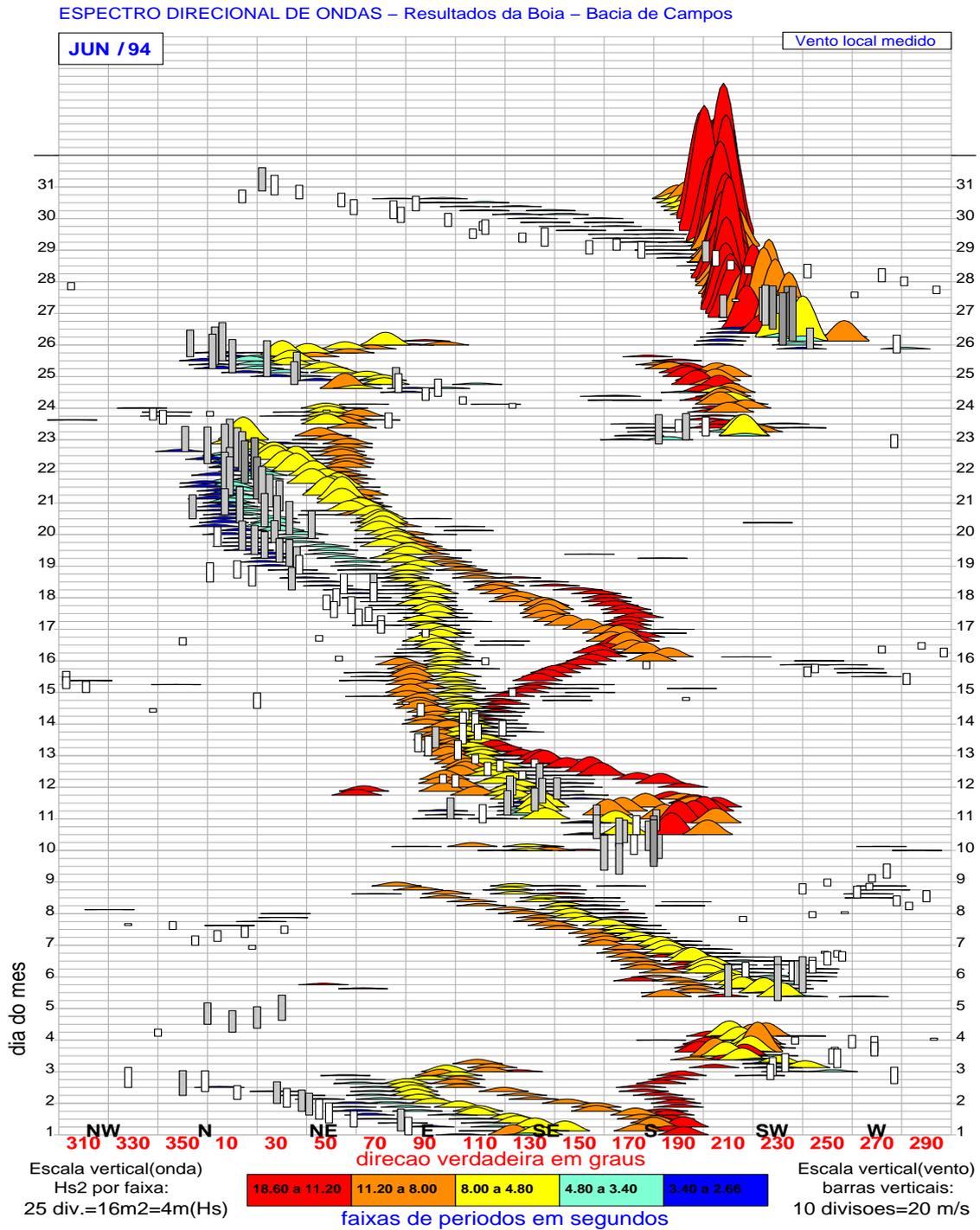
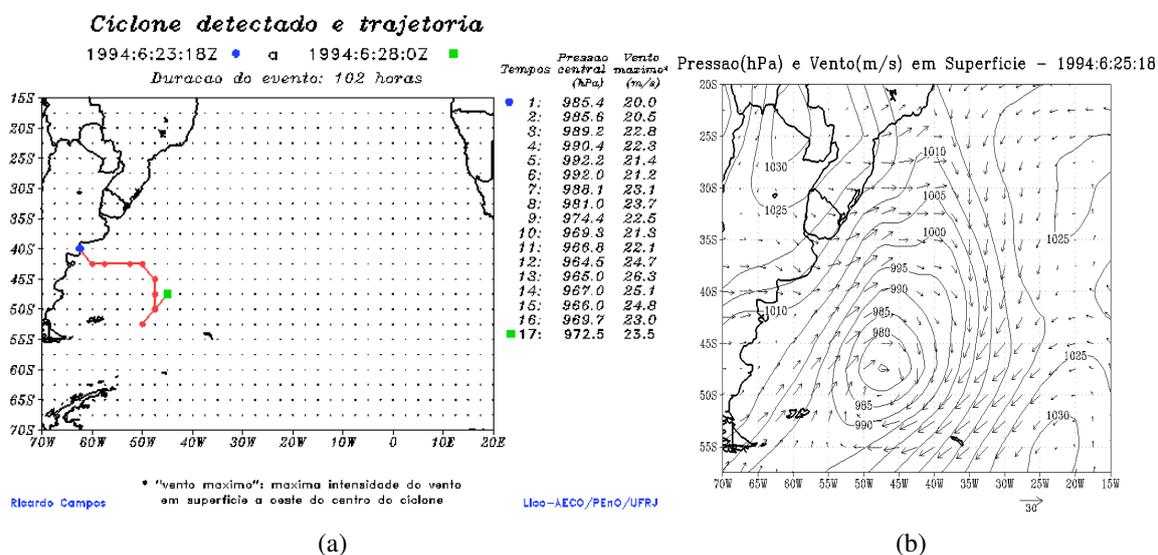


Figura 7.12: Caso 5, máximo dia 27/06/1994. PLEDs do mês correspondente.



Pressão(hPa) e Vento(m/s) em Superfície - 1994:6:25:18

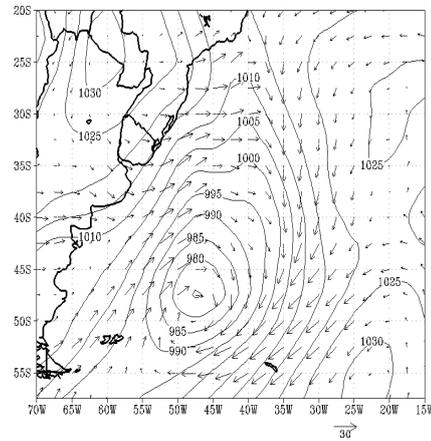


Figura 7.13: Caso 5, máximo dia 27/06/1994. (a) Trajetória do ciclone, duração, vento máximo e pressão no centro. (b) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.10: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 5.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	24/06/1994 00Z	-40,00	-62,50	2414,78	226,31	985,40	8,93	21	13,83	20,05
2	24/06/1994 06Z	-42,50	-60,00	2442,17	217,17	985,60	10,13	11	13,40	20,53
3	24/06/1994 12Z	-42,50	-57,50	2324,07	213,15	989,20	9,90	11	14,29	22,84
4	24/06/1994 18Z	-42,50	-57,50	2324,07	213,15	990,40	10,20	11	13,16	22,30
5	25/06/1994 00Z	-42,50	-52,50	2127,81	203,86	992,20	7,87	11	13,05	21,43
6	25/06/1994 06Z	-42,50	-52,50	2127,81	203,86	992,00	8,47	11	12,48	21,28
7	25/06/1994 12Z	-42,50	-50,00	2053,46	198,63	988,10	9,17	11	14,90	23,18
8	25/06/1994 18Z	-45,00	-47,50	2265,56	191,00	981,00	8,27	21	16,82	23,79
9	26/06/1994 00Z	-47,50	-47,50	2535,77	189,38	974,40	9,30	11	15,55	22,52
10	26/06/1994 06Z	-50,00	-47,50	2807,53	188,05	969,30	9,23	11	15,60	21,38
11	26/06/1994 12Z	-50,00	-47,50	2807,53	188,05	966,80	9,27	11	16,96	22,18
12	26/06/1994 18Z	-52,50	-50,00	3105,44	190,04	964,50	10,67	11	18,82	24,78
13	27/06/1994 00Z	-52,50	-50,00	3105,44	190,04	965,00	10,60	21	20,19	26,38
14	27/06/1994 06Z	-52,50	-50,00	3105,44	190,04	967,00	10,47	21	19,24	25,10
15	27/06/1994 12Z	-50,00	-47,50	2807,53	188,05	966,00	10,43	21	19,51	24,84
16	27/06/1994 18Z	-47,50	-45,00	2512,02	185,15	969,70	9,73	21	19,08	23,05
17	28/06/1994 00Z	-47,50	-45,00	2512,02	185,15	972,50	8,67	21	18,25	23,53

Caso 6 - 10 de julho de 1994

Esse caso se apresenta de forma mais complexa, com dois ciclones importantes para a geração das ondas e um cavado extenso entre os dois sistemas. A PLEDS mostra uma curta situação de BOM TEMPO com forte vento nordeste antecedendo a entrada da frente fria no Rio de Janeiro, que chega no final do dia 9, com a virada do vento para sudoeste junto com as ondas na mesma direção. No dia 10 o vento é forte e todas as faixas de frequência estão com direção entre sudoeste e oeste, caracterizando a maior D_p entre todos os extremos. Essa situação, entretanto, dura pouco e o vento se desloca rapidamente para sul, sudeste (nos dias 11 e 12), leste no dia 13, até retornar ao vento nordeste e situação de BOM TEMPO no dia 14. Após o dia 11 as faixas de frequência dois, três, quatro e cinco (períodos entre 11,20 e 2,66 s) acompanham o deslocamento direcional do vento, enquanto a faixa um, de baixas frequências, migra também para leste mas de forma mais lenta, resultado do deslocamento da pista de um ciclone ao sul, distante do Rio de Janeiro.

O primeiro ciclone a atuar se fechou no final do dia 6 em 45°S , relativamente distante da costa. O tamanho inicial é grande, como pode ser visto no parâmetro *Tipo* e na figura 7.15(c). A pressão no centro cai com o tempo, G_p atinge o máximo em 12Z do dia 17 com valor não muito alto, assim como as intensidades dos ventos, que permanecem em média com 8 m/s. No início do dia 8 V_{max} se intensifica um pouco chegando a 18 m/s. O ciclone dura apenas dois dias e a frente associada atinge o Rio de Janeiro no dia 7, com ventos moderados entre sudoeste e sul, visto na PLEDS. A pista de atuação nesse caso é grande, se estendendo até o litoral e avançando para latitudes mais baixas. Apesar da grande extensão, a intensidade dos ventos não é muito grande, fazendo com que esse sistema sozinho não pudesse gerar o extremo de onda que foi registrado na Baía de Campos.

Na figura 7.15(d) é possível perceber o cavado de grande amplitude estacionado sobre o Atlântico Sul. Esse sistema, junto com o anticiclone sobre o continente, mantém ventos de sudoeste de 55° a 25°S , gerando uma área muito grande de atuação do vento. Inserido nessa configuração nasce o segundo ciclone em 35°S (região RG2) próximo ao Uruguai, visto ainda bem pequeno na figura 7.15(d). GP nesse caso é bem superior ao primeiro ciclone, com os ventos acima de 20 m/s. O ciclone se propaga para leste com menor distância do Rio de Janeiro. O dia 9 é o mais forte, diminuindo o vento e G_p no início do dia 10. P_c cai ao longo do tempo durante toda a trajetória do evento, assim como Ang , seguindo a migração para leste.

Pode-se dizer que o primeiro sistema e o cavado foram importantes para a manutenção inicial da grande pista estacionada sobre o oceano, atingindo desde a Argentina até o sudeste brasileiro. O segundo ciclone, surgindo sobreposto a essa primeira configuração, veio fornecer ainda mais energia à pista, intensificando os ventos no dia que precedeu

o máximo de Hs registrado pela bóia. Esse caso exemplifica um evento de ciclogênese secundária, descrito detalhadamente em IWABE (2008), em que um segundo ciclone se forma, em geral, na retaguarda de outro inicial.

Caso 7 - 20 de novembro de 1994

Como é típico dos meses de novembro, grande parte da PLEDS no caso 7 apresenta situação de BOM TEMPO, ocorrendo algumas chegadas de ondulações distantes. Esse padrão muda no dia 19 com a virada brusca do vento e avanço de uma frente fria. Todas as faixas de frequência se concentram entre as direções sul e sudoeste, que se mantém nos dias seguintes com ligeiro deslocamento para sudeste acompanhando a mudança do vento. Esse caso, o mais fraco entre os sete, também não sustentou grandes alturas de onda por muito tempo, estando o dia 22 já com baixa energia. A partir do dia 25 há um deslocamento para leste na direção do vento até retornar à situação de BOM TEMPO no dia 27. Acompanhado dessa mudança, continuam chegando ondas sul, tendendo para sudeste, com pouca energia em baixa frequência, indicando que o sistema remanescente dos dias anteriores continua gerando ondas enquanto se dissipa e morre.

O ciclone que gerou tal ondulação acontece bem ao sul, surgindo em 00Z do dia 17, distante do litoral argentino. No início apresenta Gp pequeno, ventos moderados e Pc de 997 hPa, caindo rapidamente. No dia 18 o ciclone adquire grande intensidade, com Gp em torno de 10 hPa e ventos acima de 20 m/s. Pc nesse dia chega a cair até 970 hPa. No dia 19 a situação se mantém, com pequeno enfraquecimento. A distância ao Rio de Janeiro diminui um pouco, com o ciclone ao longo dos dias apresentando deslocamento insignificante para o seu tamanho, parecendo praticamente estacionado sobre 50°S e 35°W.

A figura 7.17(b) mostra o tamanho da pista e a importância do grande anticiclone da retaguarda, com 1020 hPa sobre a costa do Uruguai e Argentina. Esse sistema de alta pressão tem importância adicional em seu setor nordeste, que gera uma região a mais de atuação do vento de sul e sudeste. No dia 20 o ciclone começa a perder força, Pc passa a subir enquanto Gp , $Vmed$ e $Vmax$ caem. Característica fundamental nesse caso para a manutenção da pista de sudoeste, foi o aumento da pressão na alta da retaguarda ao lado das baixas pressões no centro do ciclone nos dias 18 e 19. A permanência desse sistema nos dias 20 e 21, apesar de mais fraco, fez com que as ondas de sul continuassem a chegar no Rio de Janeiro após o registro máximo de Hs. A distância D durante o processo de geração das ondas chegou a 3073 km, informando que mesmo ciclones distantes podem gerar grandes ondulações na Bacia de Campos.

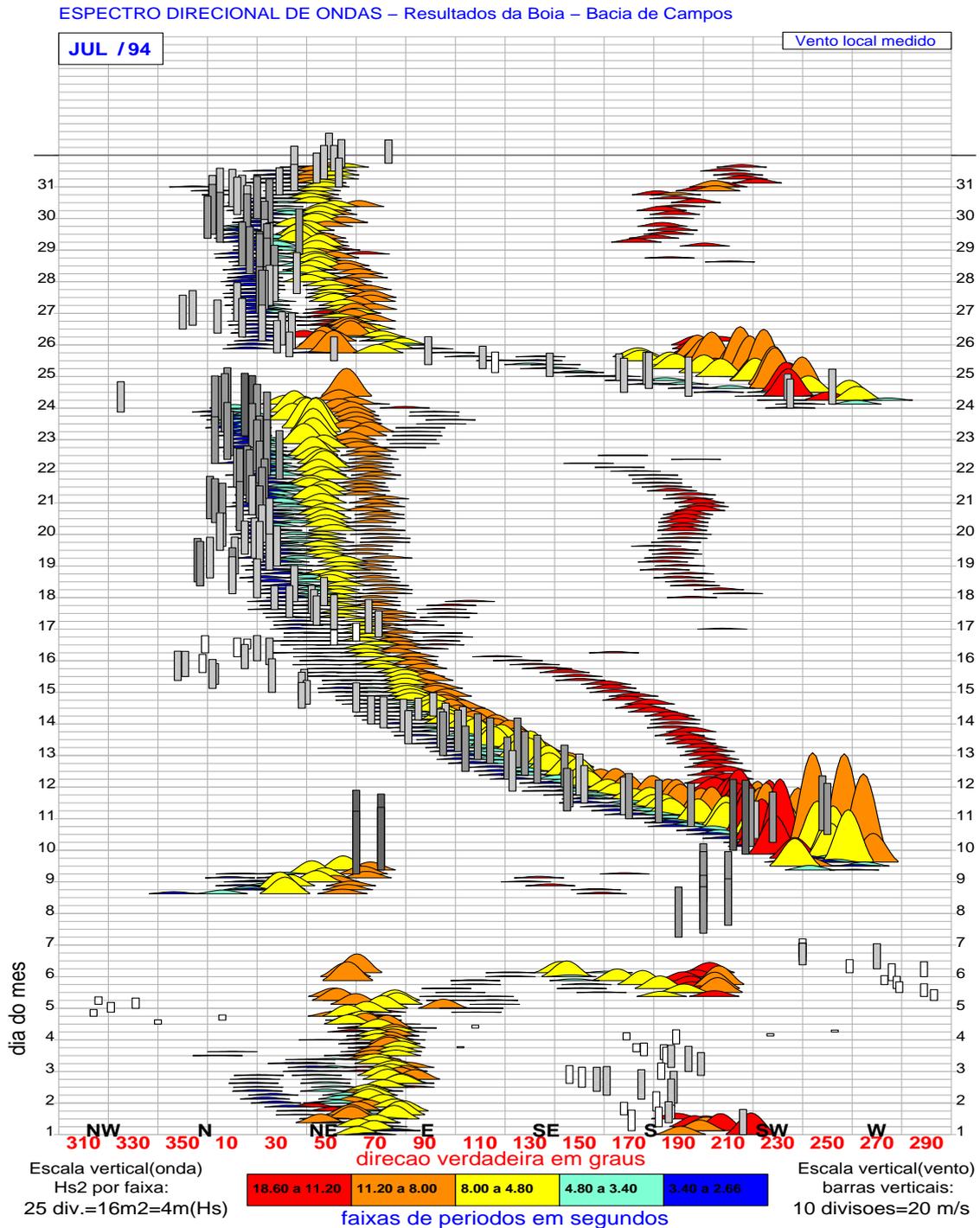


Figura 7.14: Caso 6, máximo dia 10/07/1994. PLEDs do mês correspondente.

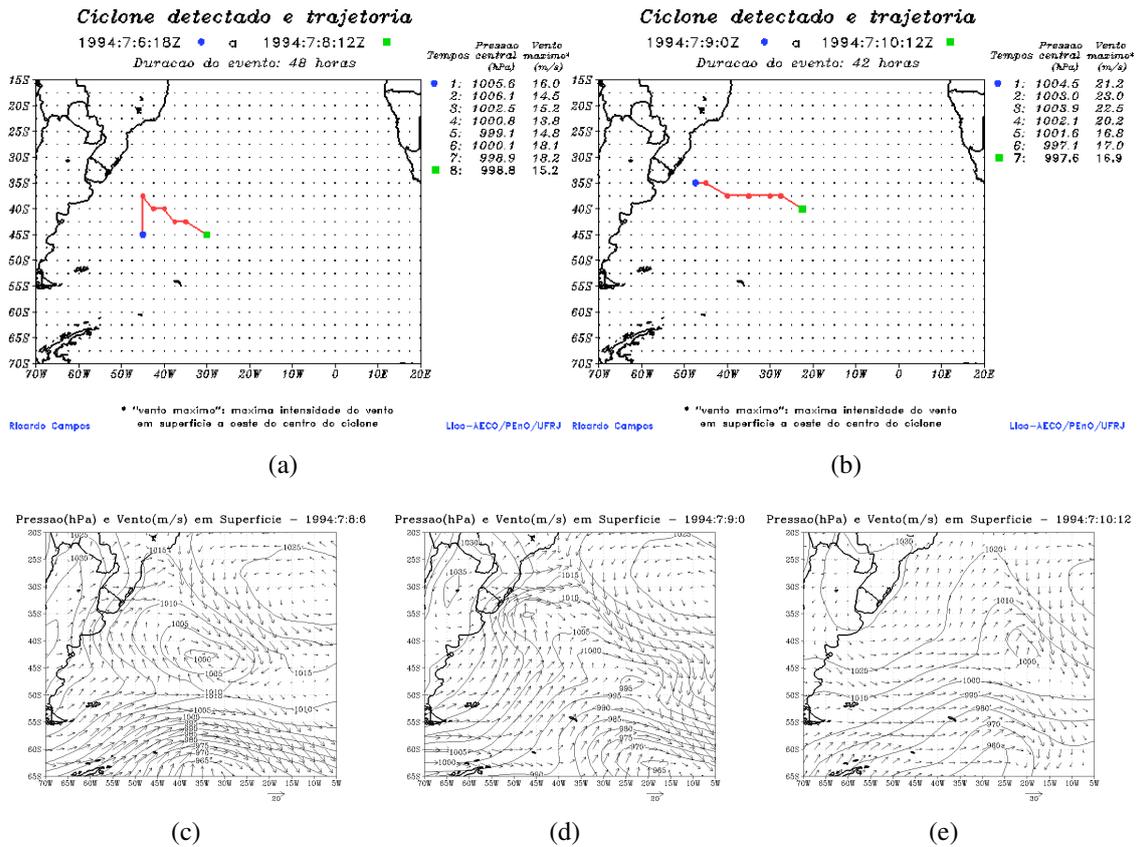


Figura 7.15: Caso 6, máximo dia 10/07/1994. (a) (b) Trajetória dos ciclones, duração, vento máximo e pressão no centro. (c) (d) (e) Pressão e vento em superfície.

Tabela 7.11: Resultado do programa de identificação de ciclones para o caso 6.

t	Data	Lat	Lon	D (km)	Ang (°)	Pc (hPa)	Gp (hPa)	Tipo	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)
1	06/07/1994 18Z	-45,00	-45,00	2236,37	186,05	1005,60	2,90	32	7,96	16,01
2	07/07/1994 00Z	-45,00	-45,00	2236,37	186,05	1006,10	3,13	31	8,73	14,58
3	07/07/1994 06Z	-37,50	-45,00	1414,91	190,78	1002,50	2,53	11	7,99	15,23
4	07/07/1994 12Z	-40,00	-42,50	1668,47	181,46	1000,80	4,63	32	8,88	13,80
5	07/07/1994 18Z	-40,00	-40,00	1676,60	174,17	999,10	3,77	12	9,63	14,87
6	08/07/1994 00Z	-42,50	-37,50	1980,57	169,26	1000,10	3,80	12	7,62	18,17
7	08/07/1994 06Z	-42,50	-35,00	2028,77	163,57	998,90	3,97	12	8,66	18,27
8	08/07/1994 12Z	-45,00	-30,00	2415,77	157,01	998,80	1,93	12	8,79	15,28
1	09/07/1994 00Z	-35,00	-47,50	1219,59	204,25	1004,50	9,43	11	11,65	21,25
2	09/07/1994 06Z	-35,00	-45,00	1145,03	193,81	1003,00	9,13	11	13,71	23,01
3	09/07/1994 12Z	-37,50	-40,00	1401,09	172,77	1003,90	6,73	31	14,16	22,52
4	09/07/1994 18Z	-37,50	-35,00	1520,94	156,05	1002,10	4,73	31	11,58	20,25
5	10/07/1994 00Z	-37,50	-30,00	1747,16	142,71	1001,60	2,47	21	9,90	16,83
6	10/07/1994 06Z	-37,50	-27,50	1888,95	137,38	997,10	3,73	12	10,62	17,03
7	10/07/1994 12Z	-40,00	-22,50	2353,92	135,12	997,60	4,70	11	12,03	16,92

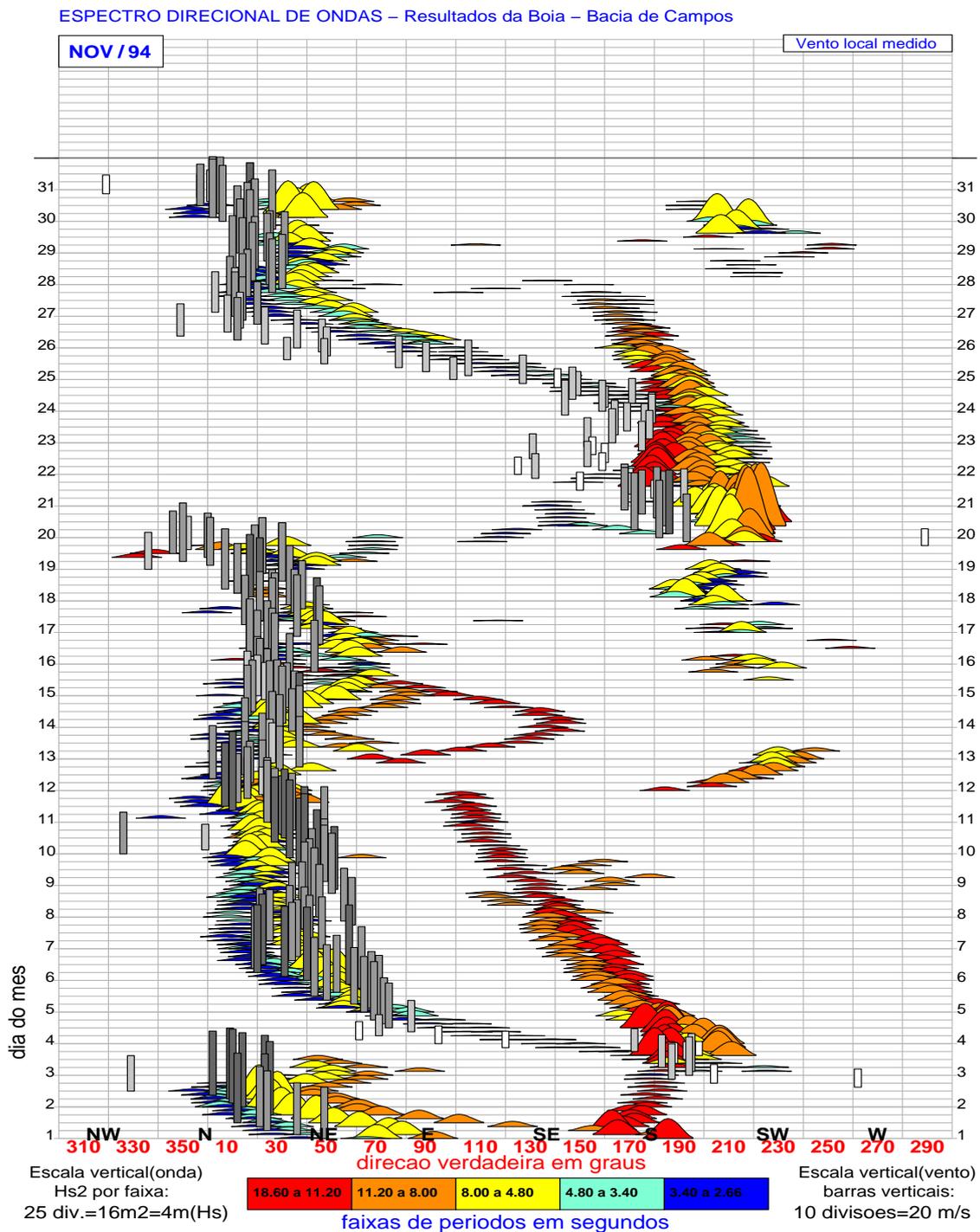


Figura 7.16: Caso 7, máximo dia 20/11/1994. PLEDs do mês correspondente.

Considerações gerais dos ciclones

Observando os sete casos de forma conjunta, notam-se algumas características comuns. Pela PLEDS é possível perceber que a altura significativa máxima em geral ocorre um dia após a entrada da frente fria, com ventos de sudoeste. Os ciclones com menor distância do Rio de Janeiro possuem o máximo um pouco mais próximo da virada do vento, devido ao posicionamento da pista. O caso 2 provou que é possível inclusive a chegada das primeiras ondas associadas ao ciclone (em baixa frequência) antes da virada do vento. Entretanto, o pico de energia sempre ocorre após a incidência da frente fria, com a contribuição da energia das vagas, caracterizando um espectro de banda larga.

Praticamente todos os casos mostraram a importância da alta da retaguarda sobre o continente para a intensificação e manutenção da pista. Essas apresentam pressões entre 1020 e 1035 hPa, com pouco deslocamento no tempo e posicionados a oeste ou noroeste dos ciclones sobre o mar. ROCHA *et al.* (2004) comprova a importância dos anticiclones extratropicais junto dos ciclones geradores dos extremos de onda no sul e sudeste brasileiro. O fortalecimento da alta pressão explica também o aumento na intensidade e duração dos ventos, fator fundamental para a geração de grandes ondulações. Os anticiclones em geral possuem gradientes de pressão menores e diâmetro muito grande, apresentando grandes pistas com ventos moderados. Ao surgir um ciclone com forte queda na pressão central próximo ao sistema, ocorre o aumento do gradiente de pressão necessário para elevar os ventos acima de 20 m/s, formando as pistas mais energéticas.

O caso 6 mostrou que configurações mais complexas podem ser responsáveis pelos extremos, destacando a importância do cavado de grande amplitude estacionado sobre o Atlântico Sul atuando em uma grande área. O ciclone que surge logo em seguida veio somar energia à pista já formada pelo cavado e anticiclone sobre o continente, disparando a condição final para a geração das ondas de sudoeste.

Algumas conclusões importantes podem ser obtidas observando as trajetórias. Os ciclones que se deslocam para leste, com maior duração e não muito distantes do Rio de Janeiro, conseguem gerar ondas em diversas direções com o passar do tempo. A ondulação incide inicialmente de sudoeste, podendo migrar para sul e, em alguns casos, até sudeste. Esse fato não ocorre com as trajetórias para sul, as quais estão confinadas a longitudes mais restritas, gerando ondas de sul/sudoeste. O caso mais comum ocorre com deslocamento dos centros de baixa pressão para sudeste.

A latitude dos ciclones mostrou ser um dos principais fatores para a ocorrência dos extremos. O evento de maior altura significativa ($H_s=6,47$ m, caso 4) apresentou o ciclone de menor latitude, mais próximo do Rio de Janeiro (região RG1); enquanto o de menor altura ($H_s=4,63$ m, caso 7) teve o ciclone mais distante, em 50°S . Essa tendência, entretanto, não é uma regra, como pode ser visto pelo caso 5 em que o ciclone com

centro em $42,5^{\circ}\text{S}$ gerou a terceira maior ondulação registrada, resultado da intensificação do setor noroeste do sistema e evolução da pista até latitudes mais baixas. Comprova-se então a importância do cálculo de *Tipo*, ou seja, se o ciclone estiver posicionado mais ao sul necessariamente deverá ser do *Tipo* 11, 21, 31 ou 41 (final 1), em que setor noroeste possui os ventos mais fortes. É possível notar inclusive que essa foi uma característica comum a todos os ciclones, visto pelas tabelas com *Tipo* igual a 11 e 21. Comparando com REBOITA (2008), destacam-se as regiões de máxima ciclogênese RG1 e RG2 como aquelas onde nascem os ciclones com maior impacto nas ondas do Rio de Janeiro. Em RG2 foram mais frequentes, entretanto em RG1 surgiu o ciclone que gerou a maior onda registrada na Baía de Campos.

A figura 7.18 ajuda a perceber as trajetórias típicas dos ciclones que geram as ressacas. É possível notar em todos os casos os sistemas surgindo acima de $47,5^{\circ}\text{S}$ e grande parte aparecendo próximo ao litoral, enquanto a climatologia típica mostrada na subseção 2.5.2 mostra a região de 50°S como a de maior frequência de trajetórias. Esse fato confirma que a questão da proximidade do Rio de Janeiro é realmente importante. Os ciclones ao longo de 60°S geram as maiores ondas e com maior ocorrência, porém a energia total do espectro sofre dispersão significativa ao cruzar grande parte do Atlântico Sul (principalmente dissipação das altas frequências), não sendo tão importante para a Baía de Campos em termos de eventos extremos⁹.

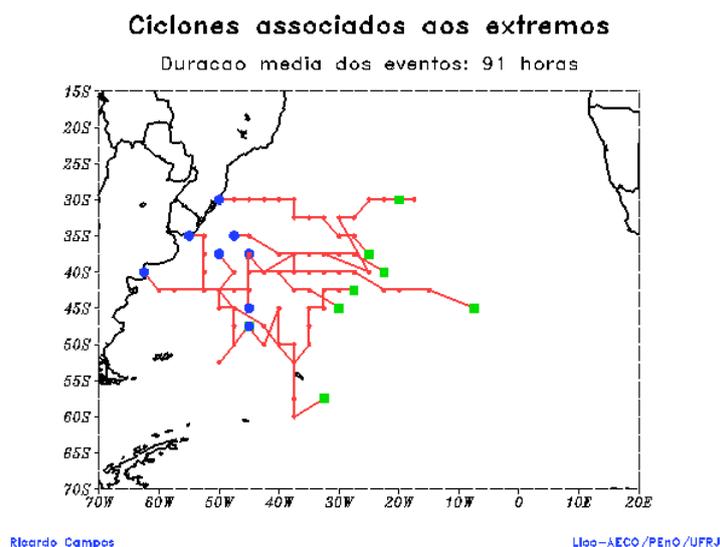


Figura 7.18: Plotagem conjunta das trajetórias dos sete ciclones que geraram os eventos extremos de onda medidos pela bóia.

⁹Somente em termos de eventos extremos, já que o clima de ondas no sudeste brasileiro é influenciado por sistemas meteorológicos de diversas partes do globo, conforme visto em BRANCO (2004).

Juntando os resultados deste trabalho com aqueles apresentados no capítulo 2 de Fundamentos Teóricos, chega-se a conclusão que os ciclones mais ao sul têm as maiores pistas e durações, com ventos sensivelmente mais fortes do que aqueles em baixas latitudes. Apesar de não serem os mais importantes em termos de extremos, foi visto pela PLEDS (principalmente no caso 5) que as ondas associadas perduram por mais tempo nesses casos e também estão relacionados a D_p mais próximas a 180° . Os ciclones em latitudes baixas, por questões de posicionamento, apresentam as D_p mais altas, de sudoeste, com menor duração. Há diferença também, na distribuição da energia entre as faixas de frequência. Os extremos de onda gerados por ciclones perto do Rio de Janeiro possuem muita energia em alta frequência, enquanto aqueles mais distantes concentram a energia prioritariamente na faixa um, com períodos maiores.

7.3.3 Análise dos processos de geração - extremos resultantes do WAVEWATCH

Nesta subseção são analisados de forma individual os extremos de onda detectados pelo WAVEWATCH. Como o número de casos é muito grande, serão abordados somente os mais importantes, com destaque aos eventos gerados por sistemas diferentes daqueles descritos nos extremos da bóia, ou seja, cavados e anticiclones. Por questão de organização, os trinta casos estão no Anexo D, os quais são de importante consulta para os comentários e discussões a seguir.

O único cavado registrado gerando grandes ondulações é mostrado no caso 1, com máximo no dia 04/08/1986. A posição da pista se encontra bem ao sul, entre 60° e 40° S a maior parte do tempo. Os ventos muito fortes de sudoeste sopram constantemente junto ao litoral sul da Argentina durante os três dias que precedem a chegada das ondas na Baía de Campos. É possível notar pelas figuras, que a frente fria avança com intensidade somente até o sul do Brasil, perdendo força ao se deslocar em latitudes mais baixas. Como consequência, na PLEDS é observada apenas um pequeno deslocamento do vento fraco no final do dia 3, o que não caracteriza a intrusão da frente fria. O AAS domina a região sudeste do Brasil, com altas pressões e vento de nordeste.

De acordo com PARENTE (1999) o evento se classifica como BOM TEMPO com marulho distante. As ondas, com direções entre sul e sudeste, incidem desde o dia primeiro em baixa frequência, mostrando pouca energia, a qual aumenta bastante nos dias 4 e 5. Soma-se nesse caso energia em alta frequência de nordeste e leste, caracterizando mar bimodal. Apesar de H_s máximo não ter sido tão significativo, igual a 3,80 m, é importante notar o diferenciado processo de geração; ou seja, uma região de baixa pressão

que não se fecha em um ciclone¹⁰, distante do Rio de Janeiro, gerando ondas que percorrem grande parte do Atlântico Sul e chegam a Bacia de Campos ainda com força. Esse caso é excelente para mostrar que, apesar das tendências e climatologias observadas, as configurações sinóticas e padrões meteorológicos não são totalmente fixos.

O caso 20, em 31/05/1999, apresenta a máxima altura significativa do WAVEWATCH gerada por ciclone (5,52 m). Os dias anteriores têm situação de BOM TEMPO, com ventos e vagas de nordeste, e pouca energia em baixa frequência incidindo como ondulação distante. No final do dia 30 o vento ronda de noroeste para sudoeste, ocorrendo a entrada da frente fria com ventos moderados. No dia 31 todas as faixas de frequência estão em torno da direção sudoeste e maior energia na faixa um. Foi verificado pela PLEDS de junho que o evento se desintensificou rapidamente, estando as ondas bem amenas no dia primeiro.

Concordando com a análise dos dados da bóia, o ciclone gerador da onda máxima resultante da simulação do WAVEWATCH ocorre em baixas latitudes, nascendo dia 29 sobre o Rio Grande do Sul com 1009 hPa e ventos fracos. Grande parte do deslocamento sobre o oceano aconteceu em 35°S, período em que o sistema migra para leste e se intensifica rapidamente. A pressão cai e os ventos chegam a 27 m/s muito próximos ao Rio de Janeiro. A figura da pressão e vento em superfície mostra a grande pista de sudoeste e a frente fria passando sobre o litoral norte fluminense. A evolução citada tem se mostrado comum entre os sistemas que produzem as maiores ondas na Bacia de Campos, tanto medidas pela bóia, quanto simuladas pelo WAVEWATCH. Esse evento provocou a destruição dos calçadões de Gragoatá e da praia de Piratininga no dia 01/06/1999.

Os dois extremos mais importantes de se analisar, relacionados a anticiclones, são os casos 10 e 11 já comentados. Esses dois quebraram a idéia absoluta, que até então havia sido formulada, de que os anticiclones geram extremos menores que os ciclones, assunto que merece investigação. O caso 10 ocorreu dia 25/05/1993. Inicialmente uma pequena frente passa pelo Rio de Janeiro no dia 16 e em pouco tempo o vento volta a migrar para sudeste, com vagas de BOM TEMPO de nordeste, caracterizando a influência do AAS. O deslocamento na direção do vento não retorna para nordeste como acontece tipicamente, devido ao anticiclone extratropical que estaciona ao sul do Rio de Janeiro. Esse sistema surge sobre a Argentina a oeste da região de baixa pressão dias antes, aumentando muito em intensidade e tamanho ao deslocar-se sobre o oceano. A pista nos dias 23 e 24 apresenta grande extensão, com ventos fortes e regulares de sudeste, condição que se mantém por dois dias, visto nas figuras.

A PLEDS desse caso aponta o vento constante de sudeste desde o dia 16 até o dia 25, com intensificação no dia 24. As ondas em todas as faixas de frequência se encontram

¹⁰E não por isso se pode julgá-la como menos intensa.

entre leste e sudeste no momento do máximo de Hs, e a faixa três (períodos entre 11,17 e 7,63 s) é a mais energética, caracterizando a geração das ondas próximas ao Rio de Janeiro (entre 35° e 23°S). O centro do anticiclone estacionário tem posição 37,5°S e 23,5°W e chega a 1035 hPa, fornecendo todas as condições para a formação e manutenção de uma pista com muita energia, grande área de atuação, ventos fortes e regulares, que permanecem sobre praticamente a mesma posição por vários dias. A queda anômala da pressão para 1015 hPa ao norte e nordeste do anticiclone, em torno de 20°S, é fator importante para intensificação do vento, o qual ocorre após a junção do anticiclone da retaguarda com o AAS. Essa queda da pressão é dita anômala pois a região citada é típica de altas pressões com permanência quase constante do AAS.

O caso 11, com extremo de onda no dia 09/03/1994, é muito semelhante ao 10. A PLEDS mostra uma frente fria fraca sobre o Rio de Janeiro nos dias 6 e 7, gerada pelo pequeno ciclone ainda visto à direita da primeira figura do vento e pressão em superfície. Novamente, dias antes, o anticiclone extratropical avança sobre o oceano ganhando tamanho e intensidade ao se fundir ao AAS após a passagem da frente. A posição é praticamente a mesma do caso 10, com centro em 35°S. A baixa pressão a nordeste do sistema intensifica o gradiente de pressão, aumentando a intensidade do vento nos dias 8, 9 e 10, visto na PLEDS. No dia 8 a amplitude das ondas na Baía de Campos aumenta rapidamente, com todas as faixas de frequência em torno da direção sudeste. Novamente muita energia se concentra na faixa três. O sistema de alta pressão migra para leste, mudando o posicionamento da pista, fazendo com que Dp também se desloque para leste. No dia 15 o sistema já se desintensificou, retornando à situação de BOM TEMPO com ventos de nordeste.

Os demais casos de anticiclones apresentam comportamento parecido aos dois últimos analisados, mostrando que esses sistemas possuem características que divergem menos entre os eventos do que nos extremos de ciclones. Os casos 3, 10, 11, 14, 15, 17, 21 e 29 possuem anticiclones com centro aproximadamente na mesma região, em 37,5° S. Em 5, 19, 23 e 30 os anticiclones estão posicionados um pouco mais ao sul, característica que não indicou explicitamente uma grande tendência na mudança da intensidade das ondas no Rio de Janeiro, como visto entre os ciclones. Nos casos 3 e 5, além das grandes ondas de sudeste geradas pelos anticiclones, foi verificada a chegada de ondulações de mais baixa frequência entre sul e sudoeste, decorrentes de sistemas de baixa pressão distantes. Isso informa que, apesar da abrangência dos anticiclones sobre o Atlântico Sul, outros sistemas, como ciclones em latitudes altas, podem gerar ondas de sul/sudoeste que chegam ao Rio de Janeiro acrescentando energia ao espectro. Nesse caso a classificação seria “MAU TEMPO de sudeste com ondulação distante”. O posicionamento mais ao norte dos anticiclones (vista na subseção 2.5.2) possibilita essa configuração, permitindo

que os ciclones típicos em 60°S continuem a gerar ondas enquanto migram para leste.

Como características adicionais, destacam-se os casos 10, 11 e 30, por fornecerem energia significativa de sudeste na faixa um, em baixas frequências, o que não é muito comum em casos de anticiclone. Esse fato é resultado da grande pista a leste do sistema e do caráter quase estacionário, que favorece a transferência da energia das altas frequências para as baixas frequências do espectro.

Observando em caráter sazonal é possível perceber que, apesar dos centros muitas vezes estarem posicionados sobre a mesma região, o lado oeste e a pista dos anticiclones estão deslocados um pouco para sul no outono, tendendo para norte no inverno. Essa característica resulta na mudança de D_p das ondas geradas. Conforme já discutido, os anticiclones com maior D_p (próximas a 180°) tendem a gerar ondas um pouco maiores, enquanto aqueles com menor D_p (próximas a 90°) alturas mais baixas. Esse fato é observado na PLEDS.

Considerações gerais dos ciclones

Observando as características gerais dos 17 ciclones e mares de sul/sudoeste é possível ver grande concordância com as análises anteriores dos extremos da bóia. Praticamente todos os eventos apresentaram situação de MAU TEMPO, com entrada da frente fria e ventos de sudoeste durante o máximo de Hs. As exceções ocorreram no caso 1 (já abordado) e o caso 4, em que o ciclone esteve tão ao sul que a frente não atingiu o Rio de Janeiro, classificado como situação de BOM TEMPO com ondulação distante. Esse apresentou altura significativa relativamente pequena (3,81 m). Apesar da pouca probabilidade de incidência e baixa energia, tal exemplo, junto com o caso 1 (gerado por cavado), provam que podem ocorrer eventos extremos em situação de BOM TEMPO, gerados por ciclones ou cavados distantes. Em tais casos a integração final do espectro fornece Hs pequeno, porém a energia concentrada em baixas frequências continua oferecendo risco às estruturas sobre o oceano.

Pelo Anexo D e figura 7.19, é possível contar 10 entre os 17 ciclones¹¹ nascendo em latitudes iguais a 30°S ou mais ao norte¹², na região RG1. Grande parte deles continuam se propagando ao redor dessa latitude um ou dois dias antes de migrar para sudeste. Tal característica é importante para as ondulações que chegam na Baía de Campos. Pela PLEDS dos respectivos casos, é possível comprovar o que foi dito anteriormente, com os eventos apresentando grande energia na região de alta frequência e a faixa um (baixa frequência) menos intensa do que nos casos em que o ciclone se encontra mais distante. Em muitos eventos é possível notar inclusive as faixas quatro e cinco com bastante ener-

¹¹Na figura contam-se apenas 8 porque dois deles surgem na mesma posição, sobrepondo na figura.

¹²São eles os casos 2, 6, 7, 16, 18, 20, 24, 25, 26 e 28.

gia acima do normal. Nos ciclones mais ao norte é perceptível, inclusive, uma pequena diferença direcional entre as frequências no sentido para oeste; ou seja, Dp da faixa um mais próxima de sul, a faixa três em torno de sudoeste e as faixas quatro e cinco quase atingindo a direção oeste. O fato é resultado do posicionamento da pista (responsável pelas frequências intermediárias e baixas) e da direção do vento local (responsável pelos curtos períodos locais). No caso 25 percebe-se a situação extrema do posicionamento da pista quase de oeste, com as altas frequências com direção em torno de 280° , característica possível devido à posição do ciclone.

Apesar de apresentarem tendência significativa, novamente não é regra todos os ciclones de baixas latitudes gerarem as maiores ondas. Tal comprovação é vista nos casos 2 e 6, com onda significativa abaixo de 4 m. Entretanto, assim como nos extremos da bóia, os eventos mais importantes são gerados mais próximos ao Rio de Janeiro, com ciclogênese em RG1.

A figura 7.20 apresenta a divisão sazonal das trajetórias dos ciclones encontrados. É possível perceber em 7.20(a) o outono com os ciclones confinados mais ao norte (RG1). Em todos os casos dessa estação as ciclogêneses ocorreram sobre o Rio Grande do Sul ou litoral sudeste, mostrando as menores distâncias ao Rio de Janeiro. O inverno, figura 7.20(b), possui maior dispersão das trajetórias, com algumas poucas ocorrendo próximas ao sudeste brasileiro e a maioria mais distantes. Nos primeiros dias dos ciclones, é possível acompanhar as trajetórias prioritariamente para leste no outono e para sudeste no inverno; ou seja, além da ciclogênese mais ao sul, os ciclones no inverno têm maior propensão ao distanciamento da Bacia de Campos.

Observando a sequência de casos do Anexo D, pode-se concluir que os ciclones no inverno em geral são mais intensos, com ventos máximos próximos a 30 m/s e pressões centrais que chegam a 980 hPa. As trajetórias em latitudes um pouco mais ao sul que no outono também mostram tipicamente pistas com grande área. Apesar de todas essas características favorecerem os extremos de onda, os ciclones no inverno geram $\bar{H}_s=4,25$ m enquanto o outono 4,53 m. Tal característica novamente leva a crer que a proximidade do Rio de Janeiro, acompanhada da propagação lenta (quase estacionária) para leste, é fator importante.

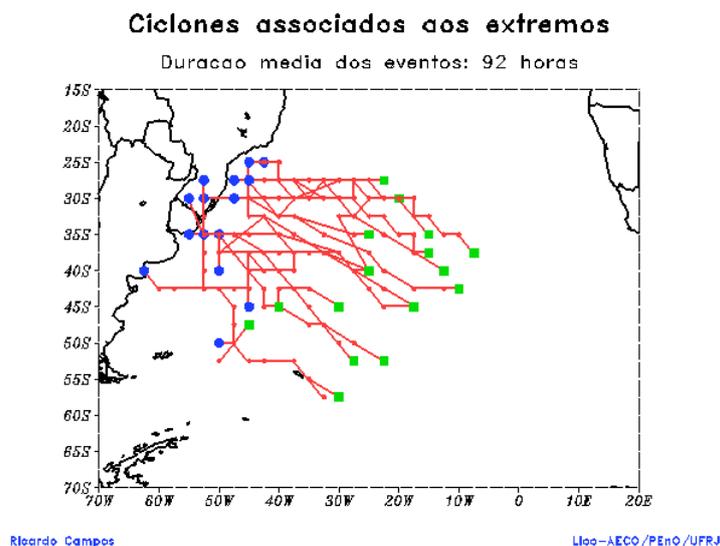


Figura 7.19: Plotagem conjunta das trajetórias dos ciclones que geraram os eventos extremos de onda simulados pelo WAVEWATCH.

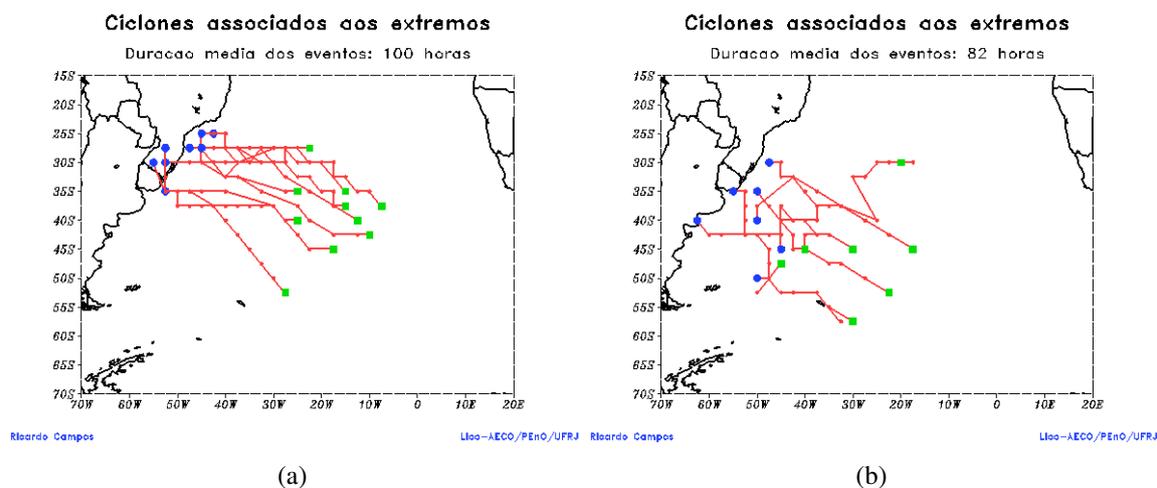


Figura 7.20: Plotagem conjunta das trajetórias que geraram os eventos extremos de onda resultantes da simulação do WAVEWATCH. (a) 10 ciclones no outono, (b) 7 ciclones no inverno.

7.3.4 Comentários e discussões

Resumindo as discussões realizadas e juntando os resultados da série da bóia e da simulação do WAVEWATCH pode-se chegar a algumas informações importantes. No geral os ciclones são responsáveis pelas maiores ondulações na Bacia de Campos. Os sete casos mais extremos da bóia, todos associados a esses sistemas, apresentaram onda significativa média de 5,26 m, $D_p=221,85^\circ$ e $T_p=13,16$ s. Tipicamente as maiores alturas

são ligadas às trajetórias mais a norte (ciclogênese em RG1), com T_p relativamente menor e D_p maior (em torno de SW). Nesses casos a pista não é tão grande, mas a proximidade com o Rio de Janeiro se torna mais importante, apresentando bastante energia tanto em baixas como altas frequências.

Alguns cálculos simples baseados nas equações da seção 2.3 foram desenvolvidos para ajudar a entender os processos de geração. Para os casos da bóia foram avaliados Δt máximos para caracterizar limitação por duração, o qual esteve em torno de 30 horas¹³. Foram calculadas também as alturas para mar completamente desenvolvido de P&M, segundo a equação 2.7. Como os eventos apresentaram H_s muito próximas às alturas calculadas a partir do vento segundo P&M e como a duração dos sistemas em determinada região é superior a dois dias, conclui-se que os casos não sofrem grandes limitações de pista ou duração. A dependência do aumento de H_s entre os casos está, então, intimamente ligada à intensidade do vento em superfície. Baseado em CARTER (1982), foi feita uma aproximação para o parâmetro R da equação 2.12, com a intenção de saber se os ciclones apresentam pequenas pistas e ventos fortes ($R=1,0$) ou grandes pistas e ventos moderados ($R=0,7$). Em geral os eventos tiveram R entre 0,76 e 0,8; ou seja, apesar dos ventos intensos atingindo até 28 m/s, a pista mostrou ser relativamente bastante extensa.

Sazonalmente pode-se chegar às seguintes conclusões, destacando as estações em ordem de importância:

- Outono: ▷ Ciclones ocorrem em grande número, mais próximos ao Rio de Janeiro (maior ocorrência em RG1 seguido de RG2), gerando ondas com D_p maior ($\simeq 238^\circ$) e T_p relativamente menor (média de 11,1 s). Destaca-se o mês de maio com grandes ondulações. ▷ Anticiclones também em grande número, maior intensidade e posicionamento mais ao sul, com D_p e T_p comparativamente maiores ($\simeq 122^\circ$ e 10 s).
- Inverno: ▷ Ciclones ocorrem com frequência, mais intensos que nas outras épocas do ano e relativamente mais distantes do Rio de Janeiro (maior ocorrência em RG2 e outras áreas), gerando ondas com D_p menor ($\simeq 220^\circ$) e T_p maior ($\simeq 13$ s). É uma estação prioritariamente de ciclones (88%) e situação de MAU TEMPO com ondas de SW que perduram por mais tempo. ▷ Somente um caso registrado de anticiclone gerando extremos, com posicionamento mais ao norte e D_p e T_p menores (94° e 9,1s).

¹³Eventos com duração menor que aproximadamente 30 horas tendem a ser limitados por duração.

- Primavera: ▷ Apenas um extremo de ciclone registrado pela bóia, com a menor altura significativa e maior distância do Rio de Janeiro. ▷ Alguns casos de anticiclones com Tp pequeno (média de 8,7 s) e Dp 117°.
- Verão: ▷ Estação com menor ocorrência de eventos extremos, sem nenhum ciclone severo encontrado. ▷ Poucos casos de anticiclones detectados, apresentando Tp e Dp parecido com os casos de primavera e menor intensidade.

Outra característica interessante é a migração direcional das faixas de frequência após a passagem da frente fria, vista em praticamente todas as PLEDS desse trabalho. Um bom exemplo é a figura 7.14, relativo ao caso 6 da bóia. Entre os dias 9 e 10 ocorre a mudança do vento, iniciando a situação de MAU TEMPO. Nos dias seguintes o ciclone se propaga para leste e sudeste enquanto perde força, fazendo com que as ondas em baixa frequência (faixa um em vermelho) se desloque lentamente para sul e sudeste diminuindo de intensidade. Ao mesmo tempo o anticiclone extratropical a oeste do ciclone migra para nordeste. Isso faz com que o vento local mude rapidamente com o deslocamento da alta pressão, passando para leste e nordeste. Como esse sistema se aproxima da Baía de Campos, a energia associada se encontra em frequências intermediárias e altas. Por uma questão de posicionamento, o que era uma pista só (entre o ciclone e o anticiclone, a qual gerou o extremo do dia 10) se “desfaz” em duas pistas, que passam a se deslocar separadamente, acompanhando a migração dos respectivos sistemas. Naturalmente as faixas de frequência na PLEDS acabam divergindo, com a alta frequência migrando para leste um pouco mais rápido que a baixa. Como resultado, é visto o que parece um formato de “y” após a ocorrência da passagem da frente. A figura 7.21 apresenta um esquema bem simplificado do que acontece sinoticamente.

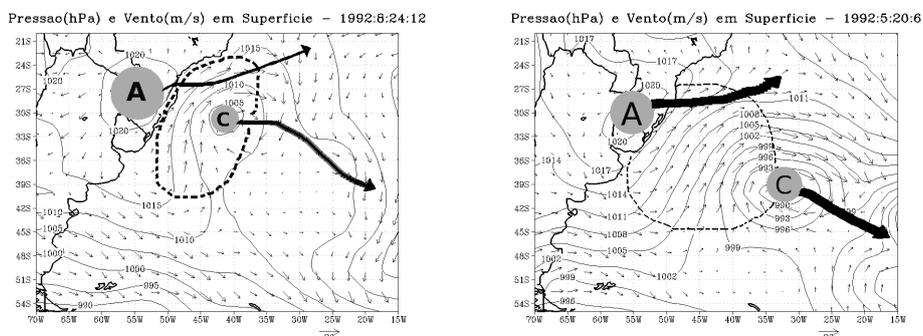


Figura 7.21: Figura ilustrativa do esquema de propagação típica dos ciclones (C) e anticiclones (A). O pontilhado destaca a pista de geração. (a) Caso de ciclone mais ao norte, em agosto de 1992. (b) Ciclone ao sul, em maio de 1992.

A figura 7.16 apresenta outros dois exemplos, um após o dia 5 e outro em seguida ao dia 25. O bom desempenho direcional da PLEDS, junto com a visualização simplificada, permite, a partir das ondas, rastrear com precisão os sistemas meteorológicos que migram por grandes distâncias ao longo do Atlântico Sul.

7.3.5 Relação entre extremos de onda e fenômenos meteorológicos de baixa frequência

A intenção desta última subseção de análise meteorológica é investigar superficialmente a relação entre ocorrência e intensidade dos extremos de onda e fenômenos meteorológicos de baixa frequência. Pelo fato de interferirem significativamente na circulação geral da atmosfera, foram escolhidos os seguintes: El Niño Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Decadal do Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation* - PDO) e Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation* - AAO).

A ENOS é o fenômeno mais importante gerado pelo acoplamento atmosfera/oceno, com grande interferência nos jatos subtropicais, na ocorrência de chuvas em diversas regiões e posicionamento dos ciclones. Fisicamente ocorre devido a anomalias quentes na temperatura da superfície do mar no Pacífico leste, que altera as células de circulação modificando a intensidade dos ventos alísios, entre outras consequências. Para os cálculos foi utilizado o *Multivariate ENSO Index* (MEI), baseado nas seis principais observações no Pacífico Tropical: pressão ao nível do mar, vento meridional e zonal em superfície, temperatura da superfície do mar, temperatura do ar ao nível do mar e fração total da cobertura de núvens. O período de cada ciclo varia bastante, estando em torno de seis a dezoito meses. MEI é positivo em El Niño e negativo em La Niña. A série foi fornecida pela NOAA.

A PDO é uma oscilação semelhante ao ENOS, com grande assinatura nos extratropicais e período em torno de vinte a trinta anos (frequência mais baixa que o ENOS). O fenômeno é visto com águas anormalmente quentes acima de 20°N. Na fase positiva o Pacífico oeste esfria e o leste se torna mais quente, enquanto na fase negativa ocorre o contrário. Os dados referentes foram obtidos do *Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean*.

A AAO é vista como uma variação no geopotencial entre a Antártica e as latitudes médias, a qual é profunda e atinge até a estratosfera. O fenômeno é observado durante todo o ano, porém variações intrasazonais e interanuais fazem parte das flutuações desse modo. Uma das principais consequências é a variação da posição e intensidade dos jatos, interferindo na trajetória e posicionamento dos ciclones e anticiclones. Na fase positiva da AAO ocorre maior atividade ciclônica em médias latitudes e deslocamento das trajetórias para

o norte. Na fase negativa se vê o contrário, com os ciclones tendendo a estar confinados em latitudes mais altas. Quando AAO é positivo também há um favorecimento nas cristas em médias latitudes, podendo aumentar a intensidade e ocorrência dos anticiclones. A série com os valores de AAO foi obtida também pela NOAA.

São realizadas três análises em sequência. Primeiramente relacionada ao número de eventos por ano, dividindo em casos de ciclones e anticiclones, comparando com os índices comentados (tabela 7.13). Em segundo, buscando a relação entre os eventos extremos de onda e os fenômenos. Como a frequência por ano é baixa, foi utilizada a ocorrência em janelas de cinco anos, aplicando o filtro de médias móveis às séries. Por último foi desenvolvida uma comparação com as alturas significativas máximas anuais, verificando o efeito também na intensidade dos sistemas.

As séries referentes aos vinte anos de *hindcast* no PONTO2 (38°W/23°S) são:

- Número de eventos iid por ano = “epa”;
- Número de eventos iid por ano gerados por ciclones = “cpa”;
- Número de eventos iid por ano gerados por anticiclones = “apa”;
- Número de eventos extremos (acima do limiar) por ano = “expa”;
- Número de eventos extremos (acima do limiar) por ano gerados por ciclones = “cexpam”;
- Número de eventos extremos (acima do limiar) por ano gerados por anticiclones = “aexpam”;
- Altura significativa máxima por ano = “mHs”;
- Altura significativa máxima por ano associada a ciclone = “cmHs”;
- Altura significativa máxima por ano associada a anticiclone = “amHs”.

A tabela 7.13 mostra a correlação (calculada pela equação 5.1) dos índices com os eventos iid (três primeiras colunas) e com os extremos (três últimas colunas).

Tabela 7.13: Correlação entre os índices MEI, PDO, AAO e as séries de eventos iid e extremos.

correlação	epa	cpa	apa	expa	cexpa	aexpa
MEI	-0,0099	0,2210	-0,2169	-0,4508	-0,5401	-0,0239
PDO	0,0065	0,2109	-0,1907	-0,2879	-0,8088	0,2927
AAO	0,6254	0,6388	0,1568	0,7747	0,0415	0,7815

Muitas informações podem ser tiradas a partir das correlações. Analisando o número total de eventos iid conclui-se que somente AAO possui grande influência, com MEI e PDO próximos a zero, informando que a Oscilação Antártica tem grande relação com os eventos em geral. Abordando os casos relacionados a ciclones, os três índices apresentaram correlações acima de zero. Conclui-se, principalmente, que valores positivos AAO tendem a aumentar os casos de ondas geradas por ciclones. A figura 7.22(a) apresenta a grande relação entre o número de ondas geradas por ciclones e o índice de AAO. Em eventos de El Niño (fase positiva do ENOS), há um pequeno aumento no número de ondulações geradas por ciclones. O mesmo acontece com PDO, com menor intensidade.

Observando as últimas três colunas da tabela 7.13, pode-se entender o impacto dos fenômenos no número de ondulações consideradas extremas do capítulo 6. De forma geral MEI e PDO mostram correlações negativas e AAO positiva (bem elevada), com a fase quente da Oscilação Antártica aumentando bastante a ocorrência. Analisando os eventos associados a ciclones intensos se vê com maior destaque a correlação negativa da PDO. AAO associada a esses sistemas tem pouca correlação, sendo mais evidente no grande aumento de casos de anticiclones gerando extremos de onda, visto na figura 7.22(b).

Juntando as informações, pode-se concluir que o El Niño causa um sutil crescimento no número total de ondulações geradas por ciclones; entretanto, diminui a incidência de extremos. Na La Niña os ciclones são menos frequentes mas geram ondas com maior Hs. A discussão da subseção 2.5.2 destaca o mesmo aspecto, onde anos de El Niño têm maior número de ciclones, com os mais intensos preferindo épocas de La Niña, resultado encontrado em PEZZA (2003). É constatado, então, o impacto da climatologia de ocorrência e intensidade de ciclones no campo de ondas na Bacia de Campos. Em PDO é observado o mesmo padrão, com a correlação negativa em casos de ciclones bem expressiva, vista na figura 7.22(c).

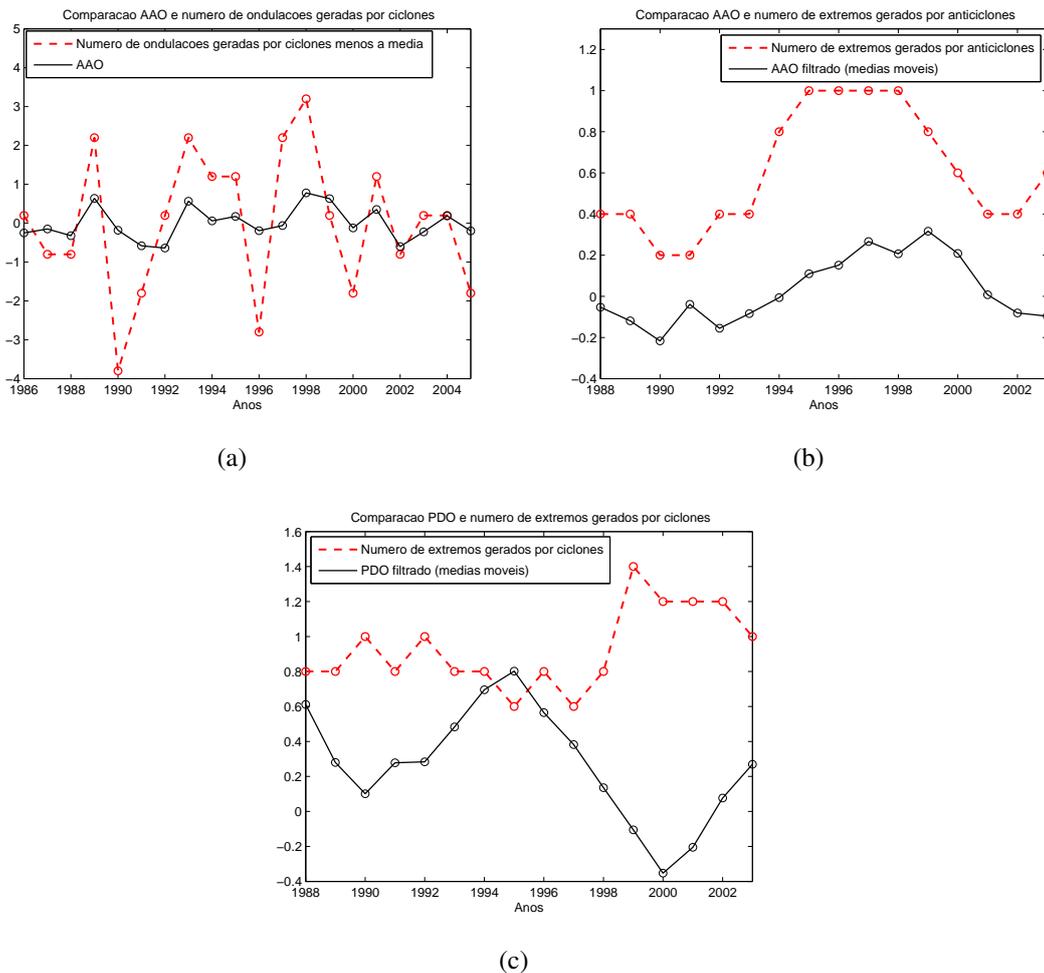


Figura 7.22: Comparação entre os índices e as séries. (a) Relação entre AAO e o número de ondulações iid geradas por ciclones. (b) Relação entre AAO e a frequência de ondas extremas geradas por ciclones. (c) Relação entre PDO e a ocorrência de extremos de onda geradas por ciclones.

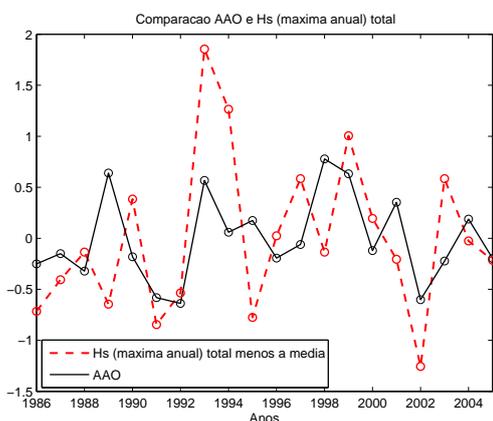
A tabela 7.14 apresenta a correlação entre os índices e as série dos vinte máximos anuais de altura significativa. No caso geral, apenas AAO se destaca (vide figura 7.23(b)), com fase positiva aumentando a energia das ondas máximas que atingem o Rio de Janeiro. Olhando os casos associados a ciclones observa-se a pequena relação negativa de MEI e principalmente PDO. Nos eventos gerados por anticiclones a correlação é positiva e pequena para os três índices, sendo um pouco maior em AAO.

Das investigações feitas até aqui é possível perceber que a Oscilação Antártica é o fenômeno meteorológico de baixa frequência com maior impacto nos extremos de onda na Baía de Campos. Esse é responsável pelo aumento da ocorrência e das alturas de ondulações geradas por ciclones e anticiclones. Chama-se atenção à grande correlação entre o número geral de tempestades geradas por ciclones e principalmente dos casos extremos associados a anticiclones, fazendo com que H_s também seja superior. Pode-se

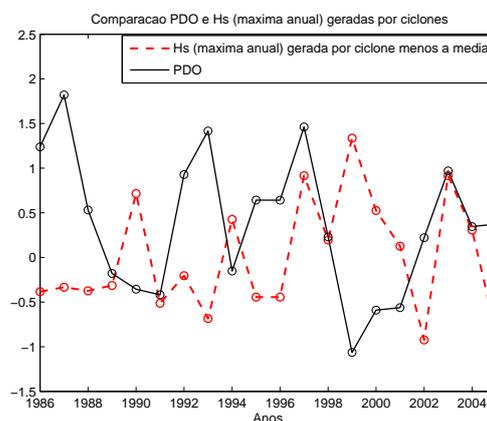
concluir que na fase positiva da AAO há maior frequência de ondulações de SW, com os extremos de SE associados a anticiclones ainda mais intensos. Outro ponto que merece destaque é a forte correlação negativa entre eventos extremos gerados por ciclones e a PDO, aparecendo também em Hs máximo da tabela 7.14. Pode-se esperar, então, aumento na ocorrência e energia das ondas de SW geradas por esses sistemas durante a fase fria da Oscilação Decadal do Pacífico. Esse fato merece atenção pois, como foi visto ao longo desse capítulo, os ciclones são responsáveis pelas principais ressacas que atingem o Rio de Janeiro.

Tabela 7.14: Correlação entre os índices e as alturas significativas máximas por ano.

correlação	mHs	cmHs	amHs
MEI	0,0216	-0,1521	0,2150
PDO	0,0041	-0,3156	0,1793
AAO	0,4322	0,2927	0,3682



(a)



(b)

Figura 7.23: Comparação entre os índices e as máximas alturas significativas anuais. (a) Máximo Hs geral e AAO. (b) Caso relacionado a ciclone e PDO.

Capítulo 8

Análise de Extremos - Ciclones e Anticiclones

Neste capítulo final do trabalho é feita a análise dos extremos das ondas geradas por sistemas meteorológicos específicos. A partir do capítulo anterior, as séries da bóia (DB1) e do WAVEWATCH (PONTO2 (38°W/23°S) - 1986 a 2005, WW3/2/8605) são divididas em ondulações formadas por ciclones e anticiclones. A mesma metodologia do capítulo 6 é aplicada, utilizando a técnica POT e o passo-a-passo proposto em 6.3. O método para o cálculo dos parâmetros de forma e escala da GPD fixado é o MOM. Essa escolha se deve à unanimidade nos casos aplicados, em que o MOM se mostrou semelhante ou superior aos outros estimadores. Problema adicional, relacionado ao número de pontos para o ajuste da GPD, surge ao dividir séries pequenas em dois sistemas meteorológicos diferentes, diminuindo ainda mais essa quantidade, o qual é discutido a seguir.

8.1 Extremos de onda gerados por ciclones

8.1.1 Registrados pela bóia

Os eventos iid registrados pela bóia apresentaram 32 casos, do total de 42, gerados por ciclones. A figura 8.1 expõe: o número de pontos acima do limiar em função de u , a série em ordem crescente e o MEP. Na busca pelo limiar ótimo é possível notar a proximidade de 8.1 com os respectivos gráficos da seção 6.4 de estudo geral dos extremos da bóia. A análise das três figuras de 8.1 apontam para o mesmo limiar utilizado na seção citada, igual a 4,57 m, onde o MEP pode ser aproximado por uma reta.

Essa aparente “coincidência” se deve ao fato das ondas geradas por anticiclones desenvolverem alturas até 4,50 m, abaixo do limiar 4,57 m. Na discussão da seção 6.4, a cauda da distribuição apresentou somente casos relacionados a ciclones, e a presença das

ondulações de anticiclones não alterou a decisão de u em relação ao presente caso.

Pensando em valores extremos com períodos de retorno até 100 anos, pode-se concluir que os resultados são praticamente¹ os mesmos em ambos os procedimentos, tanto no caso geral quanto no caso de geração por ciclones. As tabelas e gráficos da subseção 6.4.5 podem ser utilizados também como resultados desta etapa. Espera-se então, que os valores de retorno sejam gerados por ciclones sobre o Atlântico Sul.

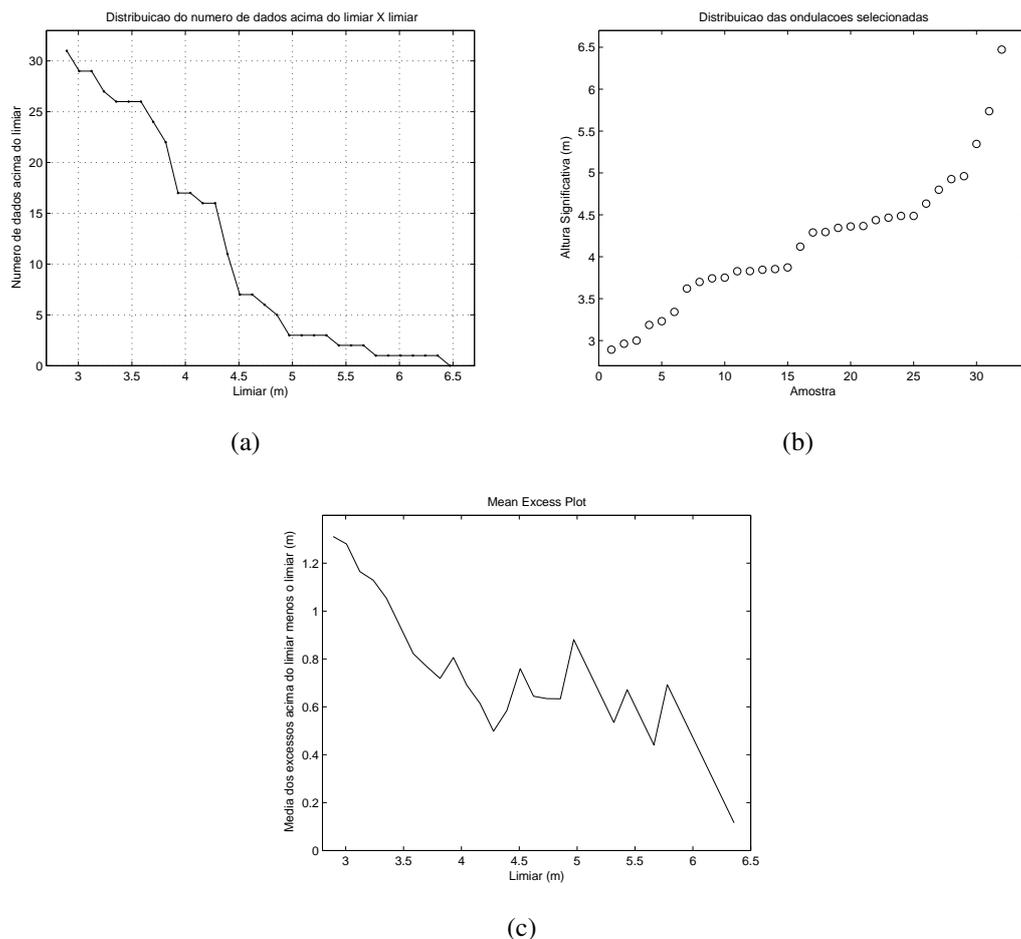


Figura 8.1: Análise e determinação do limiar. (a) Número de excessos acima do limiar em função de u , (b) Extremos em ordem crescente, (c) Média dos excessos acima do limiar.

8.1.2 Resultado da simulação do WAVEWATCH

Dos 267 eventos iid resultantes da simulação no PONTO2, 157 são gerados por ciclones. A figura 8.2 apresenta a quantidade de pontos acima de cada limiar. É possível perceber uma grande mudança na curva a partir de 3,9 m e um novo decaimento que pa-

¹A retirada dos poucos eventos de anticiclones causa uma pequena diminuição de n e conseqüentemente n_e , provocando uma ligeira mudança em p . Apesar da variação, foi verificado que os vr finais apresentaram diferenças insignificantes comparando com o caso geral.

rece ser constante acima de 4,3 m. Essas duas regiões têm percentual em torno de 10% na figura 8.2(b), o que pode indicar boa adequação para a escolha de u .

Nos gráficos de 8.3 é observado claramente o início da cauda da distribuição. Em 8.3(a) o ponto com ordenada 4,25 m está em destaque e os valores acima dele apresentam comportamento semelhante. Destaca-se o salto entre o ponto citado e o anterior, com $H_s=3,98$ m. A consequência do fato ocorre no MEP, que mostra grande elevação dos valores em torno de 3,6 e 4,2 m, região que deve ser evitada para estipular o limiar. Ao aproximar a imagem do MEP, chega-se ao intervalo entre 4,23 e 4,32 m como boa escolha para u , representando o fim da forte descontinuidade citada e início do que pode ser ajustado como uma reta.

A problemática entre 3,6 e 4,2 m também é vista nos gráficos de 8.4 e 8.5. Na figura 8.4(a), a relativa estabilidade procurada ocorre entre 4,2 e 4,55 m. Valores superiores a 4,6 m apresentam também grande variância, identificada pela divergência das curvas do intervalo de confiança e os parâmetros de forma e escala. Foi verificado que a variância acima de 4 m é menor entre 4,23 e 4,25 m.

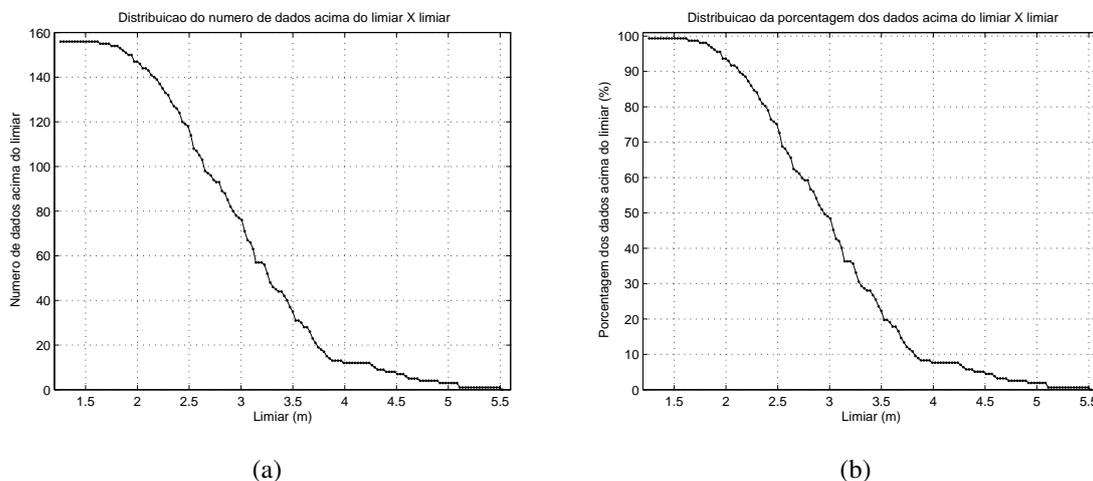


Figura 8.2: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

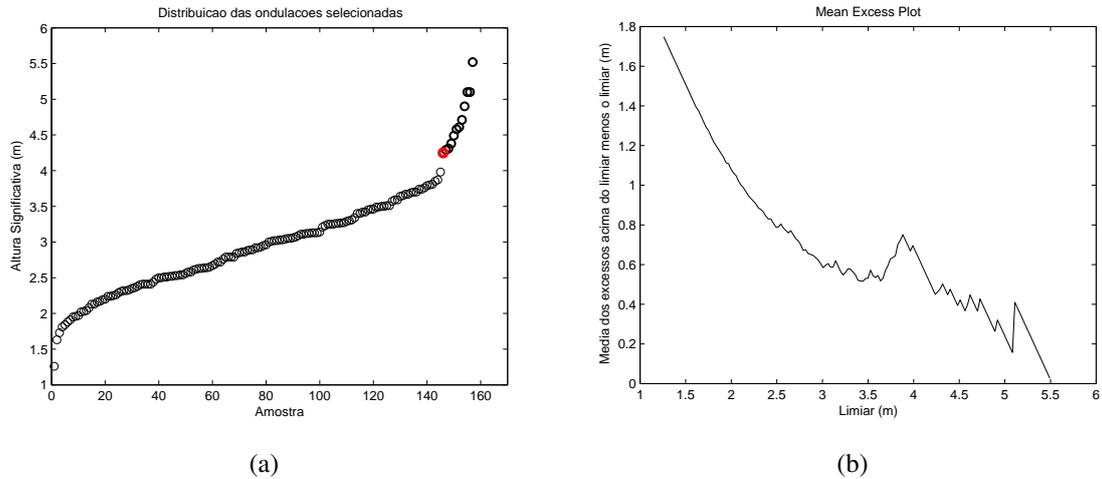


Figura 8.3: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por ciclones. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.

Resumindo a sequência citada, o primeiro ponto do que parece ser a cauda tem valor 4,25 m. A escolha de u deve ser inferior a esse para incluí-lo no ajuste. Pensado na intersecção dos intervalos selecionados do MEP, na estabilidade dos parâmetros da GPD e na menor variância, chega-se aos valores entre 4,23 e 4,25 m como faixa que deve conter u . A figura 8.5 confirma a boa escolha da região, com valores de retorno coerentes com a realidade do clima de ondas na Bacia de Campos. Foi observado também a correlação entre empírico e modelado, que apresenta resultados semelhantes dentro desse intervalo, e não acrescentará muito na escolha final de u .

Pensando no mínimo valor entre 4,23 e 4,25 m que apresente menor variância e se adeque da melhor maneira possível à linearidade do MEP e estabilidade do parâmetro de forma, chega-se a $u = 4,237$ m. As características da cauda da distribuição e ajuste da GPD são mostradas na tabela 8.1. A $\%N_u$ apresentou valor menor do que o indicado entre 10 e 15%, com apenas doze pontos para ajuste da GPD, entretanto diminuir o limiar afetaria os critérios de aplicação da POT. A correlação é boa e a variância final pequena, assegurando o sucesso na escolha de u .

É interessante a comparação das tabelas 8.1 e 6.8, da análise de extremos geral. O limiar agora é 4,237 m enquanto anteriormente foi fixado 3,775 m, ou seja, a ausência de ondulações geradas por anticiclones aumentou o valor de u . É visto que N_u no caso geral é maior e a média dos pontos acima do limiar menor, apontando a influência dos anticiclones na cauda da distribuição. Consequência disso ocorre em ξ e β , agora um pouco maior e menor respectivamente, mudando sutilmente a forma da GPD. A correlação do presente ajuste somente a ciclones é superior ao caso geral, resultado da evolução coerente entre os doze pontos e da cauda bem comportada, consequência das ondulações

agora com processos de geração muito semelhantes.

Tabela 8.1: Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (*a.l.*) fixado, gerados por ciclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{<i>a.l.</i>} (m)	d.p. _{<i>a.l.</i>} (m)	método	ξ	β	corr
4,237	12	7,64	4,69	0,40	MOM	0,1458 (-0,0133; 0,3049)	0,5152 (0,3991; 0,6313)	0,958

A figura 8.6 apresenta o ótimo ajuste da GPD. Todos os gráficos mostram os pontos próximos às curvas e retas. Comparando os resultados do capítulo 6, relativo aos gráficos de 6.9 e 6.29, com 8.6, é possível concluir que **a separação dos extremos gerados por sistemas meteorológicos diferenciados resulta em grande melhora no ajuste e aplicação da POT.**

Observando 8.6(c) e 8.6(d), pode-se dizer que não há tendência clara de superestimação ou subestimação entre empírico e modelado. Os pontos continuam próximos à reta em 8.6(d) mesmo quando se caminha para maiores valores de H_s . A boa coerência assegura maior confiabilidade na estimativa dos extremos, presente na tabela 8.2. Nela é possível notar que as ondas significativas máximas não ultrapassam muito os 7 m em 100 anos. Os extremos associados aos períodos de retorno em geral possuem valores muito abaixo da análise da bóia, entretanto representam bem a série do WAVEWATCH, que possui máximo gerado por ciclones com $H_s=5,52$ m, enquanto a GPD fornece v_r para vinte anos igual a 5,78 m.

A figura 8.7 final possui os extremos de onda para os períodos de retorno. Nota-se a baixa variância ao ver a proximidade do intervalo de confiança à curva principal. É possível perceber a inclinação e a taxa de crescimento de v_r com os anos relativamente grande, mesmo em p_r mais altos. Comparando com a análise geral da seção 6.6, os extremos gerados por ciclones são ligeiramente menores. Para $p_r = 100$ anos por exemplo (onde a diferença é máxima), v_r associado a ciclones é 7,123 m enquanto no geral é 7,884 m.

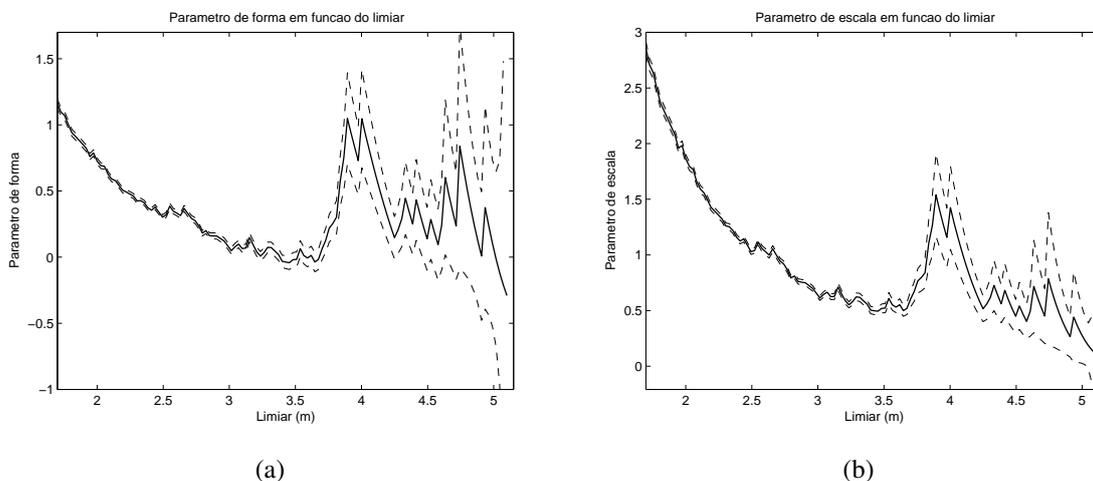


Figura 8.4: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005, gerados por ciclones. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

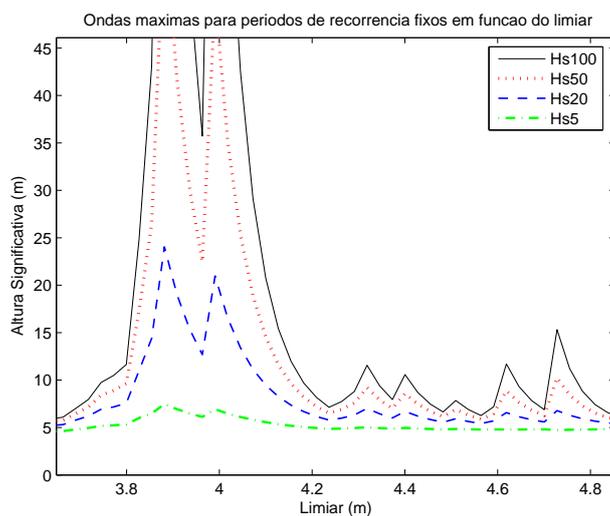


Figura 8.5: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005, para ciclones.

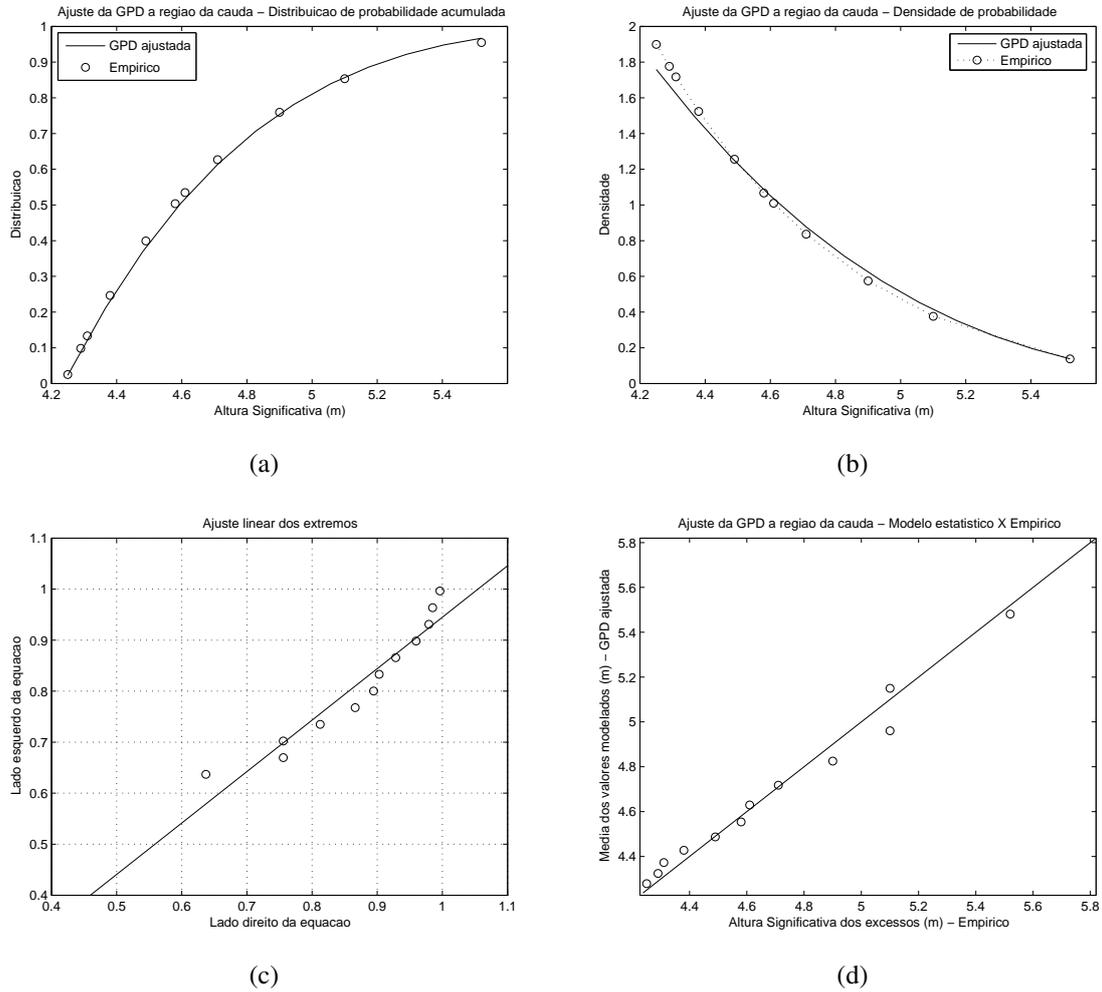


Figura 8.6: Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}W/23^{\circ}S$ - 1986 a 2005, gerados por ciclones. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente à equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,237 m.

Tabela 8.2: Valores extremos r_v para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}W/23^{\circ}S$ - 1986 a 2005, gerados por ciclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5 *	20	50	100
Valor extremo (m)	4,851 (4,844; 4,858)	5,780 (5,748; 5,811)	6,505 (6,434; 6,577)	7,123 (6,991; 7,254)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que a série a que se refere a tabela possui 20 anos de duração e não teria sentido $pr = 5$.

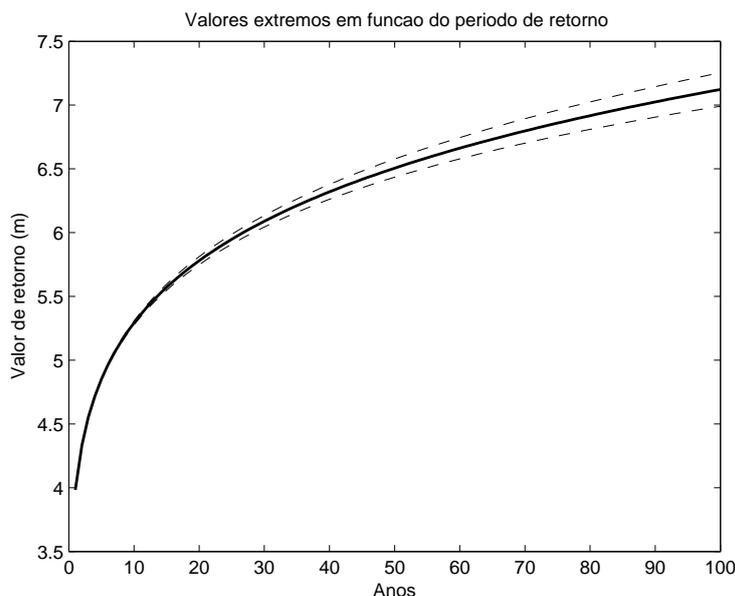


Figura 8.7: Valores extremos gerados por ciclones para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto $38^{\circ}\text{W}/23^{\circ}\text{S}$ - 1986 a 2005.

8.2 Extremos de ondas gerados por anticiclones

8.2.1 Registrados pela bóia

Inicialmente foram selecionados os extremos iid da bóia gerados por anticiclones. De acordo com o capítulo 7, apenas dez casos são associados a esses sistemas, o que já parece algo impossível para aplicação da POT. Para melhor investigação é construída a figura 8.8. Nos gráficos de 8.8(a) e 8.8(b) não é verificada nenhuma possibilidade inicial de determinação de uma cauda. O MEP se apresenta completamente diferente das análises típicas encontradas na teoria e seções anteriores. Nele é possível perceber somente uma quebra na continuidade da curva entre 3,1 e 3,4 m, entretanto o número de pontos acima desse intervalo é igual a cinco. Pensando ainda nessa região, o MEP da possível cauda está bem longe de se aproximar a uma reta, mostrando uma nítida curvatura entre 3,4 e 4,3 m.

Foi verificado que as variâncias dos estimadores possuem valores elevados, acima de 0,2, enquanto nos casos anteriores de aplicação da POT as variâncias rondaram em torno de 0,05, como visto no capítulo 6. Essa característica indica que a análise de extremos resultaria em um intervalo de confiança de amplitude tão grande, mesmo em *pr* pequenos, que os resultados não teriam sentido algum.

Em 8.8 é possível verificar que a série não concorda com o Resultado de Pickands, e

vai contra os critérios de aplicação da POT descritos em EMBRECHTS *et al.* (1997) e BELITSKY e MOREIRA (2007). A grande variância descarta de vez a possibilidade de aplicação da técnica a esses dados, consequência do número muito pequeno de pontos.

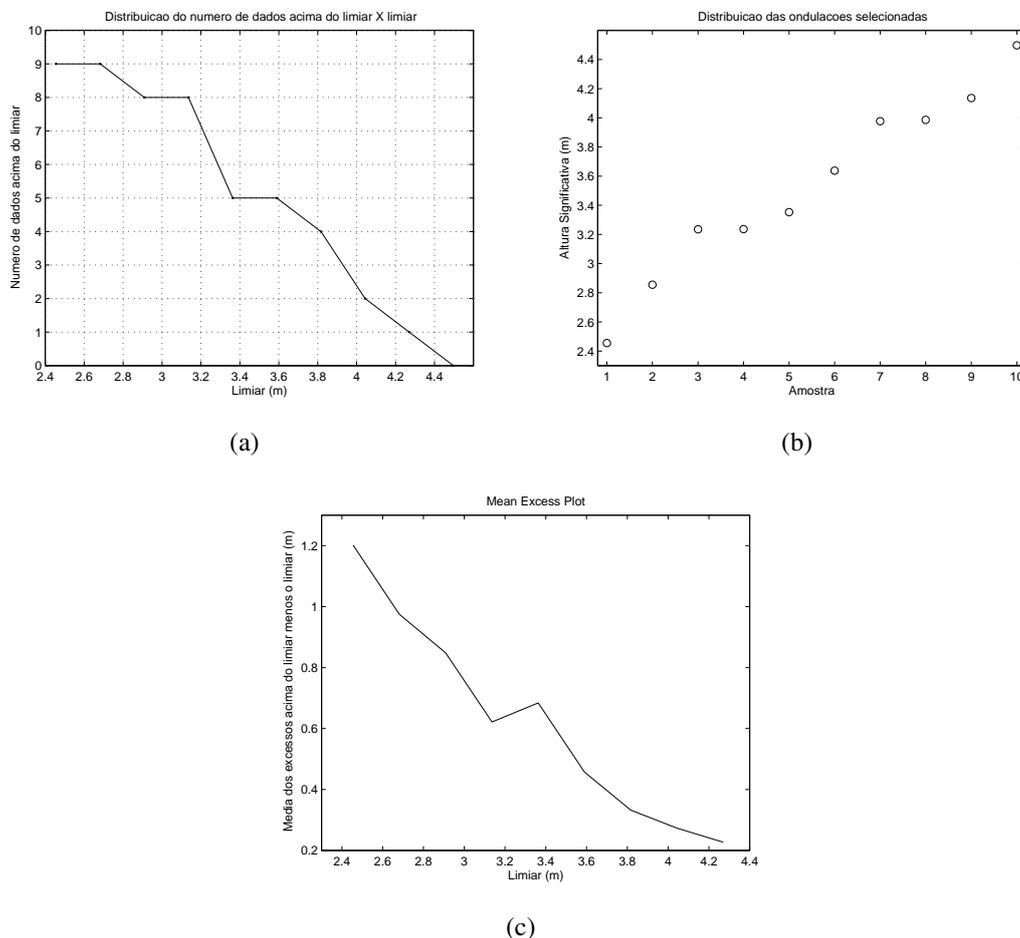


Figura 8.8: Análise da determinação do limiar. (a) Número de excessos acima do limiar em função de u , (b) Extremos em ordem crescente e (c) Média dos excessos acima do limiar.

8.2.2 Resultado da simulação do WAVEWATCH

A metodologia é aplicada aos 105 eventos iid resultantes da simulação do modelo gerados por anticiclones. A figura 8.9 apresenta o número e porcentagem dos excessos acima do limiar variável. Não é perceptível claramente nenhuma mudança brusca no comportamento, apenas uma leve insinuação do que pode ser uma cauda acima de u em torno de 3,5 m. Valores percentuais entre 10 e 15% representam limiares entre 3,6 e 4 m. Em 8.10(a) novamente não fica claro o início da cauda, entretanto, aproximando bastante o gráfico é possível perceber certa constância e linearidade no crescimento acima do ponto 3,63 m em destaque. Os casos 10 e 11 analisados no capítulo 7 aparecem com

bastante evidência, ambos distantes dos demais pontos. A característica anômala e a superestimação verificada nas análises meteorológicas não justificam a retirada desses na aplicação da GPD², entretanto naturalmente é dada menor prioridade ao ajuste dos dois, visto que o número de eventos na cauda é muito maior.

A figura 8.10(b) exige bastante atenção. Somente este gráfico foi construído excluindo os casos 10 e 11, devido ao grande salto que a distância entre as alturas de onda proporcionam, o que prejudicaria muito a busca por linearidade. Observando então o MEP, nota-se um padrão de decrescimento côncavo terminando em $H_s=3,2$ m, contudo a região entre esse valor e 3,6 m ainda apresenta curvatura suave. O primeiro dente do que parece uma serra, a partir de onde é possível aproximar uma reta, possui H_s entre 3,62 e 3,67 m, o qual precisa ser melhor investigado.

Na figura 8.11(a) é possível ver a pequena perda relativa de estabilidade em 3,5 m, sendo mais problemático em alturas acima de 4 m. A variância aumenta bastante acima de 3,6 m, distanciando as curvas do intervalo de confiança dos parâmetros de forma e escala. Foi verificado também a queda da correlação para H_s superior a esse valor. Em 8.12 nota-se poucas mudanças nos extremos para u entre 3,1 e 4,4 m. Essa característica assegura que a precisão do limiar e rigor na escolha não precisam ser tão grandes neste caso, já que poucos saltos são encontrados no gráfico.

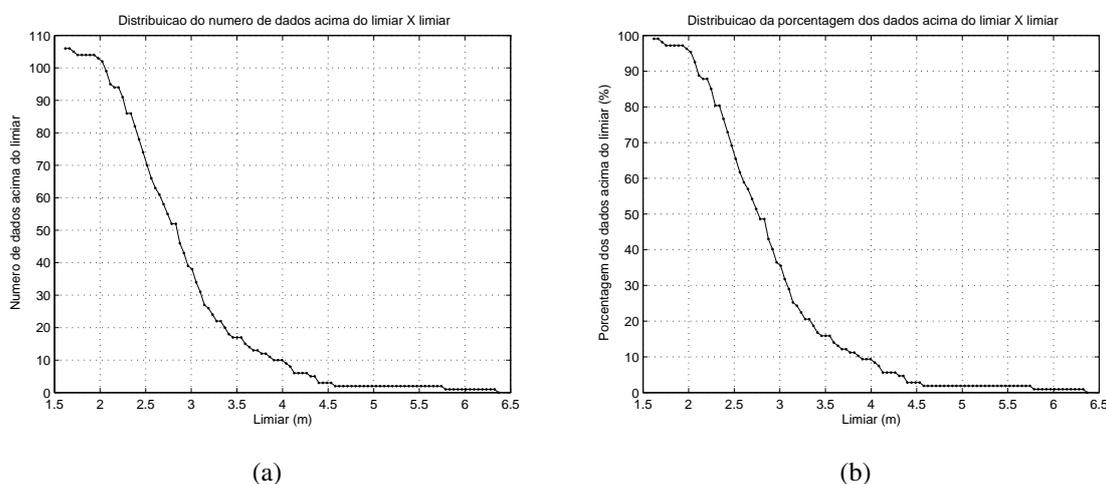


Figura 8.9: Quantificação da distribuição dos excessos em função do limiar para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. (a) Número de excessos acima do limiar versus limiar, (b) Porcentagem de excessos acima do limiar versus limiar.

²Pois foi comprovada uma configuração sinótica diferenciada que forneceu muito mais energia à pista de geração das ondas.

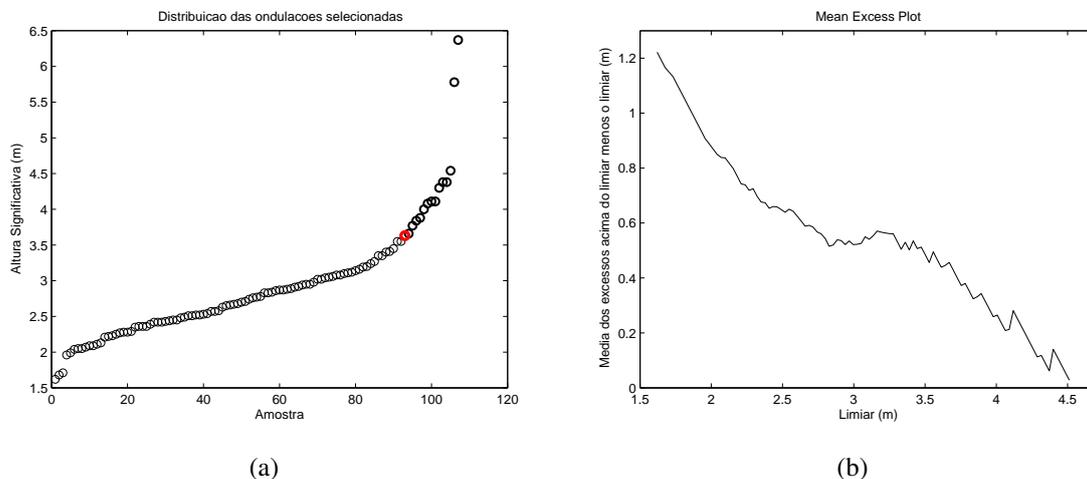


Figura 8.10: Gráficos para auxílio da determinação do limiar para os resultados do WA-VEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticlones. (a) Distribuição em ordem crescente da série, (b) Média dos excessos acima do limiar.

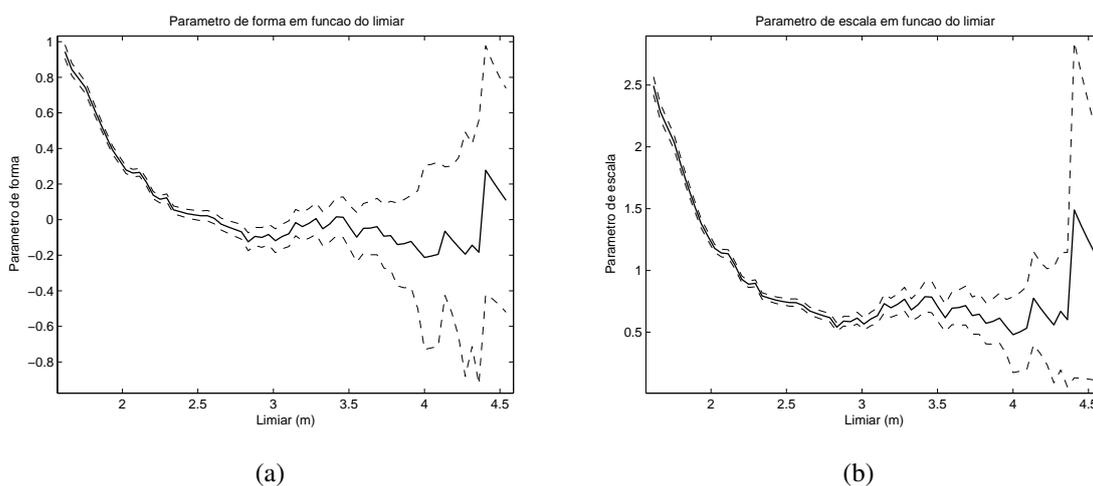


Figura 8.11: Parâmetros da GPD em função do limiar utilizando o estimador MOM para os resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticlones. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança de 95%. (a) Parâmetro de forma ξ , (b) Parâmetro de escala β .

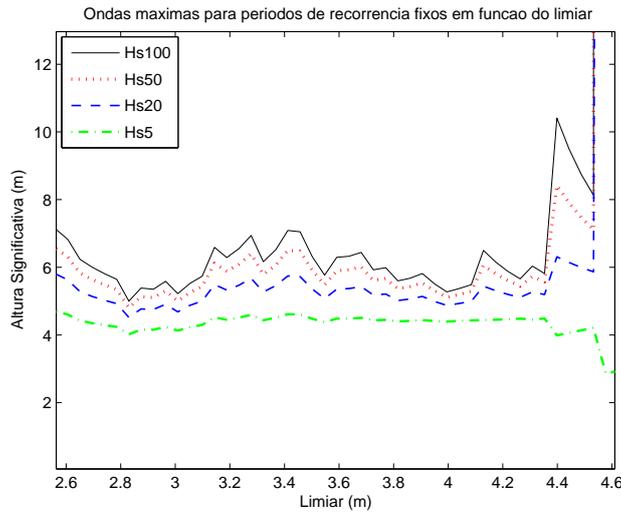


Figura 8.12: Valores extremos para períodos de retorno fixos (5, 20, 50 e 100 anos) em função do limiar. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, para anticiclones.

Resumindo as informações, procura-se o menor valor que atenda a todos os critérios. O primeiro ponto do que parece ser a cauda em 8.10(a) possui $H_s=3,63$ m, portanto u não deve superar essa altura. O intervalo sugerido para o MEP atende ao requisito. Pensando na menor variância e maior correlação entre empírico e modelado chega-se ao limiar igual a 3,620 m. Esse valor é bastante inferior ao caso dos ciclones, em que $u=4,237$ m, o que é coerente ao fato das ondas geradas por anticiclones em geral serem menores.

A tabela 8.3 mostra as características da cauda da distribuição e ajuste da GPD. O número de pontos é igual a 15, representando $\%N_u=14,02$, dentro do intervalo entre 10 e 15% indicado na metodologia. O desvio padrão é maior que o mesmo para ciclones, explicado principalmente pelos dois maiores extremos bem anômalos, o que faz também com que a correlação vista na tabela seja menor. O parâmetro ξ é negativo e menor que na seção relacionada a ciclones, enquanto β é maior. Por conta disso os extremos modelados pela POT terão crescimento mais suave ao aumentar pr , e as ondas quinquentenária e centenária não mostrarão diferenças tão grandes como nos outros casos (análise geral e devido a ciclones).

Tabela 8.3: Ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH (ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005) acima do limiar (*a.l.*) fixado, gerados por anticiclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95% para os parâmetros ξ e β .

u (m)	N_u	$\%N_u$	média _{a.l.} (m)	d.p. _{a.l.} (m)	método	ξ	β	corr
3,620	15	14,02	4,32	0,77	MOM	-0,0832 (-0,2345; 0,0681)	0,6436 (0,5146; 0,7726)	0,831

Na figura 8.13 é observada a qualidade da GPD calculada. Nota-se que a busca pelo melhor ajuste aos dois pontos de maiores alturas fez o ajuste divergir em alguns casos de H_s mais baixos. Em 8.13(d) é visto boa coerência até 4,4 m. Em torno de 4,5 m certos pontos se distanciam da reta, induzindo uma superestimação do modelo estatístico em relação ao empírico. Acima de 5,5 m os dois eventos mudam esse quadro, com grandes alturas de onda superando a estimativa da GPD.

A figura 8.14 apresenta os extremos em função do período de retorno. Verifica-se o crescimento suave de vr resultante dos valores de ξ e β comentados anteriormente. Novamente as curvas do intervalo de confiança caminham próximas, consequência da baixa variância dos parâmetros. Esta seção apresenta as menores alturas dos extremos, com onda centenária abaixo de 6 m. Na tabela 8.4 podem ser vistos os valores absolutos calculados. Comparando vr relativo a $pr=20$ anos com o máximo da série, inicialmente pode parecer que as diferenças são grandes, com o primeiro igual a 5,181 m enquanto o segundo é 6,37 m. Desconsiderando as duas alturas máximas, essas diferenças caem bastante. Em verdade o caso 10 ($H_s=6,37$ m) é tão superior aos outros extremos e tão anômalo que é maior inclusive que a onda centenária calculada pela GPD, igual a 5,954 m. Conclui-se que, de modo geral, a estimativa dos extremos foi bem trabalhada pela POT, e as duas excessões de maiores alturas devem ser estudadas separadamente. CANDELLA (1997) comenta sobre grandes ondas de sudeste que atingem o Rio de Janeiro com periodicidade aproximada de dez anos³, penetrando sobre a Baía de Guanabara, causando grandes prejuízos. O anexo C exemplifica um desses casos.

³Tal frequência tão baixa pode estar ligada à fenômenos meteorológicos de baixa frequência, explicados na subseção 7.3.5.

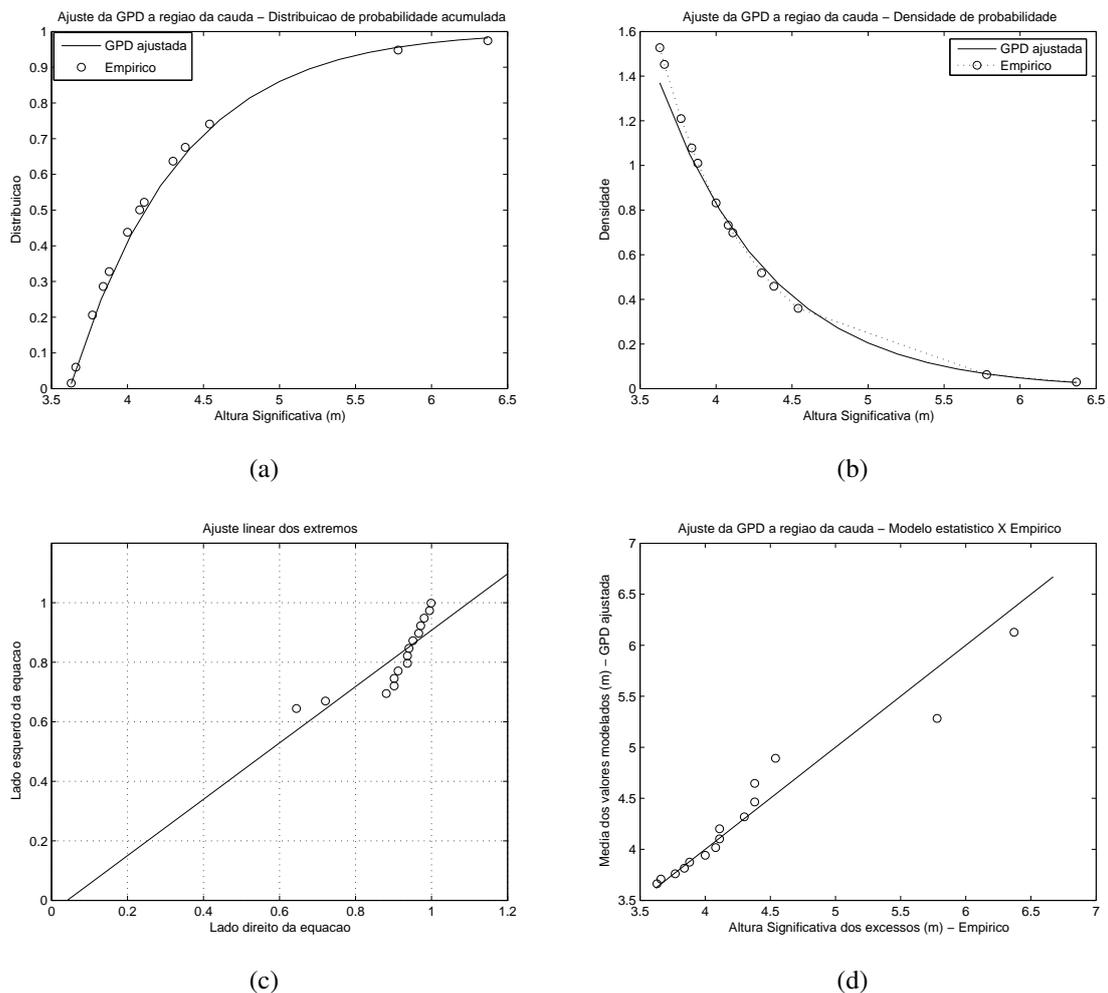


Figura 8.13: Apresentação do ajuste da GPD aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. Comparação GPD versus “empírico”, região da cauda. (a) Distribuição de probabilidade acumulada, (b) Densidade de probabilidade, (c) Plotagem do ajuste referente a equação 6.8, (d) QQplot para o limiar 4,237 m.

Tabela 8.4: Valores extremos r_v para aplicação da POT aos resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005, gerados por anticiclones. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5 *	20	50	100
Valor extremo (m)	4,426 (4,415; 4,436)	5,181 (5,146; 5,215)	5,634 (5,566; 5,701)	5,954 (5,843; 6,066)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que a série a que se refere a tabela possui 20 anos de duração, e não teria sentido $pr = 5$.

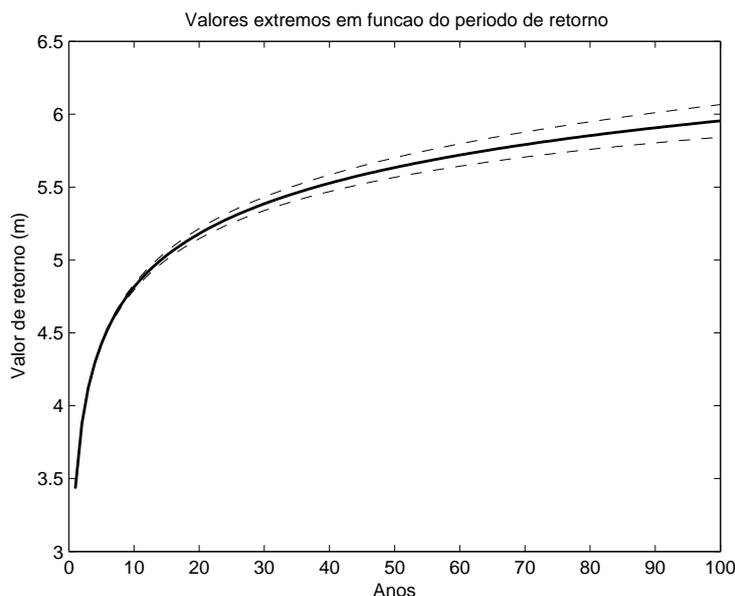


Figura 8.14: Valores extremos gerados por anticiclones para períodos de retorno até 100 anos. Resultados do WAVEWATCH no ponto 38°W/23°S - 1986 a 2005.

8.3 Comentários e discussões

Foi possível perceber os processos de escolha do limiar no presente capítulo apresentando maior clareza e evidência na determinação da cauda, ao comparar com os casos gerais. Os gráficos de valores de retorno em função de u (8.5 e 8.12) mostram, em grande parte, maior estabilidade e menor número de saltos. Essa característica favorece a procura por u ótimo, inclusive fazendo com que a escolha seja menos suscetível a erros, que geram grandes variações nos extremos finais. Observando os resultados dos cálculos da POT, é possível notar o melhor ajuste feito nesse trabalho na figura 8.6, onde são utilizados somente eventos de ciclones. O mesmo caso relacionado a anticiclones também apresentou uma cauda muito bem comportada, e o ajuste só não foi tão bom devido aos eventos 10 e 11 com grandes alturas de onda. É possível concluir que a divisão dos extremos em sistemas meteorológicos diferentes favorece muito a aplicação da POT quando o número de pontos é grande, como nas séries do WAVEWATCH. A grande vantagem citada não se aplica aos registros da bóia, em que a pouca quantidade de eventos impossibilitou a aplicação da técnica a casos de anticiclones.

Para obter uma visão geral de todas as análises de extremos realizadas até aqui foi desenvolvida a figura 8.15. Nela estão os extremos resultantes da bóia (seção 6.4, os quais são os mesmos referentes a ciclones), do WAVEWATCH no caso geral (seção 6.6), gerados por ciclones (seção 8.1) e anticiclones (seção 8.2). Inicialmente percebe-se a grande

diferença dos extremos do ondógrafo em relação aos demais, mostrando que naturalmente a subestimação do modelo de ondas tem consequências na aplicação da POT. A forma das quatro curvas é muito semelhante, com “ww3anticiclones” apresentando taxa de crescimento um pouco menor. Com essa constatação pode-se dizer que o WAVEWATCH conseguiu captar a consequência do menor gradiente de pressão dos anticiclones, comentado na subseção 2.5.2.

A tabela 8.5 expõe todos os resultados finais em conjunto. Na prática esses valores absolutos devem ser interpretados com cautela. Para o caso da bóia, como os eventos foram medidos (com pequena incerteza) e a análise de extremos foi feita junto de metodologia criteriosa, é possível confiar nos valores finais, considerando, é claro, o intervalo de confiança. Na série do WAVEWATCH foi visto que a separação em sistemas meteorológicos distintos diminui os valores de retorno. É possível verificar essa afirmação notando na figura 8.15 as curvas dos ciclones e anticiclones abaixo do caso geral. Conforme abordado na subseção 2.5.2, não existe um terceiro fenômeno que gere tipicamente ondas superiores aos dois, indicando que a alteração da cauda da distribuição com a separação mudou o ajuste da GPD. Em parte essa característica é resultado também da maior subestimação das ondulações dos ciclones em comparação a todos os casos.

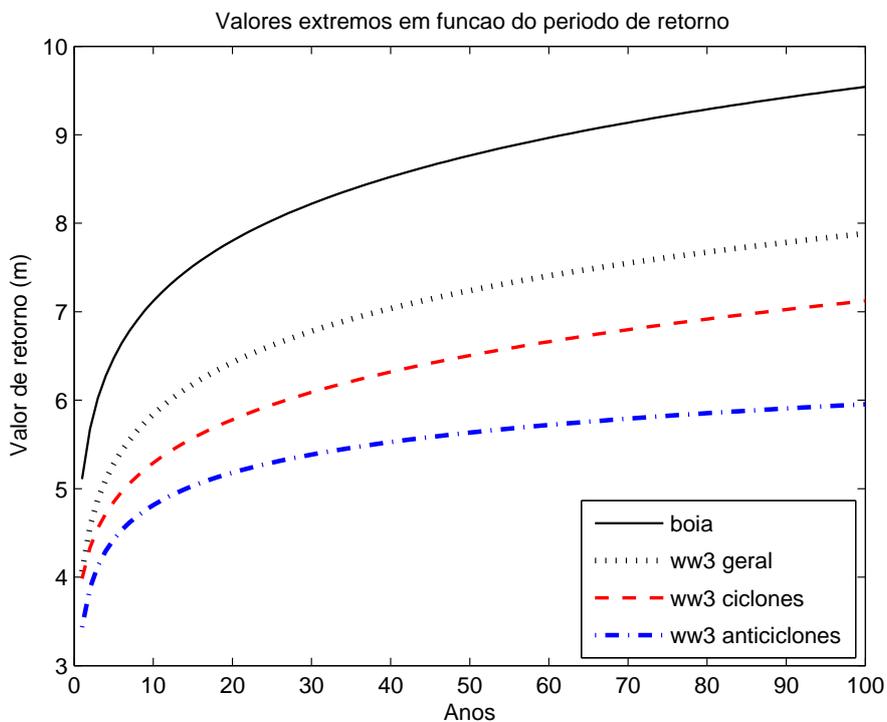


Figura 8.15: Resultados finais. Valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. Apresentação conjunta dos resultados.

Tabela 8.5: Resultados finais. Valores extremos r_v da aplicação da POT. Apresentação conjunta dos resultados. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos) Valor extremo (m)	5 *	20	50	100
Bóia - 1991 a 1995	6,47 (6,42; 6,53)	7,80 (7,57; 8,04)	8,77 (8,11; 9,42)	9,54 (8,03; 11,06)
WW3 geral - 1986 a 2005	5,279 (5,265; 5,293)	6,426 (6,390; 6,462)	7,239 (7,178; 7,299)	7,884 (7,795; 7,973)
WW3 ciclones	4.851 (4.844; 4.858)	5.780 (5.748; 5.811)	6.505 (6.434; 6.577)	7.123 (6.991; 7.254)
WW3 anticiclones	4.426 (4.415; 4.436)	5.181 (5.146; 5.215)	5.634 (5.566; 5.701)	5.954 (5.843; 6.066)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que as séries do WAVEWATCH de tabela têm 20 anos de duração e não teria sentido $pr = 5$.

Procedimento complementar - correção dos extremos com o viés do modelo

Pensando nessa questão, resume-se a discussão sobre os extremos do WAVEWATCH em dois pontos. O primeiro é que o modelo conseguiu capturar a evolução dos eventos e fazer uma boa estimativa dos valores de retorno. O segundo é que os valores absolutos finais respondem à forte subestimação da energia das ondas nos casos mais intensos, o que é um grande problema para a aplicação prática. Pensando em aproveitar os benefícios do primeiro ponto e resolver os estraves do segundo, foi estudada as diferenças médias entre o ondógrafo e o modelo para casos de ciclones e anticiclones, variando também o limiar. Os resultados encontram-se na figura 8.16. Nela é possível notar o grande viés da simulação para ciclones, superior aos eventos de anticiclones. Quanto mais severos os sistemas e a ondulação gerada, pior é a qualidade da modelagem, assunto bastante comentado no capítulo 5.

A idéia final consiste em normalizar as curvas do gráfico de 8.15, do modelo de ondas, com o viés. A tabela 8.6 mostra as diferenças médias para todos os eventos e também para os extremos. Para os extremos de ciclones de interesse, o valor do limiar u da subseção 8.1.2 fornece, pela figura 8.16, viés médio de 2,214 m⁴; o qual foi somado aos valores de retorno do WAVEWATCH. O mesmo procedimento é pensado para os anticiclones, entretando não foi realizada uma análise de extremos de tais sistemas para as medições da bóia. Por consequência, não é possível estipular u para calcular o viés médio. Como o número de anticiclones encontrado também foi pequeno, decidiu-se utilizar as diferenças médias de todos os poucos casos encontrados, resultando em 1,054 m, também somado

⁴Correspondente ao viés médio do WAVEWATCH relacionado aos sete ciclones registrados pela bóia

aos valores de retorno. A figura 8.17 e a tabela 8.7 mostram os resultados corrigidos com as diferenças da tabela 8.6.

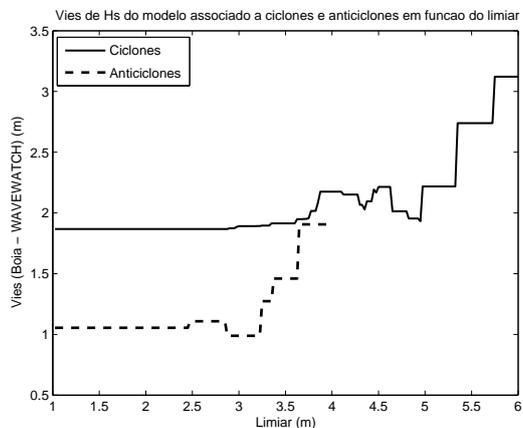


Figura 8.16: Diferença bóia - WAVEWATCH para Hs em função do limiar, em casos de ciclones e anticiclones.

Tabela 8.6: Diferença (bóia - WAVEWATCH) entre as alturas significativas geradas por ciclones e anticiclones. Como a POT não foi aplicada à série do ondógrafo em anticiclones, não é possível definir os extremos nessa situação.

Viés médio de Hs (m)	Todos os casos	Extremos ($H_s > u$)
Ciclones	1,868	2,214
Anticiclones	1,054	—

Outra possibilidade foi pensada inicialmente: corrigir o campo de ventos da reanálise com valores de estações meteorológicas costeiras. Esse procedimento é bem explorado pela comunidade científica que trabalha com modelagem. SWAIL e COX (2000), citado por ROCHA *et al.* (2004), reduziram o bias em seu experimento em 50% utilizando a técnica, mas para os objetivos e metodologias do presente trabalho exige cautela. Conforme discutido na subseção 2.5.3, as reanálises do NCEP/NCAR passam por rigoroso controle dos dados medidos que alimentam o modelo e levam em consideração o maior número de registros confiáveis ao redor do planeta. Infelizmente o Atlântico Sul possui poucos dados observados (INNOCENTINI e CAETANO NETO, 1996). Na tentativa de realizar esse trabalho procurou-se, com a ajuda da equipe do CENPES-PETROBRAS, alguns pontos sobre o litoral argentino que fornecessem informações adicionais. Poucos foram encontrados, em muitos casos com curta duração e de difícil aquisição.

Corrigir vinte anos de reanálise sobre todo o oceano a partir de algumas medições em regiões específicas, poderia piorar a qualidade dos dados ao invés de aproximar do vento real. Problema adicional surge pelo fato dos ventos nas estações sofrerem bastante

influência de fenômenos de menor escala, como micro e mesoescala. Exemplo disso são efeitos locais ligados à topografia, tempestades de cumulonimbus ou mesmo brisa. Os sistemas atmosféricos que são tratados nessa dissertação compreendem centenas de quilômetros sobre o oceano, os quais muitas vezes não atravessam sequer um ponto de medição, aumentando ainda mais o problema. Todas essas questões fizeram com que a idéia fosse deixada de lado por enquanto. ROCHA *et al.* (2004) confirmam essa impossibilidade e utilizam o vento da reanálise sem alterações, justificado pela falta de medições regulares no Atlântico Sul.

Diferentemente da previsão operacional, o objetivo da modelagem de ondas relacionada à análise de extremos não é unicamente aproximar a onda simulada da onda medida, e sim captar a evolução e inter-relações dos eventos raros das ondulações com muita energia. Naturalmente as duas questões, em parte, estão ligadas; pois resultados deficientes da modelagem interferem na cauda da distribuição de Hs. A diferença do caso da análise de extremos é que os ajustes e correções do vento, ou mesmo da física do modelo, podem melhorar a correlação entre as ondas medidas e simuladas e diminuir o EM; entretanto, estão sujeitas à pioras nas relações entre as alturas na cauda da distribuição, o que compromete a análise dos extremos e cálculos da POT. A aplicação das correções comentadas para o desenvolvimento de um *hindcast* longo pode ser problemático pois, como foi visto anteriormente, as fontes de erro são muito distintas.

Como exemplo, no capítulo 5 e na figura 8.16, a subestimação do WAVEWATCH é maior em eventos mais intensos, porém nos casos relacionados a anticiclones essa diferença é menor, inclusive com alguns casos de superestimação do modelo. Esse fato tem consequência na Dp simulada, já que pelo capítulo 7 foi verificado que os extremos de onda associados a anticiclones têm direção inferior a 170°. Pode-se perceber que a questão é complexa e exige muito cuidado. A aplicação de uma função de correção das ondas tomada a partir de um caso de ciclone, em que o modelo em geral subestima muito Hs, não pode ser aplicada a um extremo de anticiclones, onde foram encontradas algumas alturas de onda simuladas maiores que as respectivas medições. Tal procedimento poderia aumentar ainda mais a superestimação das ondas de sudeste.

Finalmente, a figura 8.17 apresenta a correção pelo viés da tabela 8.6. É possível notar a proximidade das curvas da bóia com “ww3ciclones”. As divergências são pequenas devido às diferenças sutis na forma. Os resultados do modelo para ciclones, vistos na tabela 8.7, se mostram dentro do intervalo de confiança dos valores de retorno do ondógrafo, comprovando a boa estimativa. Naturalmente os extremos gerados por anticiclones são os menores, com maior limitação no crescimento ao longo dos anos, respondendo à intensidade típica desse tipo de sistema meteorológico⁵.

⁵Com apenas duas excessões relacionadas aos casos 10 e 11 abordados no capítulo 7.

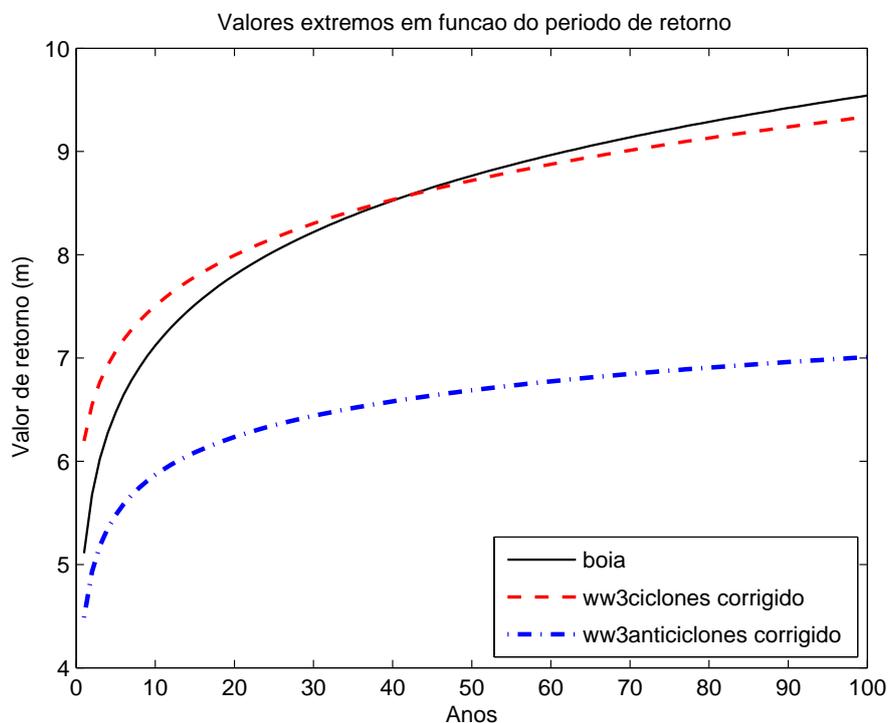


Figura 8.17: Valores extremos corrigidos para períodos de retorno até 100 anos. Apresentação conjunta dos resultados.

Tabela 8.7: Valores extremos r_v da aplicação da POT corrigidos, apresentação conjunta dos resultados. Entre parênteses o intervalo de confiança de 95%.

Período de retorno (anos)	5 *	20	50	100
Valor extremo (m)				
Bóia	6,47 (6,42; 6,53)	7,80 (7,57; 8,04)	8,77 (8,11; 9,42)	9,54 (8,03; 11,06)
WW3 ciclones	7,065 (7,058; 7,072)	7,994 (7,962; 8,025)	8,719 (8,648; 8,791)	9,337 (9,205; 9,468)
WW3 anticiclones	5,480 (5,469; 5,490)	6,235 (6,200; 6,269)	6,688 (6,620; 6,755)	7,008 (6,897; 7,120)

* É utilizado esse período de retorno para efeito estatístico de comparação e análise do ajuste da GPD, já que a série do WAVEWATCH da tabela têm 20 anos de duração e não teria sentido $pr = 5$.

Capítulo 9

Conclusões

A análise de extremos realizada a partir de séries de onda significativa simuladas por modelos envolve várias questões. No presente trabalho foram estudados os ciclones a partir de um esquema novo de detecção de eventos, a modelagem usando o WAVEWATCH III e as técnicas de extremos de onda através da POT. Toda essa abordagem serve para primeiro entender os sistemas sinóticos que geram as grandes ondulações, conhecer as deficiências do modelo, e então realizar a análise de extremos da melhor maneira possível.

A avaliação do WAVEWATCH selecionando eventos iid, dividindo em intervalos de frequência e utilizando as técnicas de PARENTE (1999) forneceu uma boa compreensão a respeito do *hindcast* desenvolvido. No método ww3Xbóia o viés em Hs foi pequeno apesar do EMQ alto, padrão que muda drasticamente ao observar bóiaXww3. O EM neste caso, chegando a -1,79 m, indica a grande subestimação da energia a ser enfrentada em casos de grandes ondas. Apesar da piora no EM, CC permanece constante. O Tp nos dois casos foi bem simulado. A grande conclusão do capítulo 5 está ligada à **mudança na qualidade da simulação de Hs** (com aumento do bias) **dos casos extremos**, comprovada na figura 8.17. Inicialmente não foi possível ir a fundo nessa questão devido a utilização dos **parametros Hs, Tp e Dp, que limitam o entendimento das condições da mar**. Tal problema é resolvido utilizando a PLEDS.

A partir das inúmeras discussões conclui-se que **a subestimação do WAVEWATCH (nesse trabalho) se deve principalmente às deficiências da reanálise II do NCEP/NCAR**, a qual se apresenta com qualidade limitada, classificada como de classe B, com adicional problema de incluir poucos dados observados no Atlântico Sul. O resultado são campos de vento com baixa resolução espacial e temporal, pouca dinâmica e variações lentas do quadro meteorológico. Como consequência, **a reanálise é menos realista em situações de ventos fortes e pistas curtas com pouca duração**. Apesar desse padrão, foram obser-

vados casos de superestimação do vento em pistas grandes com intensidades moderadas (associadas a anticiclones).

A PLEDS e a avaliação em faixas mostram que **o viés do modelo é maior em baixas frequências**, padrão que diminui até as faixas quatro e cinco, com EM em torno de zero. De acordo com as análises meteorológicas, observam-se os extremos gerados distantes do Rio de Janeiro com maiores T_p , sujeitos então a um viés maior do modelo. Pensando nas questões comentadas, pode-se concluir que as ondas significativas na Baía de Campos, simuladas pelo WAVEWATCH com os ventos da reanálise II do NCEP, apresentam maiores subestimações em casos de ciclones muito fortes, com pistas e durações pequenas, tipicamente em latitudes mais altas. O melhor comportamento ocorre em situações de grandes pistas e durações, ventos moderados e próximos ao Rio de Janeiro (característica típica dos anticiclones). As figuras 5.9 e 5.10 comprovam essa questão em termos direcionais; e 8.17 em termos dos sistemas e respectivas intensidades. Como os ciclones que geram extremos apresentam em geral ondas com $D_p > 180^\circ$ e anticiclones com $D_p < 170^\circ$, é visto uma **tendência direcional de crescimento do viés do modelo ao aumentar D_p** . Foram comparadas as **médias dos viés nos casos de ciclones e anticiclones, resultando respectivamente em 1,868 m e 1,054 m**. Os ciclones, portanto, subestimam 90% a mais as alturas significativas do que anticiclones. Esses valores mudam em função da severidade do mar, conforme visto na figura 8.16 e tabela 8.6.

Passando agora para o capítulo 6, primeiramente é possível notar que o passo-a-passo detalhado da metodologia, com análise dos inúmeros gráficos, facilitou a escolha de u , deixando-a mais precisa e menos suscetível a erros. Como os extremos de onda do quadrante sul não ocorrem tão frequentemente, N_u é limitado em séries de curta duração. Tal característica gerou a maior dificuldade enfrentada. **N_u pequeno torna mais incerta a fixação do limiar, coloca em risco os critérios de aplicação da POT e é responsável pelo aumento da variância dos estimadores, resultando em intervalos de confiança dos valores de retorno com maior amplitude**. Esse problema ocorreu na série da bóia e WW3/2/9195 (controle).

A análise da seção 6.4 do ondógrafo forneceu **$H_{s50}=8,77$ m e $H_{s100}=9,54$ m**, conforme a figura 6.10 e tabela 6.3. Apesar dos dados da bóia serem os mais próximos à realidade do mar, a variância do estimador faz com que o intervalo de confiança seja grande, principalmente em pr acima de 30 ou 40 anos. Tal característica foi ainda mais grave em WW3/2/9195, com a análise gerando resultados que não condizem com o clima das ondas na Baía de Campos¹ e grande incerteza adicional. Conclui-se que o problema

¹Verificado a partir de trabalhos sobre a caracterização dos mares da região, como PINHO (2003).

de baixo N_u e suas consequências, para séries de mesma duração (cinco anos), foi pior nos resultados do WAVEWATCH. Esse fato ocorre pois o modelo apresenta relativamente menos eventos extremos devido à subestimação da energia das ondas discutida.

Outra questão é o cálculo de n_e (número de eventos esperado em pr anos), o qual é calculado obtendo a média de extremos por ano da série utilizada e extrapolando essa taxa para os pr de interesse. Períodos anômalos, com maior ou menor número de ciclones, podem gerar problemas na extrapolação de n_e , principalmente em pr longos. **É mais exato fixar n_e a partir da média de n com uma série longa (vinte anos) do que com uma curta (cinco anos).** Vários anos de H_s permitem também um estudo das tendências de n no tempo, realizada no capítulo 6.

Na análise de extremos geral, **a forma muito semelhante de 6.9(c), 6.19(c) e 6.29(c), junto dos valores próximos de ξ e β , mostram que o modelo consegue captar a relação entre os extremos, apesar das limitações encontradas no hindcast.** A série WW3/3/8605, posicionada no PONTO3 ($42^\circ\text{W}/25^\circ\text{S}$) apresentou comportamento diferenciado. A região possui maior quantidade de grandes ondulações, entretando H_s máximo é menor que no PONTO2 ($38^\circ\text{W}/25^\circ\text{S}$). Tal característica mudou bastante o comportamento da GPD, passando a superestimar os valores extremos.

Avaliando a qualidade dos estimadores em cada série é possível concluir que o MOM, seguido pelo PWM, forneceram os melhores cálculos de ξ e β , com menor variância e maior correlação entre o ajuste e os dados.

A análise de extremos do capítulo 8 mostrou uma nova abordagem metodológica de aplicação da POT, baseada nas informações das ondulações e sistemas meteorológicos do capítulo 7. O estudo, utilizando a PLEDS e os resultados do programa de detecção de ciclones, forneceu os instrumentos necessários para separar os eventos com geração por ciclones e anticiclones. A divisão nesses dois casos favorece a estimativa dos extremos, mas diminui o tamanho da série analisada. O fato melhorou a análise dos resultados do modelo (com n grande), mas impossibilitou a aplicação aos dados do ondógrafo em anticiclones (n pequeno). **A aplicação da POT em sistemas sinóticos específicos aumenta a qualidade da estimativa dos extremos, entretanto depende de séries com longas durações.**

Na subseção 8.1.2, de análise de eventos gerados por ciclones a partir dos resultados do WAVEWATCH, é visto na figura 8.6(c) a melhor adequação da GPD aos dados encontrada nesse trabalho. A curvatura e tendências de superação do ajuste praticamente não existem mais. A exclusão das ondas geradas por anticiclones da cauda da distribuição modificou o limiar bem como os valores de retorno finais. No caso da bóia, seção 8.1.1, foi constatado que a cauda na análise geral apresenta somente ciclones. A partir daí pode-se esperar que os vr calculados sem a divisão sinótica sejam os mesmos daqueles gerados

por esses sistemas.

A seguir as principais vantagens da análise de extremos associados a ciclones e anticiclones utilizando resultados de modelo:

- **A grande duração da série faz com que N_u seja maior, facilitando e melhorando a fixação do limiar, diminuindo a variância e a amplitude do intervalo de confiança.**
- **Melhora na estimativa de n_e , já que estipular a média de ocorrência de eventos em um curto período e extrapolar a taxa para longos anos é um procedimento que fornece muita incerteza.**
- **A divisão em sistemas meteorológicos distintos favorece bastante a aplicação da POT. A GPD se ajusta bem aos pontos, praticamente sem tendências mesmo em *pr* longos.**

Abordando agora as características meteoceanográficas dos extremos é possível chegar a algumas conclusões a partir das medições e simulações. Analisando pelos dados do ondógrafo, verificou-se que **as maiores ondulações que atingem a Bacia de Campos são aquelas oriundas de sudoeste, com T_p acima de 11 segundos, geradas por ciclones, incidindo prioritariamente no inverno e outono, seguido pela primavera e verão; ocorrendo em situações de MAU TEMPO.** Claramente se vê uma divisão direcional dos máximos dos eventos. As ondas geradas por ciclones possuem D_p entre 190° e 250° e grande H_s (chegando a 6,47 m), enquanto por anticiclones D_p entre 100° e 170° , em geral com H_s menores (até 4,50 m). Importante destacar que, apesar dos picos de energia ocorrerem nas direções citadas, a PLEDS mostrou que há um deslocamento direcional associado à propagação dos ciclones. Essa migração é bem evidente quando a baixa pressão se encontra próxima ao Rio de Janeiro, como na caso 16 do modelo, detalhado no apêndice C.

Devido à grande duração da simulação e do comportamento característico do *hindcast* do presente trabalho, que valoriza a energia em grandes pistas e ventos moderados, foram encontrados alguns casos de anticiclones gerando ondulações extremas. Pela observação das PLEDS em conjunto com os campos de vento e pressão em superfície, foi possível chegar a algumas conclusões. **Os anticiclones que geram as maiores ondas acontecem em torno de 35°S , nascendo a oeste dos centros de baixa pressão transientes.** Os casos encontrados mostraram posicionamento semelhante, com **deslocamento lento (quase estacionários), grandes pistas com ventos moderados, ocorrendo principalmente no outono e primavera. Aqueles um pouco mais ao norte geram extremos com D_p próximos a 90° e menores T_p e H_s . Os anticiclones mais ao sul produzem D_p maiores**

(próximo à SE), em geral com maiores T_p e H_s ; incidindo principalmente no outono. A pressão no centro é superior a 1020 hPa, chegando a 1035 hPa.

Observando os ciclones de uma forma geral é possível concluir que **as características mais importantes daqueles que geram as maiores ondas na Bacia de Campos são o posicionamento e intensidade**. As durações e pistas se mostraram grandes em quase todos os casos, não apresentando grandes limitações no desenvolvimento do mar.

Analisando primeiro as posições, **praticamente todos os ciclones que geraram os extremos apresentaram-se acima de 40°S, com formação em RG1 e principalmente RG2. Aqueles mais ao norte (ciclogênese em RG1) mostraram maiores alturas significativas na Bacia de Campos, com D_p superiores (SW) e T_p menores**. Nas PLEDS desses casos se vê grande energia em todas as frequências devido à proximidade da baixa pressão e avanço da frente fria. As análises dos ciclones mostraram menor diâmetro e duração, ventos médios em torno de 10 m/s e máximos em 20 m/s. As respectivas ondulações com grande energia incidindo no Rio de Janeiro também duram pouco, em torno de dois dias. A simulação do WAVEWATCH mostrou que tais casos ocorrem com maior frequência no outono (destaque para o mês de maio) seguido pelo inverno.

Os ciclones mais ao sul (ciclogênese em RG2 e demais áreas), em sua maioria, geram extremos de H_s menores na Bacia de Campos, com D_p inferiores (S/SW) e T_p maiores². Na PLEDS desses casos se vê a energia prioritariamente nas faixas um e dois (baixas frequências). Os diâmetros dos sistemas em geral são maiores, assim como a duração, fazendo com que a manutenção da chegada do marulho com grande energia ocorra por três dias ou mais. As pistas apresentam ventos médios por volta de 15 m/s e máximos de 30 m/s, ocorrendo prioritariamente no inverno seguido pelo outono.

Assim como destacado na subseção 2.5.2, os ciclones ao sul ($\simeq 50^\circ\text{S}$) são mais intensos, com pistas maiores e ventos fortes. As alturas significativas nesses casos são localmente superiores aos sistemas de latitudes baixas, entretanto a distância do Rio de Janeiro se mostrou muito importante. Apesar de menos intensos, os ciclones próximos ao Rio de Janeiro apontam o fim das respectivas pistas logo na Bacia de Campos, fazendo com que a energia incida sobre a região praticamente sem sofrer dispersão. Em todos os casos de ciclones destacam-se os anticiclones extratropicais na retaguarda³, aumentando o gradiente de pressão, tamanho da pista e permanência sobre o oceano próximo ao sudeste brasileiro.

²Os períodos de pico são maiores devido à grande intensidade dos sistemas em latitudes mais altas.

³Visto nas figuras como regiões de alta pressão sobre a Argentina e Uruguai.

Sugestões para trabalhos futuros

O tema relacionado a eventos extremos de ondas envolve diversas áreas com diferentes abordagens. Para manter o foco nos objetivos propostos, inúmeras questões foram deixadas de lado e merecem maior investigação.

A primeira delas é uma avaliação profunda das simulações do WAVEWATCH III, já que a desenvolvida aqui teve somente o objetivo de entender as consequências das possíveis falhas do *hindcast* na análise de extremos e meteorológica. Para realizá-la com critério deve-se aumentar o domínio, rodando em uma malha global aninhada a outra regional (envolvendo o Atlântico Sul). As técnicas de PARENTE (1999) e as idéias presentes nesse trabalho ajudariam a compreender de maneira completa as limitações da simulação, não mais em termos de H_s , T_p e D_p , mas estudando os erros em função das faixas de frequência e sistemas meteorológicos. Tal trabalho colaboraria bastante com a previsão de ondas no Brasil e deve estar atento aos novos desenvolvimentos, como a recente versão do WAVEWATCH III.

No contexto da modelagem e previsão de desastres fica a sugestão, baseada no trabalho de ROCHA *et al.* (2004), de avaliar o WAVEWATCH em sistemas de alerta. A metodologia seria estipular um limiar u suficientemente elevado e analisar as ocorrências em que as medições (ondógrafo, TOPEX, ADCP ou outra base) superam u junto com a simulação do modelo, ou casos em que somente a medição ou só a simulação superou u . Poderiam ser analisadas as porcentagens de coerência, de alarmes falsos e de falta de alarmes. Quantificar o comportamento em função de u seria interessante, bem como variar os campos de vento de entrada do modelo. Em termos práticos, utilizar as análises dos modelos atmosféricos, como os backups do AVN e BRAMS por exemplo⁴, forneceria uma idéia real do dia-a-dia da previsão de extremos e mitigação de desastres.

Em termos de aplicação da POT, fica o desafio matemático de um estudo completo das incertezas relacionadas ao vr final e do intervalo de confiança. As fontes de erro que envolvem o procedimento são: (1) limitações instrumentais da medição e da DAAT, (2) variância de ξ e β e (3) estimativas duvidosas de n_e . Nos trabalhos convencionais o intervalo de confiança é baseado somente em (2), enquanto para se ter uma noção exata das incertezas deve-se levar em conta (1), (2) e (3). Outra sugestão envolvendo a POT, é a aplicação da metodologia dos capítulos 6 e 8 para a análise de extremos das ondas individuais, e não somente H_s como é utilizado.

Um dos maiores benefícios da estimativa de extremos usando modelos de onda é a abrangência espacial. Nesse contexto, o Brasil possui extensão da costa com quase 8000 km, grande parte dela sem esse tipo de análise. Com a evolução na qualidade dos *hind-*

⁴Os quais são salvos e armazenados pelo laboratório MASTER e pelo CPTEC.

casts atuais, fica a sugestão de aplicação da POT a pontos distintos, cobrindo as diversas regiões. No nordeste tal estudo seria muito interessante e o programa de detecção de ciclones teria de ser adaptado aos furacões e sistemas extratropicais do Hemisfério Norte. A PLEDSWW3 forneceria o instrumento necessário para caracterizar o clima de ondas de tais lugares. No sul do Brasil caberia uma análise multivariada de extremos envolvendo nível do mar e ondas. Grande parte dos ciclones destacados nesse trabalho apresentaram ventos de SW paralelos à costa com grande intensidade. Tal característica favorece o empilhamento de Ekman, causando as marés de tempestade (grandes marés meteorológicas positivas). A suspeita é que os extremos de onda de SW venham acompanhados (em algum momento) da subida do nível do mar. Nos casos de anticiclone essa característica não é tão esperada, pois ventos de SE tem menor poder de empilhamento no sul/sudeste brasileiro devido à orientação da linha de costa. Sugere-se investigar os dois mecanismos em conjunto.

O estudo da influência dos sistemas meteorológicos de baixa frequência nas grandes ondulações na Baía de Campos realizado nesse trabalho teve abordagem superficial e investigativa. A sugestão dada é o aprofundamento dessas questões, utilizando ferramentas como o cálculo de componentes principais, para entender como pequenas mudanças na circulação geral da atmosfera podem interferir na intensidade e ocorrência dos extremos de onda.

Outra parte que foi menos enfocada no trabalho foram os anticiclones. Sugere-se a mesma metodologia proposta, modificando o programa de detecção para identificar máximos de pressão e vortacidade, realizando uma climatologia e análise de extremos de ondas geradas por esses sistemas. O procedimento exige cuidado, pois os respectivos diâmetros são superiores e os gradientes de pressão, assim como os ventos, são menos intensos.

Por fim, a maior sugestão desse trabalho é a aplicação da PLEDSWW3 operacional nos principais centros de previsão de ondas. Os avanços em termos de compreensão das condições futuras do mar seriam grandes. Os *scripts* são de simples implementação e não exigem computação elevada. Para o presente estudo, esses foram desenvolvidos permitindo variar o intervalo das frequências, os quais poderiam facilmente ser adaptados ao clima de ondas de cada região.

Referências Bibliográficas

- BARBER, N. F., URSELL, F., 1948, “The generation and propagation of ocean waves and swell”. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, A 240, pp. 527-560.
- BATTJES, J. A., 1994, “Shallow water wave modelling”. *Proc. Int. Symp.: Waves-Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, pp. 1-23.
- BELITSKY, V., MOREIRA, F. M., 2007, “Emprego do método Peaks-over-threshold na estimação de risco, uma exposição abrangente, detalhada mas simples”. In: *Third Brazilian Conference on Statistical Modelling in Insurance and Finance*, pp. 1-117, Maresias, MarçoMarch.
- BEU, C. M. L., 2003, *Propagação Intersazonal de Ciclones e Anticiclones na América do Sul e o Deslocamento de Massas de Ar Frio Durante as Estações de Transição*. Tese de M.Sc., IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- BEU, C. M. L., AMBRIZZI, T., 2006, “Variabilidade Interanual e Intersazonal da Frequência de Ciclones no Hemisfério Sul”. *Rev Bras. Meteor.*, v. 21 (2), pp. 44-55.
- BOUWS, E., KOMEN, G. J., 1983, “On the balance between growth and dissipation in a extreme depth-limited wind-sea in the southern north sea”. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 13, pp. 529-554.
- BRANCO, F. V., 2004, *Contribuições de Swell Gerado em Tempestades Distantes para o Clima de Ondas na Costa Brasileira*. Tese de M.Sc., IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- CANDELLA, R. N., 1997, *Estudos de Casos de Ondas no Atlântico Sul através de Modelagem Numérica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAMPOS, R. M., 2005, *Contribuições de Swell e Wind Sea para o Clima de Ondas no Atlântico Sul por Altimetria de Satélite*. Relatório de Iniciação Científica, IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- CAMPOS, R. M., CAMARGO, R., 2006, “Caracterização do Nível do Mar em Santos e sua Correspondência com o NCEP/Reanalysis sobre o Sudoeste

- do Atlântico Sul”. *Afro America GLOSS News*, v. 10 (1). Disponível em: <http://www.mares.io.usp.br/aagn/ind.html> .
- CARDOSO JÚNIOR, H. G., 2004, *Análise Bivariada de Extremos de Onda e Vento na Bacia de Campos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CARTER, D. J. T., 1982, “Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results”. *Ocean Engineering*, v. 9 (1), pp. 17-33.
- CHALIKOV, D. V., 1995, “The parametrization of the wave boundary layer”. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 25, pp. 1333-1349.
- CHALIKOV, D. V., BELEVICH, M. Y., 1993, “One-dimensional theory of the wave boundary layer”. *Bound. Layer Meteor.*, v. 63, pp. 65-96.
- COLES, S., 2007, *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London, Springer series in Statistics.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A., 1990, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. New Jersey, Prentice-Hall.
- ELSINGHORST, C., GROENEBOOM, P., JONATHAN, P., *et al.*, 1996, “Extreme Value Analysis of North Sea Storm Severity”. In: *15th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, Vol II pp. 9-16, New York, Jun.
- EMBRECHTS, P., KLUPPELBERG, C., MIKOSCH, T., 1997, *Modeling Extremal Events for Insurance and Finance*. Berlin, Springer-Verlag.
- FERREIRA, C. C., 1989, “Ciclogêneses e ciclones extratropicais na Região Sul-Sudeste do Brasil e suas influências no tempo”, INPE-4812-TDL/359.
- FERREIRA, J. A., GUEDES SOARES, C., 1998, “An Application of Peaks Over Threshold Method to Predict Extremes of Significant Wave Height”. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 120, pp. 165-176.
- FONSECA, J. S., MARTINS, G. A., 1995, *Curso de Estatística*. 5 ed., São Paulo, Atlas.
- GAN, M. A., RAO, B. V., 1991, “Surface cyclogenesis over South America”. *Mon. Wea. Rev.*, v. 119, pp. 293-302.
- HASSELMANN, K., BARNETT, T. P., BOUWS, E., *et al.*, 1973, “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)”. *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*, v. A(8) (Nr.12), pp. 95-.

- HASSELMANN, S., HASSELMANN, K., ALLENDER, J. H., *et al.*, 1985, "Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: parametrizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models". *J. Phys. Oceanogr.*, v 15, pp. 1378-1391.
- IWABE, S. M. N., 2008, *Intrusão Estratosférica Associada com Ciclogêneses na Costa do Sul do Brasil: uma Análise Utilizando o Conceito de Vorticidade Potencial*. Tese de M.Sc., IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- INNOCENTINI, V., CAETANO NETO, E. S., 1996, "A case study of the 9 August 1998 South Atlantic storm: Numerical simulations of the wave activity". *Wea. Forecasting.*, v. 11, pp. 78-88.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., *et al.*, 1996, "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bull Amer. Meteor. Soc.*, v. 79, pp. 2753-2769.
- KISTLER, R., KALNAY E., COLLINS W., *et al.*, 2001, "The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation". *Bull Amer. Meteor. Soc.*, v. 82 (2), pp. 247-268.
- MARQUES DA CRUZ, L. M., 2004, *Estudo comparativo de variações espaciais e temporais nas forçantes meteorológicas em um modelo de ondas de terceira geração no oceano Atlântico Sul*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MENDES, B. V. M., 2004, *Introdução à Análise de Eventos Extremos*. Rio de Janeiro, E-papers serviços editoriais.
- MUNK, W. H., MILLER, G. R., SNODGRASS, F. E., *et al.*, 1963, "Directional recording of swell from distant storms". *Phil. Trans. Royal Soc. London*, A 255, pp. 505-584.
- MURRAY, R. J., SIMMONDS, I., 1991, "A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data". *Aust. Meteor. Mag.*, v. 39, pp. 155-166.
- OSTRITZ, F. F., 2008, *Estimativas de um modelo de geração e propagação de ondas empregando campos de ventos com diferentes resoluções espaço-temporais*. Relatório de Conclusão do Curso de Oceanografia, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PARENTE, C. E., SOUZA, M. H. S., 1989, "Wave Climate off Rio de Janeiro". In: *Proceedings of 21 st Coastal Engineering Conference*, Malaga-Spain.
- PARENTE, C. E., 1999, *Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas*. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- PARENTE, C. E., LIMA, J. A., VIOLANTE-CARVALHO, N., et al., 2001, “Wave and Wind Extremes Values in Good Weather Situations in the Campos Basin, off Rio de Janeiro”. In: *Proceedings of 20 th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering*, June.
- PEZZA, A. B., 2003, *Ondas de frio na América do Sul e as trajetórias dos ciclones e anticiclones extratropicais: Climatologia Sinótica*. Tese de D.Sc., IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- PEZZA, A. B., AMBRIZZI, T., 2003, “Variability of Southern Hemisphere Cyclone and Anticyclone Behavior: Further Analysis”. *J. Climate*, v. 16, pp. 1075-1083.
- PHILLIPS, O. M., 1957, “On the generation of waves by the turbulent wind”. *J. Fluid Mech*, v. 2, pp. 417-445.
- PIERSON, W. J., MOSKOWITZ, L., 1964, “A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity form of Kitaigorodskii”. *Journal of Geophysical Research*, v. 69, pp. 5181-5190.
- PINHO, U. F., 2003, *Caracterização dos estados de mar na Bacia de Campos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REBOITA, M. S., 2008, *Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade*. Tese de D.Sc., IAG-USP, São Paulo, SP, Brasil.
- ROCHA, R. P., SUGAHARA, S., SILVEIRA, R. B., 2004, “Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data”. *Weather and Forecasting*, v. 19, pp. 398-410.
- SATYAMURTY, P., FERREIRA, C. C., GAN, M. A., 1990, “Cyclonic Vortices over South America”. *Tellus*, v. 42A, pp. 194-201.
- SEIXAS, N. A. B., 1997, *Clima de ondas na Bacia de Campos: Análise de dados e proposta de parametrização*. Tese D.Sc., Observatório Nacional, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SINCLAIR, M. R., 1994, “An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere”. *Mon Wea. Rev.*, v. 122, pp 2239-2256.
- SILVA, F. L., 2008, *Investigações sobre a chegada dispersiva de ondulações (swell) em situações de BOM TEMPO na Bacia de Campos*. Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- SNODGRASS, F. E., GROVES, G. W., HASSELMANN, K. F., *et al.*, 1966, "Propagation of ocean swell across the pacific". *Phil. Trans. Royal Soc. London*, v. A 259, pp. 431-497.
- SNYDER, R. L., DOBSON, F. W., ELLIOTT, J. A., *et al.*, 1981, "Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves". *J. Fluid Mech.*, v. 102, pp. 1-59.
- SOUZA, M. H. S., 1988, *Clima de Ondas ao Norte do Estado do Rio de Janeiro*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SUGAHARA, S., 2000, "Variação Anual da Frequência de Ciclones no Atlântico Sul". In: *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, Outubro.
- SUTCLIFFE, R. C., 1947, "A Contribution to the Problem of Development". *Quart J. Roy Meteor. Soc.*, v. 73, pp. 370-383.
- SVERDRUP, H. V., MUNK, W. H., 1947, "Wind, sea, and swell: Theory of relation for forecasting". *Hydrographic Office, U. S. Navy*, v. 601.
- SWAIL, V. R., COX, A. T., 2000, "On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 17, pp. 532-545.
- TOLMAN, H. L., 2002, *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. SAIC-GSO/EMC/MMAB/NCEP/NOAA, MMAB Contribution No. 222.
- TOLMAN, H. L., CHALIKOV, D., 1996, "Source terms in a third-generation wind wave model". *J. Phys. Oceanogr.*, v. 26, pp. 2497-2518.
- TROUP, A. J., STRETEN, N. A., 1971, "Satellite observed cloud vortices over southern hemisphere". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 52 n. 7, pp. 642-647.
- VIOLANTE-CARVALHO, N., 1998, *Investigações sobre o Clima de Ondas na Bacia de Campos e Correlação com Situações Meteorológicas Associadas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- WANDI GROUP, 1988, "The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model". *J. Phys. Oceanogr.*, v. 18 n. 12, pp. 1775-1810.
- WMO, 1998, *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. World Meteorological Organization, Geneve, Suisse, 2 ed., WMO-No. 702.

YOUNG, I. R., 1999, *Wind Generated Ocean Waves*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science Ltd.

Apêndices

Apêndice A

Código da subrotina de detecção dos ciclones

O código a seguir foi desenvolvido em Fortran 90, utilizando o compilador Portland (pgf90) em ambiente Linux.

```
SUBROUTINE verifica_baixa(bcmin,pmax,lx,ly,nx,ny,nt,it,xini,yini,p,resp,borda,ry,rx,res,ref)
implicit none
integer :: xmin, ymin, resp, nx, ny, nt, it, iy, ix, xini, yini, bcmin, pmax, lx, ly
real, dimension(nx,ny,nt) :: p
real :: centro, borda, auxx, auxy, pm, lat, lon, ry, rx, res, ref, ce, bc
centro = p(xini,yini,it)
borda =( p(xini-lx,yini-ly,it) + p(xini-lx,yini+ly,it) + p(xini+lx,yini-ly,it) + p(xini+lx,yini+ly,it) ) / 4.
lon=rx+((xini-1)*res)
lat=ry+((yini-1)*res)
ce=(-0.0262)*ref*ref + (-0.7959)*ref -pmax )*(-1)
pm = (-0.0262)*lat*lat + (-0.7959)*lat + ce
ce= (-0.0032)*ref*ref + (-0.3811)*ref - bcmin
bc=(-0.0032)*lat*lat + (-0.3811)*lat - ce
if((borda - centro).gt.(bc*100) .and. (borda - centro).gt.(bcmin*100) )then
  if (p(xini,yini,it).lt.(pm*100) .and. p(xini,yini,it).lt.(pmax*100) )then
    resp = 1
  else
    resp = 0
  endif
else
  resp = 0
endif
if(lat.ge.-30)then
  if(lon.le.-57.5)then
    resp = 0
  endif
endif
return end
```

Apêndice B

Descrição dos modelos e a física do WAVEWATCH

B.1 Descrição simplificada dos modelos

Esta seção é baseada na descrição apresentada em YOUNG (1999).

A construção de um modelo de ondas que incorpore todos os processos físicos conhecidos sobre ondas geradas por vento, que seja aplicável em todas as situações, é uma missão praticamente impossível. Ao invés disso, diversos tipos são propostos para situações específicas. A seleção do modelo mais apropriado requer um conhecimento da relativa importância da física presente em cada domínio. Basicamente existem quatro a serem modelados:

1. Oceano profundo - onde são desprezados os efeitos de interação com o fundo;
2. Mares nos limites da plataforma (zona costeira) - área entre o oceano profundo e a zona de empinamento;
3. Zona de empinamento - onde tal efeito se torna importante;
4. Região portuária e(ou) abrigada - representando a área de interação entre ondas e estruturas (quebra-mar, plataforma de petróleo, ilha, recife etc).

A tabela a seguir descreve os processos físicos em grau de importância associados a cada domínio, de acordo com a classificação inicialmente feita por BATTJES (1994).

Tabela B.1: Importância relativa dos mecanismos físicos nos diferentes domínios enumerados anteriormente, segundo YOUNG (1999): \otimes desprezível; \circ menor importância; \bullet significativo; \star dominante.

Processo Físico	(1)	(2)	(3)	(4)
Difração	\otimes	\otimes	\diamond	\star
Refração/Empinamento	\otimes	\bullet	\star	\bullet
Refração por corrente	\otimes	\diamond	\bullet	\otimes
Interações Quad.	\star	\star	\diamond	\otimes
Interações Triad.	\otimes	\diamond	\bullet	\diamond
Entrada pelo vento	\star	\star	\circ	\otimes
Encapelamento (<i>Whitecapping</i>)	\star	\star	\circ	\otimes
Quebra por profundidade	\otimes	\circ	\star	\otimes
Fricção com o fundo	\otimes	\star	\bullet	\otimes

Os modelos podem ser divididos em duas classes gerais: “modelos de resolução da fase”, onde a amplitude e fase são resolvidas para ondas individuais; e “modelos médios de fase” ou “modelos espectrais”, onde são calculados os espectros e(ou) suas propriedades integrais (altura significativa, frequência de pico etc). Quando as características médias do espectro variam rapidamente (na escala de poucos comprimentos de onda), torna-se necessária a utilização dos modelos de resolução da fase. Em contrapartida, quando as propriedades das ondas variam lentamente (na escala de muitos comprimentos de onda), podem ser adotados os modelos espectrais.

Nenhum dos dois tipos é superior e os domínios de aplicação não costumam se sobrepor. BATTJES (1994) destaca que os modelos de resolução da fase demandam capacidade computacional muito maior e devem ser usados somente em casos de extrema necessidade. Dos processos citados na tabela B.1 somente a difração e interações não lineares triad. requerem esses tipos, sendo aplicados em domínios geralmente confinados às interações onda-estrutura e águas rasas. Como o presente trabalho se concentra em águas profundas e em escala global, o foco desta descrição serão os modelos espectrais.

Como o nome já diz, eos modelos espectrais calculam a evolução espaço-temporal do espectro direcional de ondas $F(f, \theta)$. Basicamente, considerando somente águas profundas, é resolvida a equação do transporte advectivo com conservação da densidade espectral de energia:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C_g \cdot \nabla F = S_{tot} \quad (\text{B.1})$$

onde $F = F(f, \theta; x, y, t)$ é o espectro direcional e C_g o vetor velocidade de grupo. O termo fonte S_{tot} é tipicamente representado como o somatório de processos individuais que, no

caso de águas profundas, pode ser apresentado como:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (\text{B.2})$$

em que S_{in} representa a entrada atmosférica do vento em superfície, S_{nl} o termo de interação não linear entre as componentes do espectro e S_{ds} a dissipação por quebra (*white-capping*).

Modelos de primeira, segunda e terceira geração

A sofisticação do termo fonte S_{tot} vem crescendo em função dos avanços na compreensão dos processos físicos das ondas geradas por vento, bem como das evoluções computacionais. Os modelos espectrais são classificados como de primeira, segunda e terceira geração.

Nos de primeira geração (ou modelos desacoplados), cada componente do espectro de energia se propaga com sua própria velocidade de grupo, desenvolvendo-se independentemente das demais, até um nível individual de saturação (PHILLIPS, 1957). Esse nível pode ser representado pela energia de um mar plenamente desenvolvido, usualmente o espectro P&M. A interação não linear é desprezada ou, se parametrizada, pouco significativa, sendo representada de forma simples (WMO, 1998). A principal fonte de erros é a subestimação do crescimento das ondas, por superestimar a entrada de energia do vento e subestimar as interações não lineares entre as ondas na região de alta frequência (CANDILLA, 1997). O termo fonte nesse caso é representado como $S_{tot} = S_{in} + S_{ds}$. Devido a esses fatores, os modelos de primeira geração possuem baixa performance em situações meteorológicas complexas, como nas rápidas viradas do vento em furacões (YOUNG, 1999).

O projeto JONSWAP (HASSELMANN *et al.*, 1973) apresentou de forma mais clara o papel das interações não lineares no balanço dos termos fonte. Nesse contexto, acompanhado da evolução dos computadores, desenvolveram-se os modelos de segunda geração (ou modelos acoplados). O termo fonte é representado como $S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$. A entrada atmosférica S_{in} tem como base medições diretas do stress do vento na direção normal exercido na superfície da água (SNYDER *et al.* 1981). O termo de dissipação S_{ds} funciona como um limite de saturação para o espectro. O grande avanço nos modelos de segunda geração está na inclusão da representação paramétrica das interações não lineares (YOUNG, 1999).

Os modelos de terceira geração apresentam o balanço dos termos fonte da mesma forma que os modelos de segunda geração $S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$, com as diferenças aparecendo na forma de cálculo desses termos (BRANCO, 2004). A evolução se dá ao fato

de apresentarem solução completa para as interações não lineares, com a integração da equação básica do transporte realizada sem restrições quanto a forma do espectro, sendo os processos físicos calculados explicitamente para todas as componentes de um espectro discretizado. O modelo WAM (*Wave Model*), criado pelo grupo WAMDI (*Wave Model Development and Implementation Group*), foi a primeira tentativa de implementação de um modelo de terceira geração operacional. Basicamente utiliza duas condições: a parametrização exata da fonte de transferência não linear de energia com o mesmo número de graus de liberdade do espectro e a especificação de uma função representativa da dissipação que feche o balanço de energia. A versão para água rasa inclui ainda, entre outros implementos, o termo de fricção com o fundo, alteração de expressão da velocidade de grupo, alteração na parametrização do fornecimento de energia pelo vento e efeitos de refração pela variação da profundidade (WAMDI, 1988 citado por CANDELLA, 1997). As principais fontes de erro desse modelo residem na parametrização dos termos fonte e dissipação de energia.

Outro que utiliza a mesma forma de cálculo de interação onda-onda é o WAVEWATCH. As diferenças principais entre este e o WAM (ciclos 3 e 4) estão nas parametrizações dos termos de fonte e dissipação de energia (CANDELLA, 1997). No WAVEWATCH, este pode tornar-se negativo (sumidouro) em situações de ângulos grandes entre as direções de onda e vento, ou no caso da onda se propagar mais rapidamente que a componente normal. A dissipação, termo apontado como o menos conhecido, é dividido em duas constituintes: uma para frequências próximas e abaixo da frequência de pico, descrita de forma análoga à perda de energia por turbulência; e outra, diagnóstica, para a região de equilíbrio, onde é assumido um balanço quase constante entre as fontes para o regime correspondente. Os resultados indicam que o desempenho do WAVEWATCH é excelente em pequenas pistas, onde o WAM subestima a energia, e comparável ao WAM em pistas médias e longas, tendo a vantagem adicional de ser menos suscetível a erros numéricos (TOLMAN & CHALIKOV, 1996 citado por CANDELLA, 1997).

A tabela a seguir apresenta de maneira simplificada as diferenças entre os modelos de primeira, segunda e terceira geração em relação à descrição do termo fonte S_{tot} .

Tabela B.3: Definição das classes de modelos baseados na representação do termo fonte (YOUNG, 1999 e BRANCO, 2004).

	S_m	S_{nl}	S_{ds}
Primeira Geração	<ul style="list-style-type: none"> • Baseados em medidas de taxa de desenvolvimento. • Grande em magnitude. 		<ul style="list-style-type: none"> • Limite de saturação.
Segunda Geração	<ul style="list-style-type: none"> • Baseado em medidas de fluxo. • Menor que o de primeira geração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Forma paramétrica. • Flexibilidade limitada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limite de saturação igual ao de primeira geração.
Terceira Geração	<ul style="list-style-type: none"> • Baseado em medidas de fluxo. • Estresse acoplado ao estado de mar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Forma aproximada da integral de Boltzman. 	<ul style="list-style-type: none"> • Forma explícita.

B.2 O modelo WAVEWATCH III

Basicamente o WAVEWATCH III resolve a equação linear de balanço do espectro de energia em função do número de onda k e da direção θ , a qual é definida como perpendicular à crista da onda (ou componente espectral). As escalas de variação da profundidade e das correntes¹ são assumidas como muito maiores que as variações das ondas individuais, implicando em uma batimetria de larga escala na qual a difração pode ser ignorada. A evolução do campo de ondas é simulada usando o espectro direcional (número de onda/direção) $F(k, \theta)$ pelo fato de possuir características invariantes em respeito ao crescimento e decaimento em diferentes profundidades. Como saída do modelo, no entanto, é fornecido o espectro de frequência/direção $F(f, \theta)$. A transformação $F(k, \theta)$ para $F(f, \theta)$ é feita utilizando o Jacobiano.

A integral ao longo de todo o espectro fornece a variância En , também chamada de energia total das ondas. Pelo fato dessa não se conservar sobre a ação de correntes, é utilizado o termo de ação de onda $A \equiv En/\omega$, conservativo. Esse novo fornece o espectro de densidade de ação das ondas $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\omega$, usado para os cálculos no modelo. A propagação é descrita então pela equação a seguir²:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S_{tot}}{\omega} \quad (\text{B.3})$$

$\frac{D}{Dt}$ representa a derivada total.

¹As novas versões também possuem correntes em superfície como condição de contorno. Nesse caso é definida a frequência relativa $\sigma = 2\pi f_r$. No presente trabalho não é utilizada essa opção.

²O balanço dessa equação é resolvido na forma Euleriana pelo modelo.

B.2.1 Propagação

Considerando o espectro representado por $N(k, \theta; x, t)$, a equação do transporte advectivo é resolvida no WAVEWATCH através da equação (em coordenadas esféricas)³:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos\theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{B.4})$$

Com λ e ϕ as longitudes e latitudes respectivamente. Considerando θ a direção e R_T o raio da Terra. As velocidades de propagação $\dot{\phi}$, $\dot{\lambda}$, \dot{k} e $\dot{\theta}$ são dadas pelas equações abaixo.

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos\theta}{R_T}, \quad (\text{B.5})$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin\theta}{R_T \cos\theta}, \quad (\text{B.6})$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s}, \quad (\text{B.7})$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan\phi \cos\theta}{R_T}, \quad (\text{B.8})$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} \right], \quad (\text{B.9})$$

onde s é uma coordenada na direção θ e m uma coordenada perpendicular a s .

B.2.2 Termos Fonte

Conceitos Gerais

O termo fonte S_{tot} é considerado como a soma de quatro componentes: interação onda-vento (fonte de energia) S_{in} , interação não linear onda-onda S_{nl} , termo de dissipação (*whitecapping*) S_{ds} e o termo de interação da onda com o fundo S_{bot} . Esses definem a equação fonte geral usada no WAVEWATCH:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \quad (\text{B.10})$$

Lembrando que ao adotar os cálculos pelo espectro de densidade de ação, define-se $S_{tot} \equiv S_{tot}/\omega$. Os termos S_{in} e S_{ds} representam processos separados, mas podem ser considerados interrelacionados pelo fato do balanço entre os dois governarem as características

³A opção em coordenadas cartesianas também é resolvida pelo WAVEWATCH, entretanto o interesse ao se trabalhar em uma grade envolvendo todo o oceano Atlântico Sul realmente está na equação em coordenadas esféricas.

de crescimento. Duas combinações desses dois termos estão disponíveis no modelo, uma usada pelo antigo WAM (ciclo 3) e outra proposta por TOLMAN e CHALIKOV (1996), a qual foi escolhida e será descrita mais adiante. Para o esquema de interação da onda com o fundo é utilizada a formulação JONSWAP (única disponível pelo modelo), descrita na seção 2.3.

Os modelos de terceira geração efetivamente integram o espectro somente até uma frequência de corte f_{hf} (ou número de onda k_{hf}), a partir da qual é parametrizada a cauda:

$$N(k, \theta) = N(k_{hf}, \theta) \left(\frac{f_r}{f_{r,hf}} \right)^{-m-2} \quad (\text{B.11})$$

Os valores de m e a expressão para $f_{r,hf}$ dependem das parametrizações dos termos fonte fixadas inicialmente.

Interações não-lineares

Na região do espectro próxima ao pico, o ganho de energia é maior que a dissipação. O excesso é transferido pelas interações não-lineares às altas e baixas frequências. Nas altas a energia é dissipada pelo fato das ondas possuírem curto período e pequeno comprimento, o que leva ao aumento da esbeltez e encapelamento do mar (*whitecapping*). A energia transferida para as baixas frequências leva ao crescimento de novas componentes espectrais, resultando na migração do pico (WMO, 1998 citado por MARQUES da CRUZ, 2004). As interações não lineares estabilizam o espectro, suavizando as perturbações locais até uma condição de equilíbrio.

Nas interações do tipo triad. duas ondas interagem não linearmente transferindo energia para uma terceira componente. Conforme a tabela B.1, esse tipo de interação é importante para águas rasas mas desprezíveis em águas profundas. O WAVEWATCH utiliza as do tipo quad., usando o método DIA (*Discrete Interaction Approximation*), desenvolvido por HASSELMANN *et al.* (1985), o qual descreve que um arranjo de quatro ondas (*quadruplets*) pode trocar energia quando a seguinte condição ressonante é satisfeita:

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 \quad (\text{B.12})$$

$$\begin{cases} \omega_2 = \omega_1 \\ \omega_3 = (1 + \Psi_{nl})\omega_1 \\ \omega_4 = (1 - \Psi_{nl})\omega_1 \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

onde Ψ_{nl} é uma constante (fixada igual a 0,25 baseada em experimentos numéricos). Nos métodos de interações não lineares, em geral, é resolvida a equação B.12 com um grande arranjo de combinações de número de ondas, tornando-se computacionalmente

pesado. No DIA é assumido $k_1 = k_2$, seguindo o arranjo das equações B.13, calculando um número menor de equações⁴. A contribuição de δS_{nl} para as interações em cada combinação discreta (f_r, θ) , para o espectro correspondendo a k_1 , é calculada como:

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl,1} \\ \delta S_{nl,2} \\ \delta S_{nl,3} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} Co g^{-4} f_{r,1}^{11} \times \left[F_1^2 \left(\frac{F_3}{(1 + \xi_{nl})^4} + \frac{F_4}{(1 - \xi_{nl})^4} \right) - \frac{2F_1 F_3 F_4}{(1 - \xi_{nl}^2)^4} \right], \quad (\text{B.14})$$

Em que Co é a constante de proporcionalidade ($= 3, 10^7$) e D o fator de profundidade⁵. O espectro é apresentado como $F_1 = F(f_{r,1}, \theta_1)$ e o termo $\delta S_{nl,1} = \delta S_{nl}(f_{r,1}, \theta_1)$, analogamente para os outros índices. Para calcular a transferência não linear de um espectro de energia dado, todas as interações entre quatro números de onda satisfazendo as equações B.12 e B.13 são consideradas; e cada k central ($= k_1 = k_2$) percorre todos os números de onda do espectro o qual é representado por uma grade discretizada (f, θ) . Apesar do fato do número de interações no método DIA ser muito menor do que na resolução completa das interações não lineares, esta aproximação mantém as características físicas principais, reproduzindo as propriedades mais importantes das interações onda-onda (YOUNG, 1999).

Interação onda-vento e dissipação

Conforme comentado anteriormente, duas parametrizações são utilizadas no modelo, sendo apresentada aqui a proposta por TOLMAN e CHALIKOV (1996). Esse pacote do WAVEWATCH consiste nos termos fonte descritos por CHALIKOV e BELEVICH (1993) e CHALIKOV (1995), e duas constituintes de dissipação. A interação onda-vento (*input*) é dada por:

$$S_{in}(k, \theta) = \omega \rho N(k, \theta), \quad (\text{B.15})$$

ρ é o parâmetro adimensional de interação onda-vento, o qual é função de dez parâmetros chamados a_1 a a_{10} , mais os termos Ω_1 e Ω_2 , e finalmente ω_a . Esse último é a frequência adimensional da componente espectral e é calculado pelo modelo por:

$$\omega_a = \frac{\omega u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w) \quad (\text{B.16})$$

⁴Reduzindo o problema final a uma integral de duas dimensões ao invés de uma integral de seis dimensões.

⁵A descrição completa do fator pode ser encontrada em TOLMAN (2002) e não será apresentada nesse trabalho pelo foco estar em águas profundas.

Onde θ_w é a direção e u_λ a velocidade do vento a altura igual ao comprimento de onda aparente λ_a , descrito pela equação:

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{k |\cos(\theta - \theta_w)|} \quad (\text{B.17})$$

Os parâmetros a_1 a a_{10} , Ω_1 e Ω_2 dependem do coeficiente de arrasto C_λ a altura $z = \lambda_a$. A descrição completa de C_λ e as parametrizações podem ser encontradas em TOLMAN (2002), e a apresentação detalhada foge do escopo deste trabalho.

O correspondente termo de dissipação é dividido em duas constituintes, relativo às altas e baixas frequências. A porção dominante de baixa frequência é baseada em uma analogia à dissipação de energia devido à turbulência:

$$S_{ds,l}(k, \theta) = -2u_* h k^2 \phi N(k, \theta), \quad (\text{B.18})$$

$$h = 4 \left(\int_0^{2\pi} \int_{f_h}^{\infty} F(f, \theta) df d\theta \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{B.19})$$

$$\zeta = b_0 + b_1 f_{p,1} + b_2 f_{p,1}^{-b_3}. \quad (\text{B.20})$$

Onde h é a escala de mistura, determinada a partir do conteúdo de alta frequência do campo de onda, e ζ função empírica que considera o estágio de desenvolvimento do mar. A parte linear da equação B.20 descreve a dissipação durante o crescimento das ondas. O termo não linear tem sido adicionado para concordar com algumas condições de controle em mares completamente desenvolvidos.

A dissipação de alta frequência empírica é definida como:

$$S_{ds,h}(k, \theta) = -a_0 \left(\frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 \alpha_n^B N(k, \theta), \quad (\text{B.21})$$

$$B = a_1 \left(\frac{f u_*}{g} \right)^{-a_2}, \quad (\text{B.22})$$

$$\alpha_n = \frac{\sigma^6}{c_g g^2 \alpha_r} \int_0^{2\pi} N(k, \theta) d\theta, \quad (\text{B.23})$$

Sendo α_n o nível de energia adimensional de Phillips normalizado por α_r , e α_0 uma constante empírica.

As duas constituintes de dissipação são inseridas usando uma combinação linear simples, definida pelas frequências f_1 e f_2 .

$$S_{ds}(k, \theta) = \mathcal{L} S_{ds,l} + (1 - \mathcal{L}) S_{ds,h}, \quad (\text{B.24})$$

$$\mathcal{L} = \begin{cases} 1 & \text{para } f < f_1 \\ \frac{f-f_2}{f_1-f_2} & \text{para } f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0 & \text{para } f_2 \leq f \end{cases} \quad (\text{B.25})$$

Para melhorar a suavização do modelo em frequências próximas à frequência paramétrica de corte f_{hf} , é utilizada uma zona de transição entre o espectro prognóstico e a cauda espectral paramétrica de alta frequência,

$$N(k_i, \theta) = (1 - \Upsilon) N(k_i, \theta) + \Upsilon N(k_{i-1}, \theta) \left(\frac{f_i}{f_{i-1}} \right)^{-m-2} \quad (\text{B.26})$$

Em que i é o contador discreto e Υ definido similar a \mathcal{L} , variando de 0 a 1 entre f_2 e f_{hf} .

Interação com o fundo

A parametrização empírica utilizada pelo WAVEWATCH corresponde à parametrização linear do JONSWAP (HASSELMANN *et al.*, 1973), sendo igual a do modelo WAM.

$$S_{bot}(k, \theta) = 2\Gamma \frac{Rn - 0.5}{gd} N(k, \theta), \quad (\text{B.27})$$

Γ é uma constante empírica, estimada $\Gamma = -0,038m^2s^{-3}$ para marulho (HASSELMANN *et al.*, 1973), e $\Gamma = -0,067m^2s^{-3}$ para vagas (BOUWS e KOMEN, 1983). Rn é a razão entre a velocidade de grupo e a velocidade de fase.

B.2.3 Descrição numérica

A descrição numérica completa do modelo WAVEWATCH é bastante complexa e pode ser consultada em TOLMAN (2002). Nesta seção serão apresentados apenas alguns aspectos importantes que devem ser fixados pelo usuário para realizar as simulações.

A fórmula B.4 representa a equação básica do modelo, resolvida com algumas adaptações numéricas. Para evitar problemas de variação do número de onda em processos envolvendo água rasa, é fixada uma grade variável de frequências para resolver as equações, evitando assim perda de resolução. A grade logarítmica é dada por:

$$\omega_{m+1} = X_\omega \omega_m \quad (\text{B.28})$$

com m o contador discreto no espaço k , representando o número de frequências fixadas

pelo usuário. X_ω é o fator de incremento que multiplica cada frequência para obter a seguinte. A equação B.4 utiliza em sua resolução um método de passo de tempo fracionado.

O primeiro, chamado de passo de tempo global Δt_g , define o tempo gasto para pagar a solução inteira, e também corresponde ao intervalo de interpolação temporal do arquivo de vento que será usado como entrada.

O segundo é o passo de tempo de propagação espacial, representando o tempo máximo de propagação para a frequência mais baixa no modelo $\Delta t_{p,m}$. Na frequência do contador m , o passo de tempo máximo $\Delta t_{p,m}$ é calculado por:

$$\Delta t_{p,m} = \frac{f_m}{f_1} \Delta t_{p,1} \quad (\text{B.29})$$

O terceiro passo se refere às propagações inter-espectrais. Esse pode ser igual ou menor que passo de tempo global. Em trabalhos com foco em águas profundas é costume fixá-los iguais, como é o caso do presente estudo.

O último passo de tempo descreve a integração dos termos fonte, o qual é dinamicamente ajustado separadamente para cada ponto de grade e passo de tempo global. Este deve ser mais acurado em cálculos de rápidas mudanças nas condições do vento e menor em situações de variações lentas, economizando tempo de integração do modelo.

Apêndice C

O evento do dia 30/05/1997

Esse evento, relativo ao caso 16 detectado pelo modelo, gerou ondas inicialmente de SW, que mudaram rapidamente para S e SE com o deslocamento do ciclone. Na Baía de Campos o máximo se deu no dia 30, com $H_s=5,10$ m, visto na PLEDS. Em 31/05/1997 o marulho perde força e passa a incidir de SE. Devido à proximidade do ciclone, as ondas ao sul no litoral do Rio de Janeiro e São Paulo têm energia concentrada em S/SE, concordando com a pista vista nos gráficos. A forte ondulação adentrou a Baía de Guanabara causando danos na Marina da Glória, destruindo a ciclovia da praia do Flamengo e o calçadão de São Conrado.

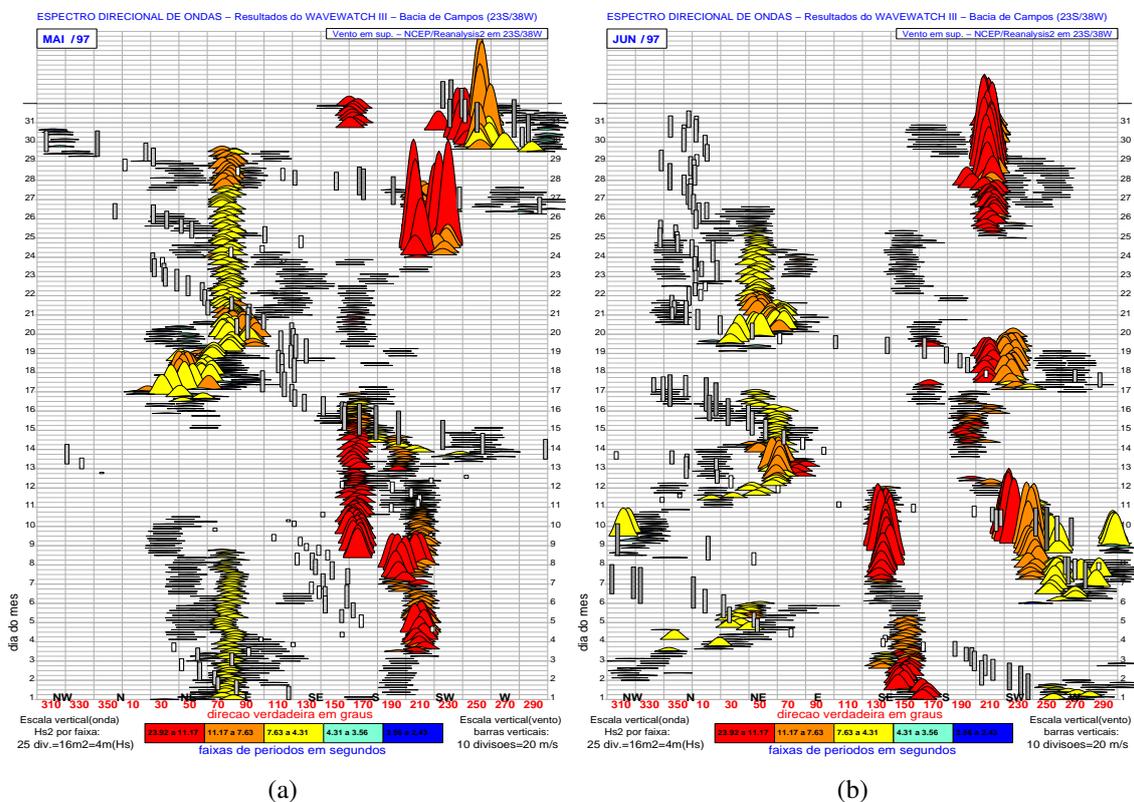
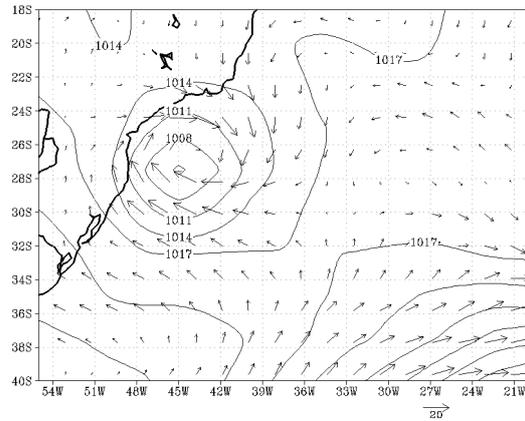


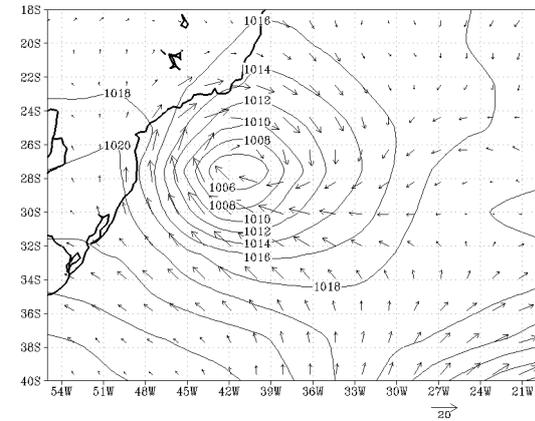
Figura C.1: PLEDS apresentando as ondas geradas pelo ciclone ocorrido entre os dias 28/05 e 02/06 de 1997. Em (a) o foco é no final do mês e em (b) nos primeiros dias.

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:29:0



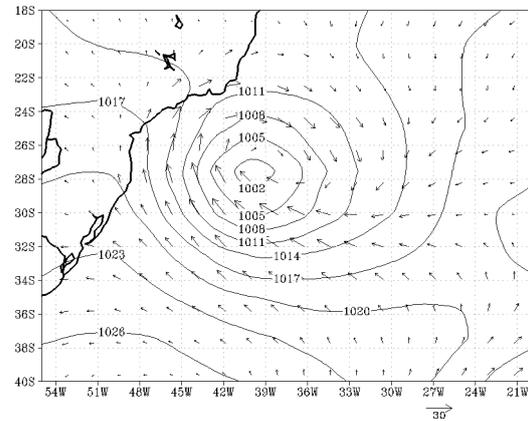
(a)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:29:12



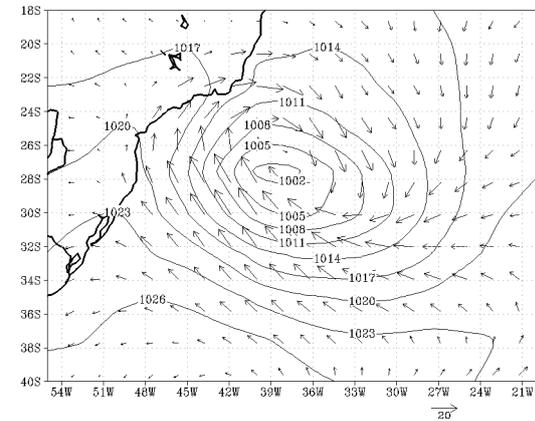
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:29:18



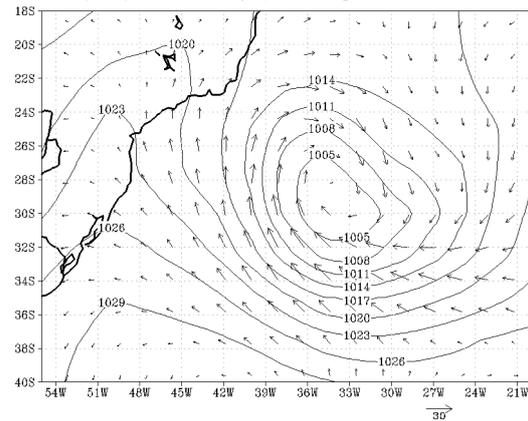
(c)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:30:0



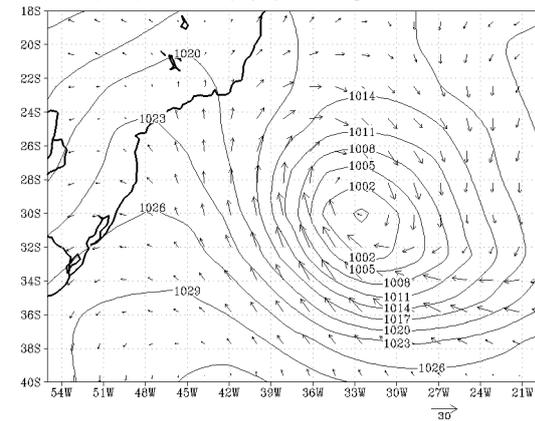
(d)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:30:12



(e)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1997:5:31:0

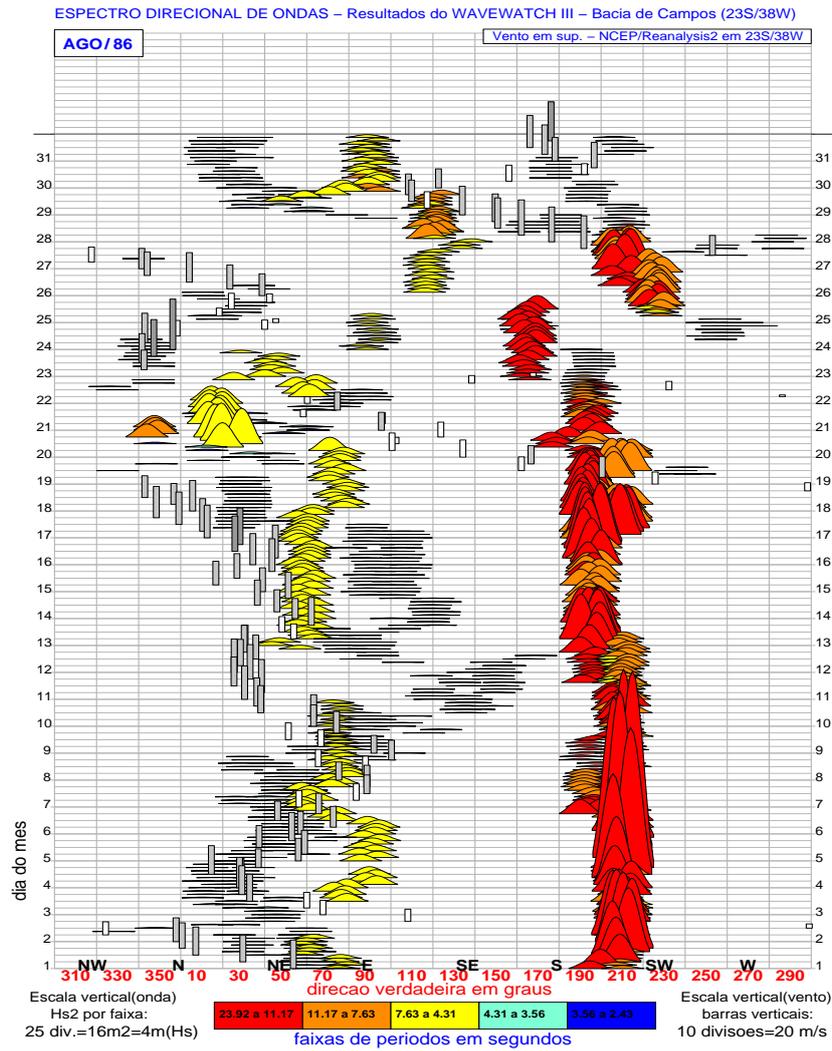


(f)

Figura C.2: Evolução dos campos de pressão e vento relativo ao ciclone que gerou a grande ondulação dos dias 28 de maio a 2 de abril de 1997.

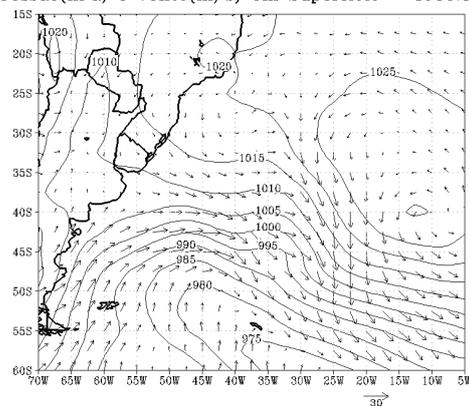
Apêndice D

Extremos registrados pelo WAVEWATCH



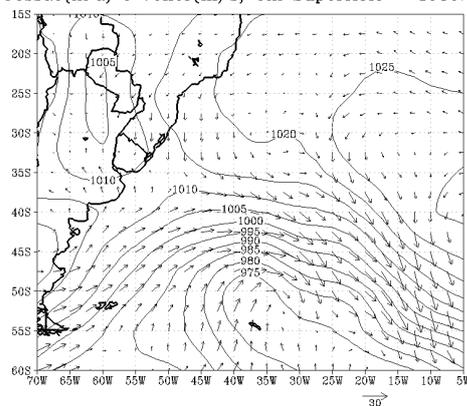
(a)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 1986:8:2:12



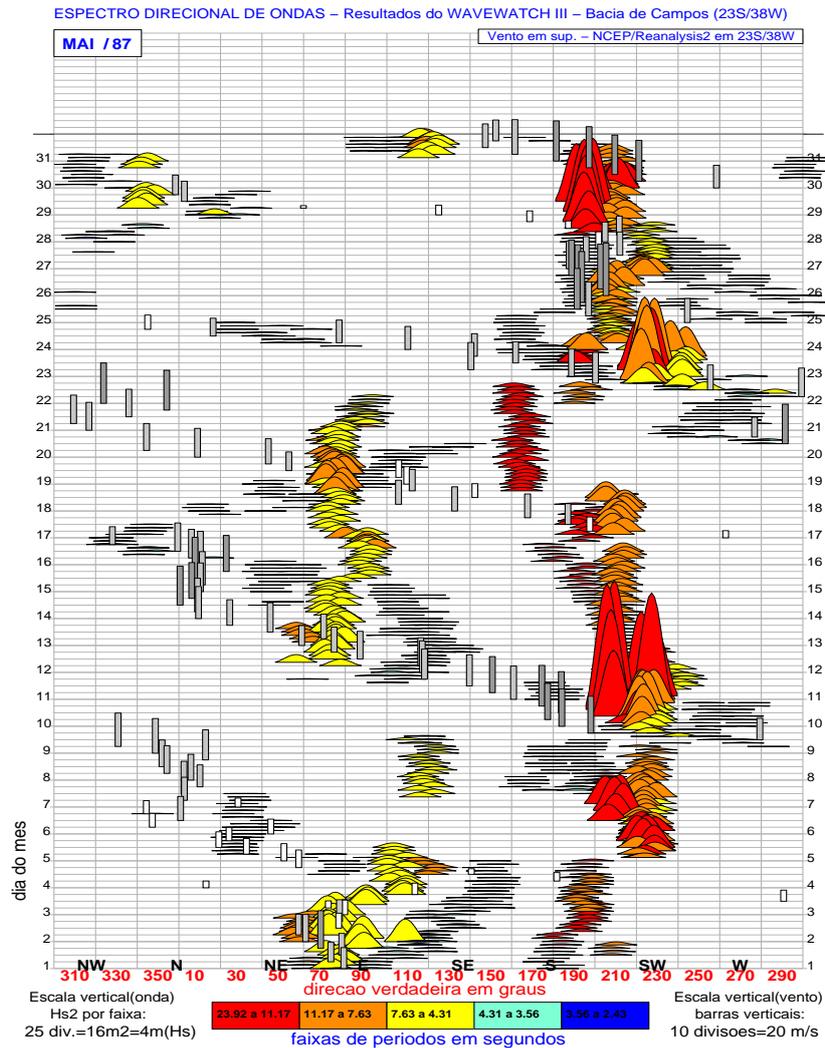
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 1986:8:3:0

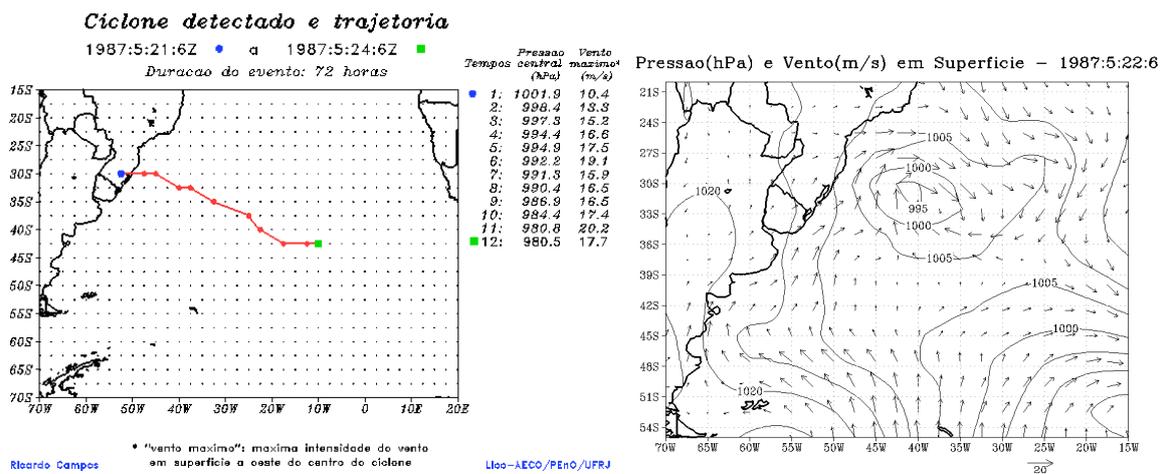


(c)

Figura D.1: Caso 1, máximo dia 04/08/1986. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



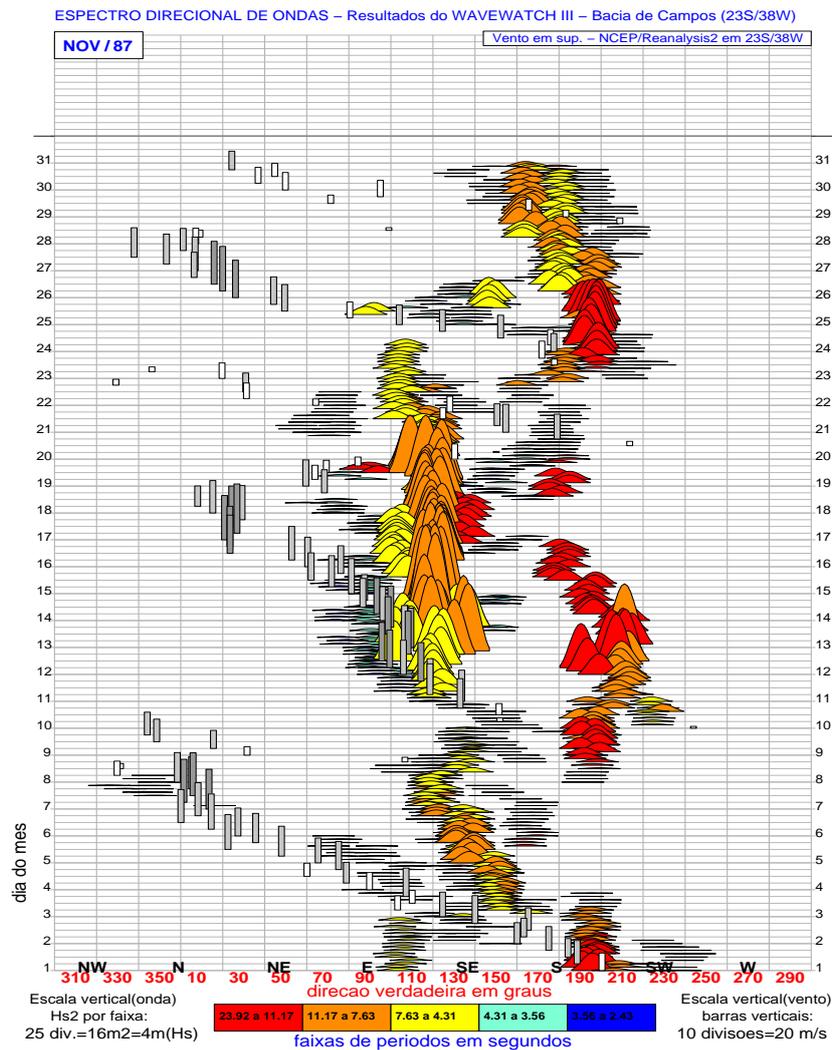
(a)



(b)

(c)

Figura D.2: Caso 2, máximo dia 23/05/1987. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

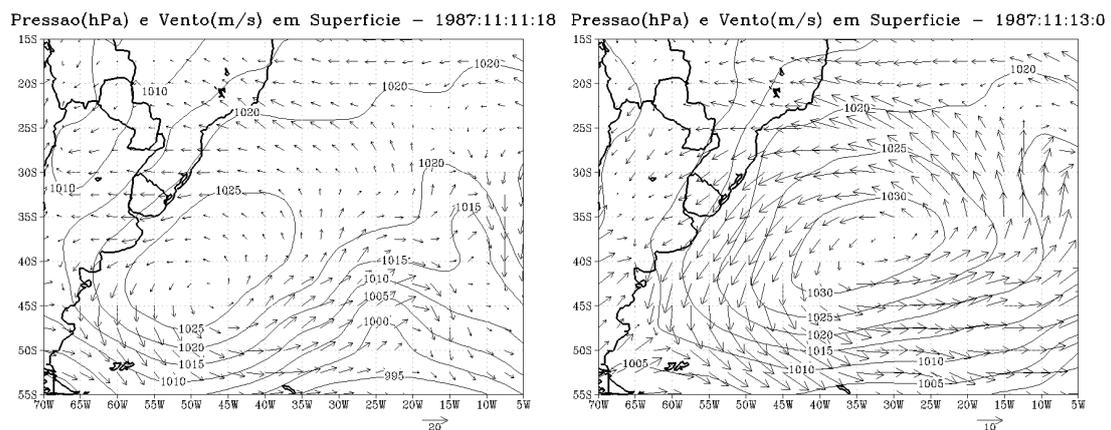
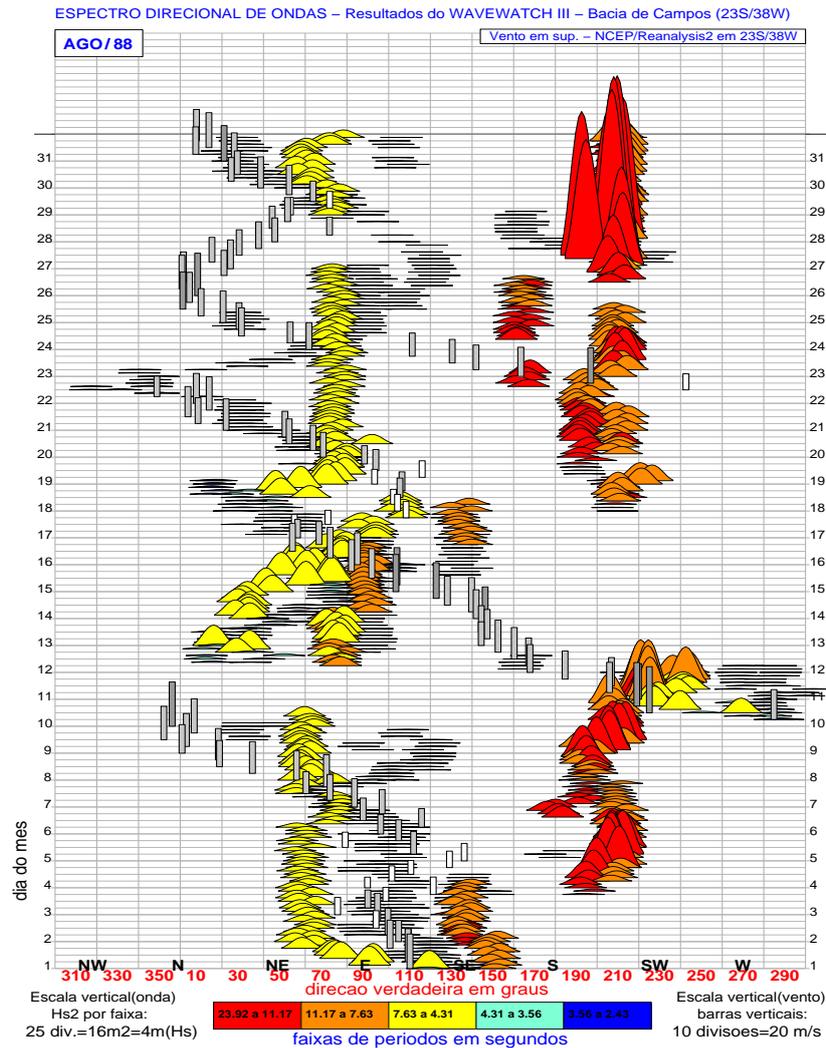
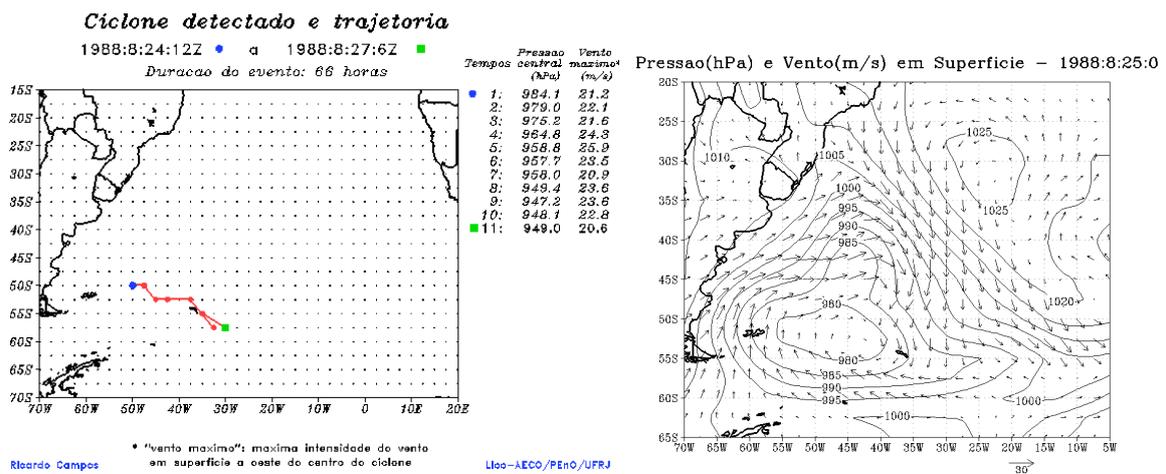


Figura D.3: Caso 3, máximo dia 13/11/1987. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



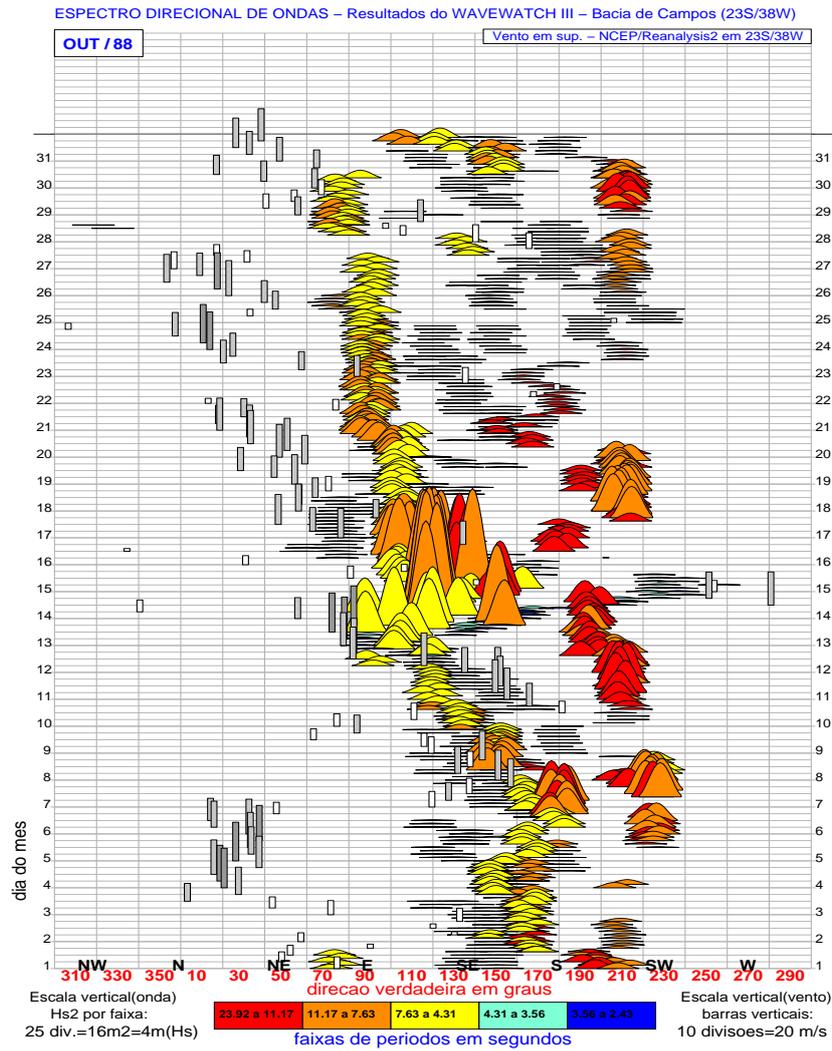
(a)



(b)

(c)

Figura D.4: Caso 4, máximo dia 27/08/1988. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

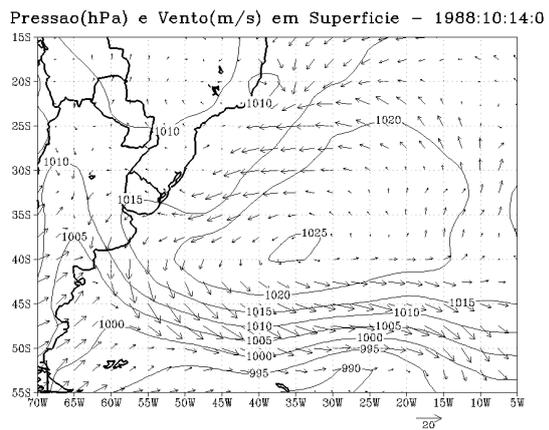
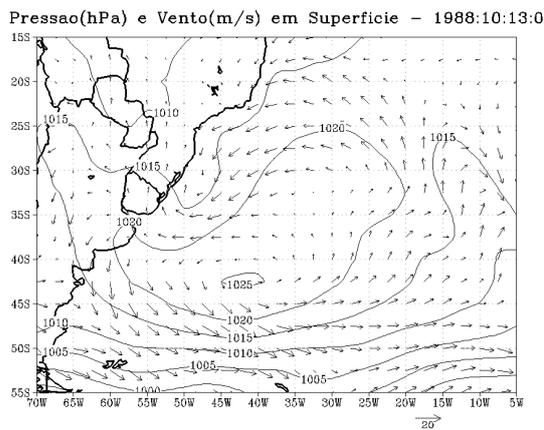
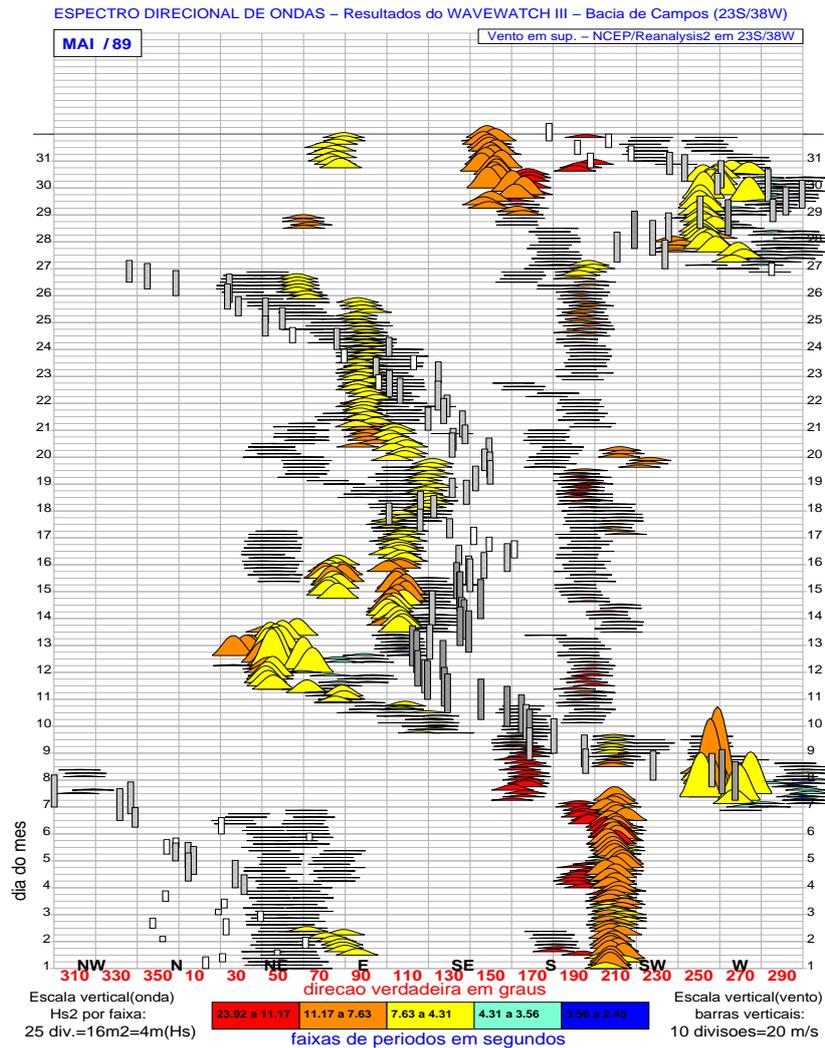
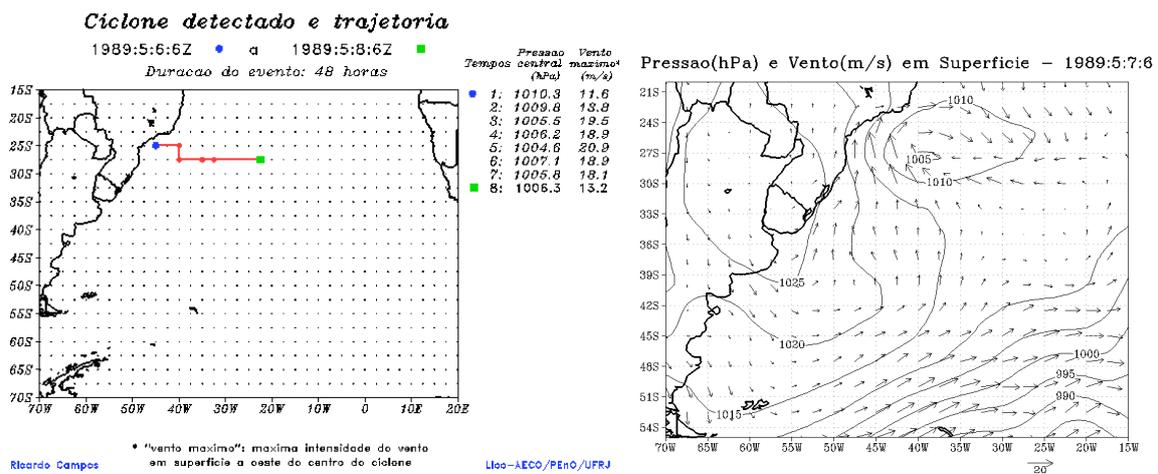


Figura D.5: Caso 5, máximo dia 14/10/1988. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



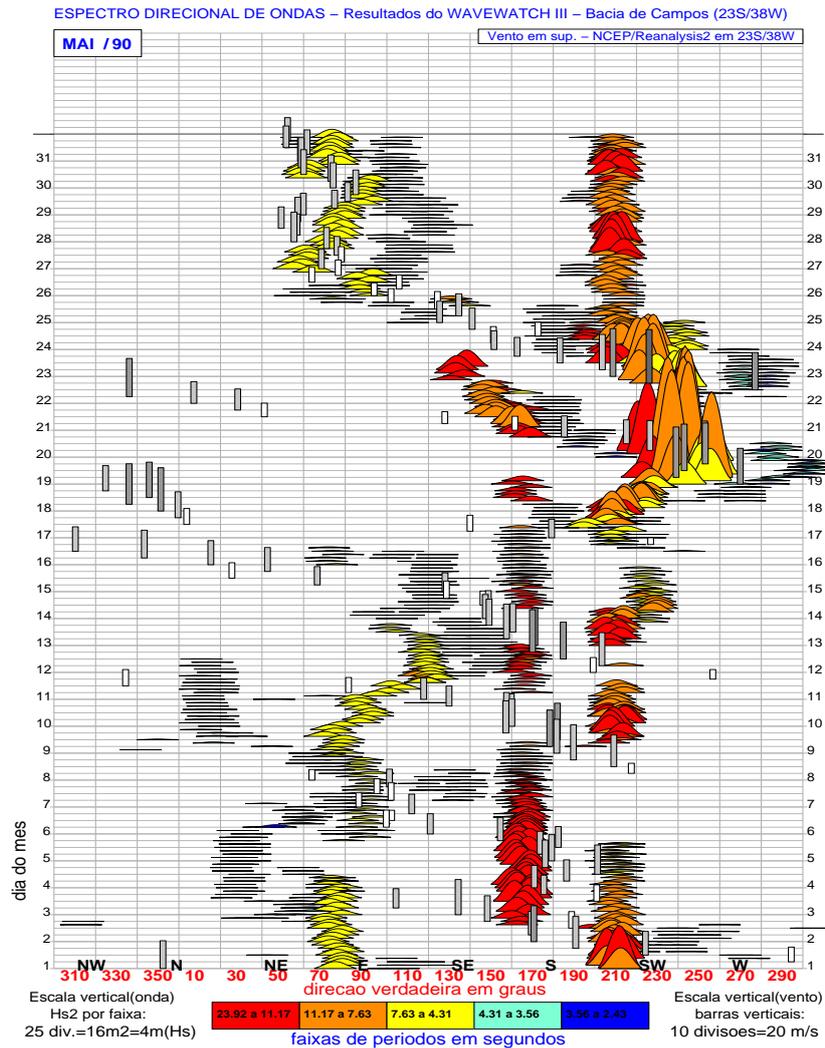
(a)



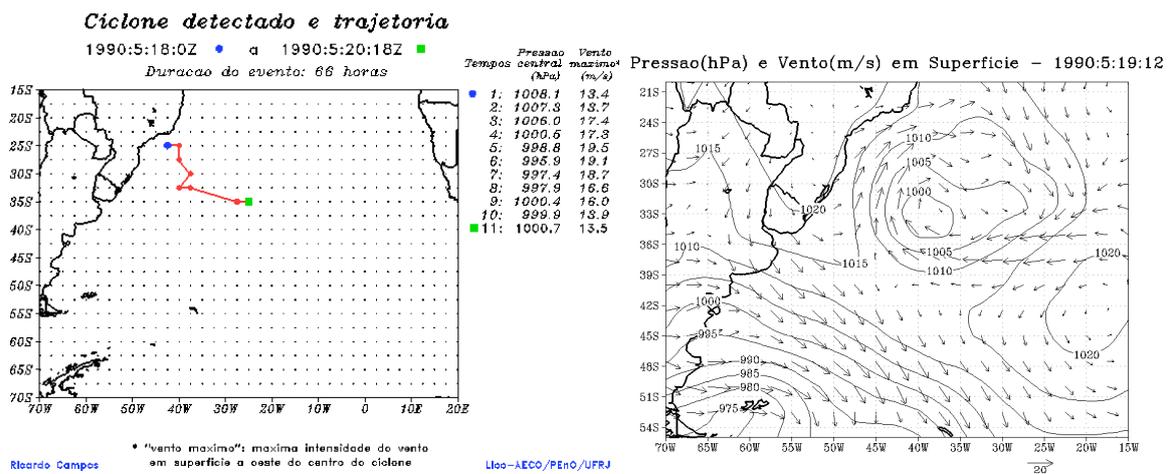
(b)

(c)

Figura D.6: Caso 6, máximo dia 07/05/1989. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



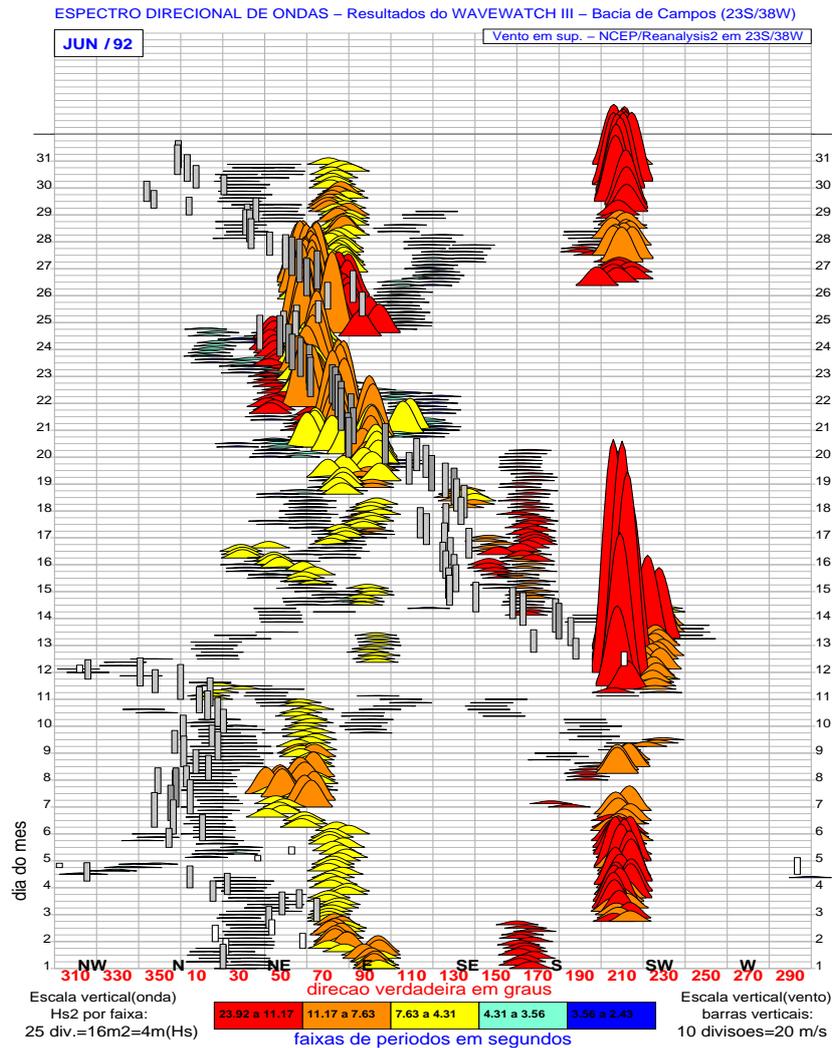
(a)



(b)

(c)

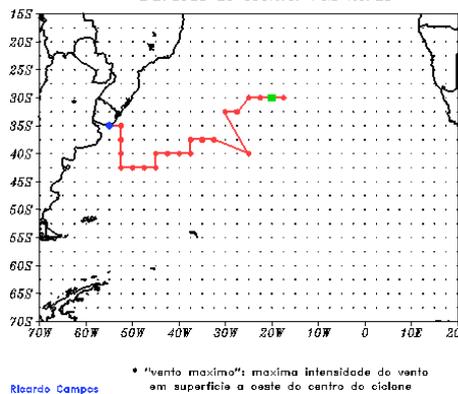
Figura D.7: Caso 7, máximo dia 20/05/1990. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

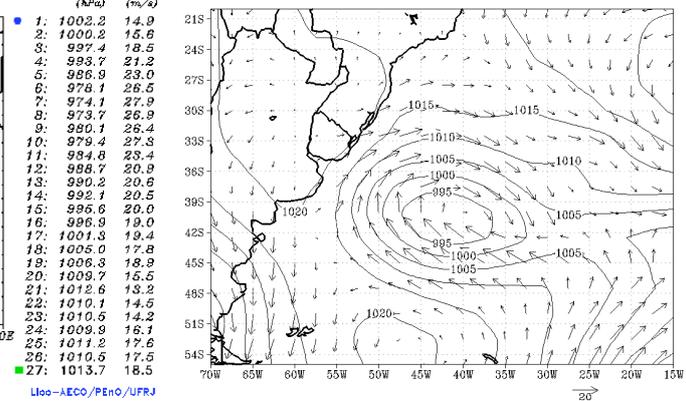
Ciclone detectado e trajetoria

1992:6:8:12Z a 1992:6:15:6Z
Duracao do evento: 162 horas



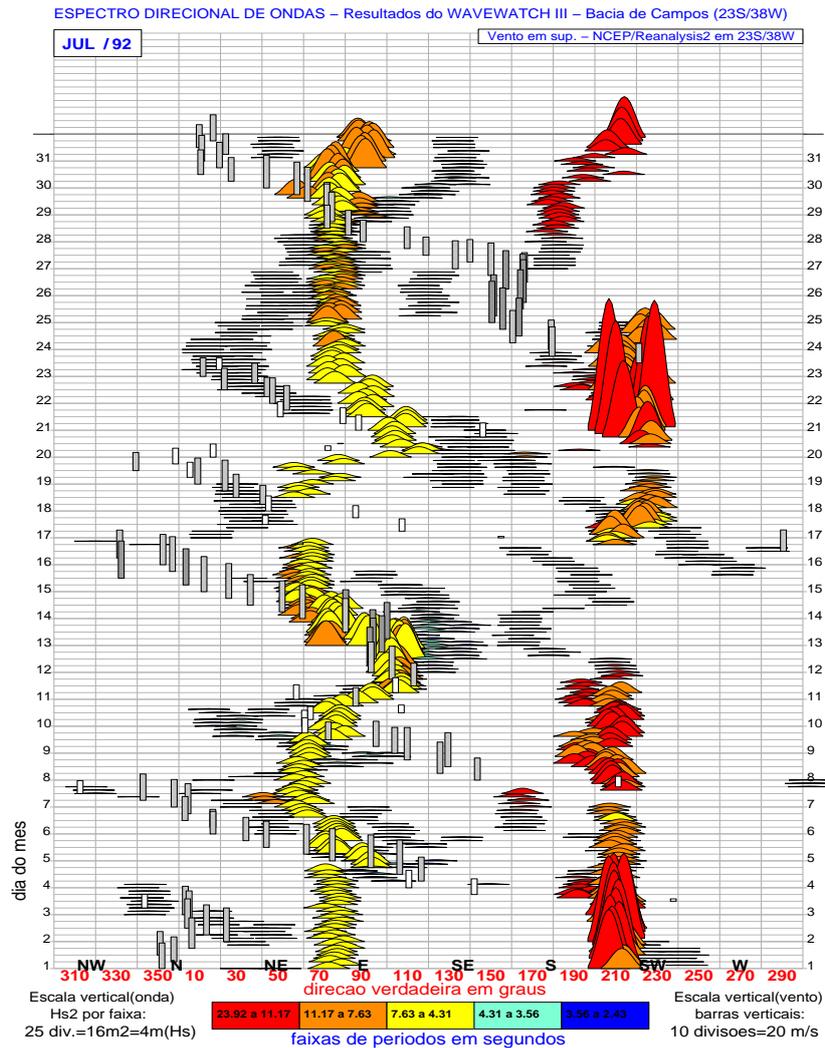
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 1992:6:11:12



(c)

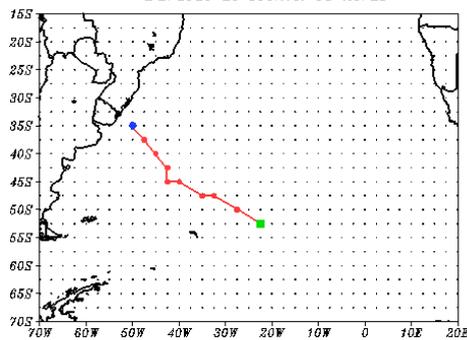
Figura D.8: Caso 8, máximo dia 12/06/1992. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

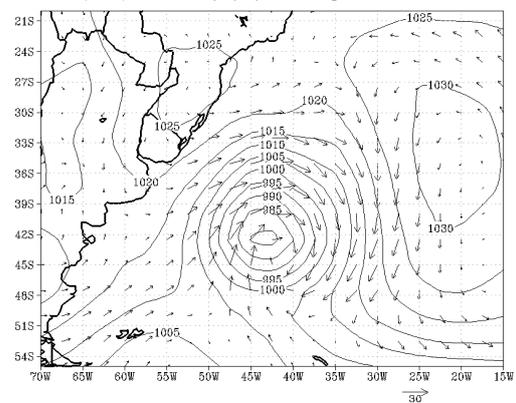
Ciclone detectado e trajetoria

1992:7:19:0Z a 1992:7:21:18Z
Duracao do evento: 66 horas



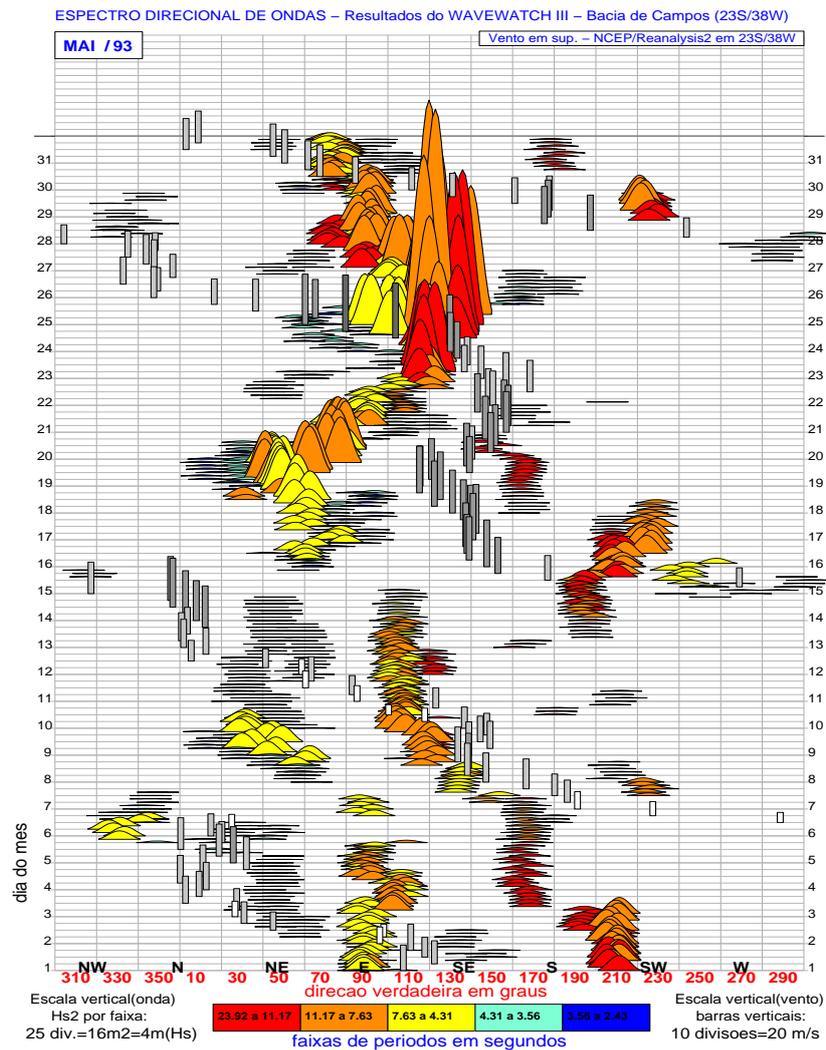
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 1992:7:20:0



(c)

Figura D.9: Caso 9, máximo dia 21/07/1992. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

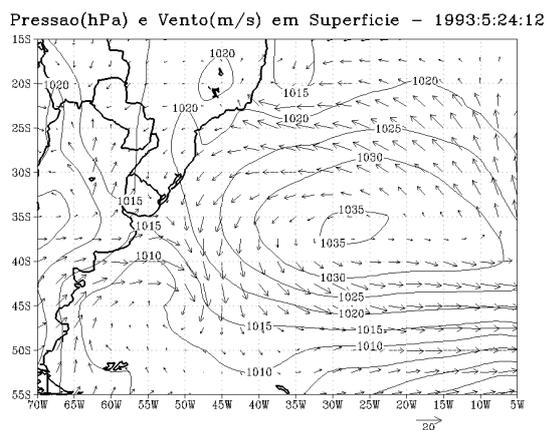
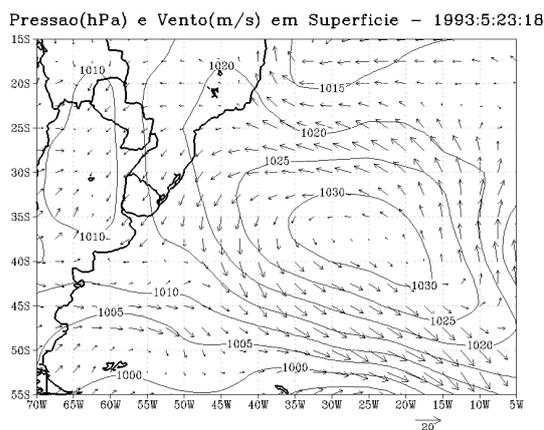
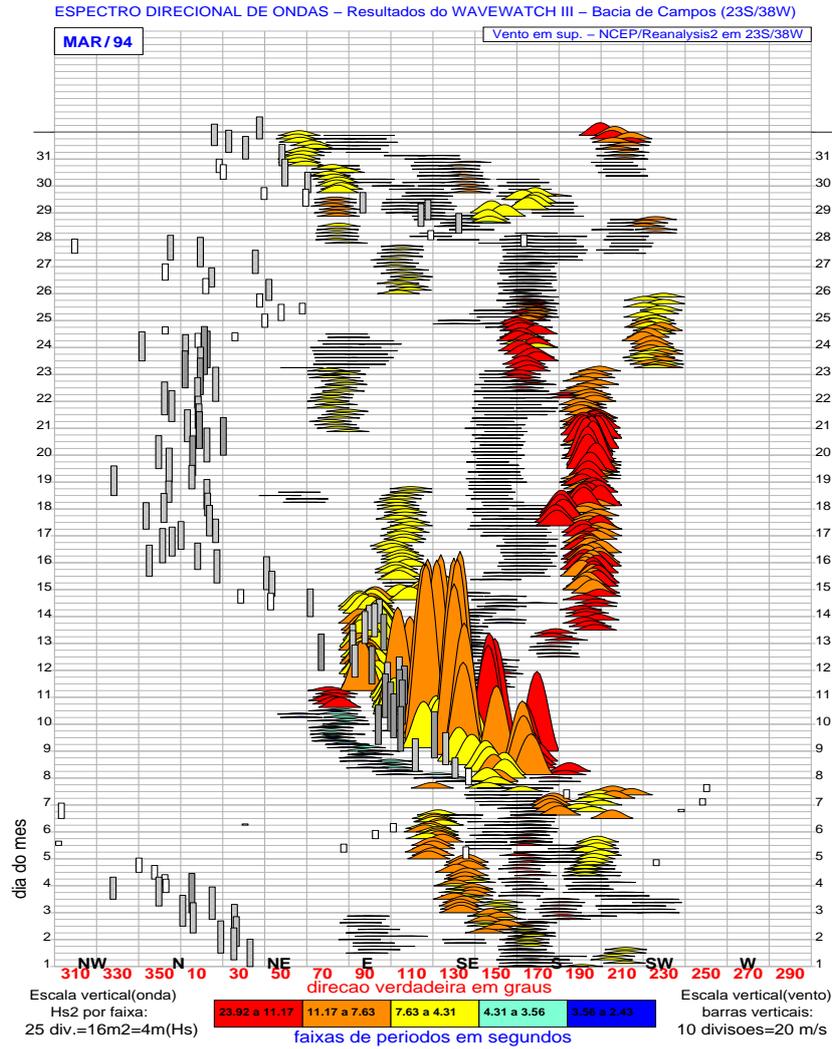


Figura D.10: Caso 10, máximo dia 25/05/1993. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

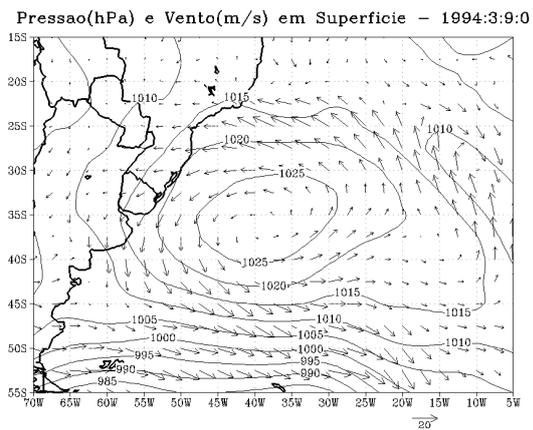
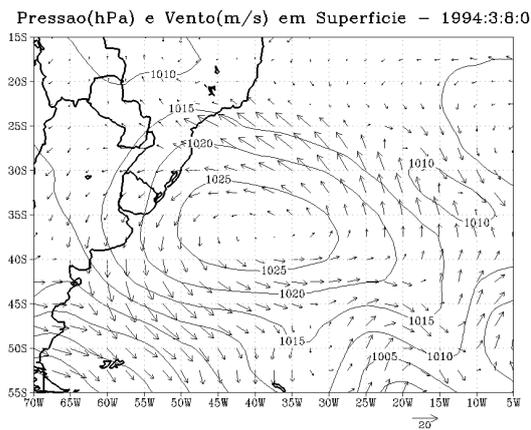
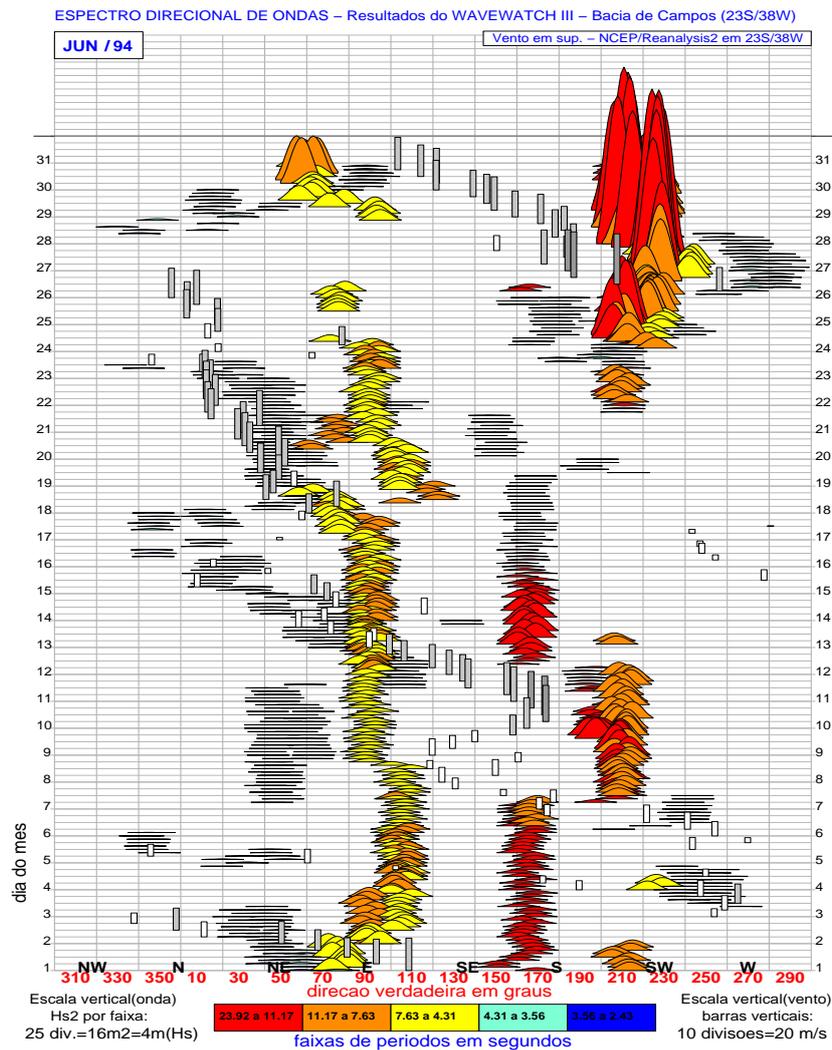
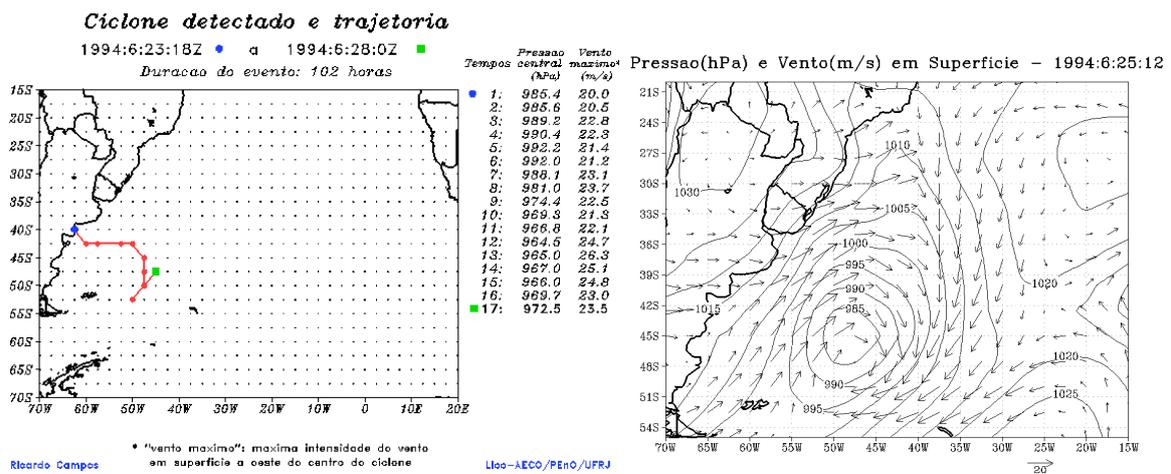


Figura D.11: Caso 11, máximo dia 09/03/1994. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)



(b)

(c)

Figura D.12: Caso 12, máximo dia 27/06/1994. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.

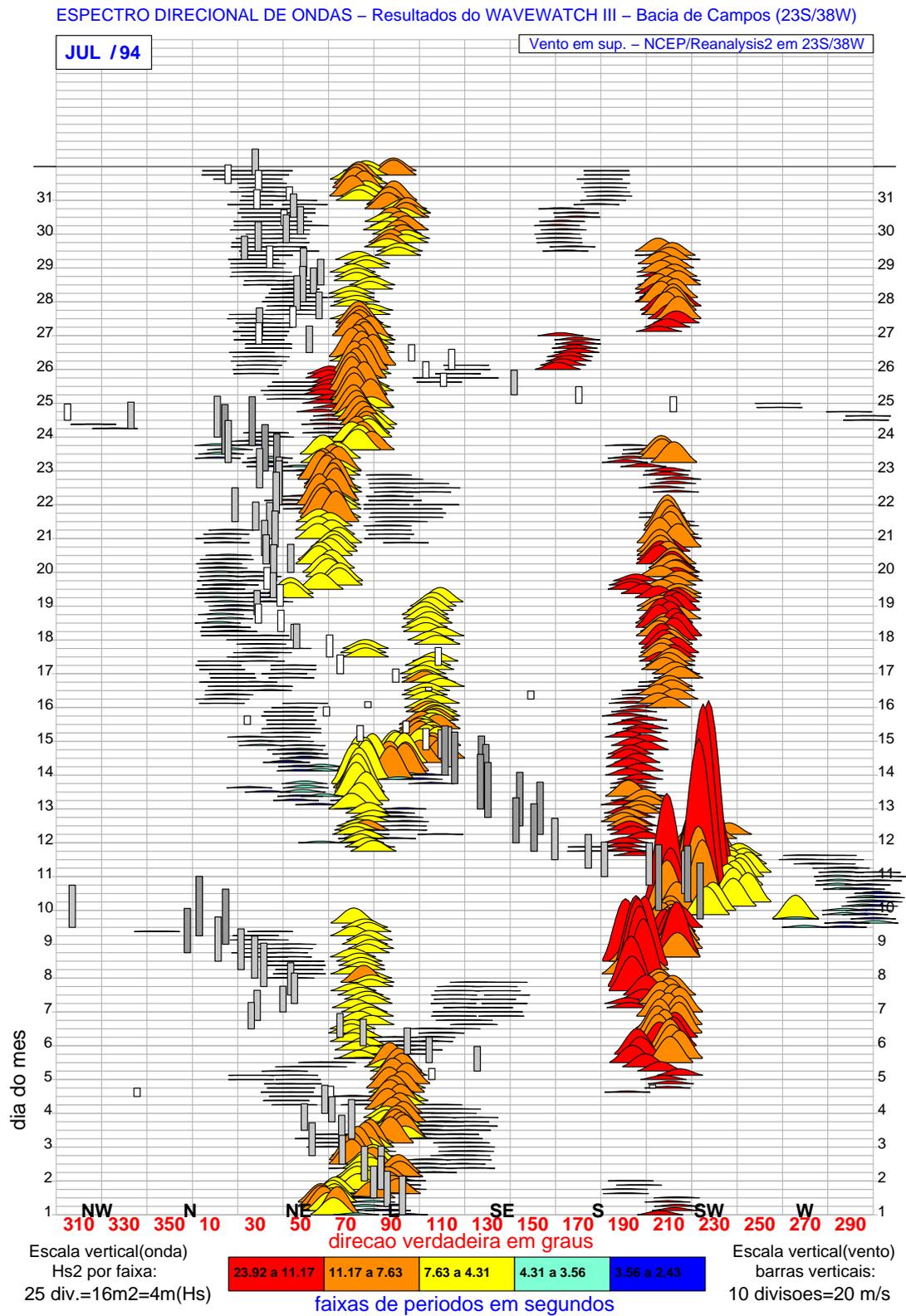
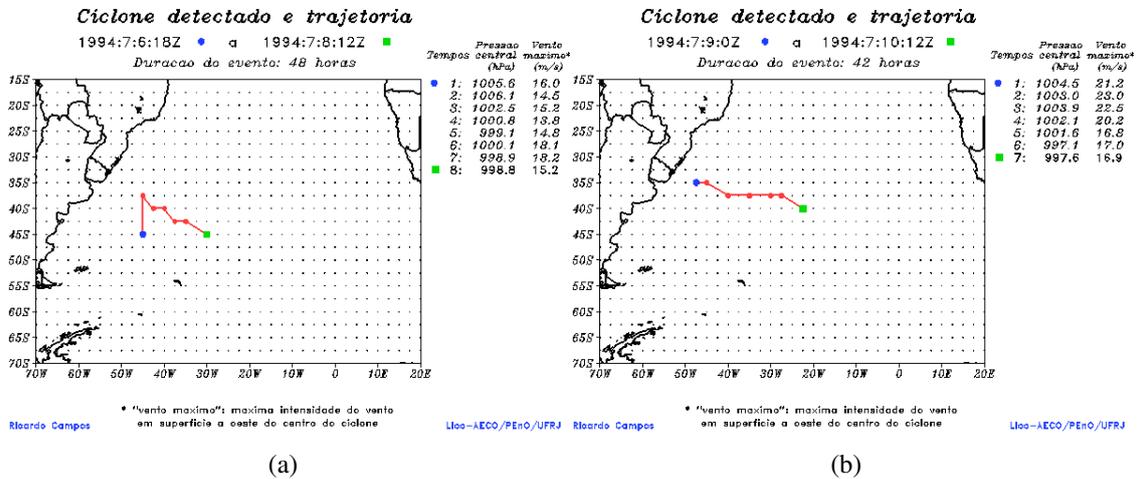
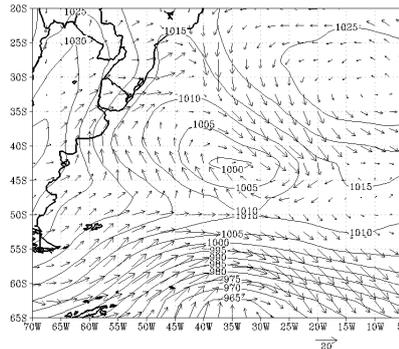


Figura D.13: Caso 13, máximo dia 10/07/1994. PLEDSWW3 do mês correspondente.

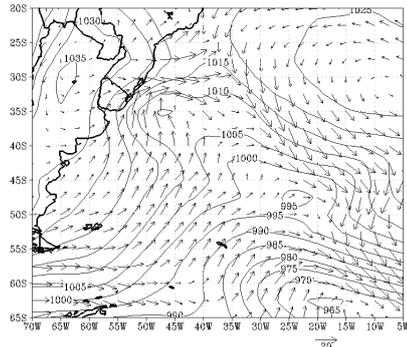


Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1994:7:8:6



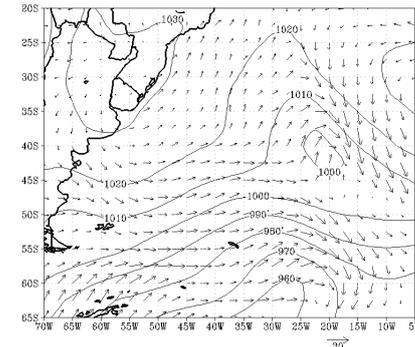
(c)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1994:7:9:0



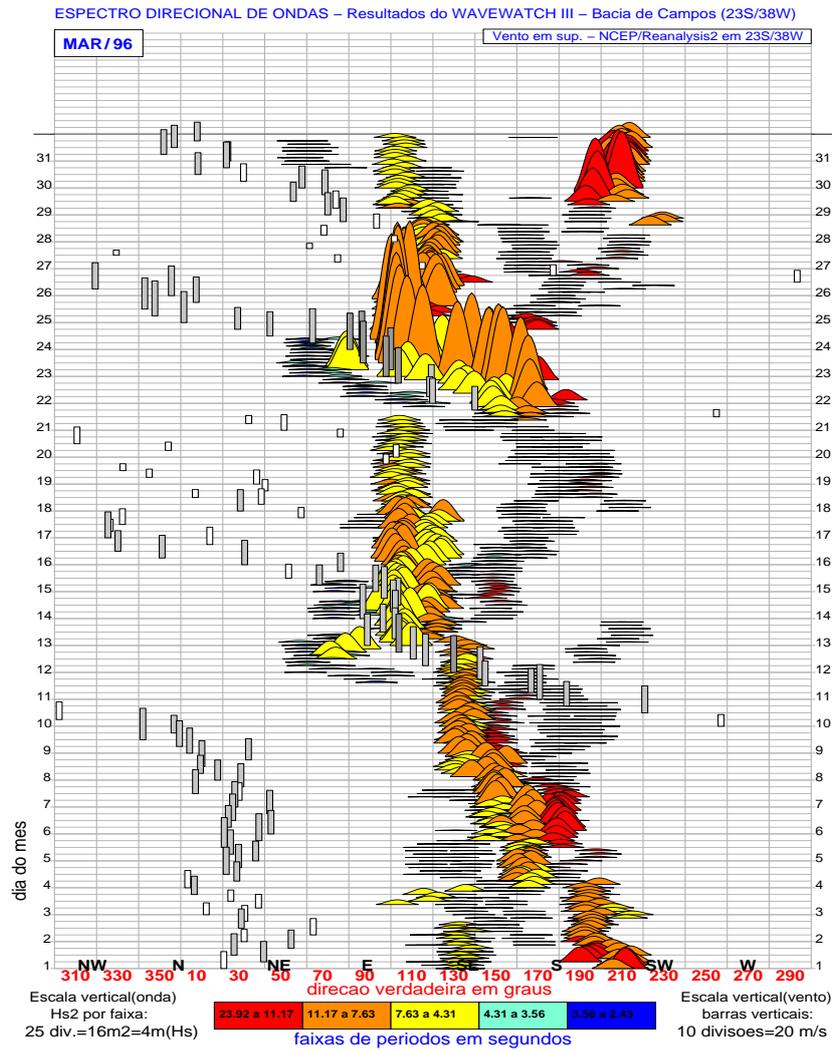
(d)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie - 1994:7:10:12



(e)

Figura D.14: Caso 13, máximo dia 10/07/1994. Ciclones geradores da grande ondulação identificada. (a) e (b) trajetórias dos ciclones. (c), (d) e (e) campos de vento e pressão em superfície..



(a)

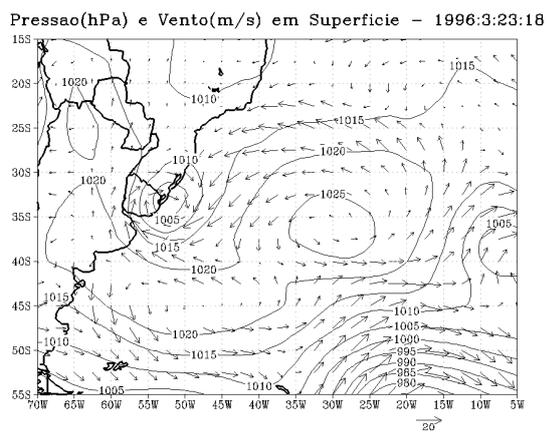
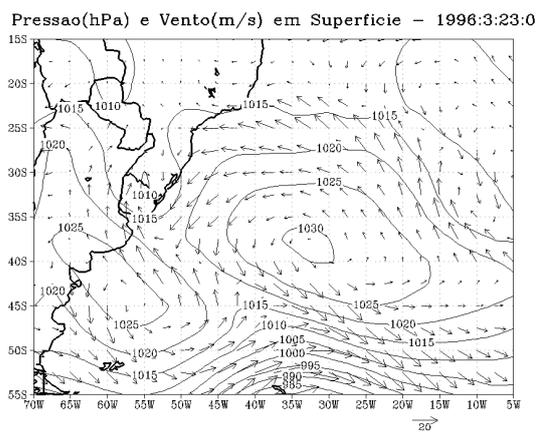
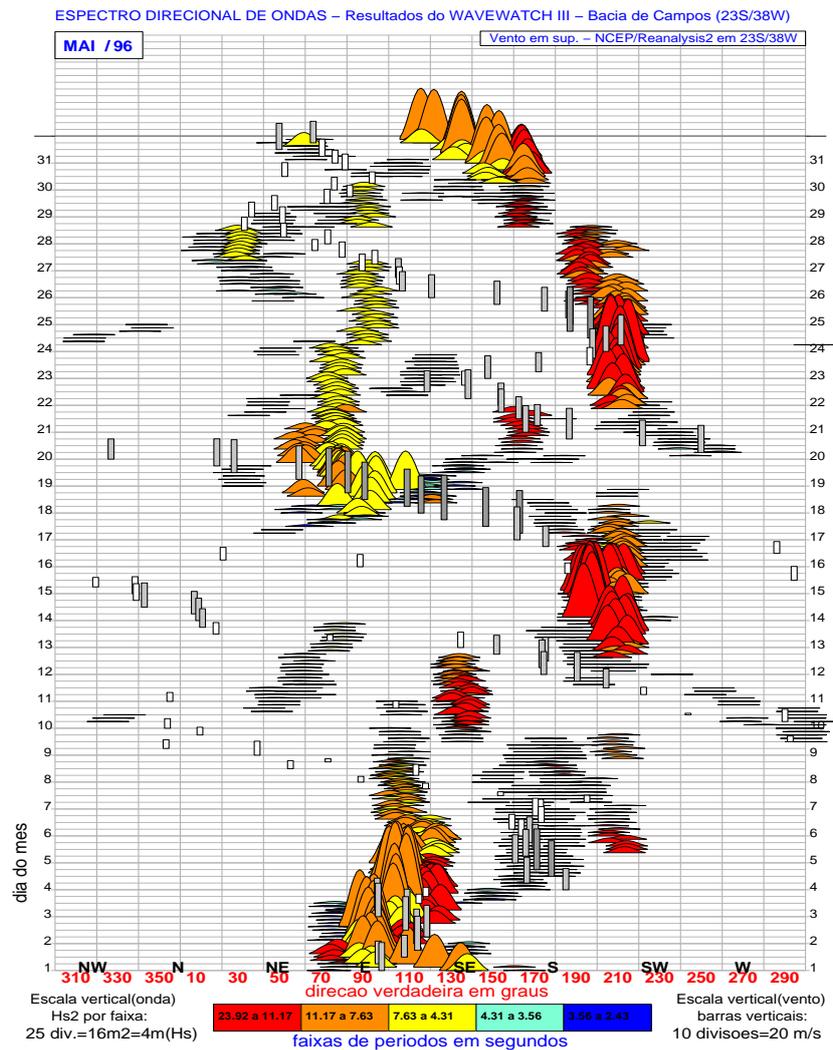


Figura D.15: Caso 14, máximo dia 24/03/1996. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

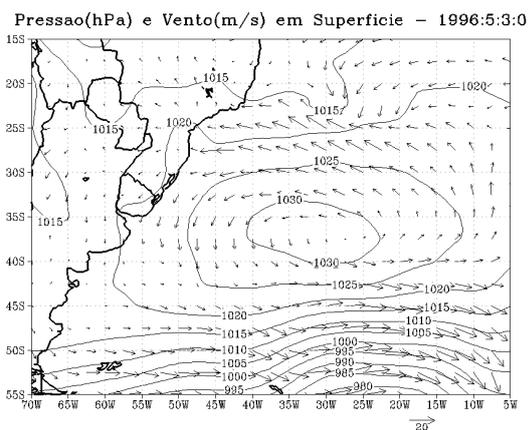
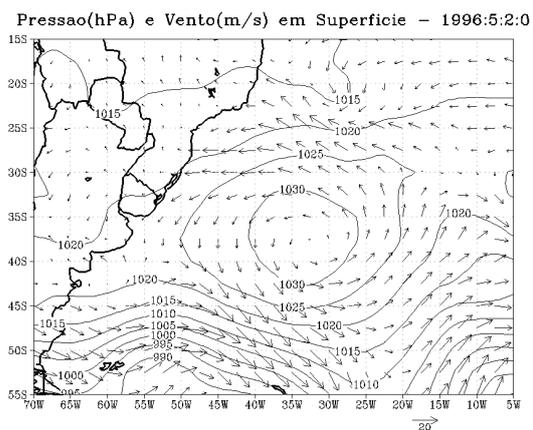
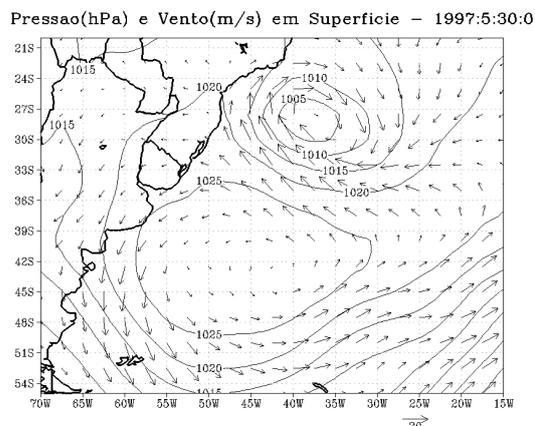
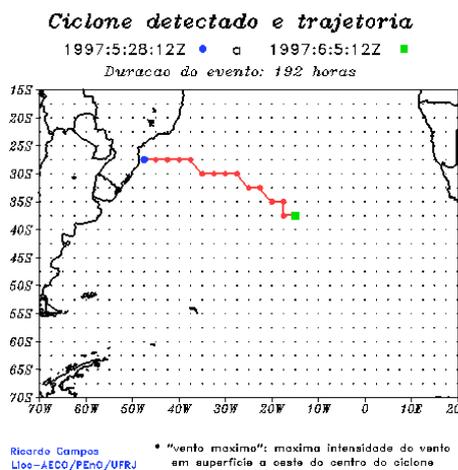
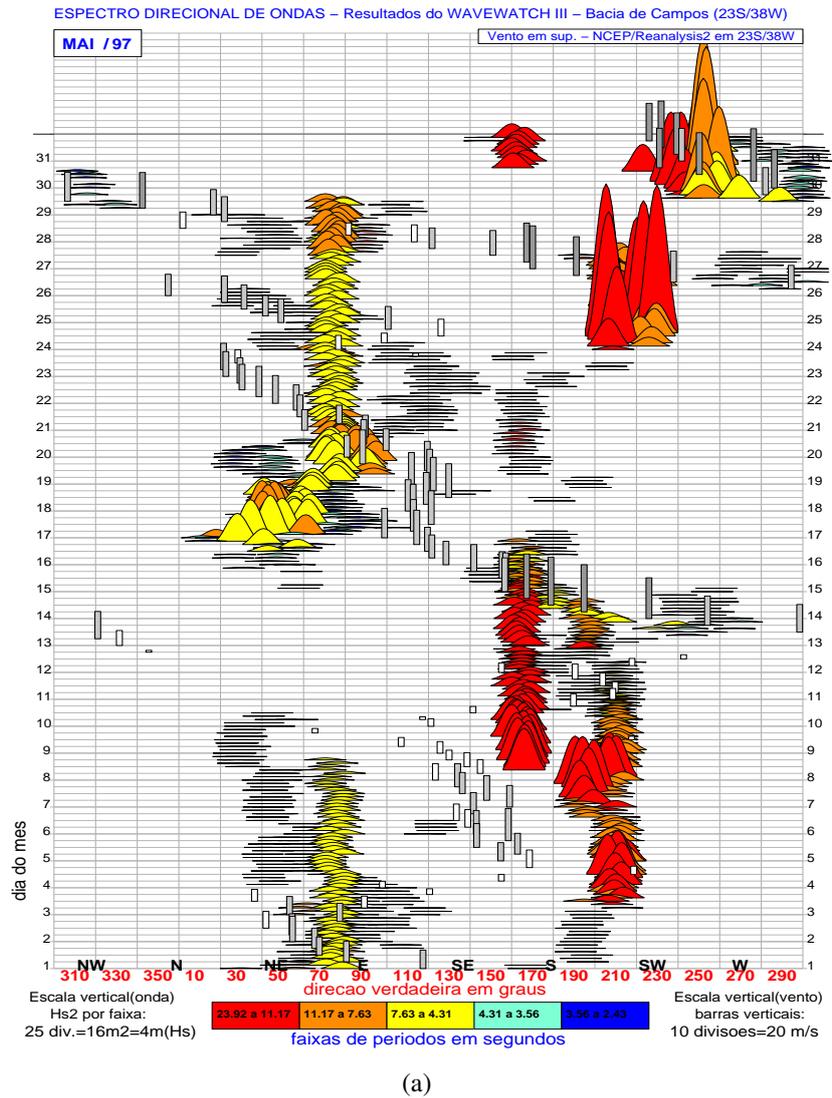


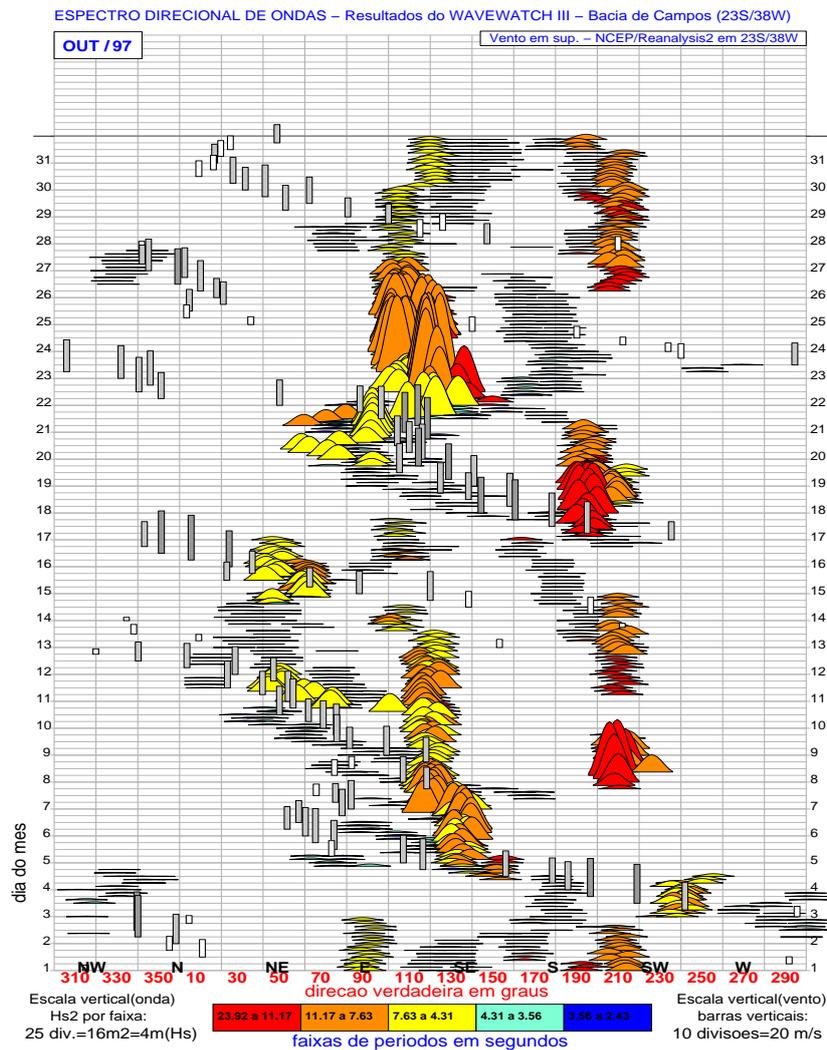
Figura D.16: Caso 15, máximo dia 03/05/1996. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(b)

(c)

Figura D.17: Caso 16, máximo dia 30/05/1997. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente (destaque para outra grande ondulação dia 24). (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

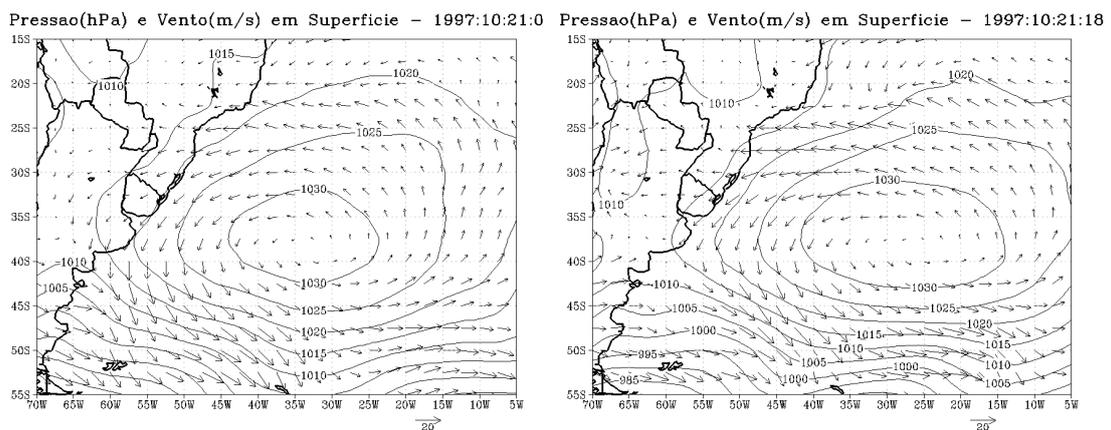
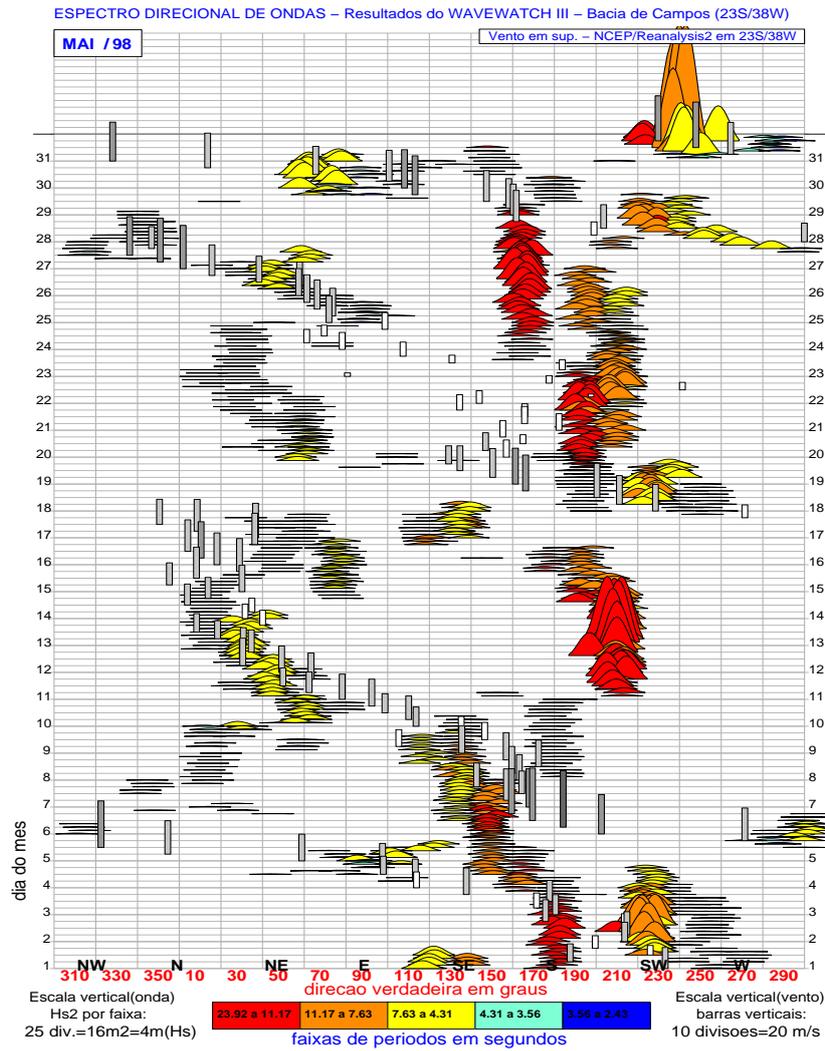
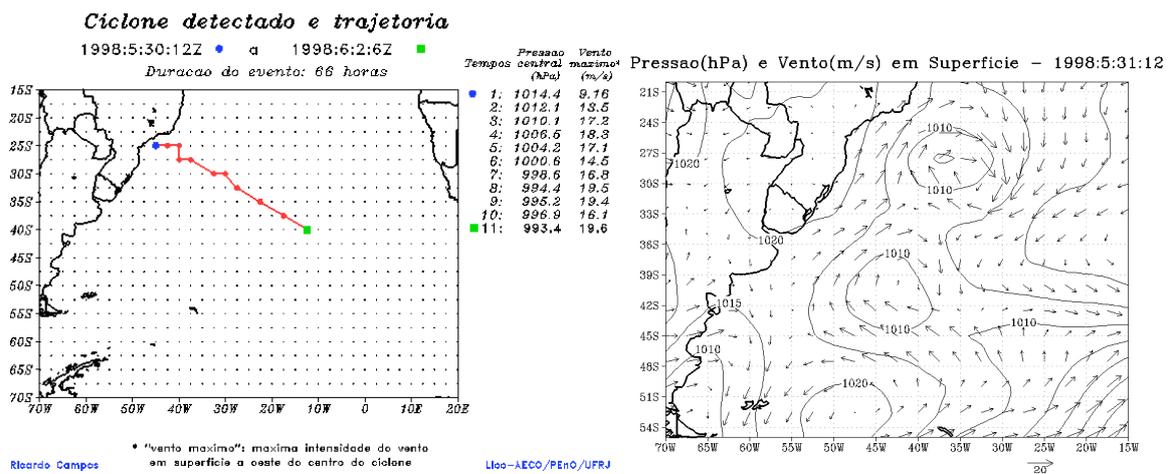


Figura D.18: Caso 17, máximo dia 22/10/1997. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



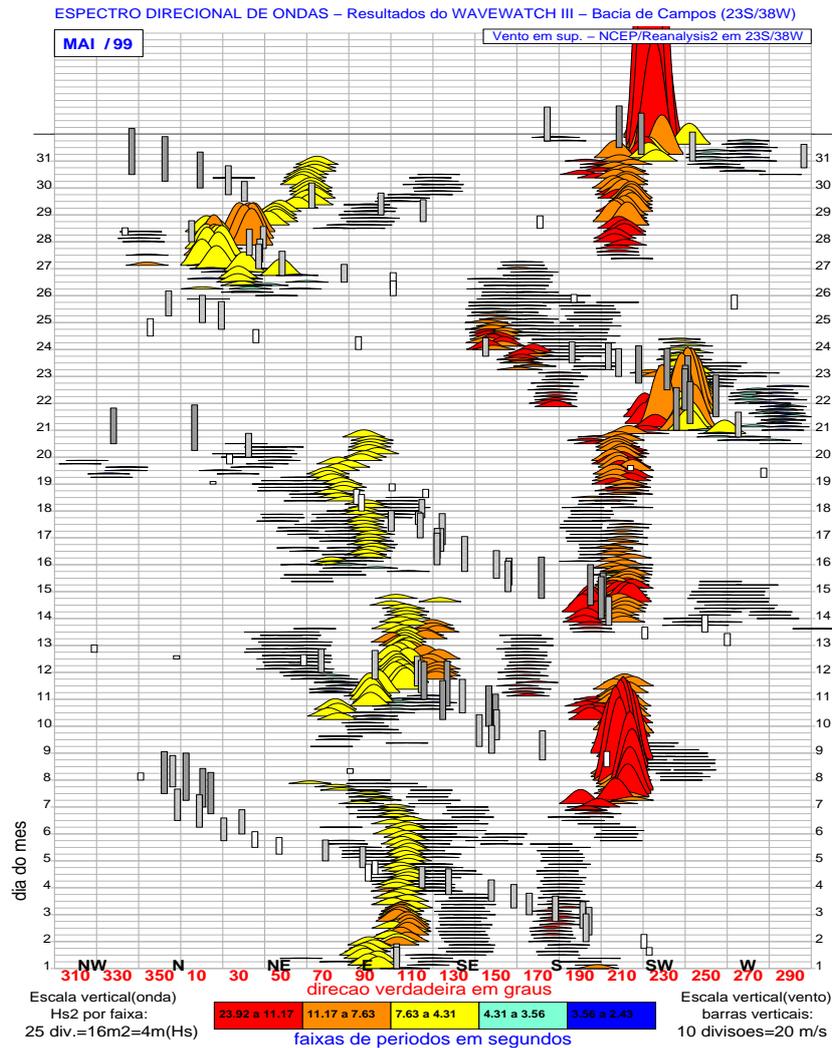
(a)



(b)

(c)

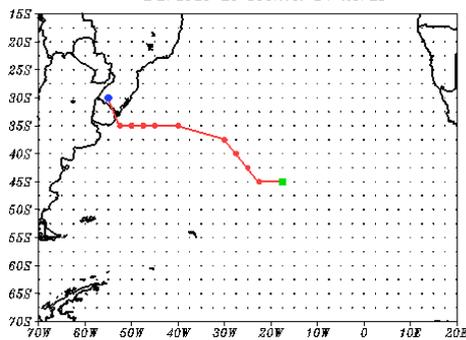
Figura D.19: Caso 18, máximo dia 31/05/1998. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

Ciclone detectado e trajetoria

1999:5:29:0Z a 1999:6:1:12Z
Duracao do evento: 84 horas



* "vento máximo": máxima intensidade do vento em superfície a oeste do centro do ciclone

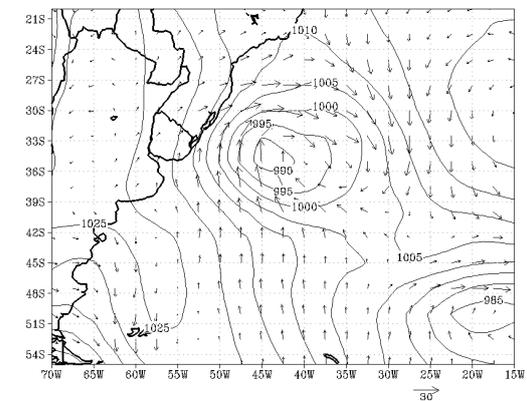
Rio de Janeiro

	Pressao Tempo central (hPa)	Vento maximo (m/s)
1:	1008.6	8.84
2:	1005.7	15.1
3:	1001.3	18.2
4:	994.9	24.3
5:	993.1	24.1
6:	990.0	23.4
7:	987.7	26.1
8:	985.8	27.1
9:	979.2	24.3
10:	977.1	22.4
11:	977.0	21.5
12:	976.7	20.5
13:	977.3	20.9
14:	970.9	24.5

Lisboa-AECO/PEO/UFRJ

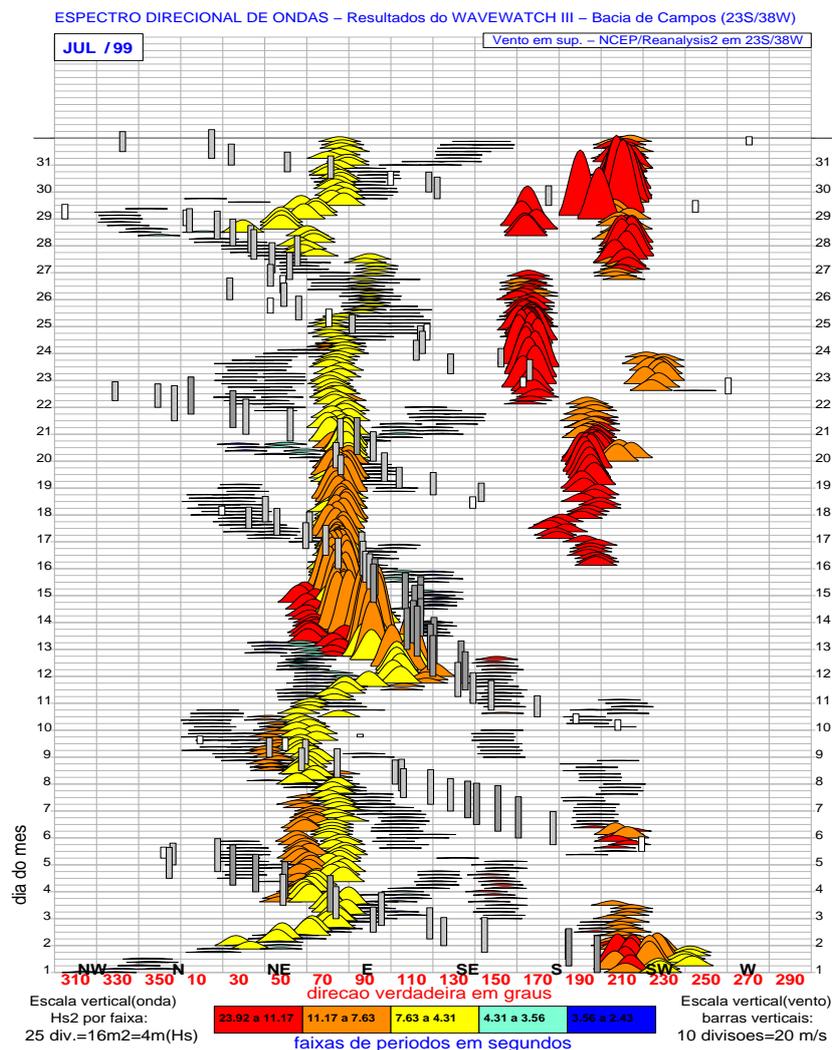
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 1999:5:30:12



(c)

Figura D.21: Caso 20, máximo dia 31/05/1999. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

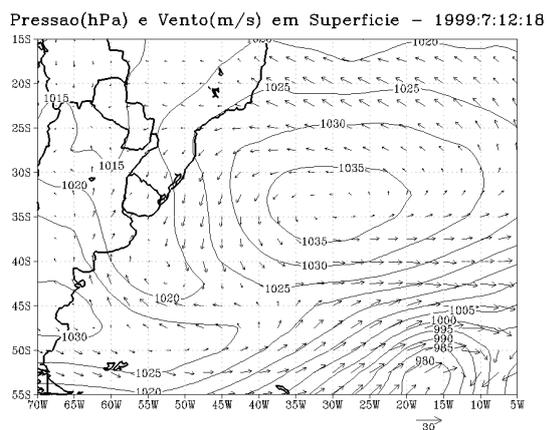
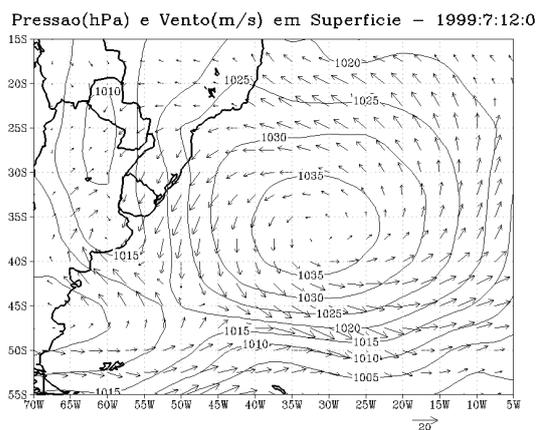
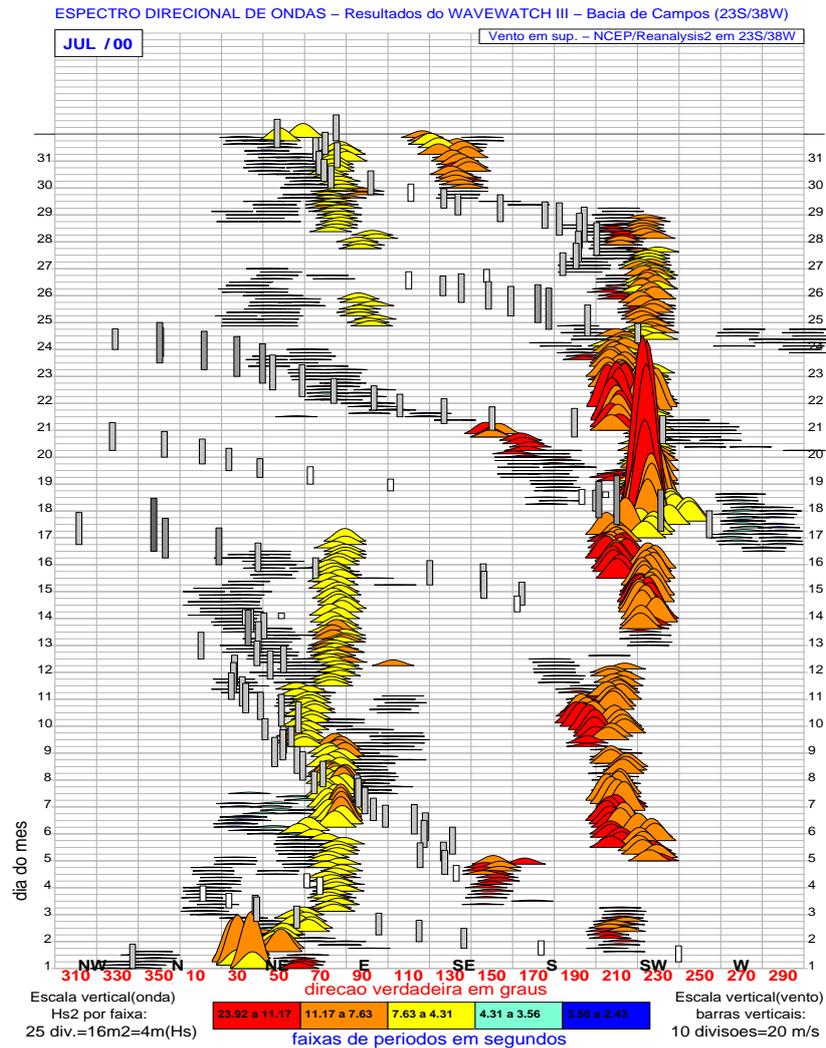
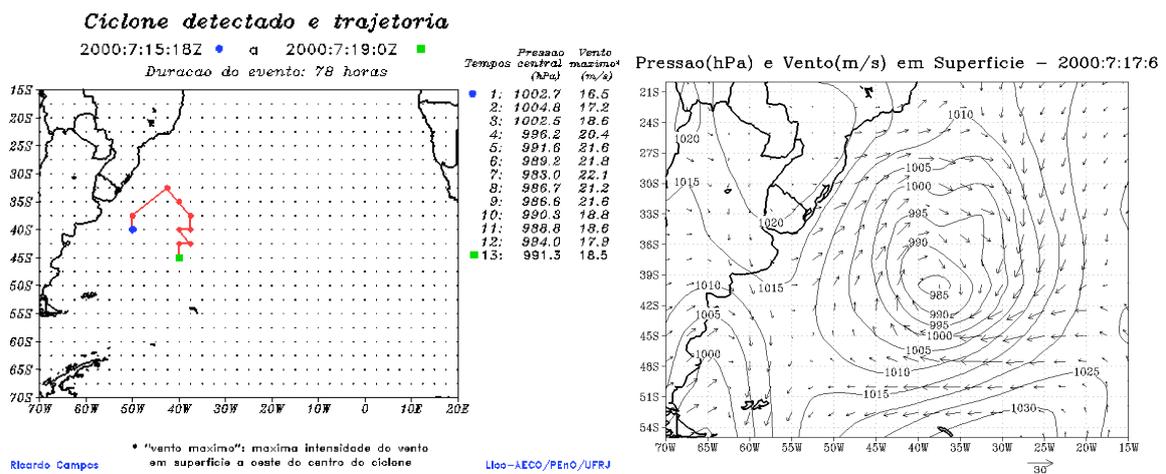


Figura D.22: Caso 21, máximo dia 13/07/1999. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



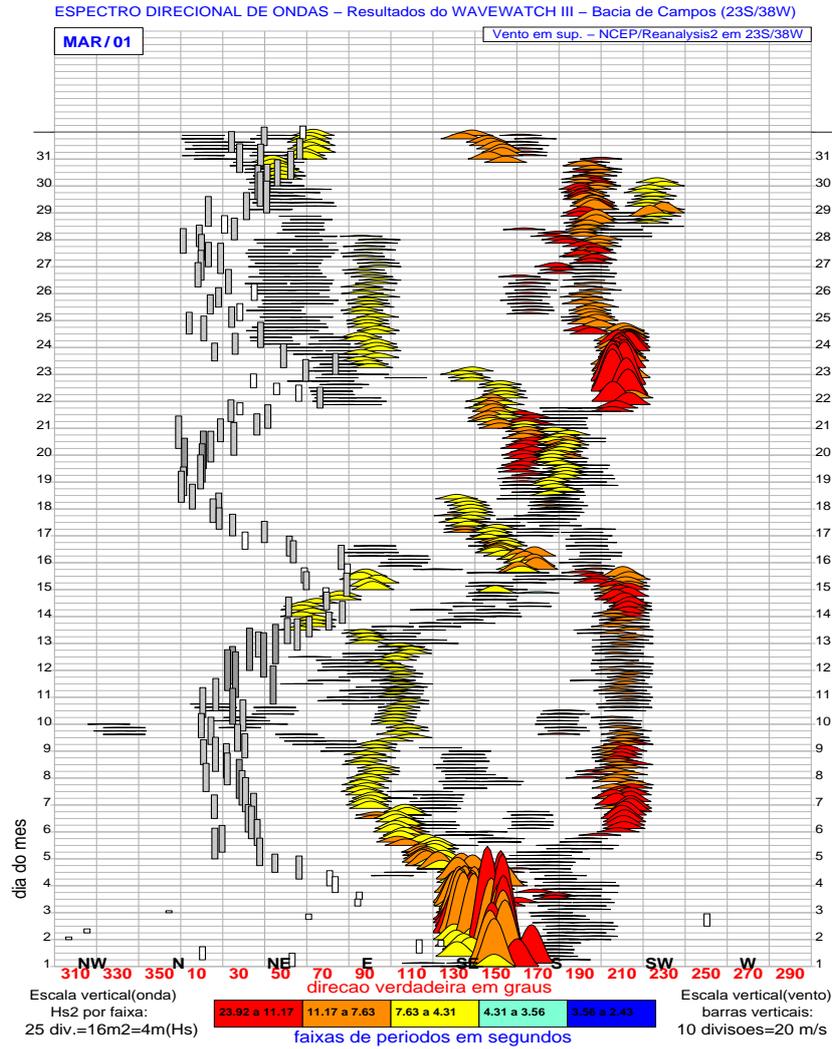
(a)



(b)

(c)

Figura D.23: Caso 22, máximo dia 18/07/2000. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

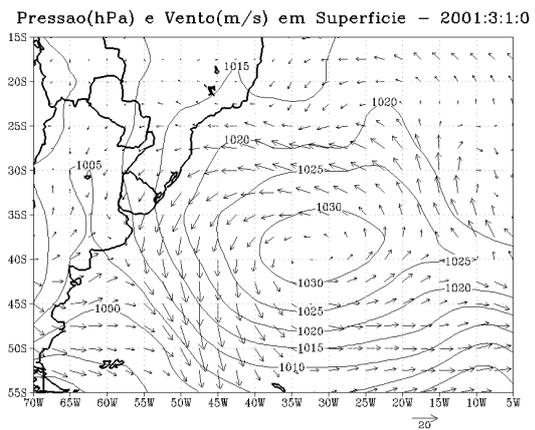
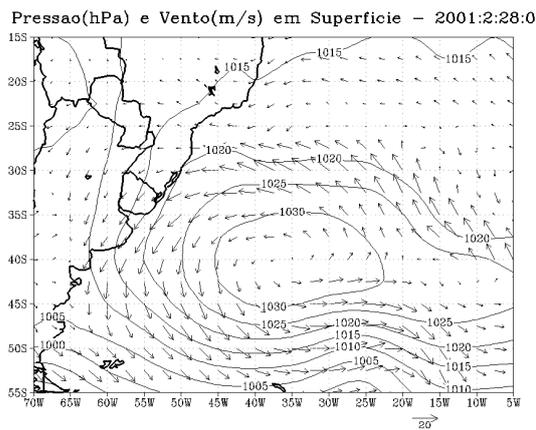
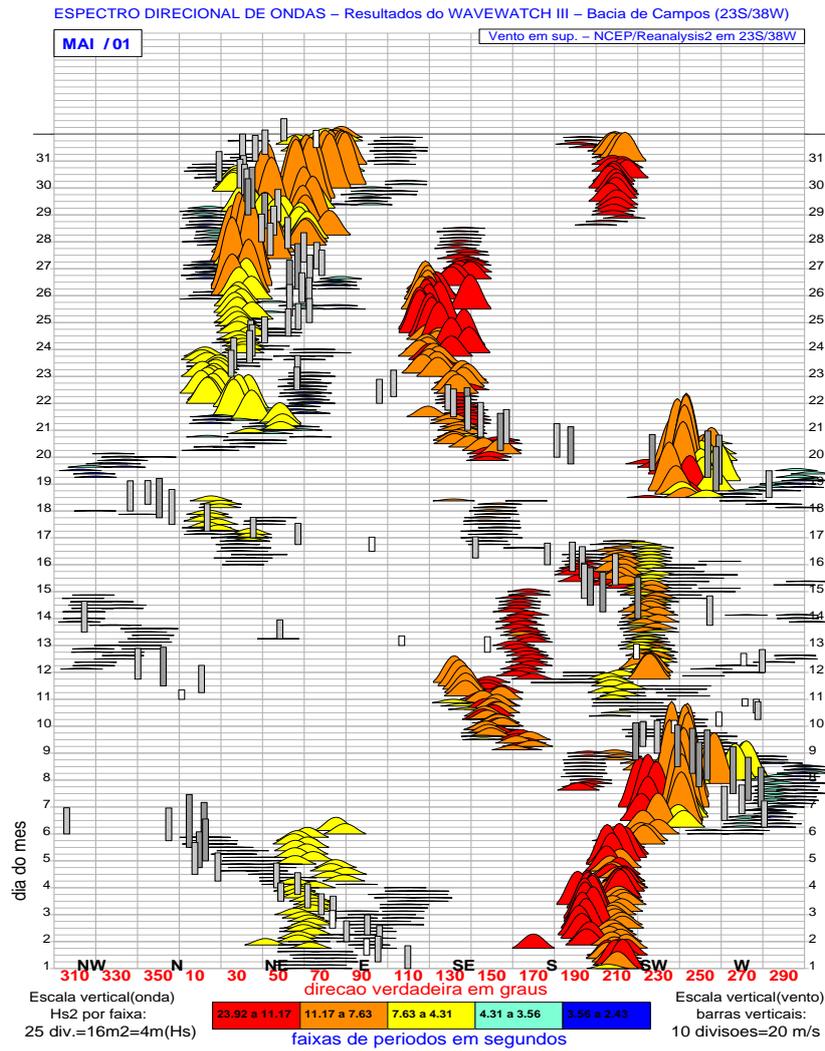


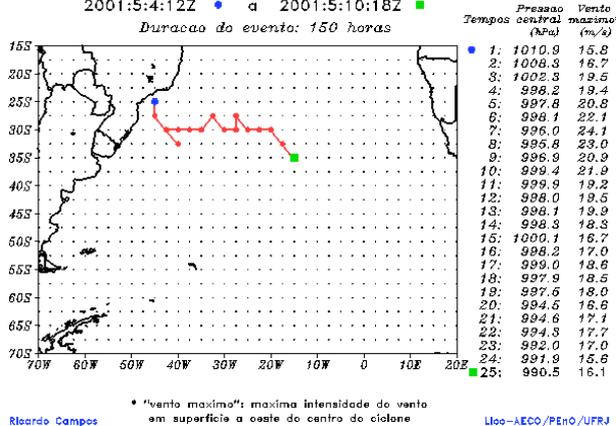
Figura D.24: Caso 23, máximo dia 01/03/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

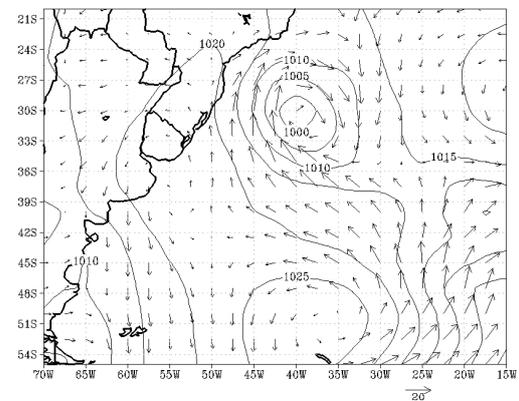
Ciclone detectado e trajetoria

2001:5:4:12Z a 2001:5:10:18Z
Duracao do evento: 150 horas



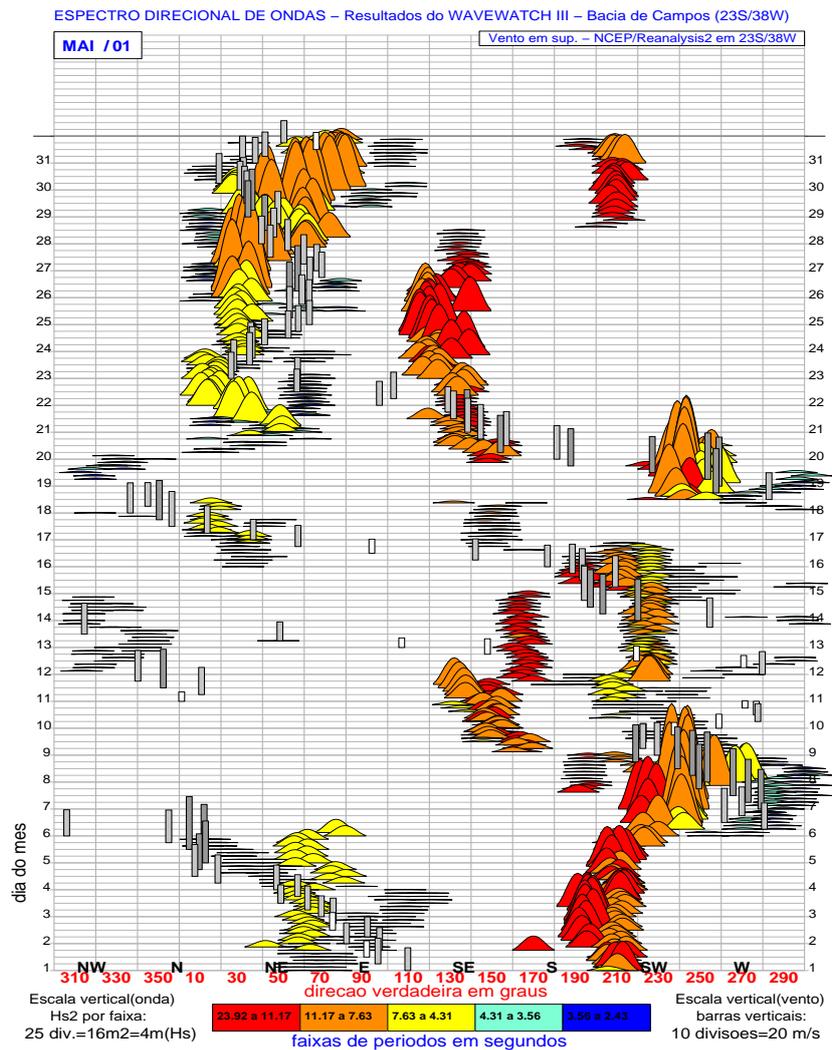
(b)

Pressao(hPa) e Vento(m/s) em Superficie – 2001:5:6:12

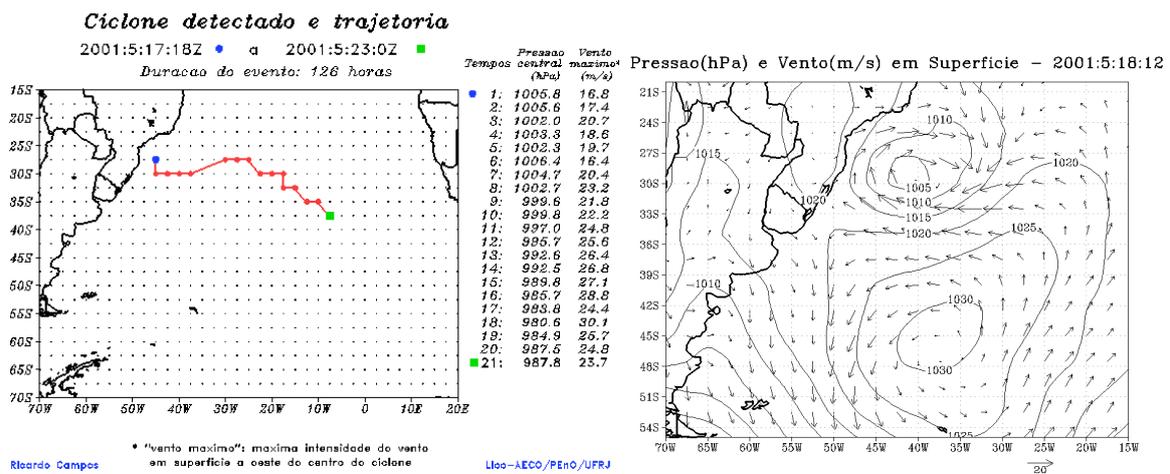


(c)

Figura D.25: Caso 24, máximo dia 07/05/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



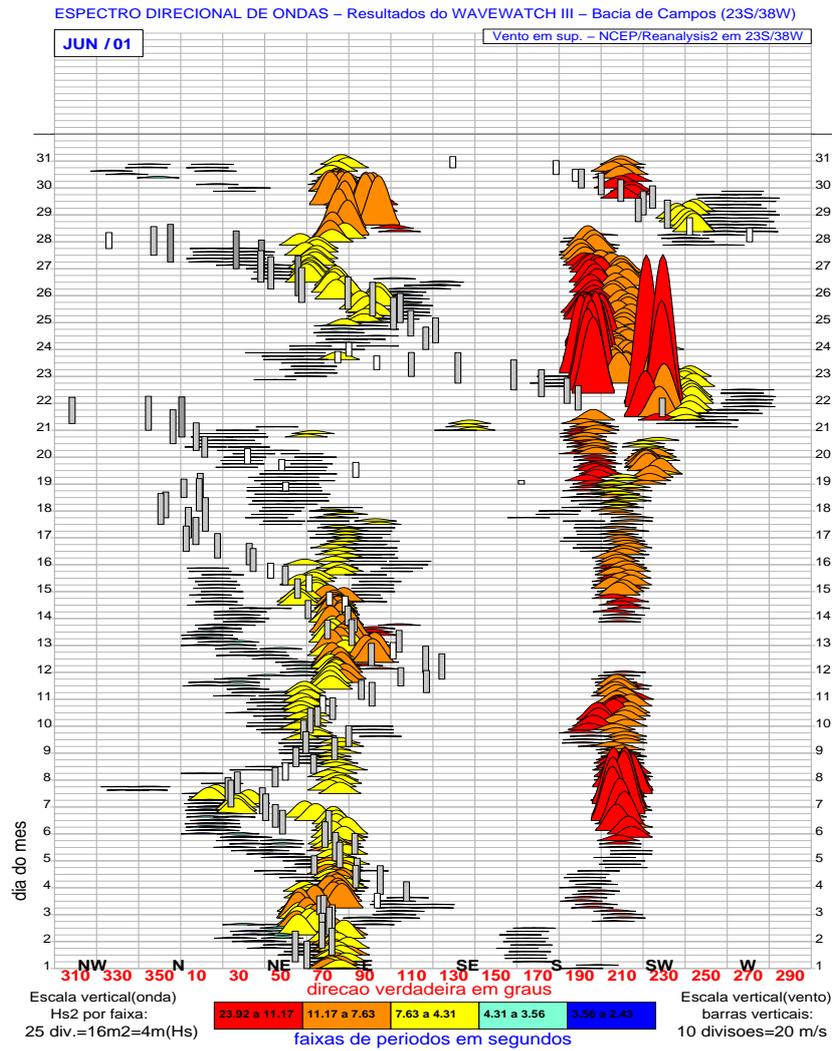
(a)



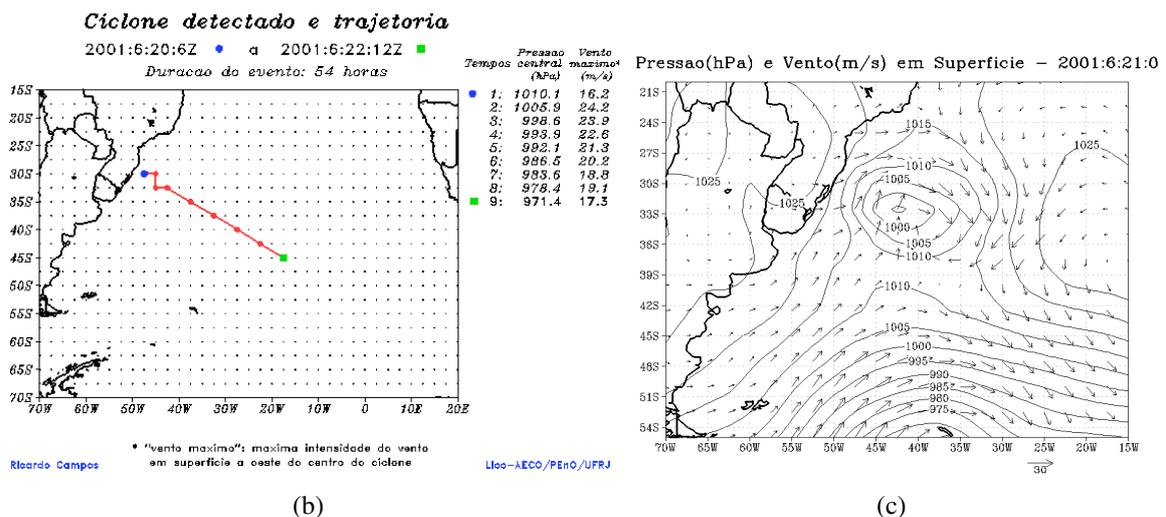
(b)

(c)

Figura D.26: Caso 25, máximo dia 19/05/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)



(b)

(c)

Figura D.27: Caso 26, máximo dia 22/06/2001. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.

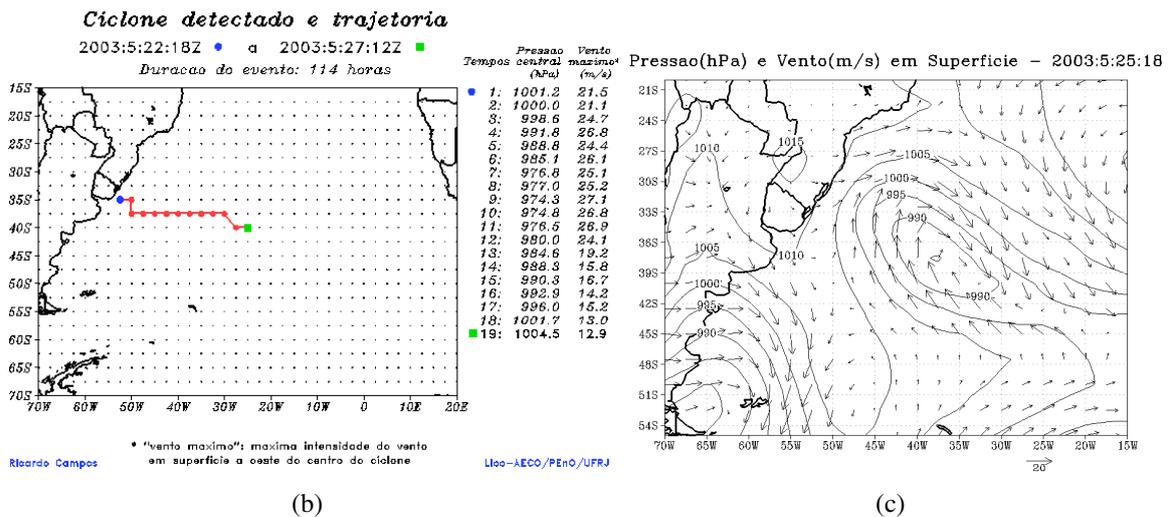
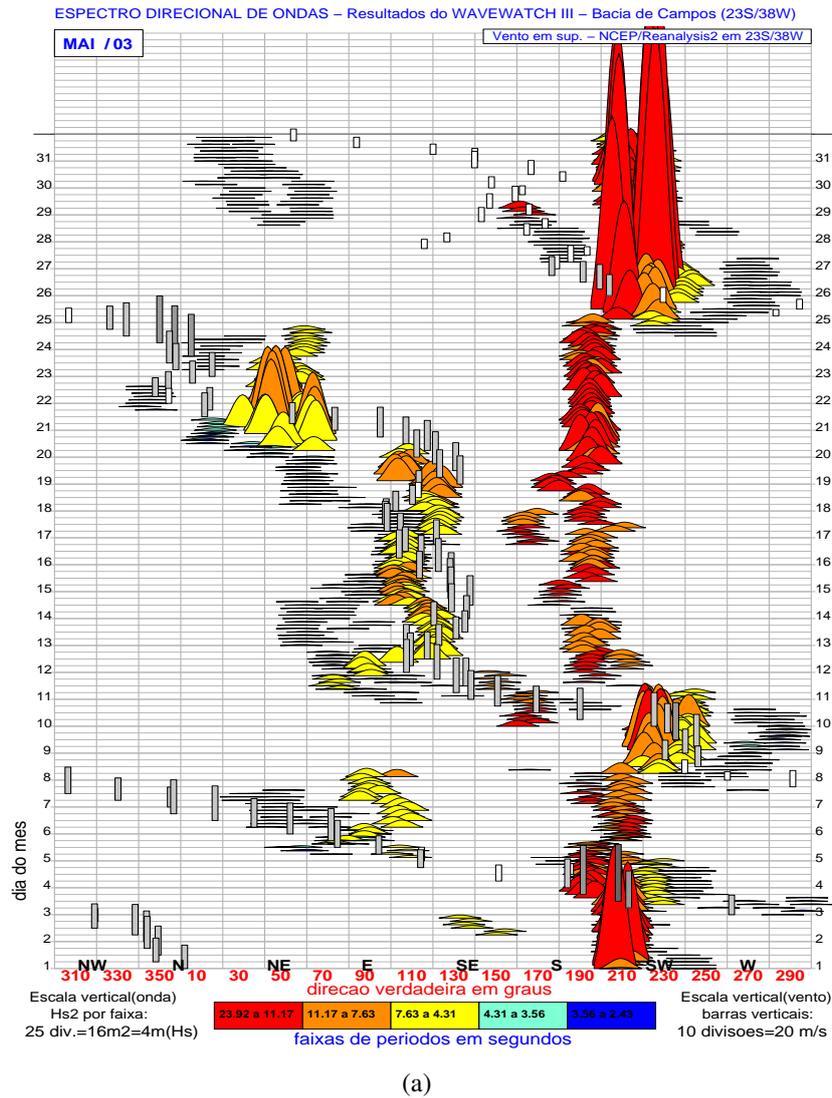
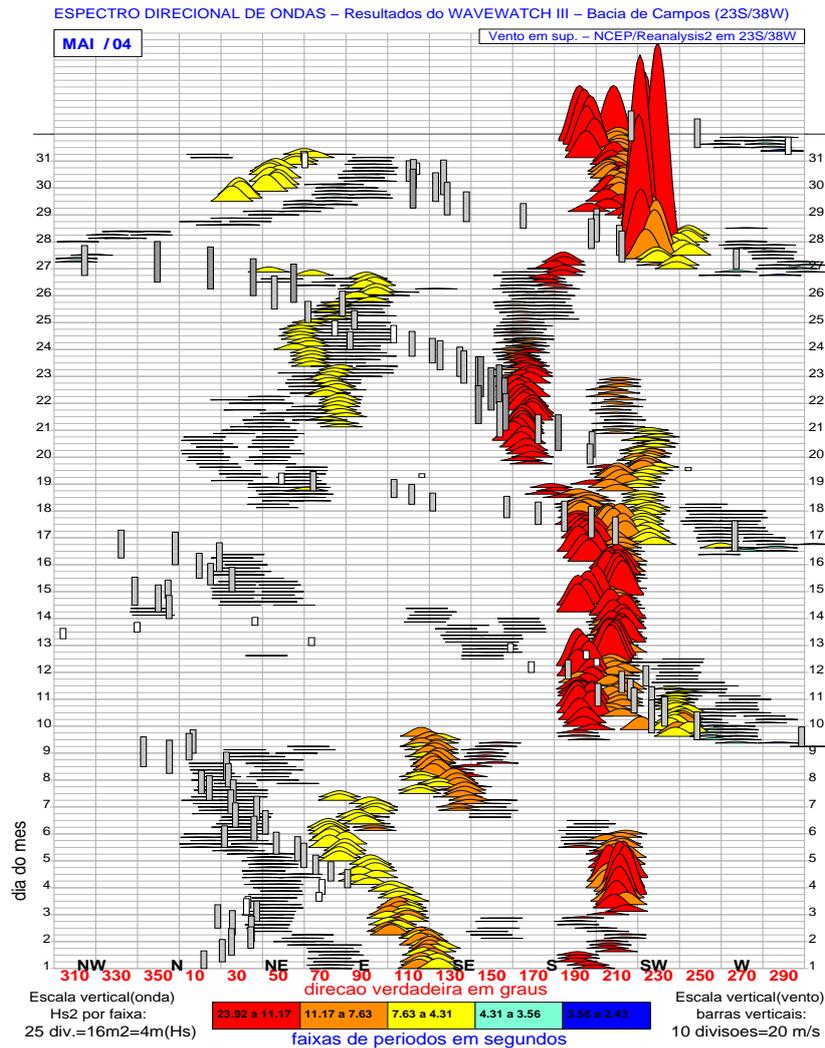
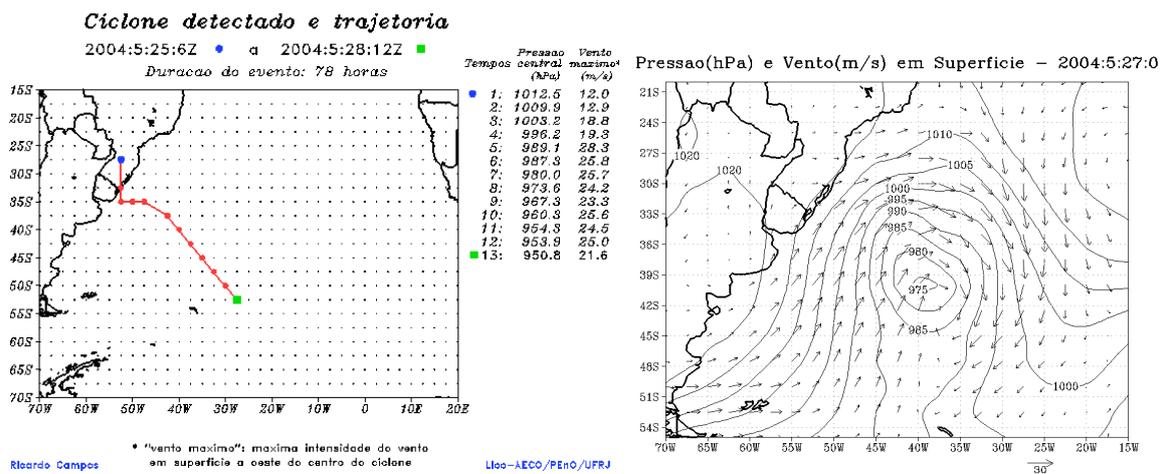


Figura D.28: Caso 27, máximo dia 26/05/2003. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



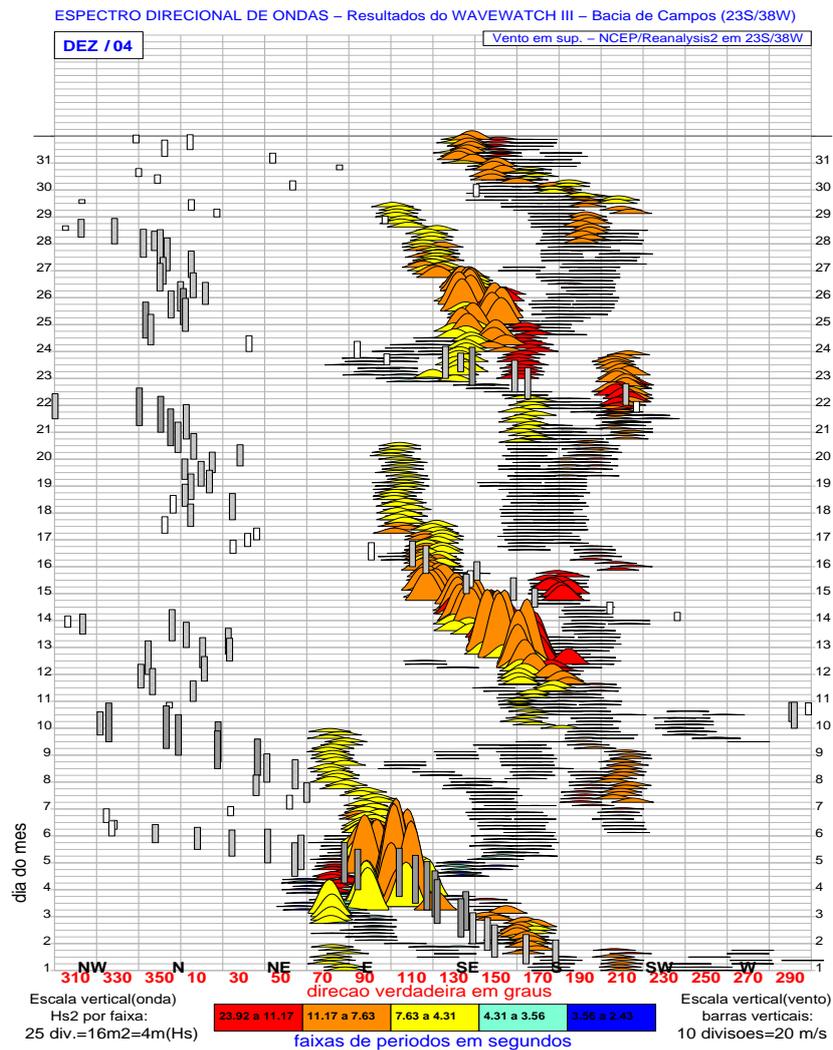
(a)



(b)

(c)

Figura D.29: Caso 28, máximo dia 28/05/2004. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) Trajetória do ciclone. (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

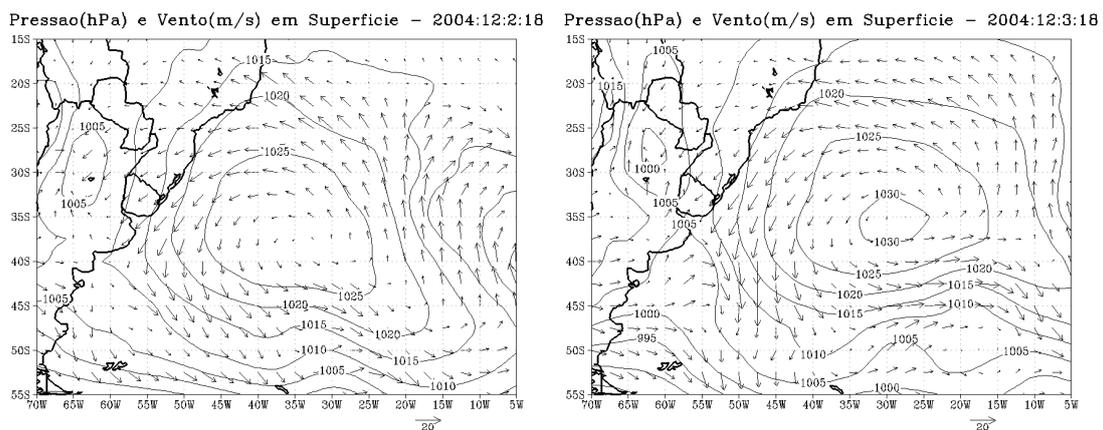
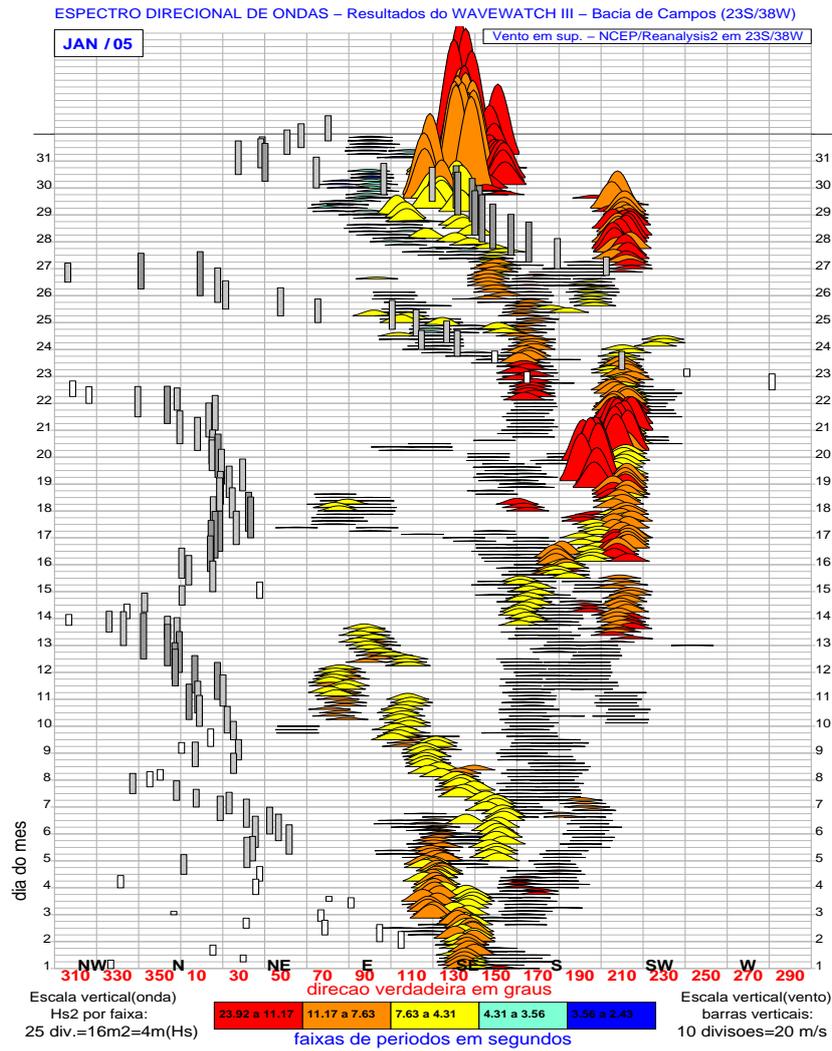


Figura D.30: Caso 29, máximo dia 04/12/2004. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.



(a)

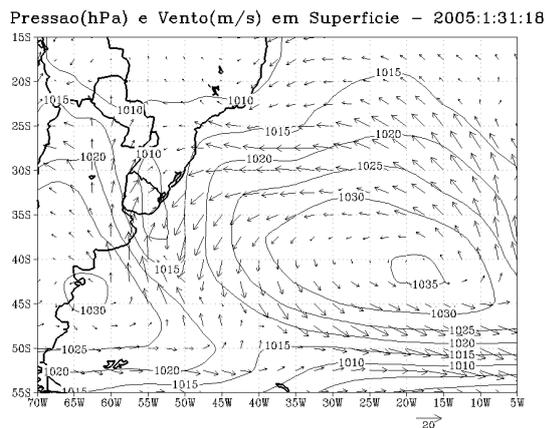
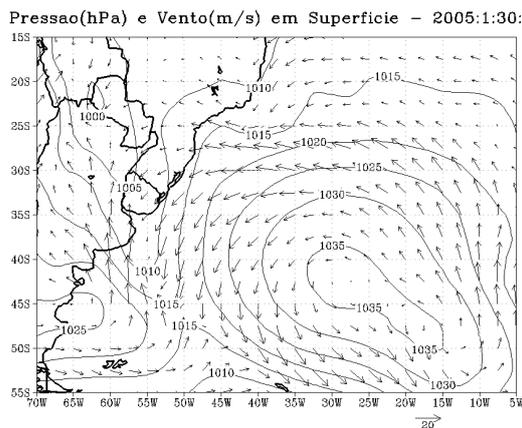


Figura D.31: Caso 30, máximo dia 31/01/2005. (a) PLEDSWW3 do mês correspondente. (b) e (c) Campos de vento e pressão em superfície.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)