

ESTUDO COMPARATIVO DE VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS NAS  
“FORÇANTES METEOROLÓGICAS” EM UM MODELO DE ONDAS DE  
TERCEIRA GERAÇÃO NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

Leonardo Maturo Marques da Cruz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVÍL.

Aprovada por:

---

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

---

Prof. Carlos Eduardo Parente, D.Sc.

---

Dr. Valdir Innocentini, Ph.D.

---

Dr. Nelson Violante de Carvalho, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2004

MARQUES DA CRUZ, LEONARDO  
MATURO

Estudo Comparativo de Variações  
Espaciais e Temporais nas “Forçantes  
Meteorológicas” em um Modelo de Ondas de  
Terceira Geração no Oceano Atlântico Sul [Rio  
de Janeiro] 2004

XI, 66p. 27,9 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE.

1. Modelagem de Ondas

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

*...Você que só ganha pra juntar  
O que é que há, diz pra mim, o que é que há?  
Você vai ver um dia  
Em que fria você vai entrar*

*Por cima uma laje  
Embaixo a escuridão  
É fogo, irmão! É fogo, irmão!...*

Trecho da música “Testamento”  
Vinícius de Moraes e Toquinho

*Em memória de:*  
José Egydio Prista Maturo e  
Niza Camargo Marques da Cruz

## AGRADECIMENTOS

Se mesmo com muita ajuda este trabalho custou tanto a ser finalizado, o que seria dele e de seu autor sem as pessoas aqui mencionadas?

Gostaria de agradecer sinceramente:

- Ao Professor Luiz Landau pela confiança e incentivo para a realização desse trabalho;

- Ao Audálio pela orientação e incentivo na realização deste estudo e em minha formação acadêmica;

- A Márcia e ao Paulo Egydio por me proporcionarem os momentos de alegria tão necessários durante esse período de minha vida;

- Aos meus pais e minha família pelo apoio nas dificuldades enfrentadas;

- Ao Maurício e ao Chico, grandes amigos que dispensam maiores comentários;

- A Marta e ao Luciano, pela ajuda “computacional” e;

- Por fim, gostaria de fazer um agradecimento muito especial ao responsável não só pela minha motivação em realizar essa dissertação, mas sim por toda a minha carreira profissional e principalmente pela amizade e respeito que tenho por ele. Muito obrigado Rogério!

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

ESTUDO COMPARATIVO DE VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS NAS  
“FORÇANTES METEOROLÓGICAS” EM UM MODELO DE ONDAS DE  
TERCEIRA GERAÇÃO NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

Leonardo Maturo Marques da Cruz

Abril/2004

Orientador: Luiz Landau.

Programa: Engenharia Civil

No presente trabalho um estudo de caso de geração e propagação de ondas superficiais de gravidade no Oceano Atlântico Sul é realizado através de modelagem numérica, com objetivo de avaliar o comportamento do modelo sob a influência de diferentes condições de contorno.

O modelo de ondas utilizado, WAVEWATCH-III, foi forçado com os campos de vento das Reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e com as Análises do modelo *Aviation Forecast* (AVN /NCEP).

Para comparação dos resultados foi utilizado o ondógrafo direcional do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), fundeado em Arraial do Cabo, no Rio de Janeiro. As comparações foram realizadas em termos de altura significativa, período de pico, período médio e direção média.

Os resultados obtidos mostraram que de maneira geral o modelo apresentou desempenho satisfatório na representação do *swell* que atinge a região, embora algumas importantes deficiências tenham sido identificadas.

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

STUDY OF THE SPATIAL AND TEMPORAL METEOROLOGICAL DATA INPUT  
VARIATIONS APPLIED IN A THIRD GENERATION WAVE MODEL FOR THE  
SOUTH ATLANTIC OCEAN

Leonardo Maturo Marques da Cruz

April/2004

Advisor: Luiz Landau.

Department: Civil Engineering

In the present work a case study of generation and propagation of wind waves in the South Atlantic Ocean is carried out through numerical modeling. The main purpose is to evaluate the behavior of the model driven by different boundary conditions.

The WAVEWATCH-III model is forced with the wind fields obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Reanalysis and from the Aviation Forecast (AVN/NCEP) analysis.

In order to evaluate the model results, data from the directional waverider of the Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), located in Arraial do Cabo, Rio de Janeiro is used. The comparisons are carried out in terms of significant wave height, peak period, average period and mean wave direction.

The results show that the model performance is satisfactory in the representation of the swell that reaches the region, although some important deficiencies are identified.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
I Introdução	1
II Objetivos	2
III Área de Estudo	2
IV Modelagem de Ondas	3
V Processos Atmosféricos	5
VI A Modelagem Atmosférica	7
VII O Modelo WAVEWATCH-III	8
VII.1 Termos Fonte	12
VII.1.1 Interações Não Lineares	12
VII.1.2 Fonte e Dissipação de Energia	13
VIII Dados de Vento	15
VIII.1 As Reanálises do NCEP	15
VIII.2 O Modelo AVN (Análises)	17
VIII.3 Aspectos Importantes	17
IX Descrição dos Experimentos	20
X Resultados e Discussão	21
X.1 Dados de Vento	21
X.2 Resultados do Modelo de Ondas	35
XI Conclusões	48
XII Referências Bibliográficas	50

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$	Frequência da onda (Hz)
$\theta$	Direção da onda ( $^{\circ}$ )
$F$	Energia ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ )
$S$	Termo de fontes e sumidouros de energia
$S_{in}$	Termo de entrada de energia
$S_{nl}$	Termo de interações não-lineares onda-onda
$S_{ds}$	Termo de dissipação de energia
$S_{bot}$	Termo de dissipação pelo atrito com o fundo
$k$	Número de onda
$\sigma$	Frequência intrínseca
$A$	Densidade de ação ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ )
$g$	Aceleração da gravidade ( $m \cdot s^{-1}$ )
$d$	Profundidade (metros)
$\omega$	Frequência absoluta
$\mathbf{c}_g$	Vetor velocidade de grupo
$s$	Coordenada na direção $\theta$
$m$	Coordenada perpendicular a $s$
$\lambda$	Longitude
$\phi$	Latitude
$R$	Raio da Terra
$\mathbf{U}$	Vetor velocidade de corrente
$\mathbf{k}$	Vetor número de onda
HS	Altura significativa
TP	Período de pico
TM	Período médio
DIR	Direção média

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Observações disponíveis para o Atlântico Norte em 10/11/2003 - 06GMT	18
Figura 2: Observações disponíveis para o Atlântico Sul em 10/11/2003 - 06GMT	19
Figura 3: Campo de energia média obtida com os dados da Reanálise para os meses de abril, maio e junho de 1997.	22
Figura 4: Campo de energia média obtida com os dados do AVN para os meses de abril, maio e junho de 1997.	22
Figura 5: Energia média integrada meridionalmente para os meses de abril, maio e junho de 1997.	23
Figura 6: Campo de diferença na energia média obtida com os dados da Reanálise subtraído dos dados do AVN para os meses de abril, maio e junho de 1997.	24
Figura 7: Campo de variância da energia calculado com os dados da Reanálise para todos os meses de abril, maio e junho de 1997.	25
Figura 8: Campo de variância da energia calculado com os dados do AVN para todos os meses de abril, maio e junho de 1997.	25
Figura 9: Variância da energia integrada meridionalmente para os meses de abril, maio e junho de 1997.	26
Figura 10: Representação esquemática dos setores analisados.	27
Figura 11: Evolução temporal da energia integrada para o setor 1.	28
Figura 12: Evolução temporal da energia integrada para o setor 3.	29
Figura 13: Evolução temporal da energia integrada para o setor 6.	30
Figura 14: Diferença na energia integrada por setor (A1, A2, A3 e A4) para os meses de abril, maio e junho de 1997.	32
Figura 15: Diferença na energia integrada por setor (A5, A6, A7 e A8) para os meses de abril, maio e junho de 1997.	33
Figura 16: Energia integrada no tempo para os setores analisados	35
Figura 17: Evolução temporal de HS para todo o período simulado, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.	36
Figura 18: Dispersão entre os valores de TM calculado pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados do ondógrafo.	37

Figura 19: Dispersão entre os valores de TM calculado pelo modelo com os dados do AVN e os dados do ondógrafo. _____	37
Figura 20: Dispersão entre os valores de TP calculado pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados do ondógrafo. _____	38
Figura 21: Dispersão entre os valores de TP calculado pelo modelo com os dados do AVN e os dados do ondógrafo. _____	38
Figura 22: Diferença entre os parâmetros calculados pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados medidos pelo ondógrafo para todo o período de simulação. _	40
Figura 23: Diferença entre os parâmetros calculados pelo modelo com os dados do AVN e os dados medidos pelo ondógrafo para todo o período de simulação. _____	42
Figura 24: Evolução temporal da direção para todo o período simulado, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo. _____	43
Figura 25: Evolução temporal de HS, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo. _____	44
Figura 26: Evolução temporal da direção, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo. _____	44
Figura 27: Evolução temporal de TP, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo. _____	45
Figura 28: Campo de vento a 10 metros da Reanálise para o dia 29/05/1997 as 06Z. ___	46
Figura 29: Campo de vento a 10 metros do AVN para o dia 29/05/1997 as 06Z. _____	46
Figura 30: Campo de vento a 10 metros da Reanálise para o dia 31/05/1997 as 06Z. ___	47
Figura 31: Campo de vento a 10 metros do AVN para o dia 31/05/1997 as 06Z. _____	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Balanço de Energia nos Setores Analisados _____	34
Tabela 2: Correlação entre os resultados do modelo, utilizando os dados da Reanálise (WW3/Reanálise) e utilizando os dados do AVN (WW3/AVN) e os dados medidos pelo ondógrafo _____	39
Tabela 3: RMS entre os resultados do modelo, utilizando os dados da Reanálise (WW3/Reanálise) e utilizando os dados do AVN (WW3/AVN) e os dados medidos pelo ondógrafo _____	39

## I Introdução

As ondas superficiais de gravidade oceânicas são um dos principais, senão o principal agente físico que intervêm na dinâmica de ambientes costeiros. Elas representam a principal e mais constante fonte de energia mecânica para esses ambientes.

Toda e qualquer estrutura costeira está sujeita a ação de ondas e, por conseqüência disso, faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas através das quais seja possível a previsão e o entendimento do comportamento das mesmas.

Até a década de 40, o único modo de descrever o estado do mar era a escala de Beaufort, criada em 1805. Com ela era possível relacionar a intensidade do vento com a força do mar (WMO, 1998).

A primeira tentativa de desenvolvimento de um modelo de previsão de ondas surgiu na década de 50, sendo baseado no princípio de conservação de energia. Desde então vêm sendo desenvolvidos modelos com o intuito de prever a propagação das ondas desde a zona de geração até as regiões costeiras, podendo-se estudar eventos passados, simulando-os com dados atmosféricos pretéritos (hindcasting), tanto quanto prever situações futuras, forçando os modelos com condições previstas por análises e previsões (forecasting).

Com o aprimoramento da física dos modelos de geração e propagação de onda, seus resultados ficaram cada vez mais dependentes das condições de contorno utilizadas nas simulações, principalmente do campo de vento que atua como principal “forçante” para esses modelos.

A Baía de Campos, no litoral do Rio de Janeiro, é atualmente a região com mais intensa atividade petrolífera na costa do Brasil, o que vem gerando um grande interesse por parte da comunidade científica no entendimento de seus processos meteorológicos e oceanográficos. Algumas coletas de dados e uma série de análises vêm sendo desenvolvidas para a caracterização das condições de onda nessa região, buscando relacionar eventos onde se detecta a presença de ondulações de diferentes origens, como por exemplo, a presença de *swell* e mar local, com as condições atmosféricas vigentes no oceano Atlântico Sul.

A implementação de um modelo de ondas utilizando condições de contorno que melhor representem os fenômenos atmosféricos caracteriza-se como uma ferramenta de simulação bastante importante para o estudo da física das ondas.

## **II Objetivos**

Através da comparação dos resultados do modelo de ondas WAVEWATCH-III – NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) / NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), utilizando os campos de vento a 10 metros obtidos das Reanálises do NCEP e do Modelo Atmosférico AVN (*Aviation Forecast*) - Análises (NOAA/NCEP), com o ondógrafo direcional (*Directional Waverider – Mark II*) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) da Marinha do Brasil, localizado em Arraial do Cabo – Rio de Janeiro, obter qual dessas bases de dados atmosféricos melhor representa as condições de mar ocorrentes no oceano Atlântico Sul.

## **III Área de Estudo**

A área de interesse deste trabalho compreende todo o Oceano Atlântico Sul, embora o enfoque principal seja o litoral sudeste do país, mais precisamente a região do Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro.

Violante de Carvalho (1998) fez um estudo, com dados de ondas coletados na Baía de Campos, sobre o clima de ondas nessa região e sua associação aos eventos meteorológicos geradores, caracterizando as ondulações de acordo com duas feições meteorológicas distintas, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e os ciclones extratropicais gerados em altas latitudes.

Essas feições geram ondulações com características muito diferentes em termos de altura significativa, direção e período de pico, o que faz com que o estado do mar nessa região seja bastante complexo.

Do ponto de vista espectral essa complexidade é representada por espectros bi, tri e até mesmo poli modais como apresentado por Parente (1997), Seixas (1997) e mais recentemente por Pinho (2003).

Segundo Innocentini *et al.* (2000), o litoral do Rio de Janeiro, devido à orientação de sua linha de costa, recebe diretamente as ondas provenientes dos ciclones gerados em altas latitudes, ficando exposto a enormes pistas, com ventos apresentando velocidades acima de 18m/s capazes de gerar ondas com altura significativa de 5 a 6 m.

Segundo Candella (1997), as principais ondas presentes no Atlântico Sul são as geradas nas médias e altas latitudes, por tempestades originadas nos ciclones extratropicais associados à frentes frias. O deslocamento desses ciclones ocorre de oeste para leste, no Atlântico Sul, gerando ventos de Sudoeste a Sudeste.

As ondas de nordeste e leste estão diretamente associadas à circulação imposta pelo ASAS, sendo predominantes, em termos de persistência, na região do Cabo Frio. Os ventos gerados pelo ASAS chegam a atingir 10m/s durante vários dias consecutivos (Candella, 1997).

#### **IV Modelagem de Ondas**

O conhecimento dos mecanismos de geração, interações e decaimento das ondas superficiais de gravidade oceânicas vêm sendo desenvolvidos durante os últimos 80 anos. No entanto, apenas nos últimos 50 anos pôde-se obter uma melhor compreensão dos processos dinâmicos envolvidos em tais fenômenos. Desde a Segunda Grande Guerra, os estudos sobre previsão de ondas começaram a ser desenvolvidos, visando sua implementação e utilização operacionais(WMO, 1998).

Os modelos de onda, além de serem utilizados para previsão, podem também auxiliar em estudos relacionados a processos sedimentares costeiros e a projetos em estruturas costeiras e oceânicas, relacionadas, por exemplo, a atividades ligadas à exploração de petróleo.

Nos primeiros experimentos de modelagem e previsão de ondas os ventos eram obtidos de cartas sinóticas de pressão em superfície, que, por sua vez, era calculado como sendo o vento geostrófico com uma regra de correção empírica. Essa abordagem, entretanto, passou a ser menos utilizada com a sofisticação dos modelos de geração e

propagação de ondas, e, principalmente, com o advento da previsão numérica do tempo e o desenvolvimento dos modelos gerais de circulação atmosférica. Dessa forma, tópicos como a relação entre a velocidade do vento e o fluxo vertical de quantidade de movimento próximo à superfície do mar, assim como os efeitos da rugosidade nessa relação despertam cada vez mais interesse (Komen *et. al.*, 1994).

Atualmente, os pontos principais das teorias e, por conseguinte, dos modelos de geração de ondas, são as flutuações de pressão em alta resolução temporal e variações de fluxo vertical de quantidade de movimento na superfície do oceano, associadas aos deslocamentos de ar sobre as ondas (Massel, 1996).

O estado da arte da modelagem de ondas encontra-se nos modelos chamados de Terceira Geração. Neste tipo de modelo, o estado do mar é determinado através do espectro de energia  $F(f, \theta)$  que descreve a distribuição da energia ao longo da frequência  $f$  e da direção de propagação  $\theta$ . A evolução desse espectro no espaço e no tempo é resolvida pela equação básica de transporte aplicada para energia:

$$\frac{DF}{Dt} = S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + \dots \quad (\text{IV.1})$$

onde:

$S$  - fontes e sumidouros de energia;

$S_{in}$  - termo de fonte de energia;

$S_{nl}$  - termo de interações não-lineares;

$S_{ds}$  - termo de dissipação.

A grande evolução dos modelos de Terceira Geração, no entanto, está nas trocas de energia entre atmosfera e oceano e entre as próprias ondas, que são parametrizadas sem nenhum tipo de restrição quanto à formas espectrais pré-determinadas, possibilitando melhor representação de situações de mudanças bruscas de direção de vento, bem como a interação entre vagas e marulhos (*wind-sea* e *swell*) (Tolman *et. al.*, 2002).

O primeiro modelo de ondas de Terceira Geração desenvolvido e operacionalizado foi o WAM (WAMDI Group, 1988), implementado e mantido

operacional em grandes centros de previsão do mundo a partir de 1994 (Tolman *et. al.*, 2002).

O modelo, no entanto, apresenta algumas deficiências, dentre elas, o esquema de propagação de primeira ordem, que pode influenciar de maneira adversa à propagação de *swell*; um passo de tempo fixo e longo demais para integração dos termos fonte, o que faz com que possam ocorrer erros na forma do espectro, principalmente em situações de mudanças rápidas nas condições de ondas; e a subestimação de condições extremas de mar e a superestimação de situações de mar muito pequeno (Tolman *et. al.*, 2002). Estas duas últimas considerações, entretanto, também são creditadas à qualidade dos campos de vento utilizados como forçantes para o modelo. Uma descrição mais completa deste modelo é apresentada no capítulo VII.

Para suprir essas carências, foi desenvolvido pelo NCEP um novo modelo de Terceira Geração, o WAVEWATCH-III (WW3), visto que a arquitetura computacional do modelo WAM praticamente inviabilizava seu aprimoramento (Tolman *et. al.*, 2002).

O desenvolvimento do WW3 teve início em 1993, sendo testado e validado até ser implementado no NCEP em março de 2000 e mantido operacional até os dias de hoje.

Atualmente, o modelo WW3 está em caráter operacional em praticamente todos os grandes centros de previsão mundiais, sendo aplicado para diversas regiões, em várias escalas temporais e espaciais.

## **V Processos Atmosféricos**

Uma boa previsão das ondas superficiais de gravidade oceânicas está intimamente ligada ao grau de conhecimento que se tem do campo de vento sobre o oceano (Komen *et. al.*, 1994), ou seja, dos processos dinâmicos que ocorrem na atmosfera.

Assim como no oceano, esses processos podem ser descritos através de um conjunto de equações diferenciais bastante complexo. Os modelos atmosféricos, utilizados para uma melhor compreensão dessa dinâmica, são desenvolvidos através da

utilização de simplificações desse sistema de equações para situações particulares, onde determinados fenômenos são considerados, em detrimento de outros.

Para o desenvolvimento desses modelos, faz-se necessária uma criteriosa análise das escalas espaciais e temporais dos processos físicos envolvidos.

De maneira geral pode-se dividir as escalas de movimento atmosférico em três classes distintas: escala sinótica, meso-escala e micro-escala, sendo que inúmeras subdivisões foram e vêm sendo elaboradas e empregadas em cada uma dessas três grandes classes, o que gera grande controvérsia quanto aos limites espaciais e temporais por parte de seus autores (Thunis e Bornstein, 1996). Orlanski (1975), por exemplo, subdividiu as três grandes classes em oito subdivisões distintas, em função da gama de fenômenos envolvidos em cada uma delas.

Stull (1988) *apud* Thunis e Bornstein (1996) aborda o problema segmentando menos as transições entre as escalas, principalmente na transição entre as micro e meso escalas. Em sua definição, na micro-escala estariam fenômenos como a turbulência, ondas acústicas, plumas e pequenos redemoinhos, abrangendo variações espaciais de milímetros até pouco mais de 10 km e variações temporais de segundos a 1 hora.

Na meso-escala, estariam fenômenos variando de 200 m a 200 km, abrangendo escalas de tempo de 30 min a 1 dia. Fica clara a interseção entre as micro e meso escalas, estando nuvens do tipo cumulus, tornados, turbulência de céu claro e tempestades como feições comuns às duas classes. Na meso-escala estariam, ainda, fenômenos como jatos em baixos níveis, grupos de tempestades, brisa marinha e circulações forçadas por obstáculos urbanos.

Finalmente, na escala sinótica (macro) estariam as frentes, furacões, ciclones extratropicais, a circulação geral e as ondas longas, abrangendo escalas espaciais a partir de 1 dia de duração e escalas espaciais com mais de 200 km de extensão.

## VI A Modelagem Atmosférica

Atualmente, diversos centros de pesquisa vêm desenvolvendo e mantendo modelos atmosféricos e de ondas aplicados nas mais variadas escalas espaciais. Instituições como o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), o *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e, mais recentemente, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) vêm se destacando na previsão atmosférica e de ondas nos últimos anos.

Uma das aplicações dos modelos atmosféricos é a utilização de seus resultados como condição de contorno para os modelos de ondas, que os utilizam na solução da equação (IV.1). Esses resultados são conhecidos no meio meteorológico como as análises globais, sendo disponibilizados ao público diariamente pelas instituições anteriormente citadas.

Bidlot *et al.* (2002) compararam os prognósticos de onda de todos os grandes centros estrangeiros acima. Seus resultados comprovaram que em todas as implementações dos modelos globais, há uma tendência à subestimação das alturas de ondas. Nas áreas de geração de ondas, no entanto, na maioria dos casos ocorre superestimação e, quando existe subestimação, esta é um pouco menor do que nas demais regiões. Ainda segundo Bidlot *et al.* (2002), dentre os dados dos centros de pesquisa analisados, aquele com menor índice de erros nas previsões de vento, também obteve o menor erro na previsão de ondas.

De uma maneira geral, o sistema de previsão do ECMWF obteve os melhores resultados, apesar de apresentar algumas diferenças regionais, como deficiências na representação das condições de vento e ondas nas bordas oeste das bacias oceânicas (Bidlot *et al.*, 2002).

Parte dessas diferenças pode ser creditada a erros de assimilação de dados de vento nos modelos atmosféricos, em virtude das diferenças nas alturas dos anemômetros, situados em bóias e navios, por exemplo. Dessa forma, a assimilação estaria introduzindo uma tendência sistemática nos dados de vento, o que por consequência, geraria erros nas previsões de ondas (Bidlot *et al.*, 2002).

Uma discussão sobre a qualidade dos campos de vento será apresentada no capítulo VIII, quando forem apresentados os dados da Reanálise do NCEP (National Centers for the Environmental Prediction).

Além dos problemas intrínsecos à geração dos campos de vento, a modelagem de ondas ainda apresenta algumas outras deficiências, como, por exemplo, a resolução espacial daqueles campos.

A evolução da computação de alto desempenho vem permitindo simulações cada vez mais complexas e técnicas de aninhamento de grades em modelagem de ondas, nas quais se transferem condições de contorno de simulações em grandes áreas com baixa resolução, para grades com melhor resolução e para áreas cada vez menores, têm se tornado cada vez mais frequentes.

Na modelagem de ondas, o avanço da dinâmica de fluidos computacional tem tornado possível resolver espacialmente cada vez melhor a propagação das ondas. Em contra-partida, os processos físicos da atmosfera, que regem a geração de ondas em escalas espaciais menores, não são bem resolvidos pelos modelos atmosféricos globais e resultados de modelos de escalas espaciais menores não são gerados para todas as regiões do globo, o que faz com que os aninhamentos de grade nos modelos de onda melhorem apenas em parte os resultados dos mesmos.

## **VII O Modelo WAVEWATCH-III**

O modelo utilizado nesse trabalho será o WAVEWATCH-III (WW3), desenvolvido no Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB) of the Environmental Modeling Center (EMC) of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), baseado em seus antecessores: WAVEWATCH-I, desenvolvido na Delft University of Technology e WAVEWATCH-II, desenvolvido na NASA Goddard Space Flight Center (Tolman, 2002).

Sua versão atual é a 2.22, porém, a aqui utilizada é a 1.18, sendo a principal diferença entre elas o fato de a primeira ser desenvolvida em FORTRAN 90.

O modelo resolve a equação linear de balanço do espectro de energia de ação em função do número de onda  $k$  e da direção  $\theta$ . Essa equação é similar à equação (IV.1), com a assunção implícita de que as variações das escalas espaciais e temporais das componentes do espectro são muito menores do que as respectivas escalas de mudanças do espectro, da profundidade e da velocidade das correntes. Em outras palavras, é assumido que as variações de profundidade e de correntes são lentas, implicando numa batimetria de grande escala, o que faz com que difração possa ser negligenciada.

Na presença de correntes, a energia das componentes espectrais não é conservada, devido ao trabalho realizado por aquelas. Nos casos onde não ocorre tal influência, a energia das componentes é conservada. Como a densidade de ação ( $A \equiv F/\sigma$ ) é conservada, utiliza-se, para os cálculos, o espectro de densidade de ação  $A(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\sigma$ .

Assim, a propagação das ondas é descrita por:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{VII.1})$$

onde:

$D/Dt$  representa a derivada total;

$S = \frac{S}{\sigma}$ , representa as fontes e sumidouros de energia e;

$\sigma$  é a frequência intrínseca, relacionada ao comprimento de onda pela relação de dispersão obtida da Teoria Linear:

$$\sigma^2 = gk \tanh kd \quad (\text{VII.2})$$

onde  $d$  é a profundidade média.

A frequência intrínseca é relacionada à frequência absoluta ( $\omega$ ) pela equação de Doppler:

$$\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} \quad (\text{VII.3})$$

onde  $\mathbf{U}$  é o vetor velocidade de corrente médio, tanto no tempo quanto em profundidade.

Em todas as aplicações do modelo nesse trabalho não foram utilizados valores de velocidade de corrente como condições de contorno para o modelo. Dessa forma

$$\omega = \sigma \quad (\text{VII.4})$$

O desenvolvimento num sistema euleriano, utilizado no WAVEWATCH, da equação de balanço (VII.1) para o espectro  $A(\mathbf{k}, \theta; \mathbf{x}, t)$  é dado por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}} A + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} A + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} A = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{VII.5})$$

onde:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}_g + \mathbf{U} \quad , \quad (\text{VII.6})$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad , \quad (\text{VII.7})$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \quad , \quad (\text{VII.8})$$

onde  $\mathbf{c}_g$  é o vetor velocidade de grupo e é dado por  $\mathbf{c}_g$  e  $\theta$ ,  $s$  é uma coordenada na direção  $\theta$  e  $m$  é uma coordenada perpendicular a  $s$ .

A equação (VII.5) é válida para coordenadas planas. Para aplicações em larga escala, em coordenadas esféricas definidas em latitude e longitude temos:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} A \cos \phi + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} A + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} A + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g A = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{VII.9})$$

onde:

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R} \quad , \quad (\text{VII.10})$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi} \quad , \quad (\text{VII.11})$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad , \quad (\text{VII.12})$$

onde R é o raio da Terra e  $U_\phi$  e  $U_\lambda$  são as componentes da corrente. A equação (VII.12) inclui um termo de correção para propagação ao longo de grandes círculos, usando uma definição cartesiana de  $\theta$ , onde  $\theta = 0$  corresponde à ondas se propagando no sentido W-E.

No modelo a equação (VII.9) é dividida em partes, para então serem resolvidas a propagação espacial, propagação intra-espectral e os termos fonte. As propagações espacial e intra-espectral são resolvidas utilizando o esquema “QUICKEST” (Leonard, 1979), combinado com o limitador “ULTIMATE TVD (total variance diminishing)” (Leonard, 1991 *apud* Tolman *et al.*, 2002). Esse esquema é suficientemente livre de difusão numérica, porém implica numa descontinuação do campo de ondas em virtude da discretização do espectro. Para evitar tal fenômeno, são utilizadas, na propagação espacial, as equações modificadas propostas por Booij e Holthuijsen (1987), onde para cada frequência do modelo, um passo de tempo de propagação máximo é definido, satisfazendo o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) (Tolman *et al.*, 2002).

Na propagação intra-espectral, o modelo permite que se ajuste passos de tempo menores do que os da propagação espacial, evitando o problema de transição entre águas

profundas e águas intermediárias para ondas de longo comprimento de maneira eficiente e econômica do ponto de vista físico e computacional (Tolman, 2002).

## VII.1 Termos Fonte

O termo fonte  $S$  geralmente é dividido em três partes, um termo de fonte de energia do vento  $S_{in}$ , um termo de interação não linear  $S_{nl}$  e um termo de dissipação de energia ('whitecapping')  $S_{ds}$ . Para águas rasas, pode-se ainda adicionar um quarto termo que considera as interações da onda com o fundo  $S_{bot}$ . Dessa forma, o termo geral de fonte do WWATCH pode ser representado por:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \quad (\text{VII.13})$$

O esquema numérico utilizado nos termos fonte do WW3 é um esquema semi-implícito, adaptado do esquema utilizado no modelo WAM (WAMDI Group, 1988).

### VII.1.1 Interações Não Lineares

Na região do espectro próxima ao pico de energia, o ganho de energia é maior que a dissipação. A energia em excesso é transferida pelas interações não-lineares às altas e baixas frequências. Nas altas, a energia é dissipada, pois essas ondas possuem curto período e pequeno comprimento, o que leva a um aumento da esbeltez e ao encapelamento do mar ('whitecapping'). A energia transferida para as baixas frequências leva ao crescimento de novas componentes de onda no espectro, resultando numa migração do pico de energia nessa direção (WMO, 1998).

O papel dos termos de interação não-linear é estabilizar o espectro, suavizando continuamente as perturbações locais e forçando-o a retornar a uma forma ‘preferida’ (Young e Van Vledder, 1993).

O tratamento das interações não-lineares define um modelo de Terceira Geração. No WW3 versão 1.18 utiliza-se a DIA (‘discrete interaction approximation’), parametrização que representa as interações não-lineares entre 4 ondas (Hasselmann e Hasselmann, 1985).

### **VII.1.2 Fonte e Dissipação de Energia**

Estão implementadas no modelo, duas parametrizações para os termos de fonte e dissipação de energia, a utilizada no WAM-3 e a parametrização baseada nos estudos de Chalikov e Belevich (1993) e Chalikov (1995).

No modelo WAM, dois pontos básicos são considerados: a parametrização exata da fonte de transferência não-linear com o mesmo número de graus de liberdade do espectro e a especificação de uma função representativa da dissipação de energia que feche o balanço de energia (WAMDI Group, 1988).

Segundo Banner e Young (1994), uma das principais fontes de erro em modelos de onda, mesmo os de Terceira Geração, é a parametrização dos termos de fonte e dissipação de energia. No WAM ciclo 3, ela é baseada na relação empírica de Snyder *et al.* (1981).

A parametrização utilizada no WAVEWATCH apresentada por Tolman e Chalikov (1996) diverge da relação de Snyder *et al.* (1981) em três pontos principais:

I) O termo de fonte pode tornar-se negativo, ou seja, sumidouro de energia, para situações de grandes ângulos entre as direções da onda e do vento, ou no caso das ondas se propagarem mais rápidas que o vento; a perda de energia das ondas para o vento pode resultar num espectro mais estreito e essa "fonte negativa" é esperada como resposta a mudanças na direção do vento.

II) Resulta em uma entrada de energia total 2 ou 3 vezes menor para mares plenamente desenvolvidos. Isto se explica em parte pelo “crescimento negativo” ou decréscimo das

componentes de onda que se desenvolveram além do limite de saturação do espectro e pelo pequeno crescimento das componentes próximas ao completo desenvolvimento; a perda de energia nas baixas frequências pode diminuir a velocidade de crescimento das componentes para espectros bem desenvolvidos, contribuindo para que haja um equilíbrio entre os termos. Tal possibilidade pode, ainda, em caso de espectros suficientemente desenvolvidos, levar a sua suavização.

III) Resulta em uma maior entrada de energia nas frequências mais altas que na relação de Snyder *et al.* (1981). Dessa forma, a diferença na entrada total de energia entre essa parametrização e a relação de Snyder *et al.* (1981) é menor para ondas mais jovens, aumentando com o desenvolvimento do espectro.

O termo de dissipação de energia considera as perdas por encapelamento ("whitecapping") e por turbulência. É, segundo Tolman e Chalikov (1996), o termo menos conhecido, sendo normalmente usado como um ajuste, balanceando o termo de fonte.

Para representar o termo de dissipação, em geral, é aplicada uma única parametrização para todo o espectro. Embora essa formulação seja bastante representativa para as frequências próximas e abaixo da frequência de pico, há uma incompatibilidade entre as escalas de tempo nos processos de dissipação nas baixas e altas frequências, fazendo com que o termo necessite ser dividido em, pelo menos, duas constituintes (Tolman e Chalikov, 1996).

Por razões numéricas, aplica-se, no WAM, uma cauda paramétrica para as altas frequências, embora esse artifício apenas fixe a forma do espectro, sem levar em consideração o nível de energia.

A dissipação nas altas frequências influencia a forma de dissipação nas baixas frequências, sendo necessário uma descrição explícita da dissipação nas altas frequências para evitar que ocorra essa contaminação (Tolman e Chalikov, 1996).

Assim, para a representação dos termos de dissipação, são utilizadas no WW3 duas parametrizações, uma para as frequências próximas e abaixo da de pico, assumindo que a forma de dissipação de energia nessa região do espectro é similar à dissipação por turbulência viscosa na camada limite oceânica; e a outra, puramente diagnóstica, para as

altas frequências, formulada para ser consistente com a forma exponencial do espectro de equilíbrio (Tolman e Chalikov, 1996).

## **VIII Dados de Vento**

### **VIII.1 As Reanálises do NCEP**

A base de dados conhecida como Reanálises do NCEP foi originada de uma cooperação entre o próprio NCEP e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (Kalnay *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (Kistler *et al.*, 2001), mantendo-se até hoje.

A Reanálise do NCEP usa o estado da arte em sistemas de assimilação de dados e um banco de dados mais completo possível, abrangendo informações meteorológicas primárias das mais diversas fontes associadas aos dados do modelo atmosférico global do NCEP (Kistler *et al.*, 2001).

Os dados primários utilizados pelo NCEP para produzir as Reanálises são de diferentes origens, como dados globais obtidos através de radiossondas, que passaram a ser válidos a partir de março de 1962 e foram recebidos diretamente de alguns países como África do Sul, Austrália, Canadá, Argentina, Brasil, Reino Unido, França e Estados Unidos da América, sendo que entre 1989 a 1991 houve uma grande queda no seu fornecimento; dados da superfície marinha, originados de observações de navios, bóias fixas, bóias móveis, estações oceânicas próximas à superfície, entre outros, obtidos em sua grande maioria através do projeto COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set), no período de 1983 a 1996; dados aéreos, originados de observações feitas por

aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos, tais como GARP (Global Atmospheric Research Program) e GATE (Global Atlantic Tropical Experiment), por exemplo. Esses dados começaram a ser processados a partir de março de 1962; dados de superfície terrestre, processados a partir de 1967, obtidos através das forças aéreas ou dos arquivos do NCEP; dados de satélites, que começaram a ser obtidos em 1967, seguindo vários programas diferentes.

Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto “Operational Vertical Sounder System” (TOVS) com resolução espacial de 2,5° e variáveis em três dimensões; dados de vento em superfície, em adição aos dados de superfície, os ventos são obtidos com o sensor espacial “Microwave/Imager” (SSM/I) que fornece os dados desde 1987; dados de cobertura de nuvem, obtidos de estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG), sendo estes disponíveis desde 1978.

Todos os dados obtidos são submetidos ao tratamento feito pela rede neural de KRANSNOPOLSKY *et al.* (1995), *apud* KALNAY *et al.* (1996), antes de serem interpolados para as resoluções de armazenamento.

Todos os dados utilizados nas Reanálises passam por um rigoroso controle de qualidade, sendo que, como existem várias formas de obtenção, cada uma merece um tratamento diferencial.

Como exposto anteriormente os dados, obtidos de várias fontes, são assimilados pelo modelo global do NCEP. Essa assimilação faz com que a qualidade dos parâmetros das Reanálises seja variável em função do grau de dependência das mesmas com o modelo e com a quantidade de informações disponíveis.

De maneira geral os parâmetros meteorológicos disponíveis nas Reanálises são classificados em três classes de variáveis, tipos A, B e C, sendo essa classificação diretamente relacionada ao grau de dependência das mesmas com o modelo e as observações. As variáveis do tipo A são extremamente dependentes dos dados coletados, podendo ser consideradas as mais confiáveis (Kistler *et al.*, 2001). As variáveis do tipo B são influenciadas tanto pelo modelo como pelas observações, podendo ser consideradas como menos confiáveis do que as anteriores. Nesse grupo está o vento a 10 metros, utilizado freqüentemente como condição de contorno para modelagem oceânica. As

últimas, tipo C, são inteiramente determinadas pelo resultado de modelo, sendo influenciadas pela assimilação das outras duas classes no modelo.

### **VIII.2 O Modelo AVN (Análises)**

O sistema de previsão numérica do tempo no NCEP, nos anos oitenta, era composto de dois tipos de previsão, o AVN (*Aviation*) com 3 dias de previsão, 2 inicializações (análises) diárias (00Z e 12Z) e previsões a cada 3 horas, e o MRF (*Medium-Range Forecast*), com previsão de 10 dias, uma inicialização (00Z) e informações a cada 6 horas.

No período de interesse deste trabalho, o sistema era ainda composto desses dois tipos de previsão. No entanto, o AVN já era inicializado 4 vezes por dia (00Z, 06Z, 12Z e 18Z), com dados tratados pelo sistema de assimilação GDAS (*Global Data Assimilation System*), idêntico ao utilizado nas Reanálises, e com a previsão do modelo utilizada como *first-guess*. A resolução do modelo era T126 com 28 níveis na vertical (Caplan *et al.*, 1997)

Atualmente, esses produtos foram integrados no chamado GFS (*Global Forecasting System*), mesclando as características dos dois sistemas anteriores com algumas melhorias computacionais que possibilitaram principalmente a melhor resolução espacial do modelo.

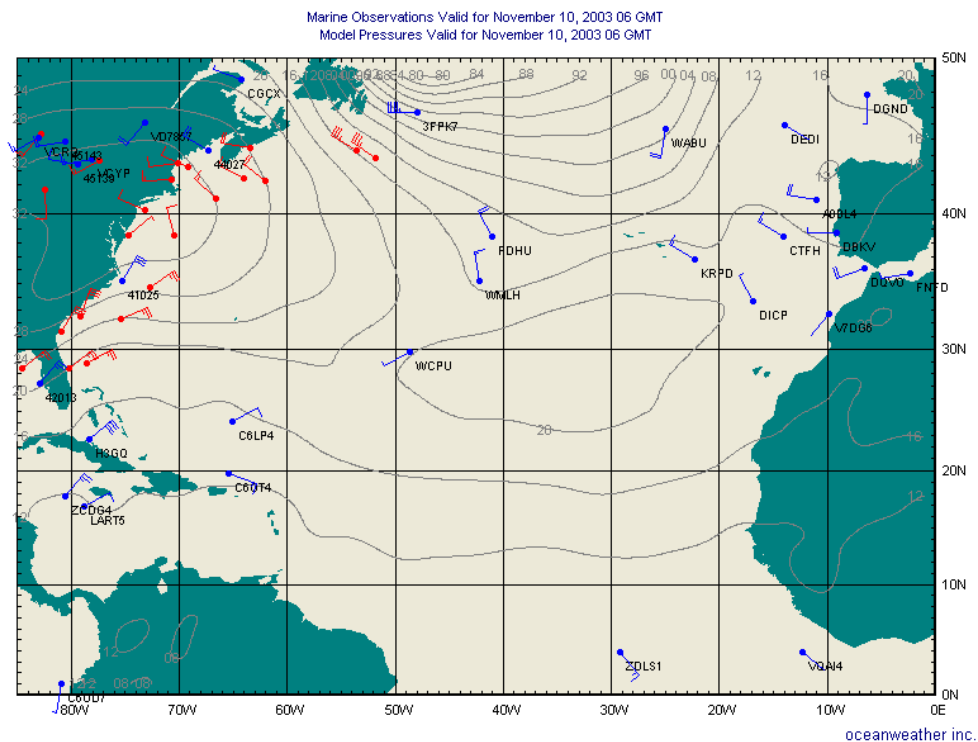
### **VIII.3 Aspectos Importantes**

Como foi discutido no capítulo VI, a qualidade da informação de vento é primordial para que se obtenha um bom resultado na modelagem de geração e propagação de ondas. Nesse sentido, alguns estudos discutindo aspectos temporais e

espaciais dos modelos de onda, bem como a qualidade dos campos de vento foram realizados, entre eles Cardone *et al.* (1995) e Graber *et al.* (1995).

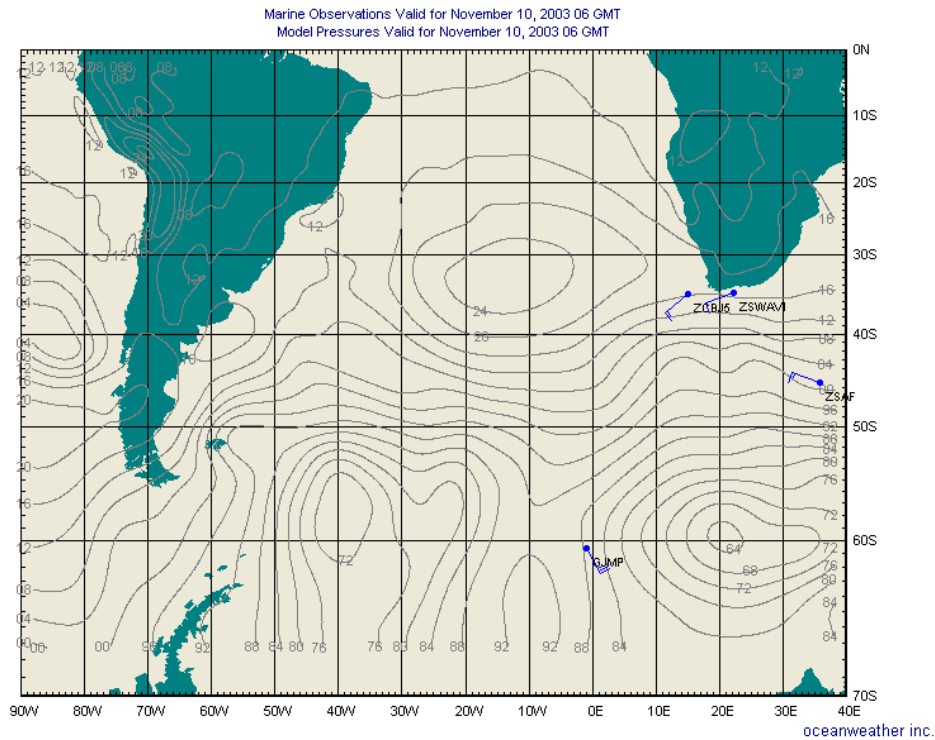
Embora a resolução tanto temporal quanto espacial dos dados de vento seja determinante para uma boa simulação de onda, outro importante fator a ser discutido é a inicialização dos modelos atmosféricos, mais especificamente os dados assimilados pelo modelo. Existe uma grande diferença quantitativa entre o número de observações assimiladas nos dois hemisférios, o que faz com que no hemisfério norte o sistema de assimilação seja mais eficiente, em função do maior volume de dados observados e assimilados.

Exemplos dessa diferença, escolhidos aleatoriamente, são apresentados nas Figuras 1 e 2.



**Figura 1: Observações disponíveis para o Atlântico Norte em 10/11/2003 - 06GMT**

(FONTE: [www.oceanweather.com](http://www.oceanweather.com), acessado em 2003)



**Figura 2: Observações disponíveis para o Atlântico Sul em 10/11/2003 - 06GMT**

(FONTE: [www.oceanweather.com](http://www.oceanweather.com), acessado em 2003)

Quando esses dados são reassimilados para geração das Reanálises do NCEP, algumas outras fontes são introduzidas, como descrito em KALNAY *et al.* (1996) e Kistler *et al.* (2001). Em contrapartida, os dados têm menor resolução espacial e temporal comparados aos das análises (modelo), os quais são duas vezes superiores em resolução.

Segundo Swail & Cox (2000), os campos de vento a 10 metros obtidos das Reanálises são, no mínimo, tão bons quanto os obtidos das análises. Entretanto, a resolução com que esses dados são disponibilizados pelos grandes centros meteorológicos mundiais pode trazer algumas deficiências para sua utilização em modelagem de ondas.

## **IX Descrição dos Experimentos**

Com o objetivo de avaliar as respostas do modelo às variações das condições de contorno, foram realizados experimentos abrangendo toda a região do oceano Atlântico Sul, sendo ajustada uma grade com um grau de resolução espacial, entre os paralelos de 80° sul até o Equador e entre os meridianos de 100° oeste e 20° leste, utilizando as informações de topografia de fundo da base de dados ETOPO5 ([www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/seltopo.html](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/seltopo.html)).

A grade espectral do modelo foi discretizada com 24 direções e 25 frequências, iniciando em 0.042 Hz, com incremento dado na forma de progressão geométrica de razão 1.124.

Foram realizadas duas simulações, utilizando os campos de vento das Reanálises, atualizados a cada seis horas, e das Análises (AVN), atualizados a cada três horas, sendo ambos interpolados linearmente pelo modelo ao longo dos intervalos de atualização. Os arquivos de resultados do modelo foram gerados a cada 3 horas durante o período simulado.

Os dados de vento utilizados foram interpolados linearmente para a resolução do modelo com auxílio da UDF (*user defined function*) REGRID2 do Software GrADS (Doty, 1995).

A simulação abrangeu os meses de abril, maio e junho de 1997 e os resultados foram comparados em termos de altura significativa, período de pico, período médio e direção principal, com os dados do ondógrafo direcional (Directional Waverider – Mark II, fabricado pela Datawell – [www.datawell.nl](http://www.datawell.nl)) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira IEAPM da Marinha do Brasil, em Arraial do Cabo – Rio de Janeiro. O ponto de grade do modelo utilizado para a comparação, em função da discretização utilizada, está localizado na mesma longitude e aproximadamente 1° de latitude a sul da localização do ondógrafo.

## **X Resultados e Discussão**

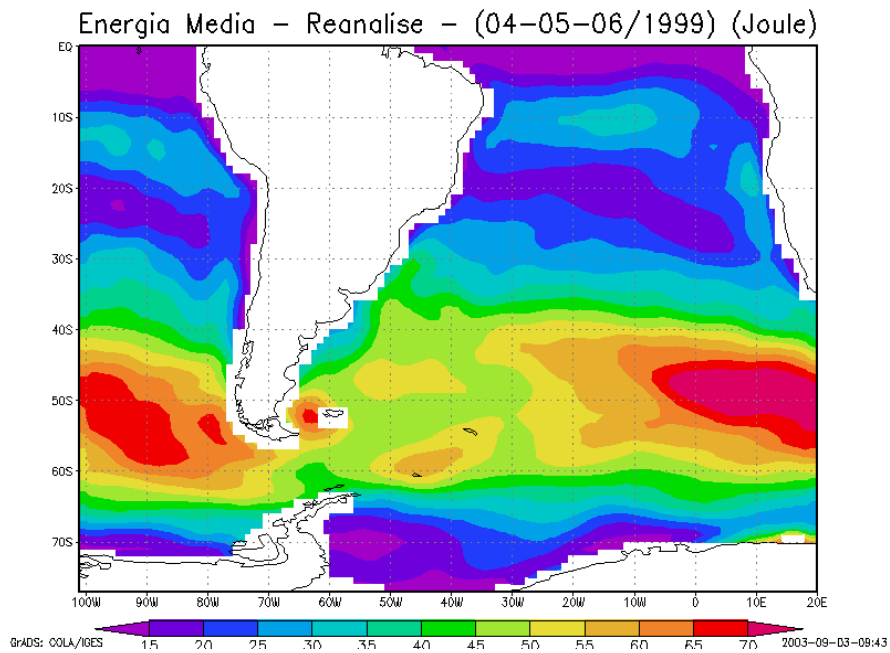
Serão apresentados a seguir os resultados das simulações realizadas com o modelo de ondas, bem como uma análise das diferenças dos campos de vento utilizados como condições de contorno para as simulações.

### **X.1 Dados de Vento**

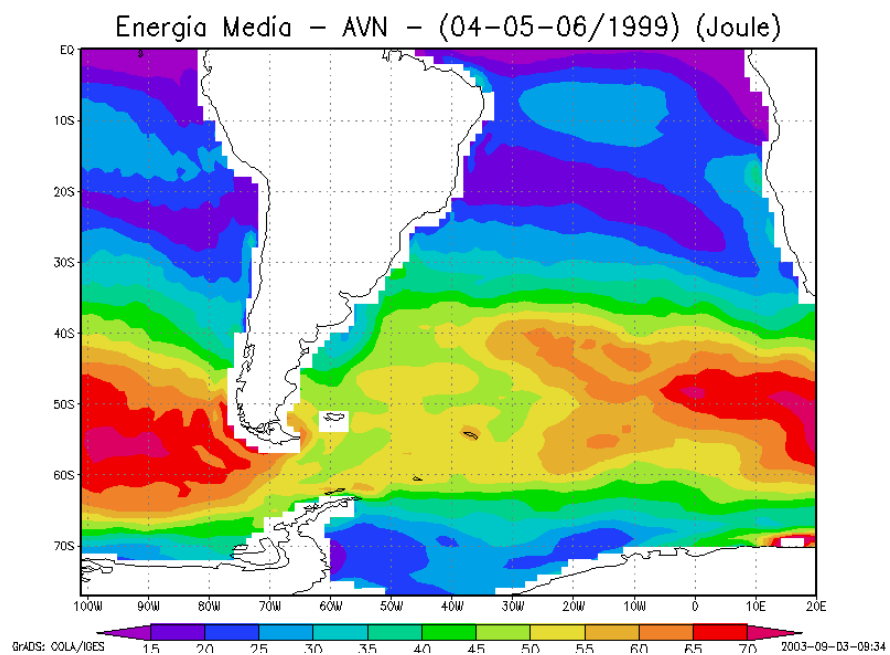
Nessa seção serão apresentadas as características dos campos de vento utilizados nas simulações, bem como uma discussão de suas diferenças.

Nas Figuras 3 e 4 podem ser observados os campos de energia média do vento calculados com os dados da Reanálise e com os dados do AVN, respectivamente, para todo o período simulado.

Pode-se observar que, de maneira geral, os campos são similares, apresentando aproximadamente a mesma distribuição da energia no espaço. Vale, entretanto, ressaltar que no cálculo da média temporal, a variabilidade temporal e algumas características transientes dos campos de vento são perdidas e serão discutidas mais tarde.

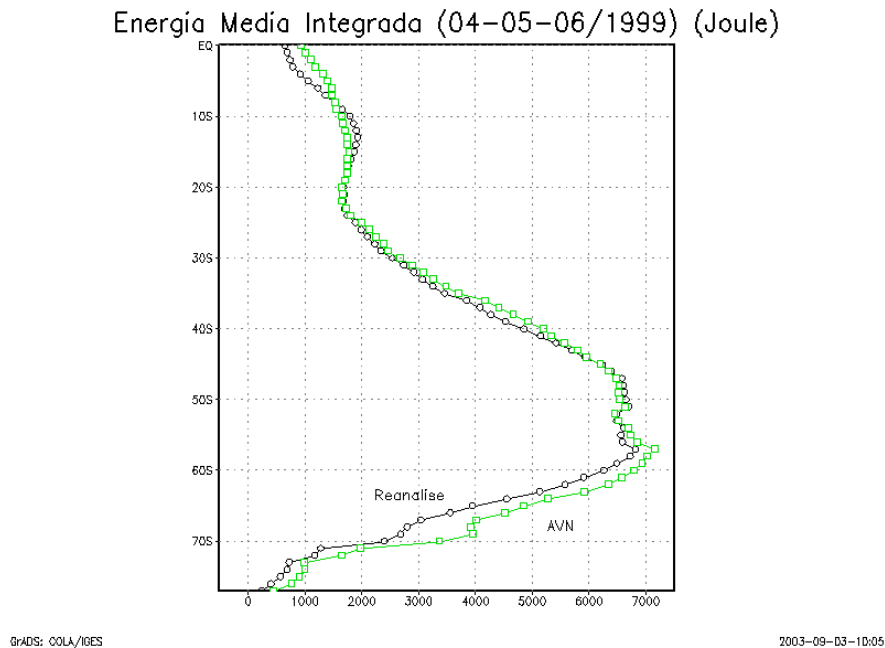


**Figura 3: Campo de energia média obtida com os dados da Reanálise para os meses de abril, maio e junho de 1997.**



**Figura 4: Campo de energia média obtida com os dados do AVN para os meses de abril, maio e junho de 1997.**

Na Figura 5 pode ser observada a variação da energia média do modelo AVN e da Reanálise integrada meridionalmente para todo o período simulado.



**Figura 5: Energia média integrada meridionalmente para os meses de abril, maio e junho de 1997.**

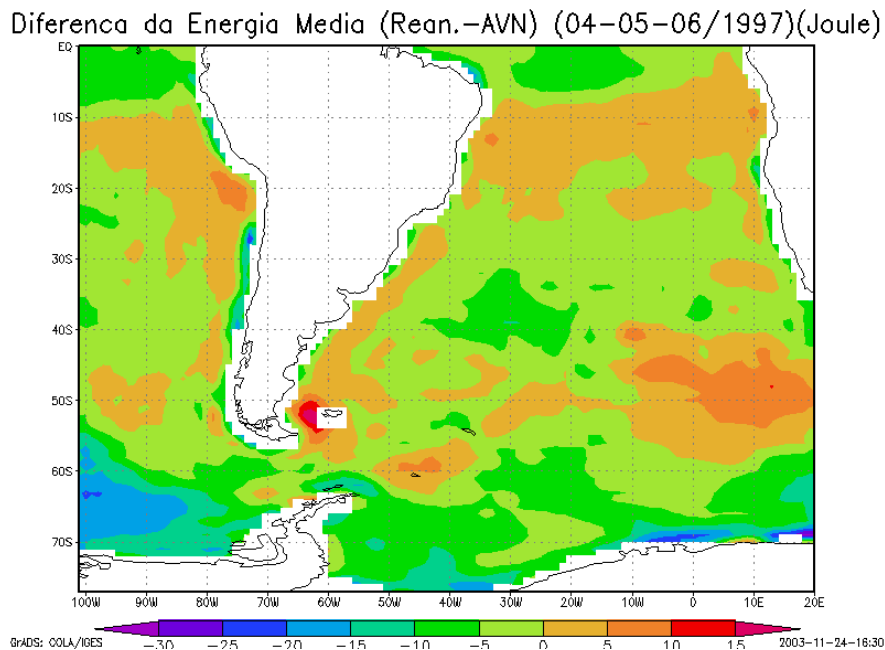
Pode se notar que os valores de energia crescem substancialmente, em ambas as bases de dados, na faixa entre os paralelos de 40° e 60° S. Essa região é caracterizada por uma dinâmica muito intensa, como pode ser comprovada pelos dados apresentados, associada a fenômenos de ciclogênese e frontogênese.

Embora haja grande semelhança entre os campos médios de energia, na Figura 6 pode ser observada a diferença entre eles. Valores positivos representam maior energia no cálculo com os dados da Reanálise em relação ao cálculo com os dados do AVN, enquanto que valores negativos representam o contrário.

Pode-se observar um domínio energético dos dados da Reanálise na região próxima a costa de toda a América do Sul, além de um cinturão bem marcado entre as

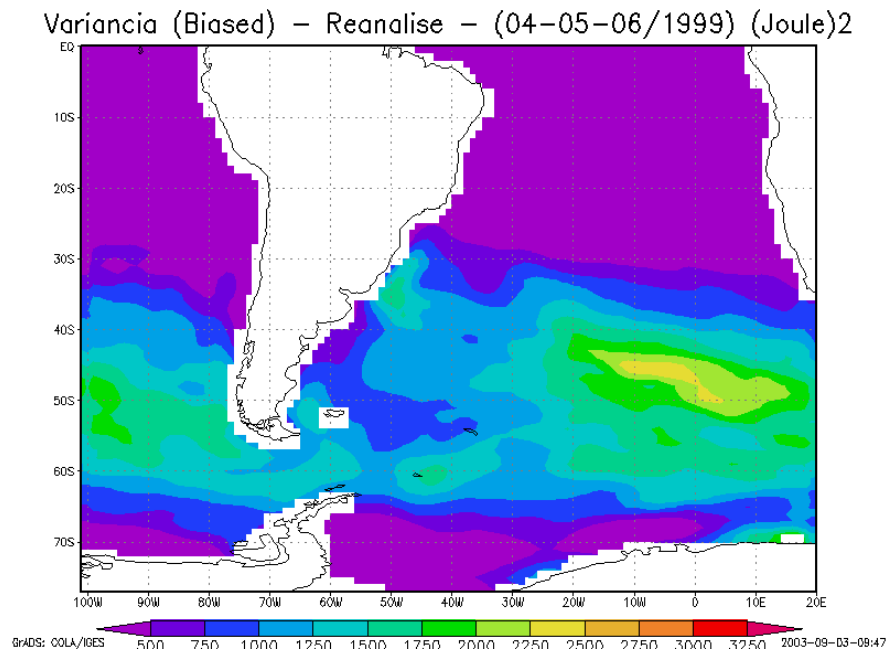
latitudes de 10° e 20° S. No extremo sul do Atlântico Sul ocorre também o máximo positivo da diferença, correspondente aos dados das Reanálises, região de formação e intensificação de ciclones extratropicais.

No interior da Bacia do Atlântico e nas proximidades do Equador, ocorrem as diferenças negativas, referentes a maior quantidade de energia presente nos dados do modelo AVN.

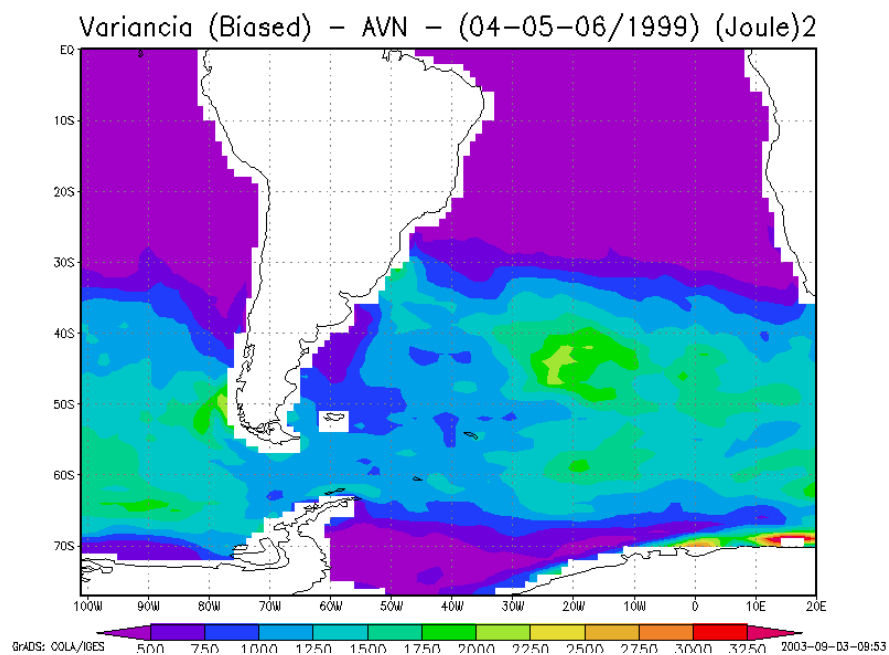


**Figura 6: Campo de diferença na energia média obtida com os dados da Reanálise subtraído dos dados do AVN para os meses de abril, maio e junho de 1997.**

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os campos de variância da energia para todo o período simulado. Mais uma vez nota-se uma distribuição bastante similar entre as duas bases de dados. Observa-se, entretanto que o cinturão de maior variação da energia é mais largo no cálculo com os dados do AVN, entre 30° e 70° S, enquanto que na Reanálise varia entre 40° e 60° S.



**Figura 7: Campo de variância da energia calculado com os dados da Reanálise para todo os meses de abril, maio e junho de 1997.**

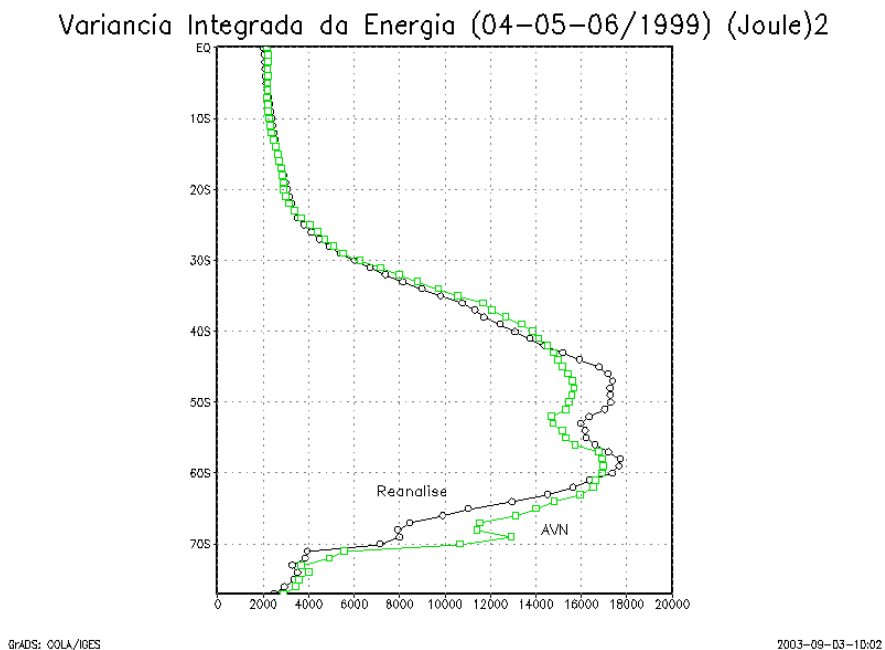


**Figura 8: Campo de variância da energia calculado com os dados do AVN para todo os meses de abril, maio e junho de 1997.**

Na Figura 9 é apresentada a variância integrada meridionalmente para o período de simulação. Pode-se observar o alargamento da faixa de maior variância da energia integrada, principalmente para sul, nos dados do modelo AVN.

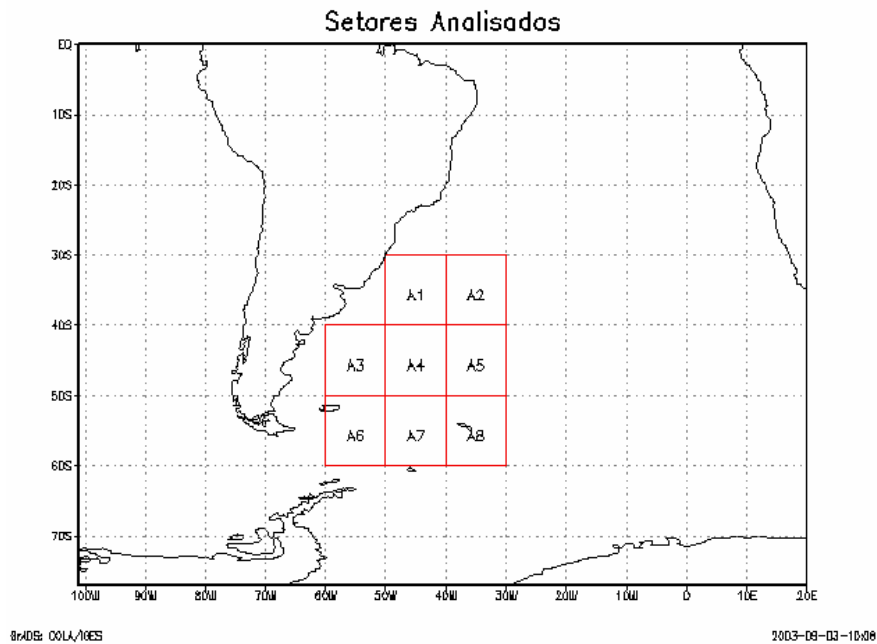
Outro fator importante a ser destacado é a coincidência entre a região de maior variabilidade da energia com a região de maior energia apresentada anteriormente. Nessa área ocorre a geração das maiores ondulações encontradas no Atlântico Sul, associadas aos ciclones ali gerados ou intensificados.

Alguns estudos, como por exemplo, Covey *et al.* (1999) mostram que é também a partir desses paralelos que são encontradas as maiores diferenças entre os resultados dos modelos atmosféricos operacionais nos grandes centros mundiais.



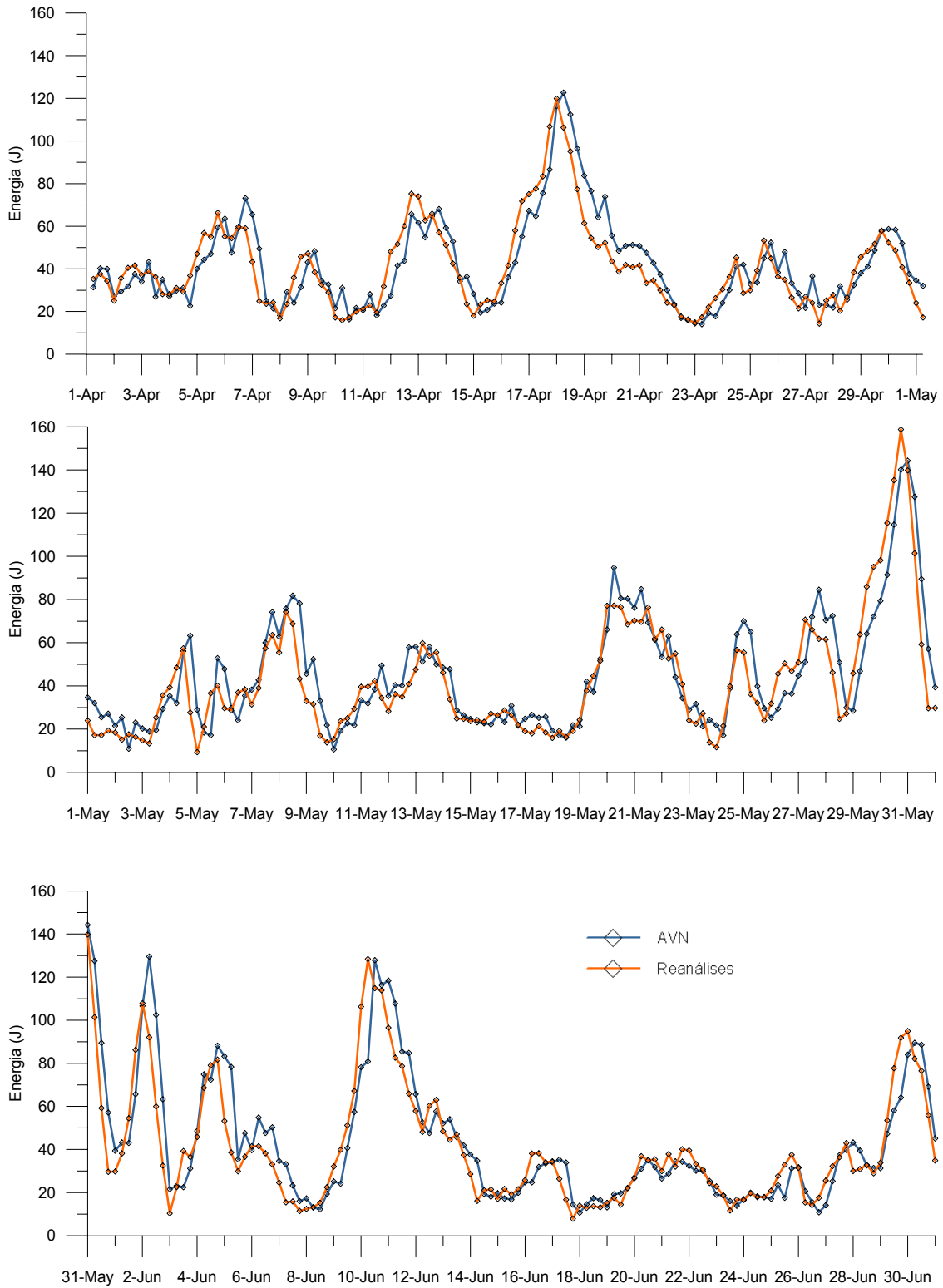
**Figura 9: Variância da energia integrada meridionalmente para os meses de abril, maio e junho de 1997.**

Com objetivo de melhor caracterizar os campos de vento e suas diferenças, principalmente na região de maior energia mencionada anteriormente, foi estabelecida uma metodologia de análise baseada em setores de 10° por 10° de latitude e longitude, como podem ser observados na Figura 10.

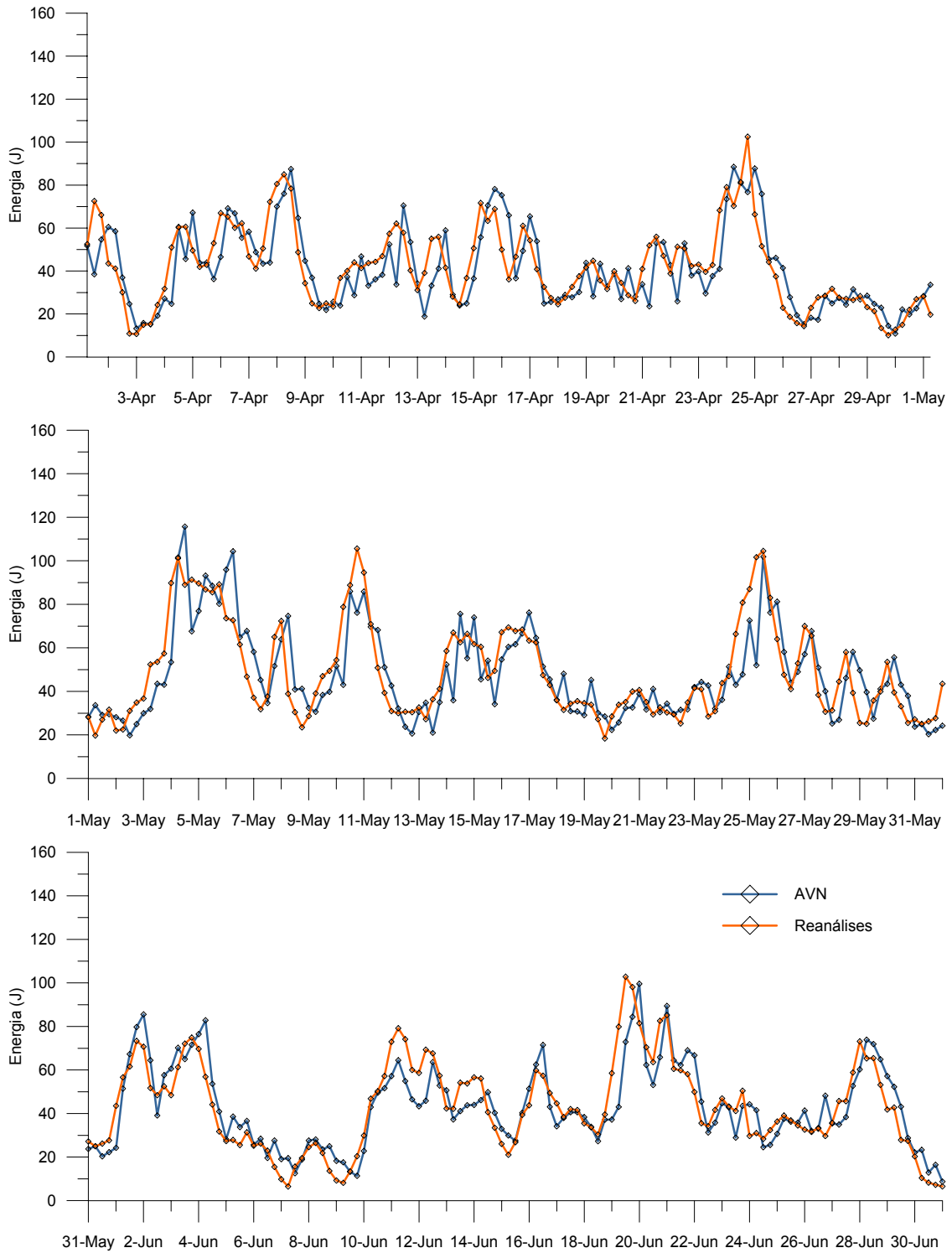


**Figura 10: Representação esquemática dos setores analisados.**

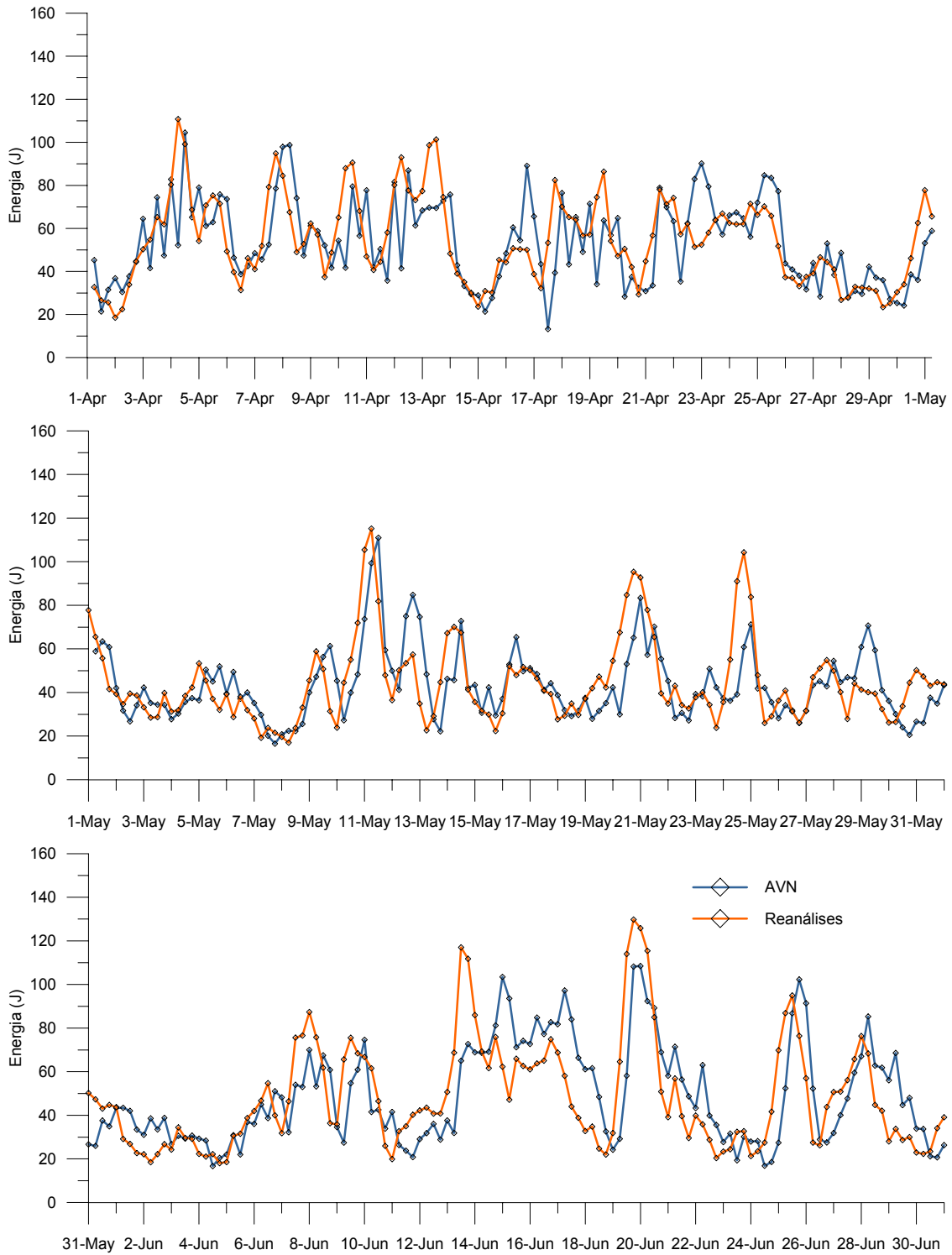
Foram analisadas as evoluções temporais da energia integrada espacialmente para cada setor representado na Figura 10. Esta análise mostrou diferenças entre as duas bases de dados, como pode ser observado nas Figuras 11, 12 e 13, referentes aos setores 1, 3 e 6, respectivamente.



**Figura 11: Evolução temporal da energia integrada para o setor 1.**



**Figura 12: Evolução temporal da energia integrada para o setor 3.**



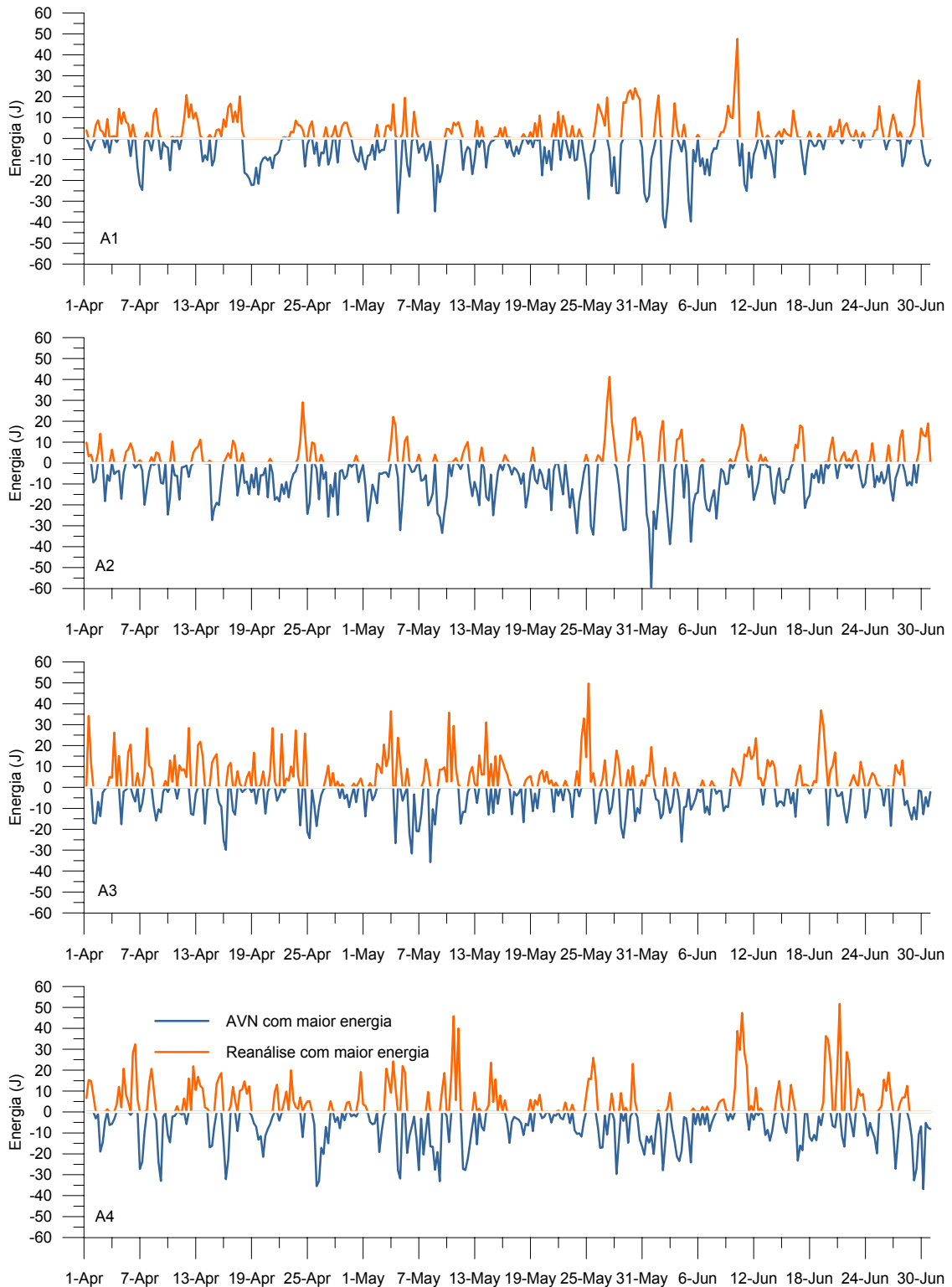
**Figura 13: Evolução temporal da energia integrada para o setor 6.**

Pode-se observar uma defasagem entre alguns eventos representados pela Reanálise em relação ao mesmo evento representado AVN. Essa defasagem ocorre principalmente em situações de maior energia associada, como se percebe na Figura 11 entre os dias 16 a 21 de abril, Figura 12 no dia 11 de maio e Figura 13 entre os dias 20 e 26 de maio.

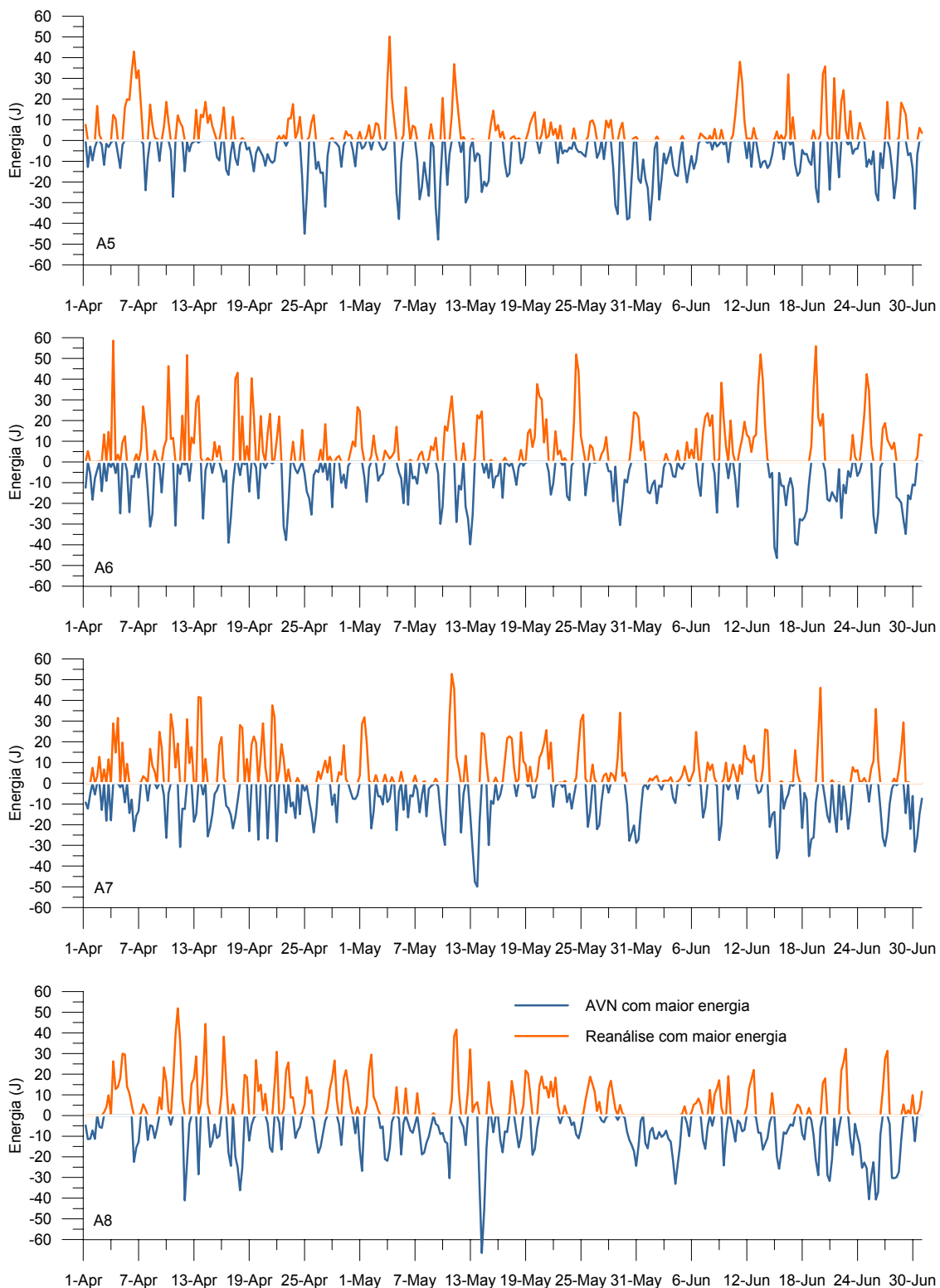
Ocorrem ainda eventos onde ora a quantidade de energia é maior no cálculo com a Reanálise e ora é maior no cálculo com o AVN, como pode ser observado na Figura 11, próximo ao dia 1 de junho, na Figura 12, próximo ao dia 11 de maio e na Figura 13, próximo ao dia 26 de maio.

Ainda a respeito das diferenças entre as energias integradas nos setores, encontram-se eventos divergentes entre as duas bases de dados, como pode ser observado na Figura 12, entre os dias 1 e 6 de maio e na Figura 13, próximo ao dia 16 de junho.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas as diferenças entre a energia integrada por setor, calculadas com os dados da Reanálise, subtraído dos valores calculados com os dados do AVN. Valores positivos representam maior energia calculada com os dados da Reanálise, enquanto que valores negativos representam maior energia associada aos dados do AVN.



**Figura 14: Diferença na energia integrada por setor (A1, A2, A3 e A4) para os meses de abril, maio e junho de 1997.**



**Figura 15: Diferença na energia integrada por setor (A5, A6, A7 e A8) para os meses de abril, maio e junho de 1997.**

Integrando as áreas das diferenças positivas e negativas das Figuras 14 e 15, quantifica-se o balanço de energia entre as duas bases de dados, ou seja, o total dos eventos onde há maior quantidade de energia presente nos dados da Reanálise, diferenças positivas, e o total de eventos onde há maior quantidade de energia presente nos dados do AVN, diferenças negativas. Esses resultados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1: Balanço de Energia nos Setores Analisados**

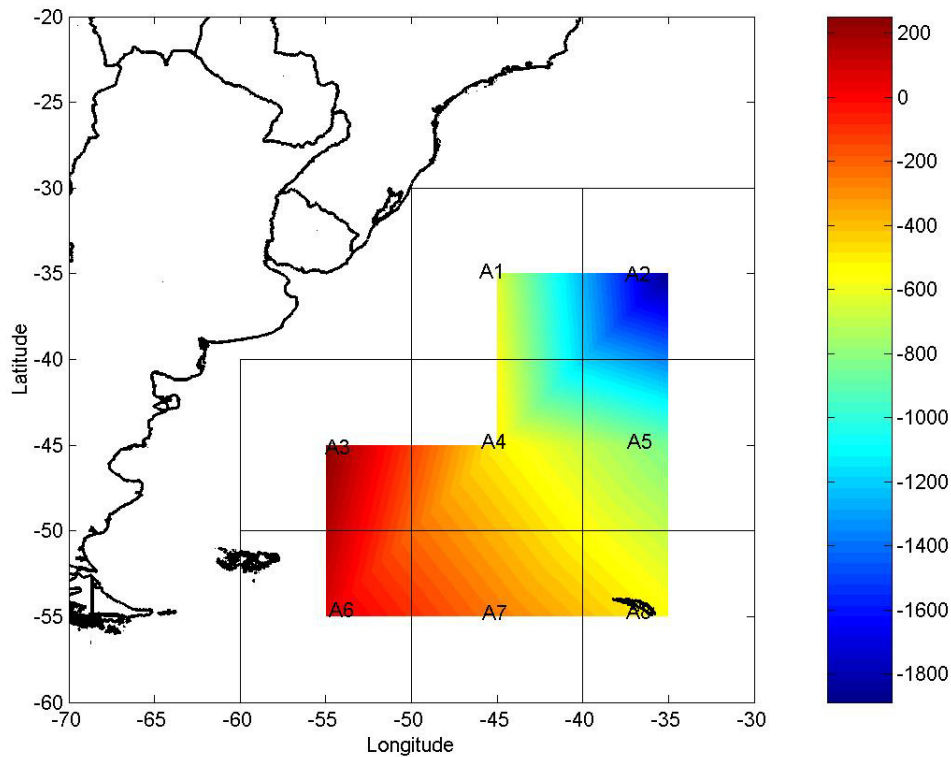
	Diferenças Positivas Integradas (J)	Diferenças Negativas Integradas (J)
Setor A1	1278.9	1907.3
Setor A2	926.4	2814.3
Setor A3	1836.3	1583.8
Setor A4	1695.9	2208
Setor A5	1539.1	2381
Setor A6	2470.9	2400.3
Setor A7	2124.5	2377.7
Setor A8	2032	2571.2
Total	13904	18244

Os valores apresentados na Tabela 1 mostram uma predominância de maiores valores de energia presente nos dados do AVN, com exceção dos setores A3 e A6, onde os valores de energia da Reanálise são ligeiramente superiores. Analisando o total das diferenças, percebe-se que ao longo da simulação os dados do AVN apresentam, de maneira geral, maior quantidade de energia nos setores analisados.

Na Figura 16 é apresentada a variação da diferença da energia integrada no tempo para os setores analisados, na forma de mapa.

Pode-se perceber que no extremo sul dos setores analisados a energia presente nos dados da Reanálise é superior a dos dados do AVN, entretanto em todas as outras regiões o inverso acontece. Vale ainda ressaltar a gradação de cor presente na figura entre o domínio energético dos dados do AVN, nordeste da região, e o domínio da Reanálise, no

sudoeste da área analisada (diagonal A2 – A6). Outro fator a ser destacado é a maior ordem de grandeza das diferenças negativas, ou seja, quando a diferença ocorre em decorrência da maior energia presente nos dados do AVN (diferença A2), essa é pelo menos uma ordem de grandeza maior do que a diferença positiva (diferença A6) .



**Figura 16: Diferença da energia integrada no tempo para os setores analisados – Valores positivos indicam mais energia presente nos dados da Reanálise em relação aos dados do AVN.**

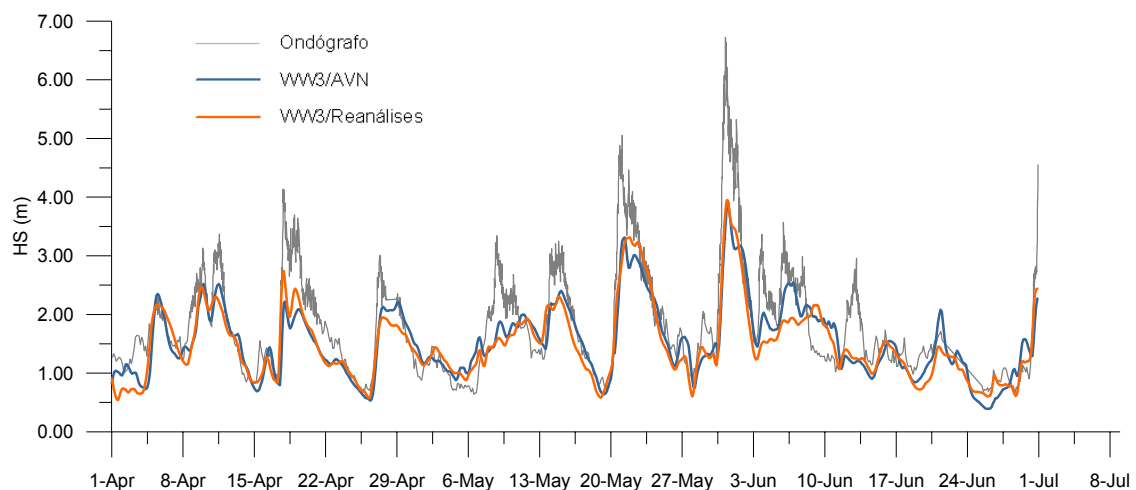
## X.2 Resultados do Modelo de Ondas

A seguir serão apresentados os resultados do modelo de ondas para o período simulado. É importante ressaltar que a posição de fundeio do ondógrafo durante o período simulado impedia que o mesmo registrasse ondas de nordeste, impondo um filtro natural aos dados medidos.

As ondas de nordeste e leste nessa região estão associadas a situações de bom tempo, sendo geradas pela ação da ASAS (Candella, 1997). Dessa forma, a comparação presente nesse trabalho restringe-se aquelas situações onde há presença de *swell*, gerado em mais altas latitudes, na região de estudo.

Na Figura 17 é apresentada a evolução temporal da altura significativa (HS) calculada pelo modelo com os ventos da Reanálise e do AVN, comparados como os dados medidos pelo ondógrafo. É possível identificar eventos onde há uma subestimação do modelo com ambos os dados em relação à medição do ondógrafo, como por exemplo, no período próximo ao dia 30 de abril.

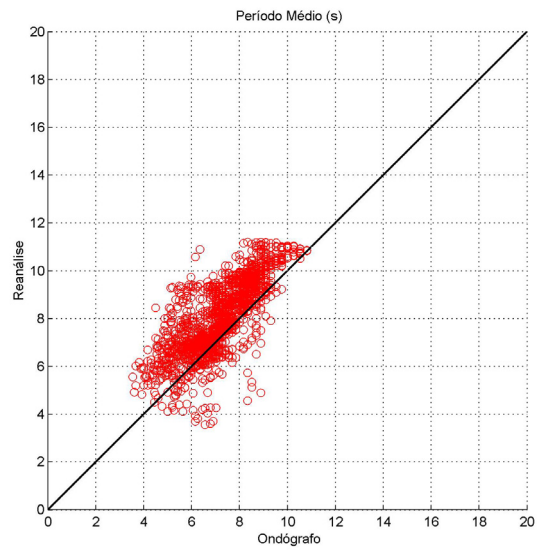
Nota-se que em determinados eventos essa subestimação é reduzida, ora com os dados da Reanálise, ora com os dados do AVN, como pode ser observado nos períodos próximos a 20 de abril e 30 de abril, respectivamente.



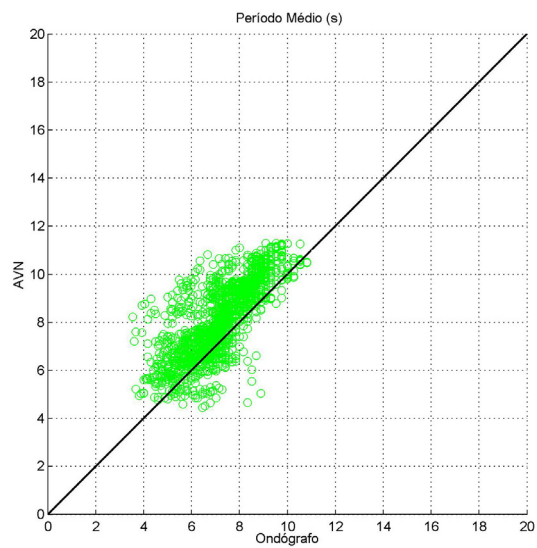
**Figura 17: Evolução temporal de HS para todo o período simulado, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.**

Nas Figuras 18, 19, 20 e 21 são apresentados gráficos de dispersão entre os resultados do modelo de período médio e período de pico com os dados do ondógrafo.

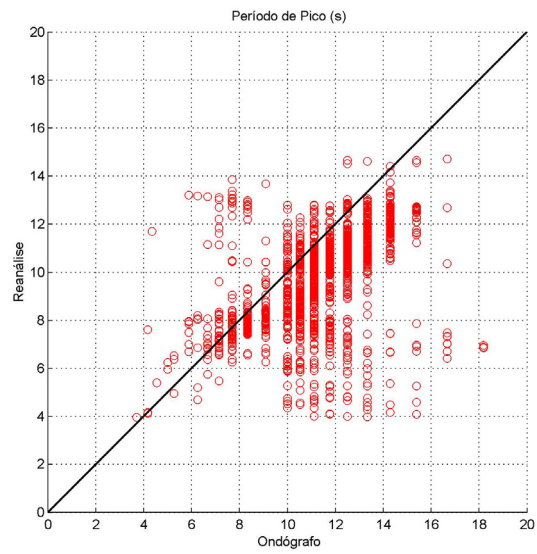
Observa-se que de uma maneira geral o modelo apresenta, nas duas simulações, uma boa correlação com os dados medidos, principalmente para HS e período médio (TM) como pode ser observado na Tabela 2.



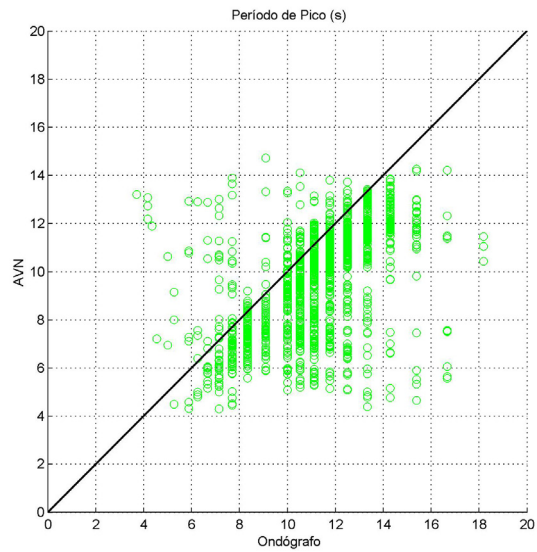
**Figura 18: Dispersão entre os valores de TM calculado pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados do ondógrafo.**



**Figura 19: Dispersão entre os valores de TM calculado pelo modelo com os dados do AVN e os dados do ondógrafo.**



**Figura 20: Dispersão entre os valores de TP calculado pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados do ondógrafo.**



**Figura 21: Dispersão entre os valores de TP calculado pelo modelo com os dados do AVN e os dados do ondógrafo.**

**Tabela 2: Correlação entre os resultados do modelo, utilizando os dados da Reanálise (WW3/Reanálise) e utilizando os dados do AVN (WW3/AVN) e os dados medidos pelo ondógrafo**

	HS	TP	TM	DIR
WW3/Reanálise	0.86	0.46	0.76	0.63
WW3/AVN	0.82	0.55	0.77	0.67

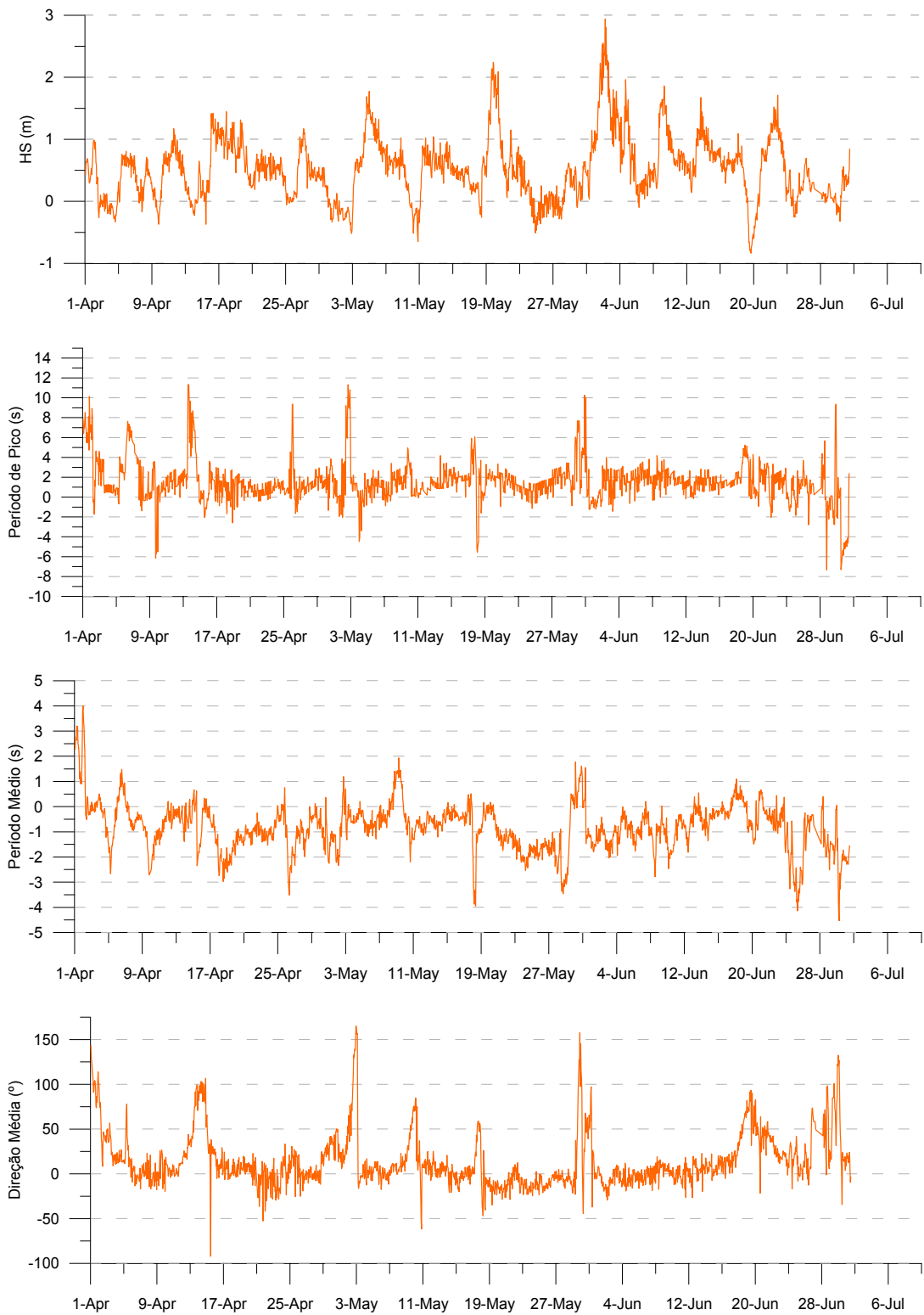
Na Tabela 3, são apresentados os valores de erro médio quadrático (RMS) entre os resultados de modelo e os dados do ondógrafo.

**Tabela 3: RMS entre os resultados do modelo, utilizando os dados da Reanálise (WW3/Reanálise) e utilizando os dados do AVN (WW3/AVN) e os dados medidos pelo ondógrafo**

	HS (m)	TP (s)	TM (s)	DIR (°)
WW3/Reanálise	0.73	2.58	1.25	33.65
WW3/AVN	0.74	2.46	1.34	31.55

Os resultados de RMS entre as simulações e os dados medidos mostraram-se muito próximos em todos os parâmetros analisados, principalmente para HS. Em relação ao período de pico os resultados do modelo forçado como os dados do AVN foram ligeiramente melhores, embora para o período médio a situação seja inversa. Para a direção média obteve-se valores de RMS em torno de 30°, como pode ser observado na Tabela 3. Este valor pode ser, em parte, explicado pela não representação de eventos de nordeste nos dados do ondógrafo, como descrito no início desta seção.

Embora o valor de RMS calculado para direção média tenha sido relativamente alto, os mesmos valores para os outros parâmetros mostram que os resultados das duas simulações, de maneira geral, foram satisfatórios, ficando as maiores diferenças localizadas nos eventos isolados, como pode ser observado nas Figuras 22 e 23.



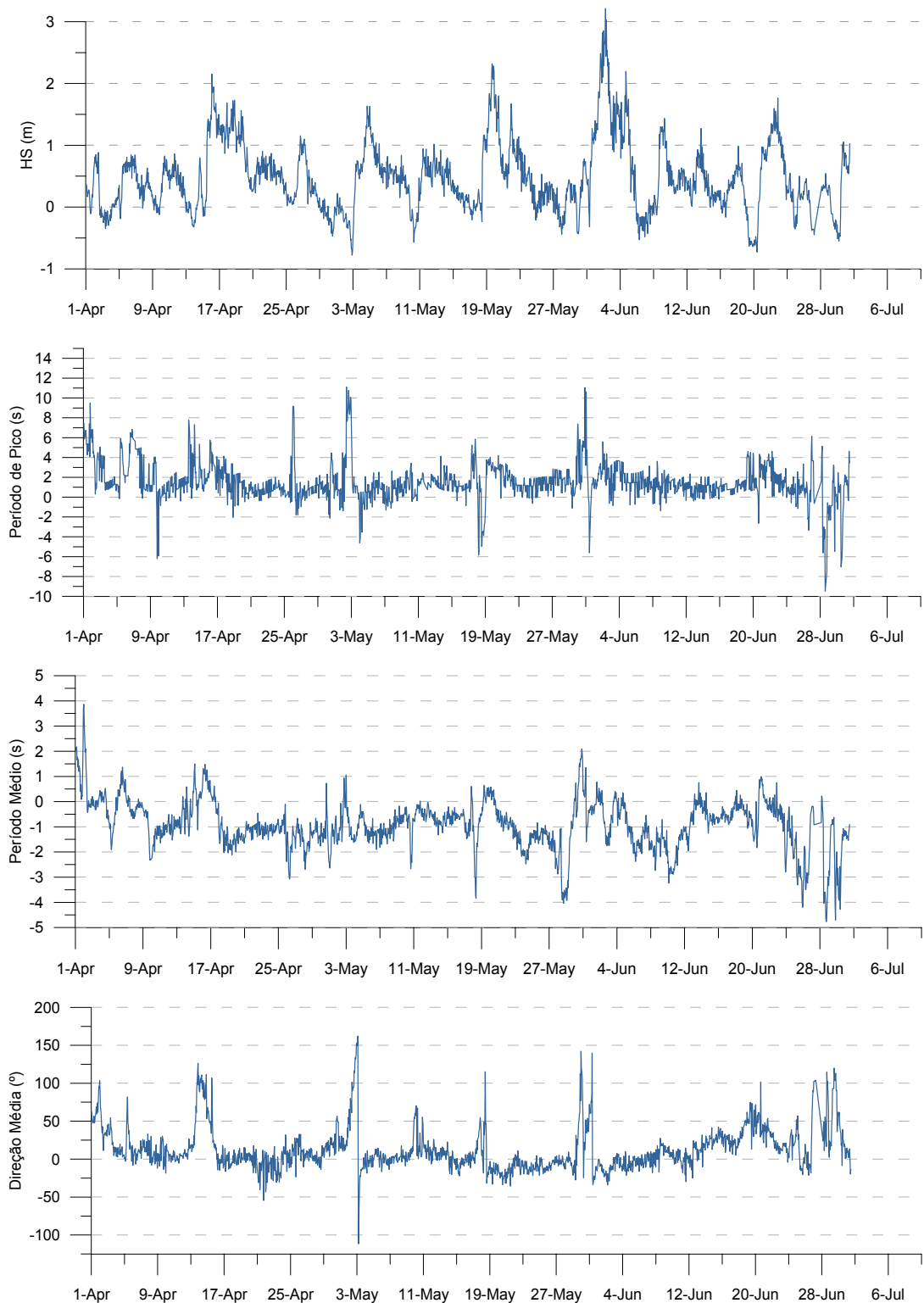
**Figura 22: Diferença entre os parâmetros calculados pelo modelo com os dados da Reanálise e os dados medidos pelo ondógrafo para todo o período de simulação.**

As Figuras 22 e 23 ilustram a diferença entre medição do ondógrafo e modelo, ou seja, valores positivos de diferença representam subestimação do modelo, enquanto que valores negativos, superestimação do mesmo.

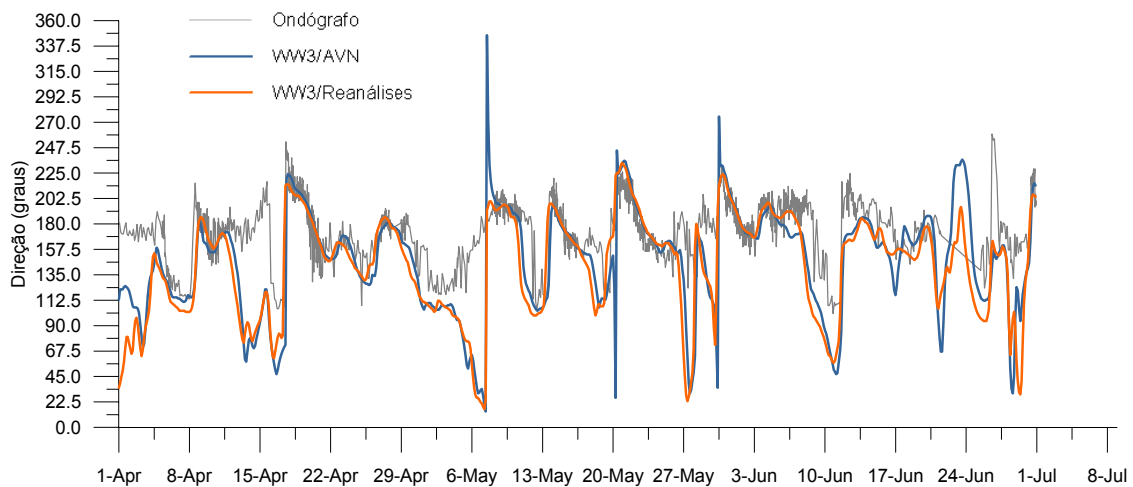
Pode-se observar que os valores de HS e TP estão quase sempre subestimados pelo modelo, principalmente em eventos com altos valores de HS, freqüentemente relacionados às tempestades extratropicais. Essa tendência de subestimação para altos valores de HS é também encontrada por Bidlot *et al.* (2002) e por Swail & Cox (2000), sendo que este último a atribui à subestimação desses fenômenos nos modelos atmosféricos.

Nota-se que os valores de superestimação do modelo são bem menores do que os valores subestimados. Isto ocorre, pois os resultados superestimados estão associados a eventos de baixos valores de HS, relacionados a eventos locais de geração de ondas. Esses eventos, no entanto apresentam direções leste e nordeste, ficando sua análise comprometida em função da deficiência dos dados do ondógrafo na representação dessas situações.

Na Figura 24 é apresentada a evolução temporal da direção, pode-se notar claramente que o valor mínimo de direção medido pelo ondógrafo foi maior que 100°, ou seja, não há presença de ondulações de leste e nordeste nos dados.



**Figura 23: Diferença entre os parâmetros calculados pelo modelo com os dados do AVN e os dados medidos pelo ondógrafo para todo o período de simulação.**

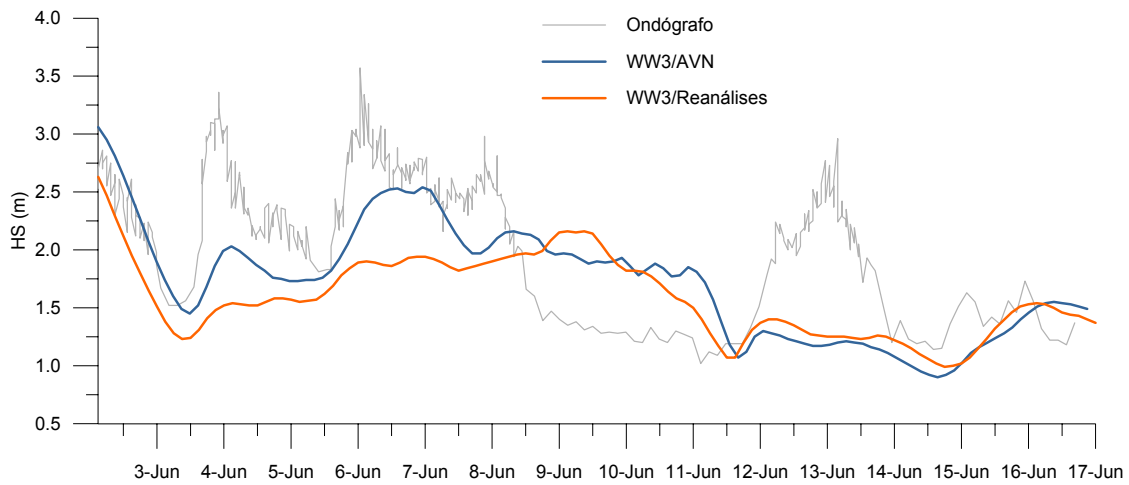


**Figura 24: Evolução temporal da direção para todo o período simulado, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.**

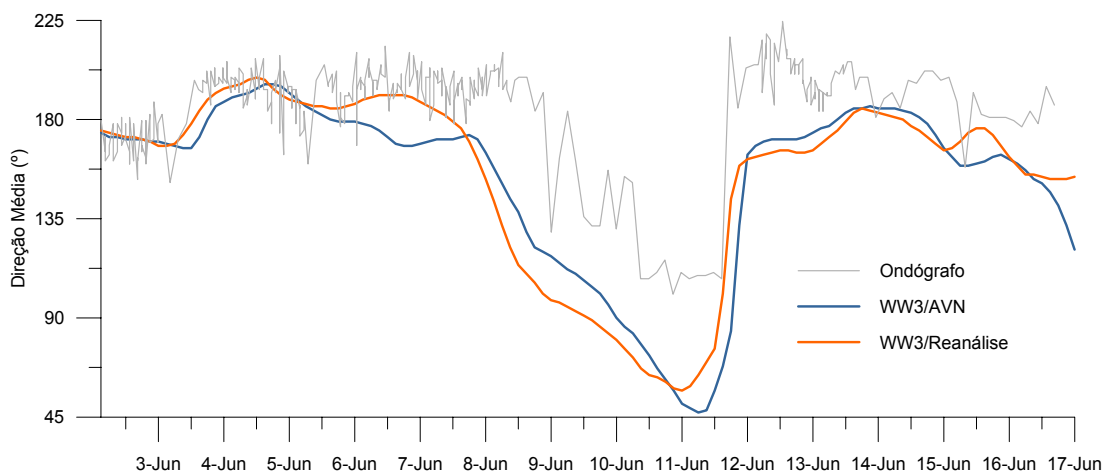
Nas Figuras 25, 26 e 27, são apresentadas as evoluções temporais de HS, direção e TP, respectivamente, para o período entre 3 e 15 de junho de 1997, em função das diferenças encontradas nas simulações nesse período. Nota-se que ocorre uma subestimação de HS e TP dos dados modelados no período entre os dias 3 e 8 de junho, com a simulação utilizando o AVN sendo menos subestimada, seguindo o padrão de toda a simulação.

Entre os dias 9 e 11 de junho, os resultados do modelo mostram valores de HS superiores e valores de TP inferiores aos do ondógrafo. Analisando a direção para o mesmo período percebe-se que se trata de um evento de direção leste e nordeste, faixa não representada pelos dados do ondógrafo.

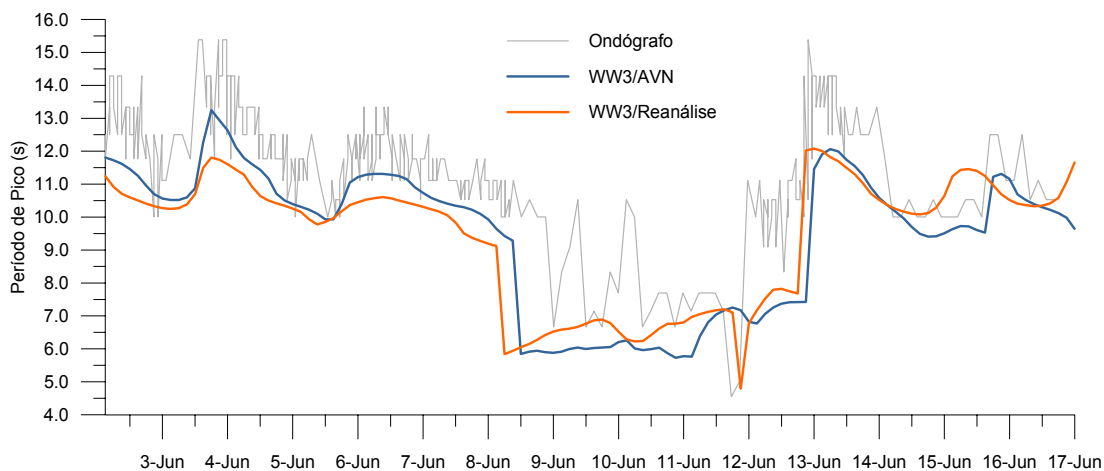
Posteriormente, entre os dias 11 e 14 de junho os resultados do modelo novamente subestimam os valores medidos pela bóia, sugerindo que os dados de vento não representaram esse evento meteorológico.



**Figura 25: Evolução temporal de HS, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.**



**Figura 26: Evolução temporal da direção, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.**



**Figura 27: Evolução temporal de TP, entre os dias 3 e 15 de junho de 1997, comparação entre os resultados do modelo e a medição do ondógrafo.**

Particularmente para esse evento do dia 13 de junho, pode-se perceber que embora os valores de direção média e TP calculados pelo modelo tenham seguido a tendência dos dados do ondógrafo, os valores de HS mostram que a energia contida nos modelos era inferior àquela medida.

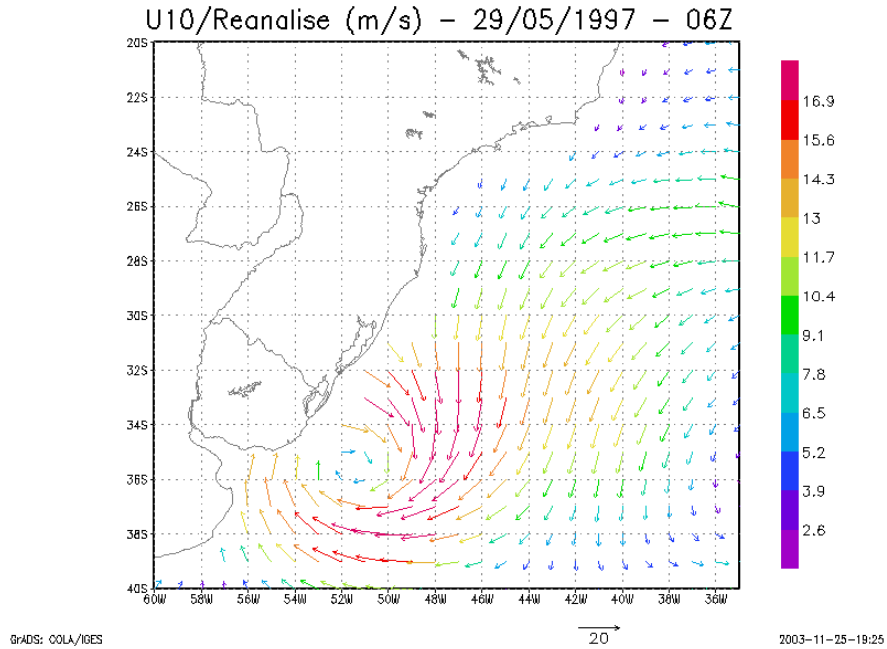
Além da subestimação dos modelos de onda em situações de tempestades extratropicais, segundo Swail & Cox (2000) ciclones tropicais também são mal representados pelos campos de vento, principalmente das Reanálises, os quais, além da baixa resolução espacial, ainda apresentam uma subestimação da energia.

Estudos sobre a qualidade dos campos de vento para simulações com modelos de onda são extensivamente realizados no hemisfério norte, identificando as deficiências aqui descritas dessas fontes de dados.

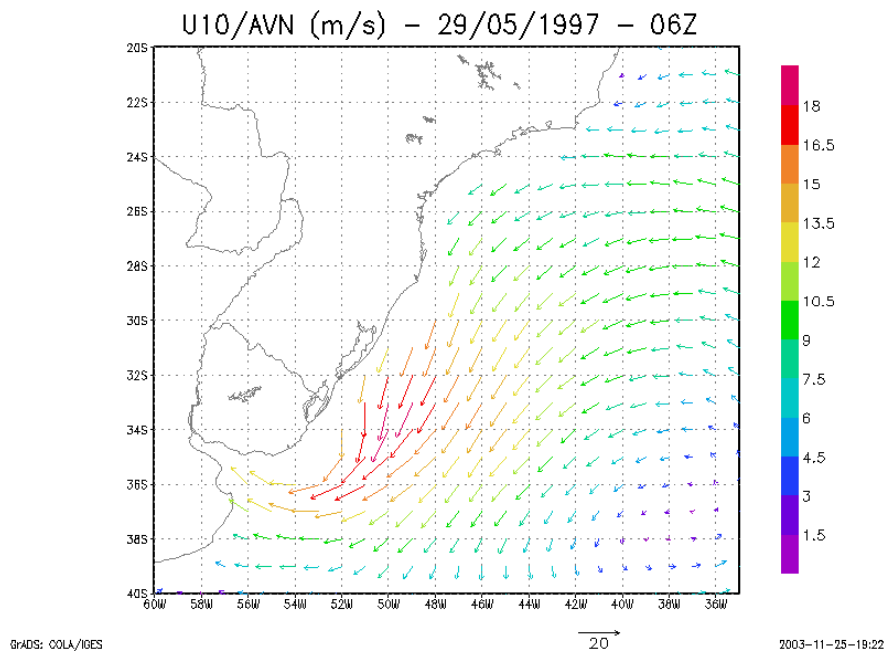
Essas deficiências somadas ao baixo número de observações *in situ*, disponíveis no hemisfério sul (ver seção VIII.3 Aspectos Importantes), faz com que hajam discrepâncias nos campos de vento disponíveis para esta região.

Observando as Figuras 28, 29, 30 e 31 pode-se perceber claramente essas diferenças. Embora os valores de intensidade do vento estejam próximos, a localização do centro do ciclone está totalmente diferente, corroborando e exemplificando as

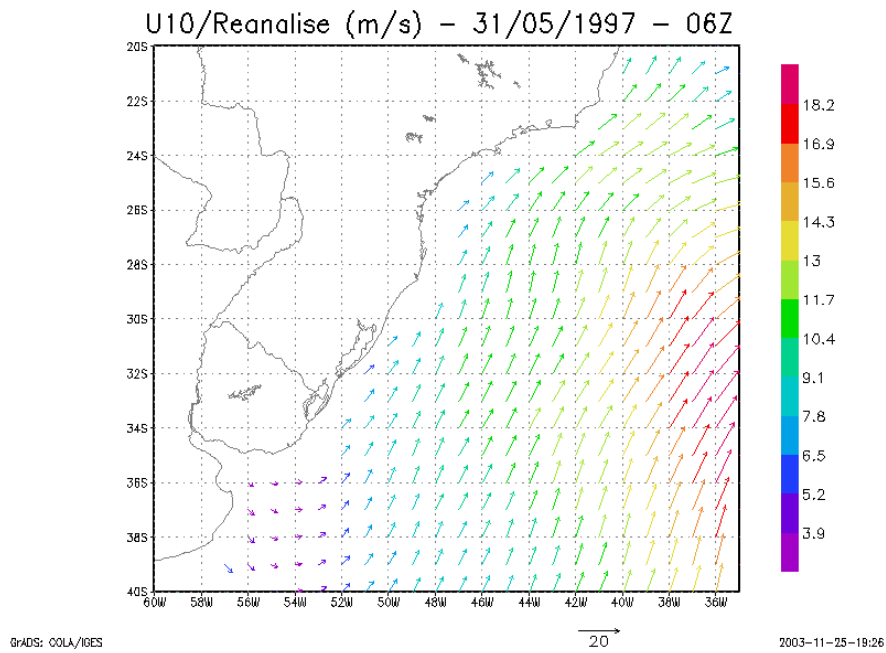
diferenças de intensidade e defasagens temporais encontradas na análise da energética dos campos de vento apresentada anteriormente.



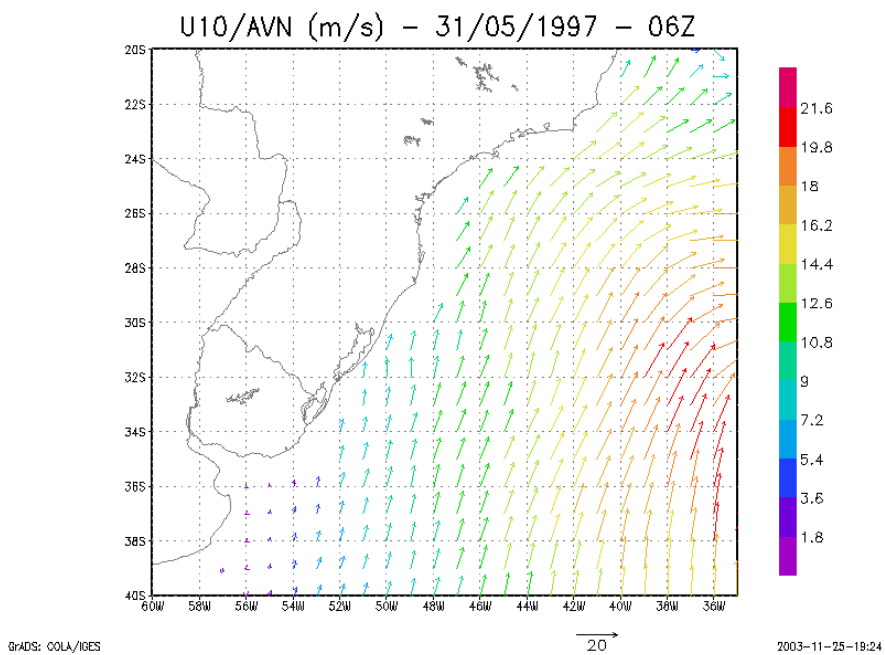
**Figura 28: Campo de vento a 10 metros da Reanálise para o dia 29/05/1997 as 06Z.**



**Figura 29: Campo de vento a 10 metros do AVN para o dia 29/05/1997 as 06Z**



**Figura 30: Campo de vento a 10 metros da Reanálise para o dia 31/05/1997 as 06Z.**



**Figura 31: Campo de vento a 10 metros do AVN para o dia 31/05/1997 as 06Z.**

Analisando a evolução desse ciclone com os dados do AVN, observa-se que além de mais intenso, a atuação dos ventos associados no modelo de ondas representou melhor a geração da ondulação presente nos dados do ondógrafo, como pôde ser observado nas Figuras 25, 26 e 27.

## **XI Conclusões**

Pode-se concluir que de maneira geral o modelo de ondas apresentou um desempenho satisfatório na representação das condições de *swell*, tanto com os dados das Reanálises como com os dados do AVN, como pôde ser observado nos valores de correlação e de RMS, para altura significativa e período médio.

O posicionamento do ondógrafo durante o período de simulação impediu que fosse possível uma discussão mais abrangente sobre as deficiências dos dados de ventos para situações de ondulações de nordeste e leste, associadas ao mar local. Isso explica, em parte, os piores índices de correlação e de RMS para direção e período de pico.

Essas deficiências na representação de mar local, entretanto são fato conhecido no meio científico, e são freqüentemente associadas a pouca resolução desses dados para representar fenômenos de mesoescala atmosféricos (Swail & Cox, 2000). Em contrapartida sua utilização para representação de *swell* era tida como satisfatória, a menos da subestimação de tempestades geradas em altas latitudes.

A análise dos campos de vento utilizados nesse estudo, no entanto, mostrou diferenças entre as bases de dados aqui discutidas, sendo estas variáveis em função do setor analisado. Como a geração do *swell* que atinge o litoral sudeste do Brasil varia, geralmente, entre as latitudes de 35° e 55° S (Candella, 1997), coincidindo com a localização dos setores analisados, as diferenças entre os setores sugerem que a representação desses eventos seja diferenciada de acordo com sua localização. Dessa maneira, pode-se concluir que o melhor desempenho de uma ou outra base de dados para situações de geração de *swell* será variável em função da localização do evento meteorológico responsável pela geração das ondas.

Como pôde ser observado, em determinadas situações, a subestimação é menor quando da utilização dos dados do AVN, que possuem melhor resolução espacial. Esse resultado vai contra a afirmativa apresentada por Swail & Cox (2000) de que os dados da Reanálise são tão bons ou melhores do que o melhor produto disponível nas análises (AVN).

Essa diferença entre o presente trabalho e os resultados de Swail & Cox (2000) pode ser explicada pelo maior número de observações (dados *in situ*), disponíveis no hemisfério norte e assimiladas nas Reanálises. No hemisfério sul os valores de vento a 10 metros das Reanálises ficam mais dependentes do modelo e a melhor resolução dos dados do AVN gera melhores resultados nos modelos de ondas.

É importante destacar que em alguns casos nenhuma das bases de dados conseguiu representar bem a ondulação presente nos dados do ondógrafo, sugerindo que embora satisfatória para representação de *swell*, a utilização desses dados com esse propósito deve ser realizada com cautela.

Como meta futura, sugere-se uma avaliação nos mesmos moldes da aqui apresentada, para situações de mar local, além de um estudo mais longo comparando outras bases, como por exemplo, as Reanálises do ECMWF, além de uma análise setorizada da energética associada a essas bases de dados para todo o oceano Atlântico Sul.

## XII Referências Bibliográficas

- BANNER, M. L. & YOUNG, I. R., 1994, “Modeling Spectral Dissipation in the Evolution of Wind Waves. Part I: Assessment on Existing Model Performance”, *J. Phys. Oceanogr.*, v.24, pp. 1550-1571.
- BIDLOT, J. R., HOLMES, D. J., WITTMANN, P. A., LALBEHARRY, R., CHEN, H. S., 2002, “Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data”, *Weather and Forecasting*, v. 17, pp. 287-309.
- BOOIJ, N. & HOLTHUIJSEN, L. H., 1987, “Propagation of Ocean Waves in Discrete Spectral Wave Models”, *J. Comput. Phys.*, v.68, pp. 307-326.
- CANDELLA, R. N., 1997, *Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica*. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAPLAN, P., J. DERBER, W. GEMMILL, S.-Y. HONG, H.-L. PAN, D. PARISH, 1997, “Changes to the 1995 NCEP Operational Medium-Range Forecast Model Analysis/Forecast System. *Weather Forecasting.*, v.12, pp.581-594.
- CARDONE, V. J., GRABER, H. C., JENSEN, R. E., HASSELMANN, S., CARUSO, M. J., 1995, “In Search of the true surface wind field in SWADE IOP-1: Ocean Wave Modeling Perspective”. *Global Ocean Atmos. Syst.*, v.3, pp. 107-150.
- CHALIKOV, D. V. & BELEVICH, M. Y., 1993, “One-dimensional Theory of the Wave Boundary Layer”, *Bound.-Layer Meteor.*, v.63, pp. 65-96.
- CHALIKOV, D. V., 1995, “The Parameterization of The Wave Boundary Layer”, *J. Phys. Oceanogr.*, v.25, pp. 1333 – 1349.

COVEY, C., ABE-OUCHI, A., BOER, G. J., FLATO, M., BOVILLE, B. A., MEEHL, G. A., CUBASCH, U., ROECKNER, E., GORDON, H., GUILYARDI, E., TERRAY, L., JIANG, X., MILLER, R., RUSSEL, G., JOHNS, T. C., LE TREUT, H., FAIRHEAD, L., MADEC, G., NODA, A., POWER, S. B., SCNEIDER, E. K., STOUFFER, R. J., VON STORCH, J., 1999, *The Seasonal Cycle in Coupled Ocean-Atmospheric General Circulation Models*. Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory. PCMDI Report No. 51.

DOTY, B., 1995, *The Grid Analysis and Display System*, Institute of Global Environment and Society – Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA).

GRABER, H. C., JENSEN, R. E., CARDONE, V. J., 1995, “Sensitive of wave model predictions on spatial and temporal resolution of the wind field”. *Proc. Fourth Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Banff, AB, Canada, Atmospheric Environment Service, pp. 263-278.

HASSELMANN, K. & HASSELMANN, S., 1985, “Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral”, *J. Phys. Oceanogr.*, v.15, pp. 1369-1377.

INNOCENTINI, V., PRADO, S. C. S. C., PEREIRA, C. S., ARANTES, F. O., BRANDÃO, I. N., 2000, “Marulhos no Litoral Norte do Brasil Gerados por Furacões: Caso 24 de outubro de 1999”, **in:** *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISUZAK, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K. C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., A.LEETMAA, REYNOLDS, R., JENNE, R., and

- JOSEPH, D., 1996, "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.77, pp. 437-470.
- KISTLER, R., KALNAY, E., COLLINS, W., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., KANAMITSU, M., KOUSKY, V., VAN DEN DOOL, H., JENNE, R., FIORINO, M., 2001, "The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.82, pp. 247-268.
- KOMEN, J. G., CAVALERI, L., DONELAN, M., HASSELMANN, K., HASSELMANN, S. & JANSSEN, P. A E. M., 1994, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. 1 ed. Cambridge, Cambridge University Press.
- LEONARD, B. P., 1979, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", *Computer Methods Applied Mechanics Engineering*, v.18, pp. 59-98.
- MASSEL, S. R., 1996, *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction*. 1<sup>st</sup> ed., Singapore, World Scientific.
- NIMER, E., 1989, *Climatologia do Brasil*, 2<sup>nd</sup> ed., IBGE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ORLANSKY, I., 1975, "A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes", *Bulletin of American Meteorological Society*, v.56, pp. 529 – 530
- PARENTE, C. E., 1997, *Contribuições ao Conhecimento das Ondas na Costa Brasileira*, Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- PINHO, U. F., 2003, *Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos*. Dissertação de Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

- SEIXAS, N. A. B., 1997, *Clima de Ondas na Bacia de Campos: Análise dos Dados e Proposta de Parametrização*. Dissertação de Tese de Doutorado, Departamento de Geofísica, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil. 142p.
- SNYDER, R. L., DOBSON, F. W., ELLIOT, J. A. & LONG, R. B., 1981, “Array Measurement of Atmospheric Pressure Fluctuations Above Surface Gravity Waves”, *J. Fluid. Mech.*, v.102, pp. 1-59.
- 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”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. V. 17, pp. 532-545.
- SWAMP Group, 1985. *Ocean Wave Modelling*. New York, Plenum Press.
- THUNIS, P., BORNSTEIN, R., 1996, “Hierarchy of Mesoscale Flow Assumptions and Equations”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.53, n.3, pp. 380-397.
- TOLMAM, H. L. & CHALIKOV, D. 1996, “Source Terms in a Third-Generation Wind Wave Model”, *J. Phys. Oceanogr.*, v.26, n.11, pp. 2497-2518.
- TOLMAN, H. L. 1999, *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. U. S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Technical Note.
- TOLMAN, H. L. 2002, *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. U. S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Technical Note.

TOLMAN, H. L., BALASUBRAMANIYAN, B., BURROUGHS, L. D., CHALIKOV, D.V., CHAO, Y. Y., CHEN, H. S., GERALD, V. M., 2002, “Development and Implementation of Wind-Generated Ocean Surface Wave Models at NCEP”, *Weather Forecasting*, v.17, pp.311-333.

VIOLANTE DE CARVALHO N., 1998, *Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Bacia de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas*. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

WANDI GROUP, 1988, “The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model”, *J. Phys. Oceanogr.*, v.18, n. 12, pp. 1775-1810.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998, *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. 2 ed., Genève, Switzerland, Pub. 702. Secretariat of the World Meteorological Organization.

YOUNG, I. R. & VAN VLEDDER, G. Ph. 1993, “A Review of the Central Role of Nonlinear Interactions in Wind-Wave Evolution”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, v.342, pp. 505 – 524.