



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA RAMS
PARA A REGIÃO DO RESERVATÓRIO DE ILHA SOLTEIRA (SP)**

BEATRIZ DA SILVA BERNARDINO

Orientador: Prof. Dr. Isimar de Azevedo Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Claudio Freitas Neves

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2012

BEATRIZ DA SILVA BERNARDINO

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia

Aprovada por:

Prof. Dr. Isimar de Azevedo Santos

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Prof. Dr. Claudio Freitas Neves

COPPE – UFRJ

Prof^a. D^{ra}. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Prof^o. Dr. Wallace Figueiredo Menezes

Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2012

Ficha Catalográfica:

Bernardino, Beatriz

**“VALIDAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO
ATMOSFÉRICA RAMS PARA A REGIÃO DO
RESERVATÓRIO DE ILHA SOLTEIRA (SP)”**

Rio de Janeiro, 2012, 75 pp . Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dissertação para obtenção do título de Bacharel em Meteorologia

Dedico esta monografia a minha melhor amiga,
minha mãe, Claudia Maria, que sempre esteve
comigo nos momentos tristes e alegres.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois sempre esteve no meu lado me dando muita força para realizar todos os meus sonhos, e por ter me dado uma família maravilhosa e a oportunidade de conhecer bons amigos.

Agradeço aos meus pais, Claudia Maria e Pedro Avelar, pelo grande apoio e por sempre terem me dado todo o carinho e atenção de que precisei. Agradeço, principalmente, a minha mãe que sempre esteve no meu lado, me dando bons conselhos e escutando as minhas reclamações e os relatos de minhas conquistas. Obrigada mãe por todos os conselhos! Também agradeço a meu irmão, Rafael Bernardino, que também sempre esteve no meu lado, expressando grande alegria com suas brincadeiras. Amo muito vocês!

Aos professores Isimar e Cláudio pela orientação acadêmica durante a graduação, pela grande ajuda na elaboração desse trabalho, por todas as sugestões dadas durante o processo de realização desse estudo e por sempre escutarem as minhas idéias e dúvidas. Obrigada professores pela orientação e pela amizade!

Também agradeço à secretária da Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ, Marise Cardoso, pelo carinho, atenção e pelos bons papos!

Aos amigos que conquistei durante a graduação e do CEFET e que sempre estiveram no meu lado: Karina (por ter me consolado naquele momento difícil), Allan Amâncio (que sempre esteve torcendo por mim!), Alice, Fábio (pelas palavras bonitas!), Ian (pelas aulas de dança!), Wanderson (pelos passeios!), Fabrício e Suzanna (pelos esclarecimentos do conteúdo de algumas disciplinas), Thábata, o casal Joly (Gaby e Rafael), Fernandinha, André (pelas caronas!), Leonardo, Luiz Felipe (01) e Rafael (Bob).

A todos os professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ e do Curso Técnico de Meteorologia do CEFET, por terem contribuído com a minha formação

profissional, pela a atenção nos momentos de dúvida e por expressarem o amor por essa ciência tão fascinante, que é a Meteorologia!

Agradeço aos amigos do Alerta Rio que também contribuíram com a minha formação profissional: Nilton, Cinthia, Igor e Alexandre, Pedro, Eduardo, Jéssica, Fernandinha, Renato, Jurandir, Bruno Moreira, Camila e Renata. Obrigada pelas nossas conversas sobre Meteorologia e pelos esclarecimentos de algumas dúvidas!

Ao projeto ONDISA - Monitoramento de Ondas no Lago de Ilha Solteira, Convênio FINEP-COPPETEC nº 0.1.05.0958-00, executado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Programa de Engenharia Oceânica/COPPE e Departamento de Meteorologia/IGEO), Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", campus de Ilha Solteira, e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Instituto de Pesquisas Hidráulicas). O Projeto ONDISA é uma iniciativa multi-institucional iniciada pela UNESP/Ilha Solteira, desde 1999, com diversas fases. O projeto em questão refere-se à Fase 3, durante a qual, recebi bolsa.

RESUMO

Este trabalho consiste na verificação da simulação numérica do modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) realizada sobre a região do reservatório de Ilha Solteira, localizado no noroeste do estado de São Paulo e pertencente à hidrovia Tietê-Paraná. A utilização da simulação numérica sobre a região do reservatório foi motivada pela importância da navegação na hidrovia Tietê-Paraná, pela carência de informações para apoio à navegação e devido à ocorrência de acidentes na hidrovia. O modelo RAMS foi adaptado para a região de Ilha Solteira (SP) com 1 grade principal e 3 grades aninhadas e inicializado com as Reanálises I do NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*). Para a verificação dos resultados, foram utilizados dados de três estações meteorológicas automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizadas próximas ao reservatório de Ilha Solteira. Foram calculados índices estatísticos, como a correlação linear de Pearson entre observações e simulações, o erro médio e o erro médio quadrático com e sem *skill* (PIELKE, 2002), para avaliar o desempenho do modelo RAMS sobre a região do reservatório. Técnicas de filtragem também foram aplicadas na comparação entre os dados de vento modelados pelo RAMS e observados nas estações, com a finalidade de separar informações em escalas temporais ou espaciais selecionadas que se encontram superpostas. As simulações numéricas realizadas para os quatro meses representativos das estações do ano (janeiro - verão, abril - outono, julho - inverno, outubro – primavera) apresentaram resultados satisfatórios em relação à temperatura e à umidade relativa, com valores de correlação próximos a 1. Já para os dados de vento, o modelo RAMS em algumas ocasiões subestima ou superestima a intensidade do vento, porém consegue prever no tempo correto a mudança da direção do vento. A comparação entre os dados de vento simulados e observados apresentou valores baixos da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), indicando pequena discrepância entre os resultados do modelo e os dados registrados nas três estações meteorológicas do INMET.

Palavras-chave: modelo atmosférico regional; interação lago-atmosfera; geração de ondas; filtros numéricos.

ABSTRACT

VALIDATION OF THE ATMOSPHERIC MODEL RAMS FORECAST FOR THE REGION OF ILHA SOLTEIRA LAKE (SP)

This work consists of verifying the numerical simulation of the atmospheric model RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) applied to the Ilha Solteira Lake region, located in the northwest region of the São Paulo at Paraná Rivers. The use of numerical simulation on the lake region was motivated by the importance of navigation in the Tietê-Paraná waterway, the lack of information to support navigation and due to accidents occurred along the waterway. The RAMS model was adapted to the region of Ilha Solteira (SP) with four nested grids and started with the I Reanalysis of NCEP / NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research). To verify the results, data from three automatic weather stations of INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) were used, located near the reservoir of Ilha Solteira. Statistical indices were calculated such as the Pearson's linear correlation between observations and simulations, the average error and the mean square error with and without skill to assess the performance of the RAMS model on the reservoir region. Filtering techniques were applied in the comparison of wind data observed in stations and modeled by RAMS for the purpose of separating information in selected temporal and spatial scales that are superimposed. The numerical simulations carried out for four months representing the seasons of the year (January – Summer, April – fall, July – Winter, October – spring) showed satisfactory results in relation to temperature and relative humidity, with correlation values close to 1. As for the wind data, the model RAMS at times overestimates or underestimates the wind strength, but can provide in a timely change of wind direction. The comparison between the wind data observed and simulated values were low square root mean square error (RMSE), indicating little discrepancy between the model results and the data recorded in the three weather stations INMET.

Keywords: regional atmospheric models, lake-atmosphere interaction, generation of waves, numerical filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização do lago de Ilha Solteira (SP).	1
Figura 1.2 – Acidentes de embarcações na hidrovia Tietê-Paraná. Fonte: FERREIRA (2000).	2
Figura 1.3 – Fotos tiradas das margens do reservatório de Ilha Solteira (SP) mostram a presença de erosão.	2
Figura 2.1 – Posição do Farol de São Martinho e Laboratório da UNESP em Ilha Solteira (SP). Fonte: MACIEL et al (2009).	7
Figura 2.2 – Mapa de pistas de vento no lago de Ilha Solteira para a direção NNE. Fonte: MACIEL et al (2009).	9
Figura 2.3 – Mapa de pistas de vento no lago de Ilha Solteira para a direção NNO. Fonte: MACIEL et al (2009).	9
Figura 2.4 – Mapa de altura de ondas para o lago de Ilha Solteira para ventos médios de 5,92m/s (21,3 km/h), direção NNE. Fonte: MACIEL et al (2009).	10
Figura 2.5 – Mapa de altura de ondas para o lago de Ilha Solteira para ventos máximos de 24,62m/s (88,6 km/h), direção NNO. Fonte: MACIEL et al (2009).	10
Figura 3.1 – As quatro grades do modelo RAMS utilizadas no estudo mostrando a topografia conforme consta de um banco de dados associado ao modelo RAMS: (a) Grades 1 e 2; (b) 1 e 3; (c) 1 e 4; (d) a grade 4 ampliada.....	26
Figura 3.2 – Localização das estações do INMET (pontos em branco) selecionadas para análise comparativa dos resultados do RAMS. A distancia entre as estações e os pontos da grade 2 (pontos em vermelho) são de aproximadamente 5 km.....	29
Figura 3.3 – Comparação entre escalas espaciais e temporais em oceanografia e em meteorologia. Fonte: MENEZES (2008)	30

Figura 3.4 – Função resposta dos filtros ideais tipo passa-baixa (A), passa-alta (B) e passa-banda(C), respectivamente. Fonte: COSTA (2010).	31
Figura 3.5 – Curva resposta para o filtro 1	33
Figura 3.6 – Curva resposta para o filtro 2	33
Figura 4.1 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Jales (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	37
Figura 4.2 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Três Lagoas (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	39
Figura 4.3 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Valparaíso (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	41
Figura 4.4 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Jales (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	43
Figura 4.5 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Três Lagoas (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	44
Figura 4.6 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Valparaíso (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008	46

Figura 4.7 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Jales (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

.....50

Figura 4.8 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Três Lagoas (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.....51

Figura 4.9 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Valparaiso (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.....53

Figura 4.10 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Jales (SP): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.....61

Figura 4.11 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Três Lagoas (MS): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.
.....63

Figura 4.12 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Valparaiso (SP): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.
.....64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Altura das maiores ondas geradas por ventos médios anuais corrigidos e obtidos no decurso do ano de 2003 no lago de Ilha Solteira. Fonte (MARQUES, 2005)	6
Tabela 2.2 – Resumo das médias dos dados de vento durante todo o período de medição (2007 a 2009). Fonte: MACIEL et al (2009)	7
Tabela 3.1 – Configurações das grades utilizadas nas simulações com o modelo RAMS	27
Tabela 3.2 – Opções disponíveis no RAMS utilizados neste estudo	27
Tabela 3.3 – Coordenadas geográficas das estações meteorológicas e dos pontos da grade utilizadas na validação do modelo RAMS	28
Tabela 3.4 – Frequências de corte para os Filtros 1,2 e Passa-Banda	32
Tabela 3.5 – Características dos Filtros 1 e 2 utilizados no estudo.....	32
Tabela 4.1 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de temperatura – Janeiro 2008.....	54
Tabela 4.2 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de temperatura – Abril 2008.....	55
Tabela 4.3 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de temperatura – Julho 2008.....	55
Tabela 4.4 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de temperatura – Outubro 2008.	55
Tabela 4.5 – Avaliação de <i>skill</i> para a umidade relativa – Janeiro 2008.....	56
Tabela 4.6 – Avaliação de <i>skill</i> para a umidade relativa – Abril 2008.....	57
Tabela 4.7 – Avaliação de <i>skill</i> para a umidade relativa – Julho 2008.....	57
Tabela 4.8 – Avaliação de <i>skill</i> para a umidade relativa – Outubro 2008.....	57
Tabela 4.9 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Janeiro 2008.....	59
Tabela 4.10 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Abril 2008.....	59
Tabela 4.11 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Julho 2008.....	59
Tabela 4.12 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Outubro 2008.....	60
Tabela 4.13 - Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento - Janeiro 2008 – Filtro Passa Banda	66

Tabela 4.14 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Abril 2008 – Filtro Passa Banda	66
Tabela 4.15 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Julho 2008 – Filtro Passa Banda	67
Tabela 4.16 – Avaliação de <i>skill</i> para os dados de vento – Outubro 2008 – Filtro Passa Banda	67
Tabela 1: Pesos do filtro 1 de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.....	73
Tabela 2: Pesos do filtro 2 de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.....	74
Tabela 3: Pesos do filtro Passa Banda de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.....	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
GRADS	Grid Analysis and Display System
GEOS	Goddard Earth Observations System Model
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISAN	Isentropic Analysis package
JAL	Jales (Estação meteorológica do INMET)
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
ME	Mean Error – Erro médio
MSE	Mean Square Error – Erro médio quadrático
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCL	Nível de Condensação por Levantamento
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RMSE	Raiz quadrada do erro médio quadrático
RMSE _{ub}	Raiz quadrada do erro médio quadrático com skill
r_{xy}	Correlação linear de Pearson
SP	São Paulo
TEB	Town Energy Budget
TRL	Três Lagoas (Estação meteorológica do INMET)
UTC	Coordinated Universal Time
VLP	Valparaiso (Estação meteorológica do INMET)
$\sigma_{\text{observado}}$	Desvio padrão da série observada
σ_{simulada}	Desvio padrão da série simulada

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 – Ondas Geradas por Ventos em Hidrovias	5
2.2 – O Modelo de Previsão Atmosférica RAMS	11
2.2.1 - Descrição do Modelo Atmosférico RAMS	12
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 – A Configuração do Modelo RAMS sobre o Lago de Ilha Solteira (SP)	25
3.2 – A Validação do Modelo RAMS	27
3.3 – Aplicação de Técnicas de Filtragem aos Resultados do Modelo RAMS	29
3.4 – Teste Estatístico	33
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 – Comparação entre os Dados Observados e Simulados.....	36
4.1.1 - Resultados Qualitativos	36
4.1.2 - Resultados Quantitativos	53
4.2 – Resultados dos Filtros Numéricos	60
5 – CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O trabalho consiste na verificação das simulações numéricas do modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) realizadas sobre a região do lago de Ilha Solteira, localizado no noroeste do estado de São Paulo, pertencente à hidrovia Tietê-Paraná (Figura 1). A utilização da simulação numérica sobre a região do lago foi motivada pela importância da navegação na hidrovia Tietê-Paraná, pela carência de informações para apoio à navegação e devido à ocorrência de acidentes na hidrovia.

Estudos preliminares e a prática corrente dos navegadores e gestores da hidrovia apontavam para os benefícios de um sistema especialista para alerta de ondas geradas por vento nos lagos que compõem a hidrovia. Acidentes já verificados nessa hidrovia (FERREIRA, 2000), existência de algumas obras de proteção (e.g. em pilares de pontes, em estruturas de aproximação de eclusas e outras estruturas hidráulicas) e erosão nas margens (Figura 1.2) comprovam a necessidade de desenvolver sistemas de previsão e monitoramento de ondas geradas por ventos, para fins de segurança à navegação.

Ademais, encontram-se na internet relatórios de viagem de praticantes de pesca ou de navegação que reportam sobre condições severas de ventos e ondas em lagos de barragens. O lago de Ilha Solteira com cerca de 40 km é um típico exemplo destes casos. (MACIEL et al., 2006).



Figura 1.1 – Localização do lago de Ilha Solteira (SP)

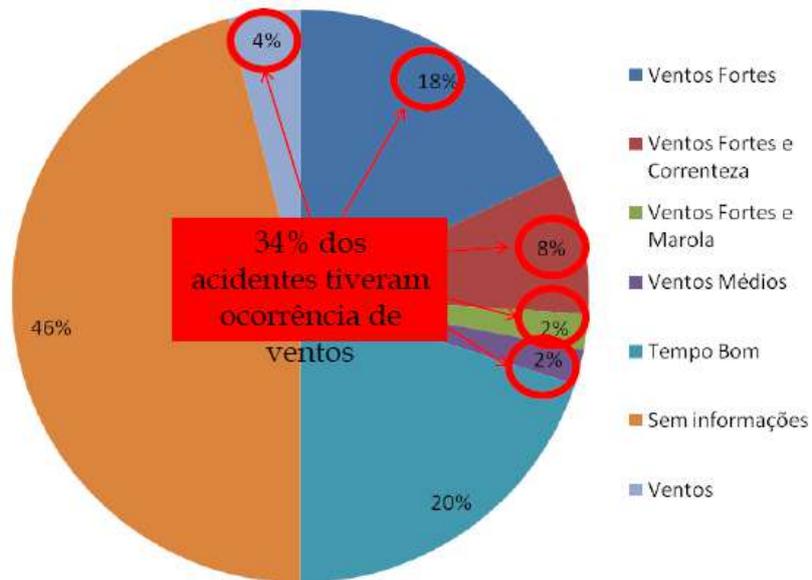


Figura 1.2 – Acidentes de embarcações na hidrovía Tietê-Paraná. Fonte: FERREIRA (2000)

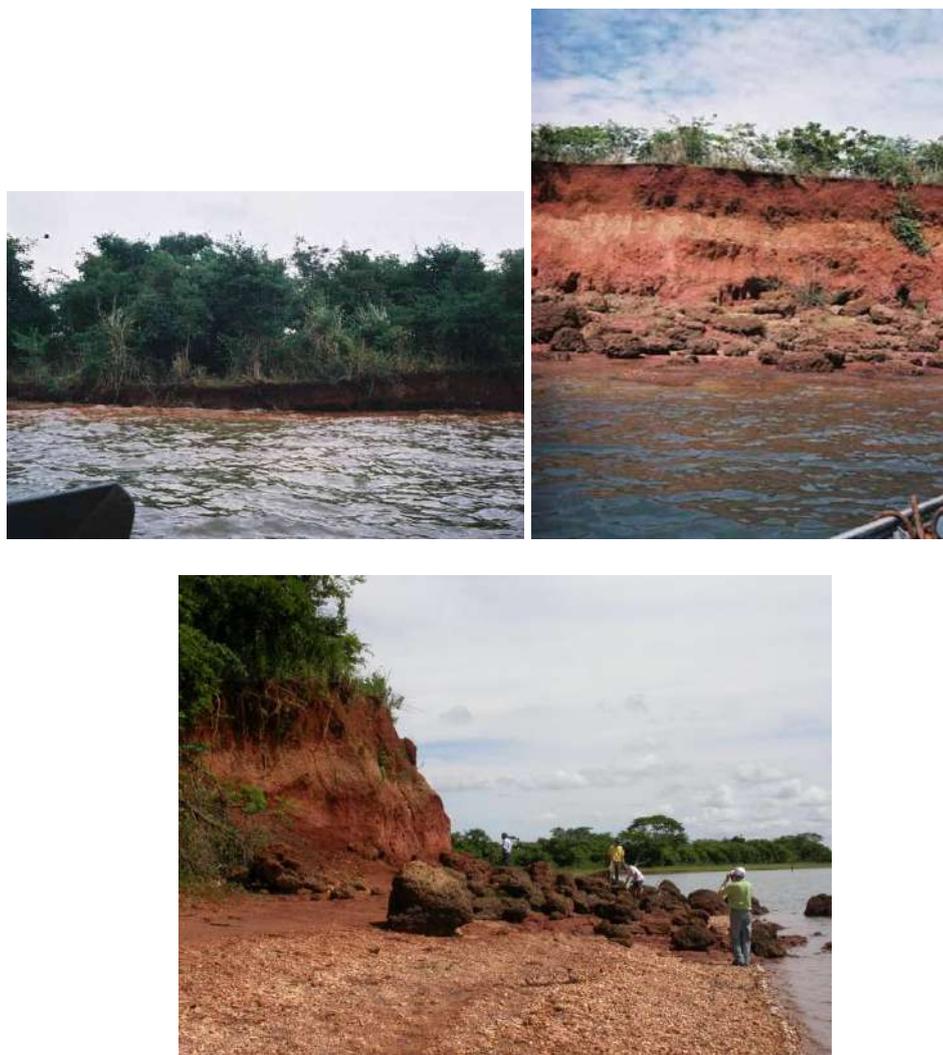


Figura 1.3 – Fotos tiradas das margens do reservatório de Ilha Solteira (SP) mostram a presença de erosão.

O objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados das simulações numéricas realizadas com o modelo de previsão atmosférica RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) sobre a região do lago de Ilha Solteira (SP) e verificar a representatividade desses resultados, comparando os dados simulados com dados observados em três localidades próximas ao lago.

Os dados observados foram coletados em três estações meteorológicas automáticas mais próximas ao lago de Ilha de Ilha Solteira. As estações são Jales (SP), Três Lagoas (MS) e Valparaíso (SP), mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O modelo RAMS foi adaptado para a região de Ilha Solteira (SP) com 1 grade principal (grade 1) com espaçamento de 48 km e 3 grades aninhadas, com espaçamentos de 12 km, 3 km e 1 km (grades 2, 3 e 4, respectivamente), que sucessivamente promovem o *downscaling* das informações até uma resolução espacial adequada (1 km) à aplicação de um modelo numérico de geração e previsão de ondas.

O modelo de geração e previsão de ondas que foi utilizado e testado no contexto do projeto ONDISA – Fase 3 é o modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), porém seus resultados preliminares não serão apresentados neste trabalho, cuja finalidade é avaliar a funcionalidade do modelo atmosférico RAMS configurado para a região do reservatório de Ilha Solteira (SP). O modelo SWAN é utilizado para obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos, e estuários, podendo utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos. O modelo SWAN torna-se mais robusto e computacionalmente mais econômico para zonas de profundidade mais reduzida, sendo por isso mais apropriado para reservatórios de águas rasas.

As variáveis meteorológicas utilizadas na comparação entre os dados observados e simulados pelo modelo RAMS foram: temperatura, umidade relativa e vento. A comparação entre os dados observados e simulados consiste em uma análise estatística através dos cálculos do erro médio, do erro médio quadrático, da correlação linear entre observações e simulações.

Também foram aplicadas técnicas de filtragem na comparação dos dados de vento modelados pelo RAMS e registrados nas três estações meteorológicas mais próximas ao reservatório, com a finalidade de separar informações em escalas temporais ou espaciais selecionadas que se encontram superpostas.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos temas discutidos nesta monografia. A metodologia e os dados utilizados são descritos no capítulo 3, já os resultados são apresentados no capítulo 4. E o capítulo 5 é destinado às conclusões.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica dividida em duas partes: na primeira, abordam-se os principais trabalhos sobre a estimativa da altura das ondas do lago de Ilha Solteira (SP) a partir de dados de vento e na segunda são apresentadas as principais características do modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), que foi configurado sobre a região do lago com a finalidade de modelar as condições meteorológicas, para que estas possam servir de dados iniciais para modelos de previsão de ondas.

2.1 Ondas Geradas por Ventos em Hidrovias

Em reservatórios de uso múltiplos, com grande espelho d'água e que fazem parte de segmentos de hidrovias, há necessidade de metodologia de previsão e monitoramento de ondas geradas por ventos, para fins de segurança à navegação. (MACIEL et al., 2006).

A ocorrência de acidentes em hidrovias é relativamente comum. Por exemplo, na hidrovia Tietê-Paraná o abalroamento de comboios de transporte de grãos em pontes, eclusas e outras estruturas hidroviárias já produziram significativos prejuízos. Com a previsão de início de transporte hidroviário de cargas perigosas, como o etanol, se torna relevante um melhor entendimento das condições ambientais adversas (vento e ondas) visando mitigar uma fração considerável desses acidentes. (LIMA et al., 2011).

Grande parte do interesse do estudo dos efeitos das ondas no reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, estado de São Paulo, provém de sua localização estratégica. O lago faz parte do complexo de navegação Tietê-Paraná. Assim, o conhecimento do regime de ventos e ondas nesta área não só contribui para a previsão das condições de navegabilidade como também na estimativa da capacidade erosiva destas junto às margens do reservatório. (MARQUES et al., 2007).

Quando a onda é gerada pela ação do vento em grandes espelhos de água como oceanos, baías, rios, lagos e reservatórios, a altura da onda fica condicionada a três fatores

relacionados ao vento: a velocidade, a duração e a pista sobre a qual ele sopra. (MARQUES et al, 2007).

A dissertação de mestrado de MARQUES (2005) teve como objetivo inferir alturas de ondas máximas, geradas por ação de ventos, em espelhos d'água de recintos fechados, tais como lagos de barragens. Com os dados de vento registrados no reservatório de Ilha Solteira (SP) no ano de 2003, MARQUES (2005) estimou para um vento de 6,3 m/s de NE, a altura de onda máxima de 36 cm (Tabela 2.1).

Na grande maioria dos métodos empregados, o comprimento da pista do vento entra como uma variável importante no processo de estimativa da altura da onda. Portanto, uma boa estimativa da altura da onda tem início com uma eficiente determinação do comprimento da pista de vento, ou *fetch*. A pista de vento é a área de geração de ondas, e é definida como sendo a região na qual a velocidade e direção do vento podem ser consideradas aproximadamente constantes. Segundo o *U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER* (1983) apud MARQUES (2005), esta velocidade é considerada constante quando as variações não excedem 2,5 m/s com relação à velocidade média. (MARQUES, 2005).

Tabela 2.1 - Altura das maiores ondas geradas por ventos médios mensais corrigidos e obtidos no decurso do ano de 2003 no lago de Ilha Solteira. Fonte: MARQUES (2005)

Direção	E	ENE	NE	NNE	N	NNO	NO	ONO	O	OSO	SO	SSO	S	SSE	SE	ESE
Pista (km)	11,3	11,9	12	12	11,7	10,2	9,9	11,6	12,6	12,6	12	12	11,3	9,6	9,3	10,4
Vento (m/s)	4,5	6	6,3	3,8	4,5	5,1	3,9	3,9	4	3,9	3,8	3	3,5	3,2	3,7	2,9
Altura onda (cm)	25	34	36	21	25	27	20	22	23	23	21	17	19	16	18	15

Em Ilha Solteira, no ano de 2003 o vento de maior frequência chegou pela direção O, e o de maior intensidade pela direção NNO, para dados não corrigidos. Para velocidades corrigidas (levam em conta os efeitos da elevação, da localização, da correção de estabilidade, e da velocidade média no tempo e do arrasto) a maior intensidade do vento atingiu o lago pela direção NE. (MARQUES, 2005).

No trabalho de MACIEL et al (2009) também é relatado a elaboração de um modelo automatizado para estimativa de altura de ondas, a partir do reconhecimento das pistas de vento (*fetch*) e da climatologia dos ventos, o que permitiu determinar as maiores alturas de ondas e identificar pontos críticos, tanto para a segurança à navegação, quanto para a estabilidade das margens do reservatório de Ilha Solteira (SP).

Os dados de vento utilizados no estudo de MACIEL et al (2009) provêm de

equipamentos instalados à beira do lago de barragem de Ilha Solteira (anemômetros 2D e 3D) no Farol de São Martinho (Figura 2.1). Assim, os dados de ventos são enviados por rádio-telemetria e armazenados no laboratório de Hidrologia e Hidrometria da UNESP de Ilha Solteira. No trabalho de MACIEL et al (2009), é apresentado a Tabela 2.2 que resume as médias dos dados de vento registrados no período de medição (2007 a 2009).



Figura 2.1 – Posição do Farol de São Martinho e Laboratório da UNESP em Ilha Solteira (SP). Fonte: MACIEL et al (2009)

Tabela 2.2 – Resumo das médias dos dados de vento durante todo o período de medição (2007 a 2009). Fonte: MACIEL et al (2009)

Médias de todo período															
E	ENE	NE	NNE	N	NNO	NO	ONO	O	OSO	SO	SSO	S	SSE	SE	ESE
Média das Velocidades															
4,80	4,28	5,02	5,92	4,89	4,51	4,64	4,37	3,69	3,00	2,35	2,51	3,14	2,60	4,00	4,51
Média das Freqüências															
4,64	4,27	6,15	9,88	8,15	12,70	19,81	14,76	4,15	2,62	1,50	1,57	1,87	1,38	2,59	3,94

O estudo de caso apresentado no trabalho de MACIEL et al (2009) infere sobre ondas geradas no reservatório de Ilha Solteira, a partir do banco de dados de ventos medidos nos anos de 2007 a 2009. Assim, os ventos de interesse na geração de maiores pistas e ondas foram:

- Maior Vento Médio → 5,92m/s (21,3 km/h - esse valor é classificado como brisa moderada pela escala Beaufort) na direção NNE.
- Vento Máximo → 24,62m/s (88,6 km/h - esse valor é classificado como

ventania forte pela escala Beaufort) na direção NNO.

Assim no estudo de MACIEL et. al (2009) foi decidido gerar pistas de ventos e mapas de ondas para os dois casos, tanto para o maior vento médio, quanto para o caso do vento máximo captado no período.

Para estimativa das ondas máximas geradas pela ação de ventos, no trabalho de MACIEL et al (2009) foi utilizado o modelo espectral JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), que consistiu em uma série de levantamentos de dados de ventos e ondas realizados no Mar do Norte ao longo dos anos de 1968 e 1969, com o objetivo de melhor compreender o processo de formação das ondas pelo vento. A coleta de dados foi realizada ao longo de um trecho de 160 km a partir da costa a oeste da Dinamarca. Os resultados deste estudo foram utilizados para estabelecer fórmulas de previsão de altura significativa e período de ondas considerando uma velocidade de vento constante e incluindo as limitações de pista e de duração para desenvolvimento da onda.

As figuras 2.2 e 2.3 representam os mapas de pistas de vento para os dois casos analisados. MACIEL et al (2009) notaram com esses resultados que as maiores pistas de vento para as direções analisadas estão localizadas na margem sudeste da barragem.

As figuras 2.4 e 2.5 mostram os mapas de ondas geradas pela ação do vento. MACIEL et al. (2009) observaram com as figuras apresentadas que as maiores ondas ocorrem a sudeste da barragem, como era de se esperar devido à análise do mapa de pistas de vento .

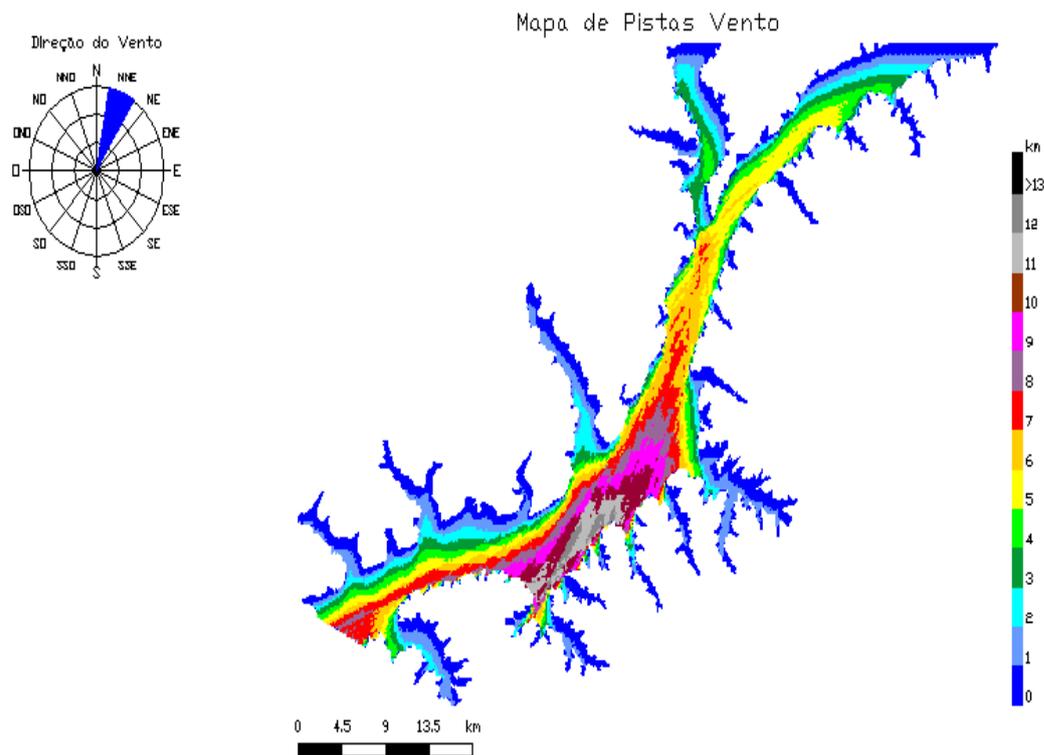


Figura 2.2 – Mapa de pistas de vento no lago de Ilha Solteira para a direção NNE. Fonte: MACIEL et al (2009)

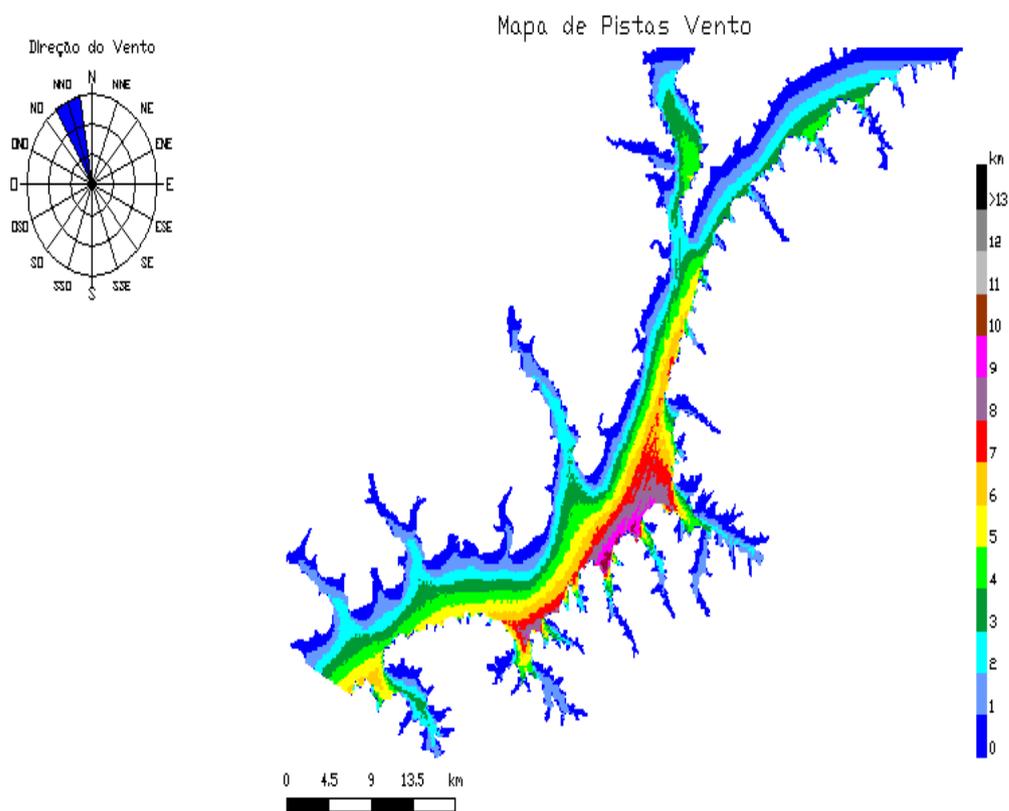


Figura 2.3 – Mapa de pistas de vento no lago de Ilha Solteira para a direção NNO. Fonte: MACIEL et al (2009)

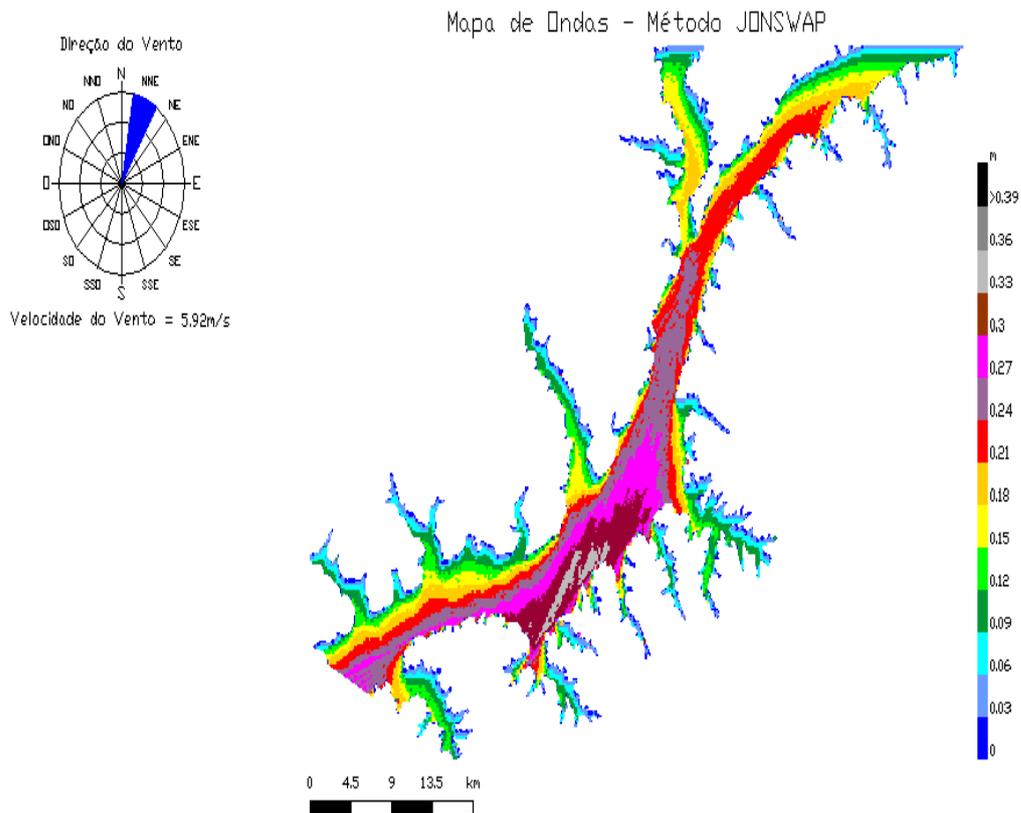


Figura 2.4 – Mapa de altura de ondas para o lago de Ilha Solteira para ventos médios de 5,92m/s (21,3 km/h), direção NNE. Fonte: MACIEL et al (2009)

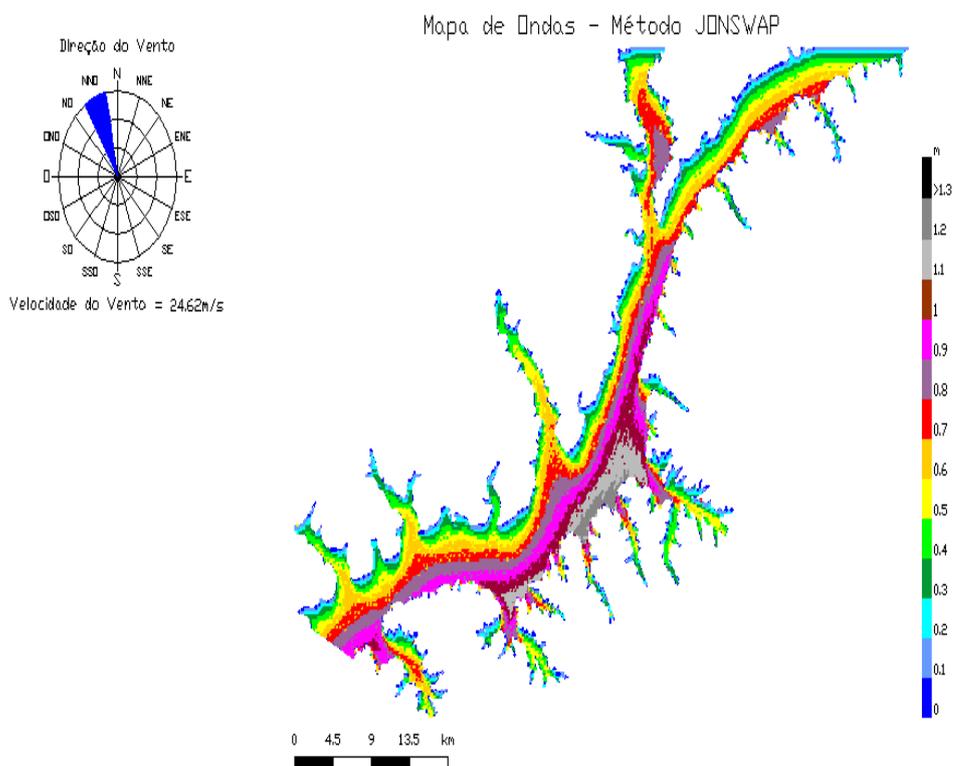


Figura 2.5 – Mapa de altura de ondas para o lago de Ilha Solteira para ventos máximos de 24,62m/s (88,6 km/h), direção NNO. Fonte: MACIEL et al (2009)

2.2 O Modelo de Previsão Atmosférica RAMS

A atmosfera exibe variações e flutuações que são irregulares, e representá-los é um grande desafio para a modelagem computacional. O modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) desenvolvido pelo corpo científico do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade do Colorado é um modelo numérico de múltipla finalidade desenvolvido para simular circulações atmosféricas que vão desde a microescala até a macroescala. É mais utilizado na simulação de fenômenos atmosféricos de mesoescala, cujas escalas horizontais variam de 2 a 2000 km, com a finalidade operacional de fornecer previsão de tempo e dar suporte à pesquisa. No entanto, o RAMS também pode operar como um modelo de escala global para simulação de sistemas de grande escala.

O modelo RAMS foi inicialmente introduzido no Brasil através da Universidade de São Paulo (USP) em 1989. Desde então o RAMS tem sido constantemente usado em estudos que envolvem modelagem de sistemas de mesoescala, brisa marítima, previsão do tempo e como ferramenta de apoio à pesquisa. (MARTINS, 2006).

FREITAS (2003) utilizou o modelo RAMS-TEB (TEB é uma parametrização adequada ao tratamento das propriedades da superfície) para estudar os efeitos causados pela presença de áreas urbanizadas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), conhecidos por ilha de calor urbana. Em seu estudo, FREITAS (2003) realizou uma comparação entre os dados simulados pelo modelo e dados observacionais de superfície, e encontrou coeficientes de correlações superiores a 0,9 para a temperatura e superiores a 0,8 para a umidade relativa.

MENEZES e SILVA DIAS (2004) realizaram algumas simulações numéricas da evolução do Ciclone Catarina, ocorrido em março de 2003, com o modelo RAMS versão 4.3 com a finalidade de avaliar o impacto da resolução horizontal do modelo e da parametrização da física de nuvens na simulação do caso. As simulações indicaram que, com resoluções mais altas de grade, é possível reproduzir algumas das características observadas, como as bandas de nuvem em espiral e o “olho” do sistema. Taxas altas de precipitação sobre a região costeira foram bem simuladas pelo modelo. Entretanto a intensidade do sistema, medida pela pressão mais baixa no centro do ciclone, e a intensidade dos ventos foram abaixo dos valores observados. Contudo, em termos do vento simulado, também ficou caracterizado que a modelagem em mesoescala consegue ganhos de informação devido ao seu maior “refinamento” físico. A parametrização de microfísica do modelo não teve um impacto

significativo na intensidade do sistema simulado. Uma explicação possível, atribuída por MENEZES e SILVA DIAS (2004), é proposta em termos da distribuição vertical do aquecimento diabático.

CAVALCANTI et al (2002) utilizaram o modelo numérico RAMS para simular os campos de água precipitável e do fluxo de vapor d'água sobre a região Nordeste do Brasil (NEB). Neste estudo, o modelo RAMS mostrou-se eficiente para o estudo do teor e transporte de vapor d'água na atmosfera no NEB e credencia-se como importante ferramenta para estudos futuros.

O RAMS é um modelo numérico de equações primitivas que inclui equações da continuidade para o vapor d'água, para a água de nuvem, para a água de chuva e para sete formas de gelo. Apresenta versões hidrostáticas e não hidrostáticas de tratamento do movimento vertical. É altamente versátil, permitindo a sua adequação às mais diversas formas de utilização. Através de uma lista de decisões (*namelist*), são definidas as características dos testes e aplicações pretendidas.

2.2.1 Descrição do Modelo Atmosférico RAMS

Nesta seção são descritas as principais características do modelo RAMS, as suas equações, a estrutura da grade, as opções físicas e numéricas e os modos de parametrização.

- O Arquivo Descritor (RAMSIN)

A configuração de cada simulação no RAMS é feita através de um arquivo do tipo lista de variáveis (*namelist*), chamado RAMSIN, que é dividido em cinco partes. A primeira parte do *namelist* RAMSIN (MODEL_GRIDS) está relacionada principalmente com a configuração das grades utilizadas em cada simulação. Nesse estágio são definidos o tamanho de cada grade e suas localizações, o número de grades, o número de pontos de grade e o espaçamento horizontal, o número de níveis verticais e de camadas de solo e o espaçamento vertical e tempo de simulação. Na segunda parte (MODEL_FILE_INFO) são definidos os tipos de inicialização, homogênea (através do uso de uma sondagem) ou heterogênea (através do uso de análises como as fornecidas pelo NCEP/NCAR), parâmetros relacionados com o *nudging* vertical e horizontal, frequência de geração de arquivos de saída, os arquivos de topografia, ocupação do solo e temperatura da superfície do mar. Na terceira parte

(MODEL_INFO) são definidas as opções físicas e numéricas do modelo, tais como o tipo de condição de fronteira lateral, os parâmetros de radiação, convecção, difusão turbulenta, camada superficial e modelo de solo e microfísica. A quarta parte é destinada para a inclusão de sondagens no caso da inicialização homogênea. A quinta parte está relacionada com a impressão de resultados para verificação durante a simulação.

A definição dos parâmetros utilizados para a inicialização e relaxação newtoniana, *nudging*, (HOKE & ANTHES, 1976) também está incluída no RAMSIN. No processo de *nudging*, as componentes horizontais do vento, a temperatura potencial, a razão de mistura total e a função de Exner são forçadas em direção aos correspondentes valores observados contidos nas análises, através da adição de uma tendência artificial às tendências locais dessas quantidades (FREITAS (1999) apud FREITAS (2003)). No primeiro estágio (ISAN_CONTROL) são definidos os arquivos que serão utilizados para a inicialização heterogênea. Para esse tipo de inicialização é possível a inclusão de dados de superfície e sondagens para uma melhor definição da condição inicial e do processo de *nudging*. No segundo estágio (ISAN_ISENTROPIC) são definidos os parâmetros utilizados na análise objetiva realizada para a inicialização do modelo. O último estágio (ISAN_GRAPH) está relacionado com a geração dos resultados para a visualização utilizando-se do pacote gráfico *NCAR-Graphics*.

- As Equações

O conjunto de equações utilizados no RAMS consiste das equações não hidrostáticas, quasi-Boussinesq, descritos por TRIPOLI & COTTON (1982) apud SANTOS (1998). Existem equações prognósticas para todas as variáveis de estado incluindo u , v , w , temperatura potencial, razão de mistura e função de Exner.

O modelo atmosférico é construído em torno do conjunto completo de equações não hidrostáticas compressíveis, da dinâmica e da termodinâmica da atmosfera, além de equações de conservação de quantidades escalares, tais como vapor d'água e razão de mistura de hidrometeoros líquidos e de gelo. Estas equações são complementadas com uma grande seleção de parametrizações de difusão turbulenta, radiação solar e terrestre, processos úmidos incluindo a formação e interação de nuvens com água líquida e gelo, os efeitos cinemáticos de terreno, convecção cumulus, e troca de calor sensível e latente entre a atmosfera e a superfície, que consiste em múltiplas camadas de solo, vegetação, cobertura de neve, e de superfície.

No caso dos modelos de mesoescala, destinados a aplicações regionais e de mais curto prazo que os modelos globais, as pesquisas mostraram ser necessário, além de integrar as equações primitivas, acrescentar equações que permitam um tratamento mais detalhado dos processos úmidos, além de requererem a parametrização mais realista possível de processos físicos que ocorrem nas escalas menores que a escala modelada, como acontece com a turbulência da camada limite.

O RAMS resolve numericamente as equações primitivas na forma de médias de Reynolds das variáveis u , v , w , π' , θ_1 e r_n , todas médias num volume em torno de cada ponto da grade tridimensional (barras sobre as variáveis, omitidas por simplicidade). As variáveis u , v e w são as componentes do movimento do ar nas direções oeste-leste, sul-norte e vertical ascendente, respectivamente. A variável π' é a perturbação da função de Exner π , dada por:

$$\pi = c_p \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad [2.1]$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante, p é a pressão e p_s é a pressão a superfície e R é a constante dos gases perfeitos para o ar seco .

As equações do movimento são para o caso não hidrostático:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z}) \quad [2.2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z}) \quad [2.3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g\theta}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial w}{\partial z}) \quad [2.4]$$

Nestas equações θ é a temperatura potencial do ar, f é o parâmetro de Coriolis, g é a gravidade, K_m é o coeficiente de viscosidade turbulenta, θ_v' é a perturbação da temperatura potencial virtual θ_v , dada por:

$$\theta_v = \theta(1,0 - 0,61q) \quad [2.5]$$

e θ é a temperatura potencial do estado básico. Os três últimos termos de cada equação referem-se à contribuição da escala subgrade às variações da quantidade de movimento (momentum) na forma de transportes turbulentos. Estes termos, da maior importância nos

níveis inferiores da atmosfera, na camada limite planetária, são calculados em separado através da parametrização das misturas turbulentas.

A equação da energia termodinâmica é:

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z}) + (\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t})_{rad} \quad [2.6]$$

onde θ_{il} é a temperatura potencial da água líquida no ponto duplo com o gelo e K_h coeficiente de difusão turbulenta.

A equação da continuidade não hidrostática para o ar atmosférico é dada por:

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R \pi_o}{c_v \rho_o \theta_o} \left(\frac{\partial \rho_o \theta_o u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_o \theta_o v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_o \theta_o w}{\partial z} \right) \quad [2.7]$$

onde R é a constante dos gases perfeitos para o ar seco e c_v é o calor específico a volume constante. As grandezas π_o , ρ_o e θ_o referem-se ao estado básico que, pela aproximação de Boussinesq, é estratificado em função apenas da altura.

Finalmente as equações da continuidade não hidrostática para cada uma das espécies de hidrometeoros são apresentadas:

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial r_n}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial r_n}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial r_n}{\partial z}) \quad [2.8]$$

onde r é a razão de mistura das espécies consideradas e o índice n refere-se a cada espécie em separado: água líquida total, água de nuvem, neve, agregados, graupel e granizo. Os termos referentes à escala subgrade são parametrizados em separado e suas tendências vêm da contribuição explícita do módulo de microfísica, da contribuição implícita do módulo de convecção e da contribuição da superfície no modelo de solo e vegetação.

Também é importante considerar que, em todas as equações apresentadas acima, as derivações na horizontal e na vertical sofrem correções devidas à esfericidade da Terra e às variações da escala vertical. Estas correções não foram indicadas nas equações acima (2.2 a 2.4) por simplicidade, mas estão inclusas no código do RAMS.

O modelo utiliza, basicamente, a formulação de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo. Os termos de advecção são colocados na forma de fluxo de maneira tal que massa, momento e energia sejam conservados. O modelo tem também um esquema de divisão dos passos de tempo (*time-split*) para resolver os problemas gerados por ondas

sonoras. Este esquema calcula os termos responsáveis pelas ondas sonoras em um passo de tempo menor que o passo de tempo utilizado para os termos como advecção (TRIPOLI & COTTON, 1982 apud SANTOS (1998)).

- Aninhamento de Grades

O RAMS é equipado com um esquema de aninhamento múltiplo de grades, permitindo que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais. Grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala, tais como escoamento sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície. As grades maiores, de menor resolução, são utilizadas para modelar o ambiente destes sistemas menores, fornecendo assim as condições de fronteira para as grades mais finas. Além disso, as grades de menor resolução são utilizadas para modelar os sistemas atmosféricos de grande escala, os quais interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades mais finas.

O aninhamento de grades é usado no RAMS para permitir alta resolução espacial em locais selecionados cobrindo, ao mesmo tempo, um grande domínio com baixa resolução. Uma grade aninhada ocupa uma região dentro do domínio computacional de sua grade mãe mais grossa, e coincidindo seus pontos com ela, em vez de substituí-los. Pode ser usada qualquer quantidade de grades aninhadas, tendo como limite a capacidade de memória do computador e o tempo de espera para o processamento das integrações. Uma grade aninhada pode estender-se desde o solo até o topo do modelo, embora isto não seja obrigatório, podendo também as grades moverem-se horizontalmente durante uma simulação do modelo, com a velocidade de um sistema tal como uma tempestade ou um ciclone tropical, a fim de manter o sistema dentro da grade de alta resolução. O refinamento da resolução de uma grade aninhada pode ser prescrito para as direções tanto horizontal como vertical. O refinamento deve ser tal que um número inteiro de células da grade aninhada esteja sempre contido numa célula da grade mãe. Como o RAMS usa uma coordenada vertical que segue o terreno, a definição da topografia deve ser compatível entre as grades de modo que os níveis verticais em ambas as grades coincidam apropriadamente.

O aninhamento múltiplo de grades também permite que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente na interação das grades computacionais de diferentes resoluções espaciais. A interação de duplo sentido (*two way interaction*) entre as grades aninhadas é

realizada seguindo os esquemas de CLARK & FARLEY (1984) e CLARK & HALL (1991) apud SANTOS (1998).

- A Estrutura da Grade

A grade utilizada pelo RAMS é alternada, do tipo C de Arakawa (MESINGER & ARAKAWA (1976) apud FREITAS (2003)). As variáveis termodinâmicas e de umidade são definidas nos mesmos pontos de grade, enquanto que as componentes u , v e w do vento são intercalados em $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ e $\Delta z/2$, respectivamente.

Por serem não lineares, as equações primitivas não podem ser resolvidas senão por técnicas numéricas. Como acontece com a quase totalidade dos modelos atmosféricos, o RAMS resolve suas equações de derivadas parciais discretizando-as por diferenças finitas. Assim sendo, para as derivações horizontais é usada uma grade, opcionalmente retangular ou quadrada, do tipo C de Arakawa, isto é, todas as variáveis escalares são definidas nos nós da grade, enquanto que as componentes da velocidade u , v e w são definidas nos pontos intermediários $\delta x/2$ e $\delta y/2$.

- Coordenadas

Para a vertical, aplica-se um sistema de coordenadas que acompanha o terreno, denominada sigma- z , descrito por GAL-CHEN & SOMERVILLE (1975), CLARK (1977) e TRIPOLI & COTTON (1982) apud WALKO & TREMBACK (2000). No sistema σ_z de coordenadas, o topo do domínio do modelo é exatamente plano e a base segue as oscilações do terreno.

Na vertical, o RAMS usa a coordenada transformada σ_z dada por:

$$\sigma_z = H \left(\frac{z - z_g}{H - z_g} \right) \quad [2.9]$$

onde H é a altura do topo da grade e z_g é a elevação do terreno, o RAMS apresenta um arquivo de topografia que é interpolado para os nós da grade escolhida. As alturas z são determinadas pelo usuário através do que se costuma chamar grade telescópica, onde é definida uma distância, como sendo a diferença de altura δz dos dois primeiros níveis, e um fator amplificador, que faz com que δz vá aumentando com a altura até alcançar uma diferença limite a partir da qual δz ficará constante. Esta técnica traz melhor definição aos níveis mais próximos à superfície.

Por exemplo, se δz inicial for definido como 100 m, o fator de aumento for de 15%, o valor máximo prescrito para δz for 1200 m e o número total de níveis for 29, a altura do topo da grade ficará em torno de 18000 m. Se for escolhida a forma não hidrostática, a grade vertical é deslocada em $\delta z/2$ para posicionamento das tendências de u , v e w com relação às demais variáveis. Desse modo fica garantida a conservação de massa, ao integrar-se $\delta w/\delta z$ de baixo para cima, para obtenção da tendência da velocidade vertical w .

- Condições de Fronteira

Modelos de área limitada, como é o caso do RAMS, têm no tratamento das condições de fronteira o seu mais intrincado problema, por serem totalmente irrealísticos os contornos impostos nos limites do domínio a ser modelado, com exceção do limite inferior. Duas precauções são comumente sugeridas: escolher as técnicas de tratamento das fronteiras que resultem na menor interferência possível no interior do domínio e estender os limites laterais e superior da grade o mais distante possível da região de maior interesse em modelar. Obviamente a limitação desta segunda sugestão é a capacidade computacional disponível.

No caso das direções normais às fronteiras laterais, usa-se comumente uma condição radiativa que minimize a reflexão dos campos cinemáticos de volta para o interior do domínio. Assim, na advecção fronteira se inclui um termo cuja velocidade advectiva ou de fase c seja prescrita. Esta técnica, conhecida como condição radiativa, é devida a Sommerfeld (HEDLEY & YAU, 1988 apud SANTOS (1998)). O RAMS oferece três alternativas para esta velocidade de fase da condição radiativa, sendo a mais usada a de Orlanski (HEDLEY & YAU, 1988 apud SANTOS (1998)). Para os demais campos escalares, condiciona-se por opção a forma dos gradientes ou a condição radiativa para os fluxos entrando e para os fluxos saindo. Na fronteira superior, define-se também a permeabilidade do topo e eventualmente uma camada viscosa de Rayleigh capaz de absorver as ondas de gravidade indesejadas. Quanto à fronteira inferior, os fluxos da camada de superfície fornecem as principais formas de trocas de informação entre a atmosfera e a superfície. A camada superficial é parametrizada em separado, como será mostrado mais adiante. Contudo, por razões numéricas, o RAMS define valores para as variáveis atmosféricas também num nível fictício $\delta z/2$ abaixo da superfície.

- Parametrizações e Modelos Associados ao RAMS

Nos tópicos anteriores foi visto como o RAMS integra as equações primitivas no espaço e no tempo para gerar previsões do comportamento atmosférico, incluindo o tratamento das fronteiras. Contudo vários processos físicos, inerentes ao diagnóstico e ao prognóstico da atmosfera, precisam ser parametrizados em separado, devido à sua complexidade ou às peculiaridades das equações que os descrevem. A seguir são apresentadas as parametrizações utilizadas no RAMS e os modelos associados.

Solo e Vegetação:

Como parte das informações necessárias à definição do que ocorre na camada atmosférica junto à superfície ou camada superficial, o RAMS usa modelos de solo e de vegetação, parametrizando em separado e prognosticando os processos térmicos e hídricos, tanto na camada vegetada quanto numa camada de solo cuja profundidade é especificada. Na realidade, o RAMS divide logicamente cada área de grade (área do retângulo de lados δx e δy com centro em cada ponto de grade) em três classes distintas: água, solo nu e superfície vegetada. Assim, para determinar os fluxos de calor e de vapor d'água na camada superficial, são tomados dados categorizados da superfície a partir de uma, duas ou três das classes acima.

Radiação:

O RAMS trata as radiações de onda curta e de onda longa através de modelos que opcionalmente levam ou não em conta a presença de água condensada na atmosfera. A forma mais simples de tratamento da radiação, sem considerar as nuvens, é bastante econômica computacionalmente (MAHRER & PIELKE (1977) apud FREITAS (2003)), mas em estudos em que as nuvens sejam importantes, deve-se optar pelo uso do modelo de radiação de CHEN & COTTON (1983) apud FREITAS (2003), apesar do ônus computacional. Em compensação o RAMS permite que o modelo de radiação seja acionado para atualização dos campos a ela sensíveis, com uma frequência bastante inferior à dos passos de integração das equações de previsão. Deve ser definida esta frequência em segundos.

O modelo de transferência radiativa para a radiação de onda curta também se baseia nas proposições de STEPHENS & WEBSTER (1979) apud SANTOS (1998) e é construído sob a premissa de que sejam inicialmente determinadas a reflectância, a absorptância e a transmitância em cada camada da atmosfera modelada. A partir daí determina-se quais são as taxas de transferência radiativa ou fluxos de radiação ascendentes e descendentes. Considerando inicialmente uma atmosfera sem nuvens, são parametrizadas a absorptância

devida ao vapor d'água, o espalhamento molecular da baixa atmosfera e a absorção pelo ozônio. Em seguida, ao considerar as nuvens, este esquema de radiação de onda curta parametriza a absorção atmosférica devida à água líquida, em função dos comprimentos de onda da radiação e das espessuras óticas das camadas de nuvens.

Ao determinar o dia Juliano e o horário universal para cada instante de integração e em cada ponto de grade, o RAMS determina o ângulo de incidência da luz solar em relação a um plano tangente ao local. Uma correção é então feita para a incidência efetiva em função da inclinação do terreno devida à topografia.

Modelo de Cúmulos:

No RAMS, a parametrização da convecção profunda segue uma formulação simplificada, baseada no esquema de equilíbrio convectivo proposto por KUO (1974). Os passos para cálculo das tendências convectivas neste esquema são:

(a) Determinado o nível de condensação por levantamento (NCL), a convecção é ativada se a coluna da grade é convectivamente instável, isto é, $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} < 0$, e se a velocidade do movimento ascendente no NCL é superior a um patamar. Onde θ_e é a temperatura potencial equivalente.

(b) Define-se um nível fonte de ar como sendo o nível em que θ_e é máximo, não podendo ser superior a 3 km acima do solo. Calcula-se o NCL para este nível fonte.

(c) O topo da nuvem é definido como sendo o nível acima do qual a temperatura potencial da adiabática úmida se torna menor que a temperatura do ar.

(d) São calculados os perfis verticais do aquecimento (Q_1) e do umedecimento (Q_2) convectivos.

(e) Finalmente são determinados os termos de tendência convectiva para a temperatura potencial:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{con} = \frac{L}{\pi} (1-b) I \frac{Q_1}{\int_{z_g}^{z_{ct}} Q_1 dz} \quad [2.10]$$

E para a água total:

$$\left(\frac{\partial r_t}{\partial t}\right)_{con} = bI \frac{Q_2}{\int_{z_g}^{z_{ct}} Q_2 dz} \quad [2.11]$$

Onde I é a taxa de suprimento de umidade na coluna da grade, dada pelo fluxo vertical de vapor d'água através do NCL, isto é,

$$I = \int_{z_g}^{z_{ct}} w \frac{\partial q}{\partial z} dz \quad [2.12]$$

Onde w é a velocidade vertical no NCL e q é a umidade específica ou razão de mistura do vapor d'água. O parâmetro b foi proposto por KUO (1974) para determinar que fração do suprimento total de água (I) usada para aumentar a umidade da coluna. O restante da umidade (1-b) representa a precipitação e o calor latente correspondente a esta parcela de umidade irá aquecer a coluna. No RAMS a fração 1-b, que pode ser interpretada como a eficiência da precipitação, segue a formulação empírica proposta por FRITSCH & CHAPPELL (1980) apud SANTOS (1998). L é o calor latente de condensação e π é a função de Exner. Os limites de integração z_g e z_{ct} referem-se às alturas respectivamente do nível mais baixo do modelo e do topo da nuvem.

Na determinação do perfil vertical de aquecimento convectivo Q_1 , são usadas as diferenças entre a temperatura potencial do ambiente e uma temperatura potencial convectiva, referente à temperatura potencial da adiabática úmida que passa pelo NCL do nível fonte. Visando uma maior proximidade com a realidade convectiva, Q_1 é uma média ponderada, entre os dois perfis de temperatura convectiva, um ascendente e outro descendente (TREMBACK (1990) apud FREITAS (2003)). Para determinação do perfil de umidificação Q_2 , a coluna vertical é dividida em duas regiões, uma abaixo da base da nuvem onde o ar é secado à taxa I, e outra na região ativa dos cúmulos onde o ar é umedecido à taxa bI.

Modelo de Microfísica:

O RAMS, em suas versões mais recentes (a partir da versão 3b) apresenta um pacote de microfísica bastante sofisticado (WALKO et al, 1995 apud SANTOS, 1998). Neste pacote, equações de previsão são propostas para as espécies de água de nuvem, água de chuva e de gelo nas formas de neve, agregados, graupel e granizo. Deve então ser calculada a

dependência da velocidade terminal para com a concentração ou massa de cada espécie por unidade de volume do ar, o diâmetro das partículas e as formas de nucleação e crescimento das gotas e dos cristais.

Difusão Turbulenta:

Sendo a camada limite planetária fortemente afetada pela fisiografia da superfície, sua modelagem necessita de tratamento criterioso e diferenciado, tanto nas equações do momento quanto nas equações referentes às trocas de calor e umidade entre a superfície e a baixa troposfera. É muitas vezes desejável que, na região estudada, se leve em conta as características cinéticas dos fluxos, além das trocas térmicas e hídricas, incluindo-se a evapotranspiração.

As equações do RAMS incluem termos de covariância, representando os fluxos turbulentos de massa, calor e momento, e mediadas por médias de Reynolds. A parametrização desses fluxos segue o esquema de fechamento denominado Teoria K, pelo qual as covariâncias dos fluxos turbulentos na escala subgrade são funções de gradientes verticais das grandezas tomadas na escala da grade do modelo, tendo como coeficientes de proporcionalidade o coeficiente de viscosidade turbulenta (K_m) para os processos cinéticos e o coeficiente de difusão turbulenta (K_h) para os processos térmicos e hídricos. O RAMS parametriza estes coeficientes em função do cisalhamento do vento (produção mecânica de energia cinética turbulenta) e da taxa de variação na vertical da temperatura potencial virtual que vem a ser a produção ou perda de flutuação, isto é, a conversão de energia potencial em energia cinética turbulenta.

O RAMS oferece quatro formas alternativas de parametrização da difusão turbulenta, duas aplicáveis aos casos em que os espaçamentos da grade horizontal são muito maiores que o da grade vertical e outras duas para os casos onde as grades horizontais e verticais tenham resoluções comparáveis.

- Assimilação de Dados, Inicialização e Dados Disponibilizados com o RAMS

O RAMS é “alimentado” com dados atmosféricos de duas maneiras, ou na forma homogênea, na qual uma única radiossondagem é incluída no “namelist” e é assumida como condição inicial válida em todo o domínio, ou na forma denominada heterogênea, em que os dados previamente analisados em níveis de pressão padrões são lidos e assimilados na grade do modelo como condição inicial. Além disso, é possível, nas integrações do tipo

heterogênea, que os dados provenientes de análises ou mesmo de previsões sejam continuamente assimilados durante a fase de integração, o que se constitui na assimilação de dados em quatro dimensões (AD4D ou na sigla em inglês 4DDA).

Os dados a serem usados no RAMS, tanto no instante inicial quanto ao longo do período das integrações, são processados pelo próprio RAMS, sendo interpolados em dois tipos de grades que são em seguida combinadas. No pacote de análise inicial do RAMS, denominado ISAN (*Isentropic Analysis*) aplica-se o esquema de análise objetiva de BARNES (1973) apud SANTOS (1998) e nenhuma forma de balanço entre os campos analisados do vento e da massa é imposta nesta fase de preparação dos dados.

Na fase de análise dos dados, o RAMS é acionado com um “namelist” semelhante ao da fase de integrações, mas com características específicas desta fase, quando os dados são preparados na forma conveniente para posterior utilização pelo modelo. Primeiramente, os dados de entrada, provenientes de arquivos previamente analisados, como por exemplo, as reanálises do NCEP, do ECMWF ou do GEOS/NASA, apresentados numa grade horizontal com espaçamentos prescritos nas direções x e y e em níveis isobáricos padrões, são interpolados numa grade em que a estrutura horizontal é mesma da grade proposta para as integrações posteriores enquanto que a grade vertical é composta de níveis isentrópicos (θ constante) também prescritos. O RAMS faz então a análise objetiva das componentes horizontais do vento, da pressão e da umidade relativa provenientes dos dados de entrada sobre estes níveis isentrópicos. Em seguida os mesmos dados são interpolados em outra grade, cuja estrutura horizontal é a mesma, mas a grade vertical é composta dos níveis σ_z . Numa terceira etapa, as duas grades são combinadas de modo a aproveitar as vantagens e reduzir os efeitos das desvantagens de ambas às etapas anteriores. Assim, desde a superfície até um nível previamente selecionado, só as informações da grade em σ_z são usadas, enquanto que acima de outro nível também escolhido, só as informações da grade isentrópica são usadas. Na camada intermediária, as duas grades são combinadas segundo uma função de peso relacionada à altitude. O mesmo procedimento de interpolação nas grades isentrópica e σ_z é acionado para analisar os dados de radiossondagens.

A topografia tem enorme importância em diversas aplicações da modelagem meteorológica. No RAMS, a assimilação da informação da topografia, inserida através de arquivos de dados disponibilizados juntamente ao código do modelo, é feita em três etapas. Na primeira, os dados de topografia são interpolados da grade original para uma grade de resolução comparável à desses dados, mas com projeção estereográfica polar. Na segunda

etapa, os dados são interpolados numa grade temporária cujo espaçamento é o dobro da grade final, sendo ainda obtida uma matriz silhueta, capaz de identificar aquelas montanhas que possam ter sido filtradas durante essa interpolação. Na terceira etapa são combinadas sob ponderação as duas matrizes (a de topografia e a de silhueta) ainda na escala que é o dobro da escala final, sendo então os dados interpolados para a grade final do modelo.

O RAMS disponibiliza ainda outros dados de superfície necessários à fase de integração do modelo, que são a percentagem de terra em cada célula de grade e a temperatura da superfície do mar, constituída de 12 arquivos correspondentes à climatologia dessas temperaturas ao longo do ano. Estes dados são interpolados a partir dos arquivos de dados disponibilizados, para a grade do modelo, passando por etapas semelhantes às da topografia, exceto que nestes casos não há a geração do arquivo silhueta.

No caso de experimentos em que seja necessário especificar regionalmente as características do solo, a cobertura de vegetação, a temperatura da superfície do mar ou outros quaisquer parâmetros superficiais, que em condições normais seriam considerados homogêneos em todo o domínio horizontal do modelo, o RAMS permite tal regionalização através de um módulo específico para tal fim.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são discutidas as fontes de dados utilizados durante o estudo, a configuração do modelo atmosférico RAMS sobre a região do lago de Ilha Solteira, e as técnicas de análise utilizadas para avaliar o desempenho das simulações.

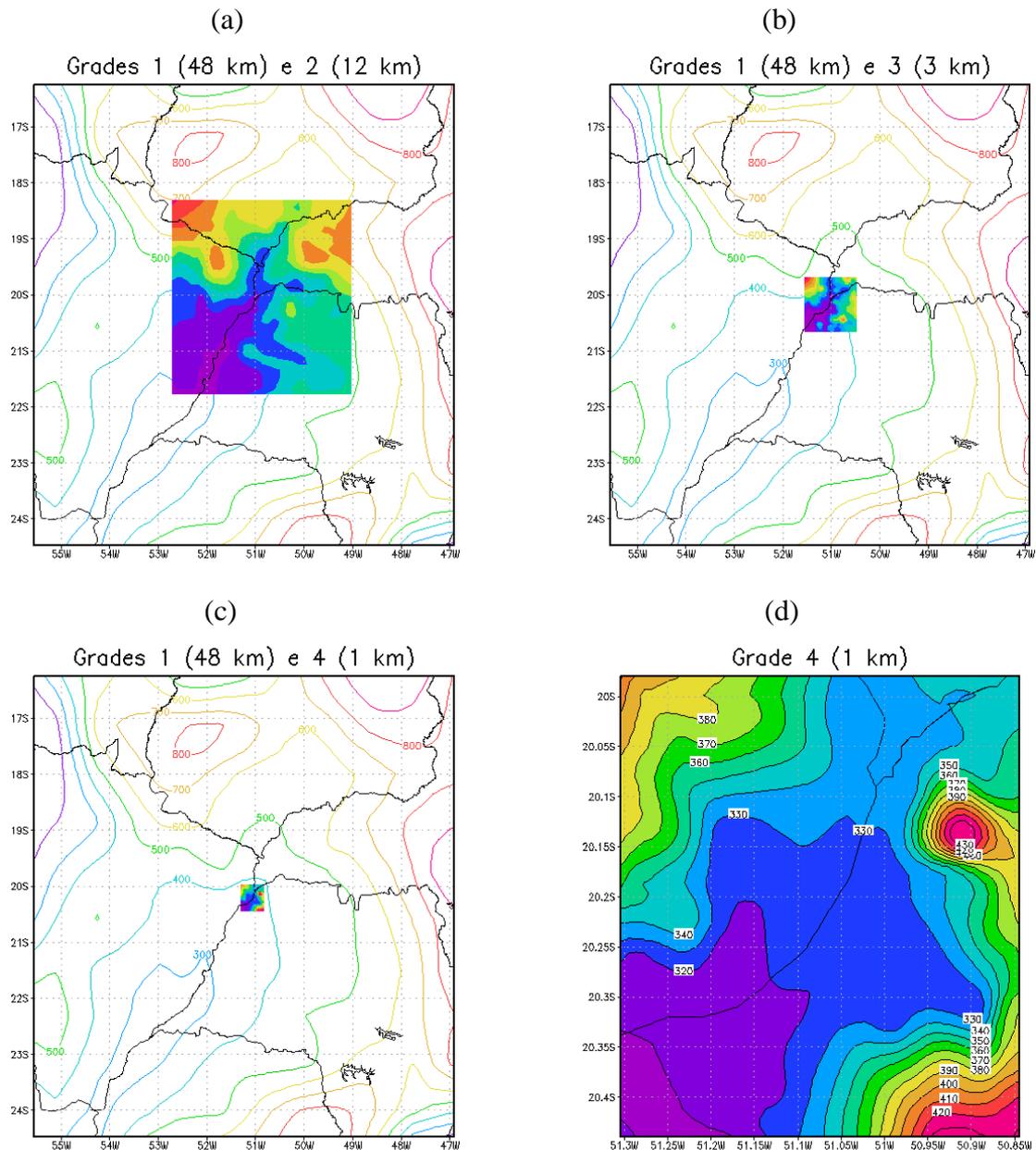
3.1 A Configuração do Modelo RAMS sobre o Lago de Ilha Solteira (SP)

O modelo numérico de previsão atmosférica RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) da versão 4.3 foi adaptado para a região de Ilha Solteira (SP) utilizando uma grade principal e três grades aninhadas (Figura 3.1), e foi inicializado de forma heterogênea com os dados meteorológicos (pressão, temperatura, umidade relativa e vento) da Reanálise 1 do NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*; KALNAY et al., 1996), com resolução de 2,5 graus na horizontal para os horários das 00, 06, 12 e 18 UTC (*Coordinated Universal Time*).

Uma grade principal e três grades aninhadas foram centradas no lago de Ilha Solteira (20,22°S e 51,07°W), com espaçamento de grade horizontal de 48, 12, 3 e 1 km para as grades 1, 2, 3 e 4, respectivamente, e são apresentadas na Figura 3.1. A grade 1 cobre extensa área do setor oeste dos estados da região Sudeste e do setor leste dos estados da região Centro-Oeste do Brasil. Esta grade, denominada grade mãe, com espaçamento entre os seus nós de 48 km, tem por função básica a assimilação dos dados de grande escala provenientes do acervo denominado Reanálise 1 do NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996). Estes dados meteorológicos de grande escala são: pressão, temperatura, umidade relativa e vento.

A segunda grade, com espaçamento de 12 km, faz o *downscaling* das informações assimiladas pela primeira grade. Do mesmo modo a 3ª grade com espaçamento de 3 km e a quarta com 1 km entre os nós da grade, fazem o *downscaling* até que a informação das condições atmosféricas chegue à escala local desejada e adequada à aplicação de um modelo numérico de geração ou previsão de ondas. Este procedimento parece ser bastante semelhante ao que a natureza faz na medida em que os ventos e demais grandezas meteorológicas de

grande escala interagem com as características fisiográficas locais, gerando as condições atmosféricas que poderão ser mensuradas localmente.



ES

Figura 3.1 – As quatro grades do modelo RAMS utilizadas no estudo mostrando a topografia (em metros) conforme consta de um banco de dados associado ao modelo RAMS: (a) Grades 1 e 2; (b) 1 e 3; (c) 1 e 4; (d) a grade 4 ampliada.

A simulação numérica com o modelo RAMS 4.3 para a região do lago de Ilha Solteira (SP) foi realizada com resolução máxima de grade de 1 km (Grade 4 – aninhada). A tabela 3.1 mostra o resumo das configurações de grade utilizadas neste estudo e a tabela 3.2 apresenta algumas das opções de parametrização de radiação, de cumulus e de turbulência disponíveis no RAMS e utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.1 – Configurações das grades utilizadas nas simulações com o modelo RAMS.

Grades	Nº de Pontos em x	Nº de Pontos em y	$\Delta x = \Delta y$ (Km)	Δt (s)
Grade 1	21	21	48	60
Grade 2	34	34	12	15
Grade 3	38	38	3	3,75
Grade 4	50	53	1	1,25

Tabela 3.2 – Opções disponíveis no RAMS utilizados neste estudo.

Nº de pontos na região de fronteira lateral utilizados para <i>nudging</i>	5
Escala de tempo de <i>nudging no topo</i> do domínio	7200 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> no interior do domínio	10800 s
Escala de tempo de <i>nudging</i> nas fronteiras laterais	7200 s
Condição de fronteira lateral	KLEMP & WILHELMSON (1978)
Parametrização de radiação de onda curta/longa	CHEN & COTTON (1983)
Freqüência de atualização na tendência de radiação	1200 s
Parametrização de Cumulus	KUO (1974)
Parametrização de Turbulência	SMAGORINSKY(1963)

3.2 A Validação do Modelo RAMS

A modelagem atmosférica é uma ferramenta muito utilizada para o desenvolvimento de pesquisas e para caráter operacional. Permite analisar a fundo o comportamento da atmosfera e gerar previsões para uma determinada região. Para ter certeza que o modelo está representando o comportamento atmosférico de forma realística é necessário a validação dos seus resultados, que foi feita através da comparação entre os dados observados e os resultados do modelo. É importante ressaltar que, cada região apresenta características fisiográficas peculiares que interferem diretamente nos resultados do modelo.

Os resultados da simulação numérica para temperatura, umidade relativa e velocidade de vento foram validados através da comparação com os dados observados em três estações meteorológicas automáticas – Jales (SP), Três Lagoas (MS), Valparaiso (SP), mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizadas próximas ao reservatório de Ilha Solteira, dentro da área de influência da grade 2 (12 km de resolução espacial). As comparações entre os dados observados e modelados pelo RAMS foram realizadas para os

meses de janeiro, abril, julho e outubro de 2008, que são representativos das estações do ano.

Para o mês de abril/2008, dois testes foram realizados com o modelo RAMS, o primeiro com *nudging* fraco e o segundo com *nudging* muito intenso. O segundo teste foi realizado porque, no primeiro teste, cujos resultados não serão apresentados neste trabalho, as verificações da simulação, através da comparação com os dados observados, se mostraram bastante discrepantes. Ao utilizar um *nudging* intenso (descrito na seção anterior), o modelo foi forçado ao longo da integração para as quatro análises diárias que constituem o banco de dados progressos, denominado Reanálise do NCEP/NCAR, e que no presente estudo representam as condições sinóticas reinantes no oeste de São Paulo no período de 30 dias. Os resultados do segundo teste com *nudging* intenso serão apresentados no capítulo 4. A comparação entre os dados simulados pelo modelo RAMS no segundo teste e os dados observados registrados no mês de abril nas três estações apresentou menor discrepância em relação aos resultados do primeiro teste com *nudging* fraco.

Os dados simulados foram coletados nos pontos referentes ao primeiro nível (35 m acima da superfície) da segunda grade (resolução de 12 km) mais próximos das três estações meteorológicas. Os resultados do modelo foram obtidos automaticamente pelo software GRADS (*Grid Analysis and Display System*). Os testes com a grade 2 são mostrados nesse trabalho, pois essa grade abrange as três estações meteorológicas utilizadas na validação do modelo atmosférico RAMS sobre o reservatório de Ilha Solteira (SP).

A distância entre as estações e os nós da grade é de, aproximadamente, 5 km. A tabela 3.3 mostra as coordenadas geográficas das estações meteorológicas e dos pontos de grade utilizados na validação do RAMS. Nenhuma correção em função da diferença de altitude ou distância entre as estações foi aplicada.

Tabela 3.3 – Coordenadas geográficas das estações meteorológicas e dos pontos da grade utilizados na validação do modelo RAMS.

Local	Código	Latitude	Longitude	Altitude
Jales (SP)	A733	20,0954° S	50,3542° W	457 m
JAL (nó da grade)	-	20,0434° S	50,3410° W	-
Três Lagoas (MS)	A704	20,7833° S	51,7° W	313 m
TRL (nó da grade)	-	20,7994° S	51,7449° W	-
Valparaiso (SP)	A734	21,3192° S	50,9303° W	374 m
VLP (nó da grade)	-	21,3393° S	50,8810° W	-

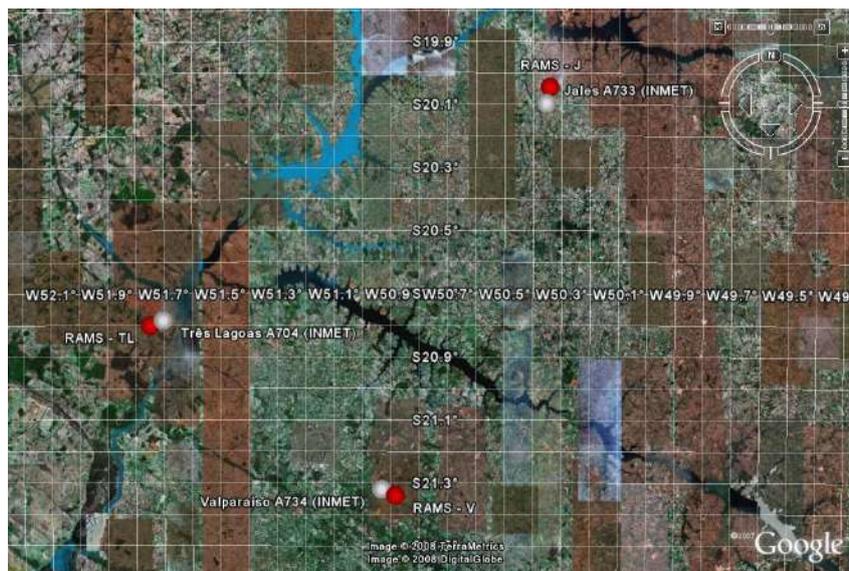


Figura 3.2 – Localização das estações do INMET (pontos em branco) selecionadas para análise comparativa dos resultados do RAMS. A distância entre as estações e os pontos da grade 2 (pontos em vermelho) são de aproximadamente 5 km.

3.3 Aplicação de Técnicas de Filtragem aos Resultados do Modelo RAMS

Esta seção apresenta a técnica de filtragem (filtro de Thompson - MENEZES, 2006) aplicada na comparação entre os dados de vento simulados com o modelo atmosférico RAMS e observados nas três estações meteorológicas mais próximas ao reservatório de Ilha Solteira e sob influência da grade 2 (seção 3.1), como também apresenta a finalidade da utilização da filtragem numérica no presente estudo.

O processo de calibração do modelo atmosférico RAMS para a região do reservatório de Ilha Solteira utilizou uma série de testes estatísticos em quatro grades aninhadas. A partir da constatação de que fenômenos em escalas espaciais diversas estariam associados a fenômenos em escalas temporais diversas, introduziram-se filtros numéricos para o tratamento dos resultados das simulações.

As técnicas de filtragem são utilizadas para separar informações em escalas temporais ou espaciais selecionadas que se encontram superpostas. No caso das informações meteorológicas, é usual trabalhar-se com fenômenos em escalas espaciais diversas (e.g. global, sinótica, mesoescala, microescala), porém muitas vezes não se atenta para o fato de que escalas espaciais e temporais estejam intrinsecamente relacionadas (Figura 3.3).

Ao efetuar as etapas de verificação da adequação do modelo e calibração de alguns

parâmetros, argumenta-se que os fenômenos da grade de menor resolução deveriam ser analisados em escalas temporais diferenciadas daqueles fenômenos modelados (ou observados) nas escalas mais refinadas. Ou seja, ao analisar dados observacionais ou resultados de modelos numéricos, não se podem dissociar as escalas temporais e espaciais.

Mais além, propõe-se mesmo que, em cada grade (resolução espacial), proceda-se a calibrações próprias, em vez de se comparar apenas os resultados na escala mais refinada. Ou seja, ao fornecer informações para o modelo, não parece razoável que as informações (de contorno) em superfície, na resolução da escala da grade 1, sejam valores pontuais; alternativamente, seria preferível utilizar valores promediados numa região de influência do nó. Da mesma forma, ao verificar os resultados em pontos selecionados da grade 2, seria recomendável, em vez de comparar resultados e dados de alta frequência (ou seja, curta escala temporal, pequena escala espacial), seria justificável proceder a uma filtragem da série temporal antes de efetuar os testes estatísticos.

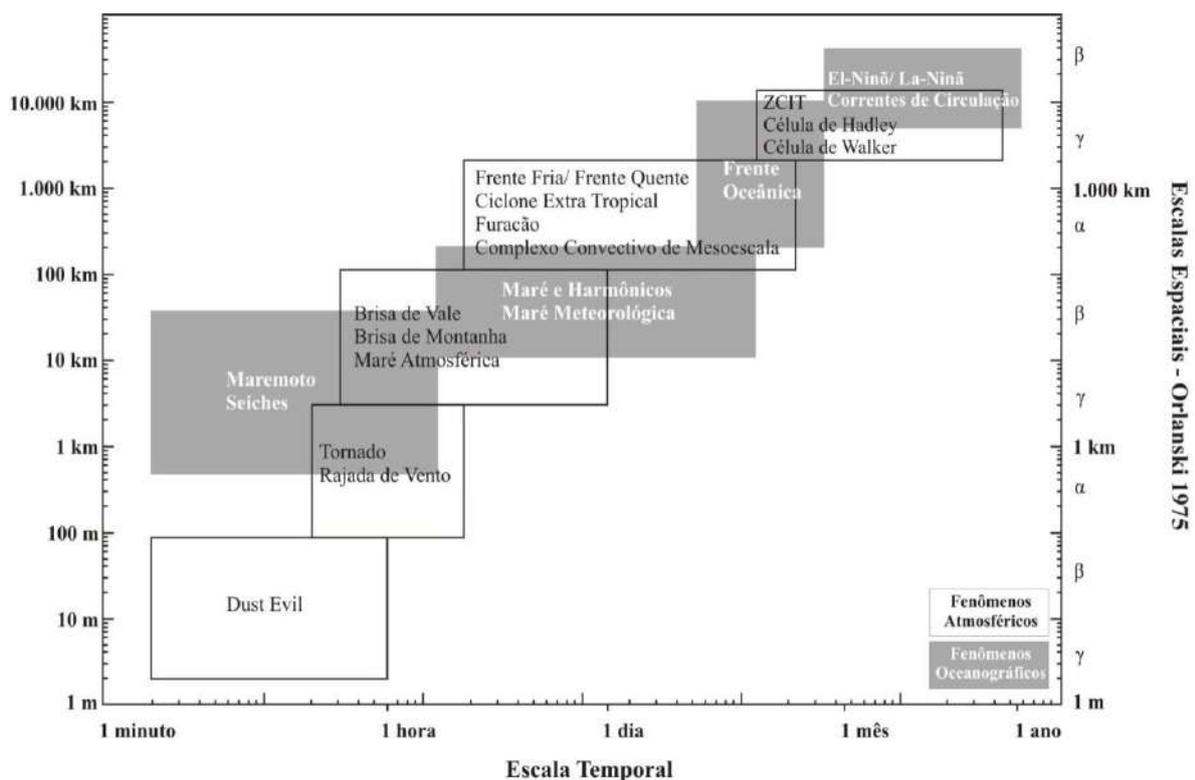


Figura 3.3 – Comparação entre escalas espaciais e temporais em oceanografia e em meteorologia. Fonte: MENEZES (2006).

Portanto, um filtro numérico é utilizado em séries temporais com o objetivo de separar dentro do domínio do tempo, ruídos ou interferências, para separar baixas e altas frequências e frequências específicas no domínio da série. (MENEZES, 2006)

Distinguem-se três tipos de filtros que são classificados quanto à posição das frequências de corte, sendo eles: filtros passa-baixa, que são aqueles que atenuam oscilações acima da frequência de corte (Figura 3.4-A); passa-alta, que atenuam oscilações abaixo da frequência de corte (Figura 3.4-B) e o passa-banda, que atenuam oscilações fora do intervalo de frequências pré-delimitado (Figura 3.4-C). (COSTA, 2010).

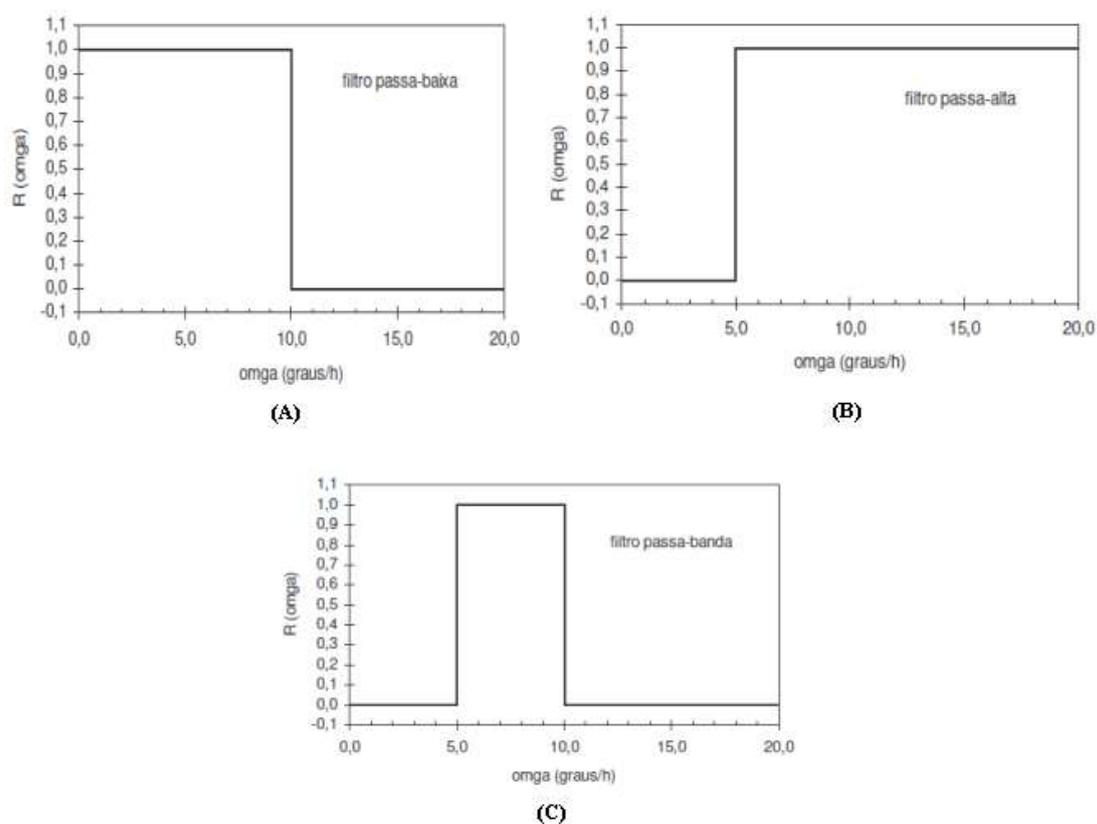


Figura 3.4 – Função resposta dos filtros ideais tipo passa-baixa (A), passa-alta (B) e passa-banda(C), respectivamente. Fonte: COSTA (2010).

A técnica de filtragem adotada neste estudo foi o *filtro de Thompson* (MENEZES, 2006), que consiste em uma média ponderada móvel, com número de pesos e frequências de corte selecionadas pelo usuário. No caso em estudo, foram realizados testes com três filtros, para os quais se adotaram as seguintes escolhas: 120 pesos (para dados horários, isto significa 5 dias); frequências de corte para o Filtro 1 iguais à $\Omega_1=3^\circ/h$ e $\Omega_2=10^\circ/h$., preservando oscilações com períodos acima de 5 dias e eliminando aquelas com período inferior a 1,5 dias, ou seja fenômenos de escala sinótica, como entrada de sistemas frontais na região do

reservatório de Ilha Solteira, foram preservados; frequências de corte para o Filtro 2 iguais à $\Omega_1=10^\circ/h$ e $\Omega_2=30^\circ/h$, preservando oscilações com períodos acima de 1,5 dias e eliminando aquelas com período inferior a 0,5 dias; frequências de corte para o Filtro Passa-Banda, que é a diferença entre o filtro 2 e o filtro 1 (Filtro 2 “menos” Filtro 1), preserva oscilações com período entre 0,5 e 1,5 dias (Tabela 3.4). O filtro Passa-Banda preserva fenômenos como a variação diurna da direção e intensidade do vento na região do reservatório. As figuras 3.5 e 3.6 mostram a função resposta dos filtros 1 e 2 utilizados neste trabalho, respectivamente.

Tabela 3.4 – Frequências de corte para os Filtros 1,2 e Passa-Banda

Filtros	Nº de Pesos	Frequência de Corte	Preservou	Eliminou
Filtro 1	120	$\Omega_1=3^\circ/h$ e $\Omega_2=10^\circ/h$	T > 5 dias	T < 1,5 dia
Filtro 2	120	$\Omega_1=10^\circ/h$ e $\Omega_2=30^\circ/h$	T > 1,5 dia	T < 0,5 dia
Filtro Passa-Banda	120		T > 0,5 e T < 1,5	

Onde T é o período.

Tabela 3.5 – Características dos Filtros 1 e 2 utilizados no estudo

Filtro_Thompson	FILTRO 1	FILTRO 2
número de pesos	120	120
número de frequências zeradas	0	0
omega 1(Hz)	2,31E-06	7,72E-06
omega 2(Hz)	7,72E-06	2,31E-05
T1	432002,76	129603,01
T2	129595,96	43196,92

Onde T1 e T2 são os períodos de corte do filtro 1 e 2, respectivamente.

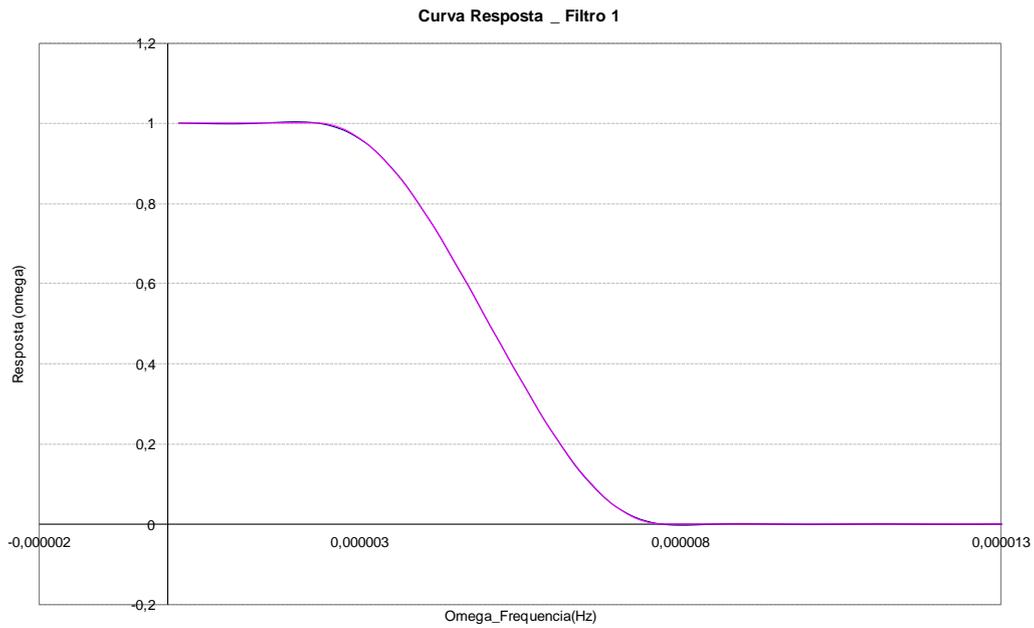


Figura 3.5 – Curva resposta para o Filtro 1.

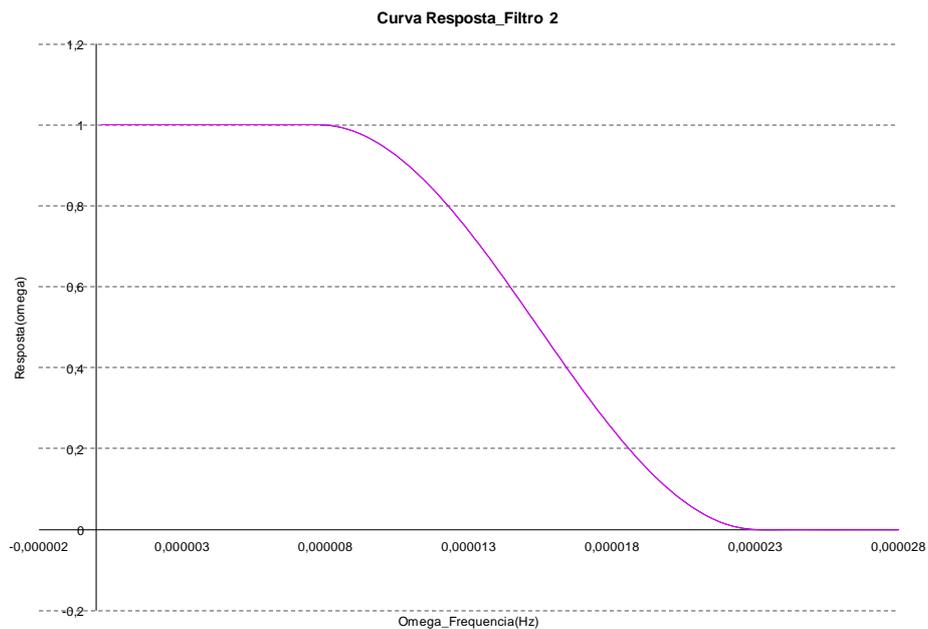


Figura 3.6 – Curva resposta para o Filtro 2.

3.4 Teste Estatístico

Para avaliar o desempenho do modelo RAMS, foram calculados índices estatísticos (PIELKE, 2002 e WILKS, 1995), como a correlação linear de Pearson (r_{oy}), o erro médio (ME), a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e a raiz quadrada do erro médio

quadrático com *skill* ($RMSE_{UB}$), para a comparação entre os dados simulados e observados nas três estações meteorológicas (Jales, Três Lagoas e Valparaíso) nos quatro meses representativos das estações do ano (janeiro, abril, julho e outubro de 2008).

A correlação é um indicador da associação linear entre duas variáveis. Altas correlações indicam um bom acordo entre as fases das oscilações, ou seja, as variações ocorrem num mesmo sentido simultaneamente. O método utilizado nesta análise é conhecido como correlação linear de Pearson (WILKS, 1995), dada pela razão entre a covariância existente entre duas variáveis e o produto de seus desvios padrão, ou seja:

$$r_{oy} = \frac{cov(o, y)}{\sigma_o \sigma_y} \quad [3.1]$$

Onde n é o número total de observações, o_i é o dado observado, \bar{o} é a média dos dados observados, y_i corresponde aos dados simulados pelo modelo RAMS e \bar{y} corresponde ao valor médio da série simulada.

Apesar das correlações fornecerem uma boa informação sobre a relação linear entre as simulações e as observações, elas não levam em conta os desvios (bias) que podem estar presentes na previsão e nem uma amostra da acurácia das simulações. Um desses métodos é o chamado erro médio (ME), dado por:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i) = \bar{y} - \bar{o} \quad [3.2]$$

O ME é simplesmente a diferença entre a média das simulações e a média das observações e, portanto, expressa o desvio da simulação. Indica a direção média dos desvios de um conjunto de previsões a partir de um conjunto de valores observados ou de análises. É indicativo de tendência de erro ou vício do modelo. (OLIVEIRA et al., 2000). O erro médio é representativo de toda a série de simulações não fornecendo informações sobre erros individuais. Sendo assim, ele não representa uma medida de acurácia. Simulações que em média são maiores que as observações apresentam $ME > 0$ e simulações que em média são menores que as observações apresentam $ME < 0$.

Para a medida da acurácia das simulações, utiliza-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE), dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2} \quad [3.3]$$

A RMSE é a média quadrática das diferenças entre pares de simulações e observações. Valores elevados de MSE indicam alto nível de discrepância entre simulações e observações. A raiz quadrada do MSE (RMSE) tem as mesmas dimensões das previsões e observações, podendo ser considerada como a magnitude típica dos erros das simulações.

PIELKE (2002) apresenta outro parâmetro, $RMSE_{UB}$, para avaliar a habilidade (*skill*) de uma simulação:

$$RMSE_{UB} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - (o_i - \bar{o})]^2} \quad [3.4]$$

A $RMSE_{UB}$ representa a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio. Na equação acima, n é o número total de observações, o_i é o dado observado, \bar{o} é a média dos dados observados, y_i corresponde aos dados simulados pelo modelo RAMS e \bar{y} corresponde ao valor médio da série simulada.

O teste estatístico aplicado na comparação entre os dados observados e previstos pelo modelo RAMS consiste na avaliação da habilidade (*skill*) de uma simulação (PIELKE, 2002), dada pelas seguintes condições:

$$(1) \sigma_{SIM} \cong \sigma_{OBS}$$

$$(2) RMSE < \sigma_{OBS}$$

$$(3) RMSE_{UB} < \sigma_{OBS}$$

Onde σ_{obs} é o desvio padrão das observações, σ_{sim} é o desvio padrão das simulações, RMSE é o erro médio quadrático e o $RMSE_{UB}$ é o erro médio quadrático com *skill*. Os métodos estatísticos explicados nesta seção também foram aplicados na comparação entre os dados de vento filtrados simulados e observados. Os resultados das simulações em comparação com as observações são apresentados no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do presente trabalho, separados em duas partes: Comparação entre os dados observados e simulados e Resultados dos filtros numéricos. Primeiramente são apresentadas as análises qualitativa e quantitativa da comparação entre os dados observados nas três estações meteorológicas mais próximas ao reservatório de Ilha Solteira (SP) e simulados pelo modelo atmosférico RAMS e, posteriormente, são mostradas as avaliações dos resultados da aplicação dos filtros numéricos nessa comparação. Para facilitar a interpretação esses resultados foram resumidos em forma de tabelas, gráficos e figuras.

4.1 Comparação entre os Dados Observados e Simulados

4.1.1 Resultados Qualitativos

As figuras 4.1 a 4.9 apresentam a comparação entre os dados observados (linhas em azul) nas três estações meteorológicas utilizadas no estudo (Jales, Três Lagoas e Valparaíso) e os dados simulados com o modelo numérico RAMS (linhas em rosa) na grade 2 (12 km de resolução horizontal) para os meses de janeiro (verão), abril (outono), julho (inverno) e outubro (primavera) de 2008.

Os resultados da grade 2 são mostrados nesse trabalho, pois essa abrange as três estações meteorológicas utilizadas na validação do modelo atmosférico RAMS adaptado para a região do reservatório de Ilha Solteira (SP).

- Análise das séries de temperatura

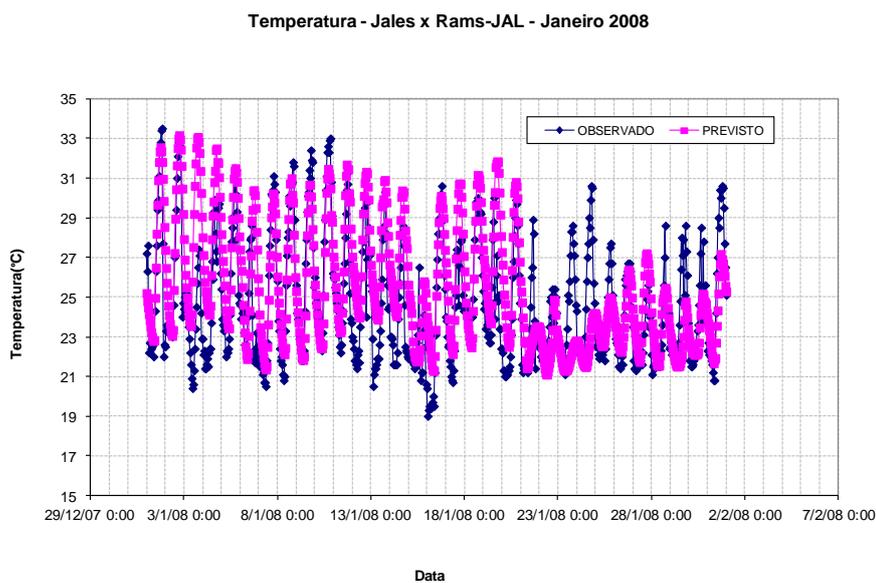
Em geral, os dados de temperatura simulados pelo modelo atmosférico RAMS ficaram próximos dos valores observados em quase todos os meses estudados. A fase dos máximos e mínimos também teve representação satisfatória para todas as estações e meses analisados.

Notam-se diferenças de quase 5°C entre os valores máximos de temperatura simulados e observados, a partir da segunda quinzena do mês de janeiro de 2008, nas estações meteorológicas Jales (SP) e Três Lagoas (MS). (Figuras 4.1-a e 4.2-a, respectivamente).

Também são observadas diferenças entre os valores mínimos simulados e observados na estação Valparaíso (SP) no mês de abril de 2008. (Figura 4.3-b)

Para os dados de temperatura, as simulações para os meses de julho e outubro apresentaram os melhores resultados nas três estações meteorológicas utilizadas no estudo.

(a)



(b)

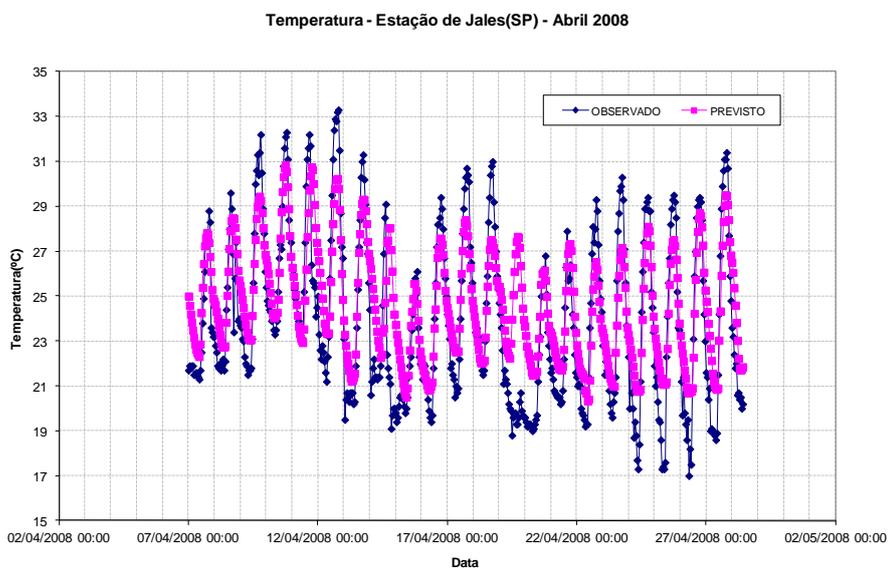
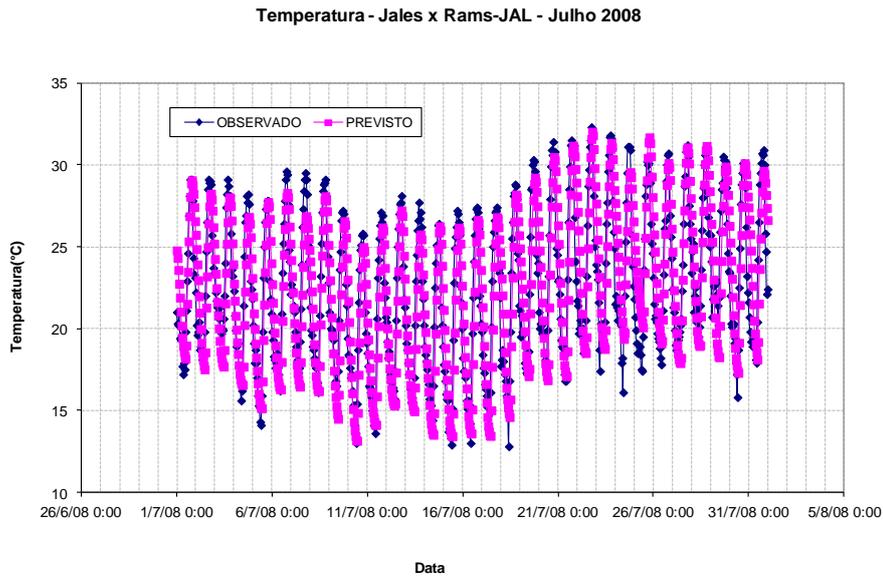


Figura 4.1 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Jales (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(c)



(d)

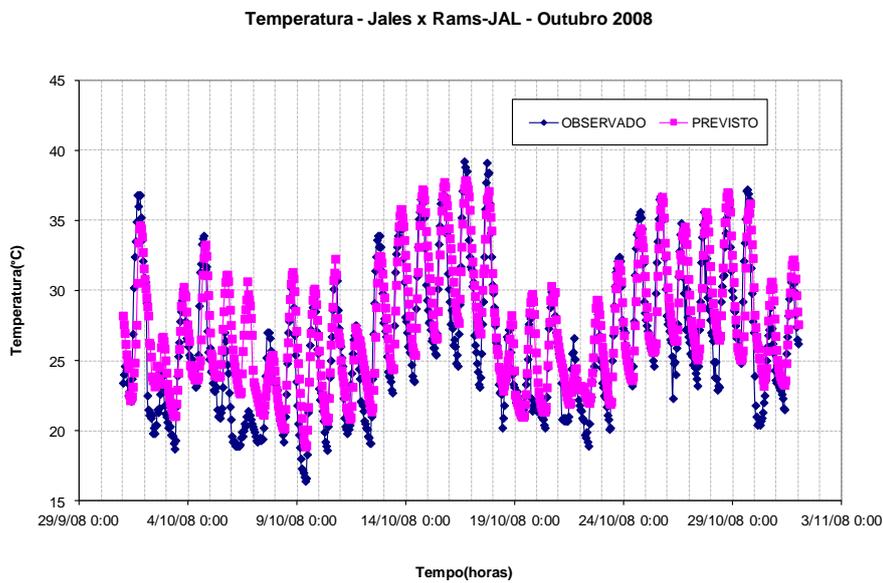
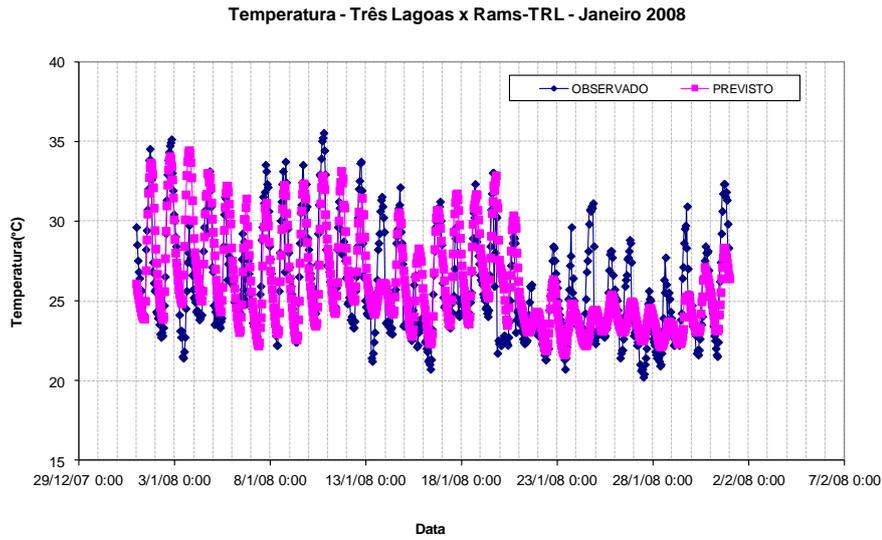


Figura 4.1 – Continuação.

(a)



(b)

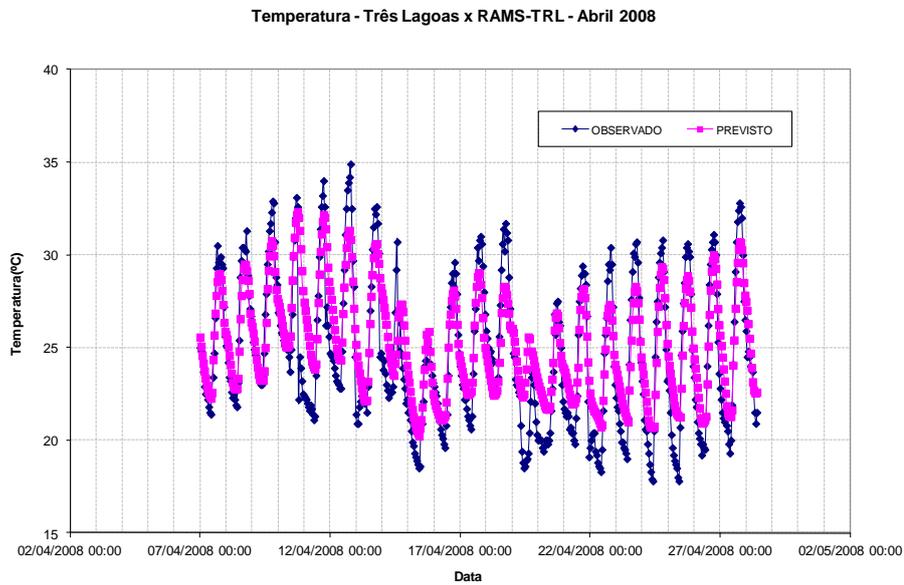
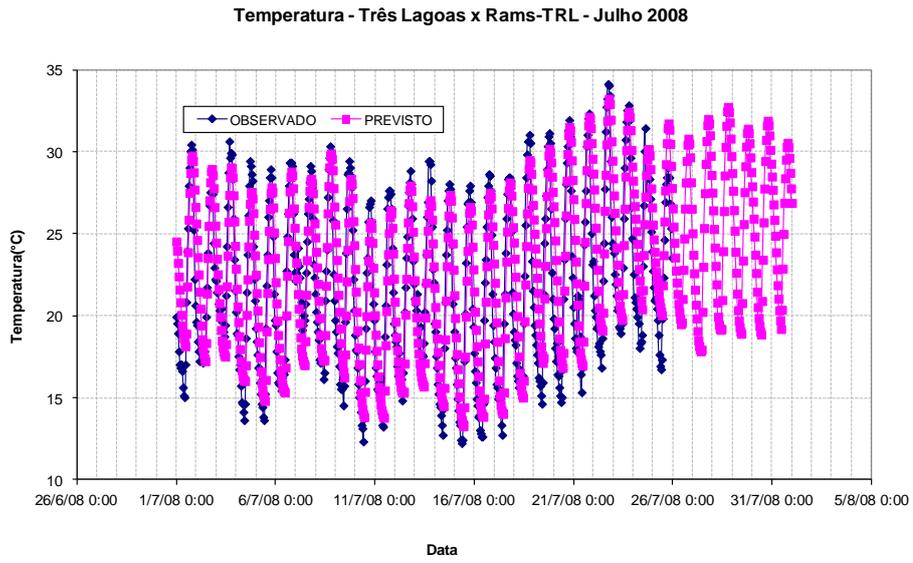


Figura 4.2 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Três Lagoas (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(c)



(d)

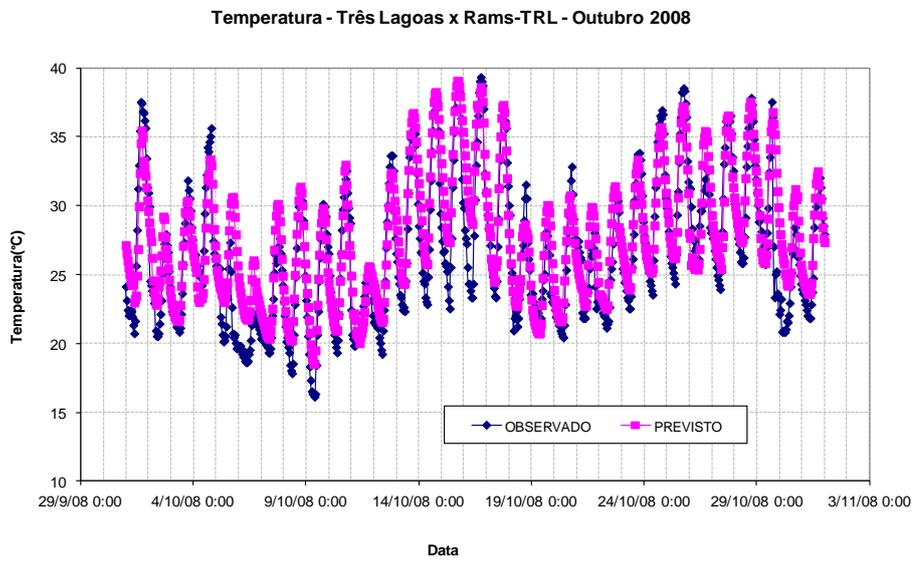
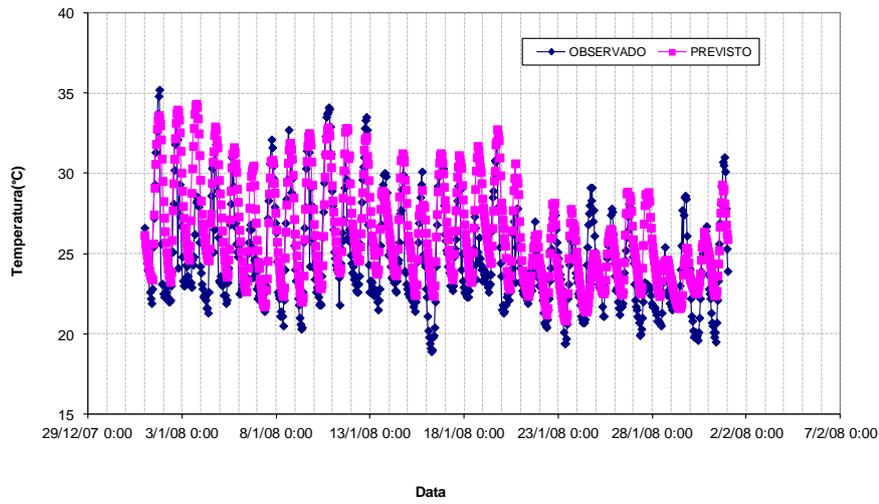


Figura 4.2 – Continuação.

(a)

Temperatura - Valparaiso x Rams-VLP - Janeiro 2008



(b)

Temperatura - Valparaiso x RAMS-VLP - Abril 2008

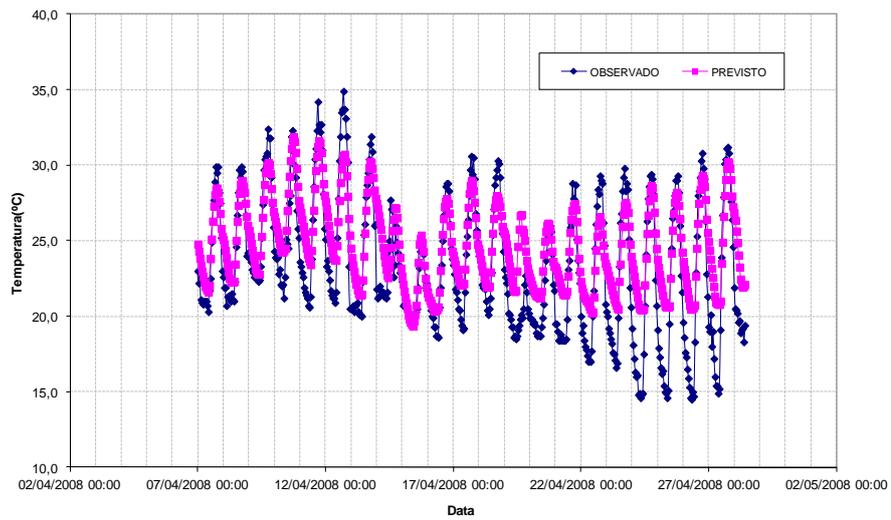
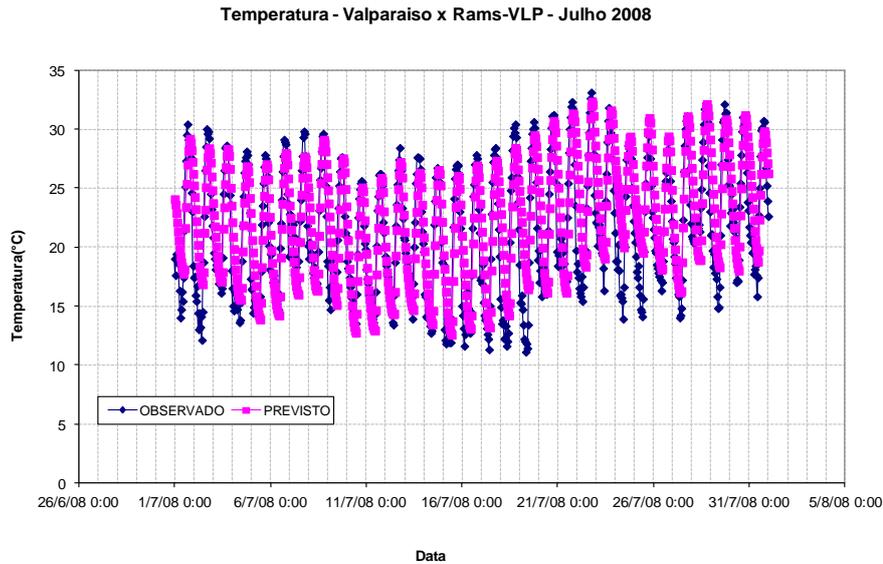


Figura 4.3 – Comparação entre os dados de temperatura observados na estação Valparaiso (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(c)



(d)

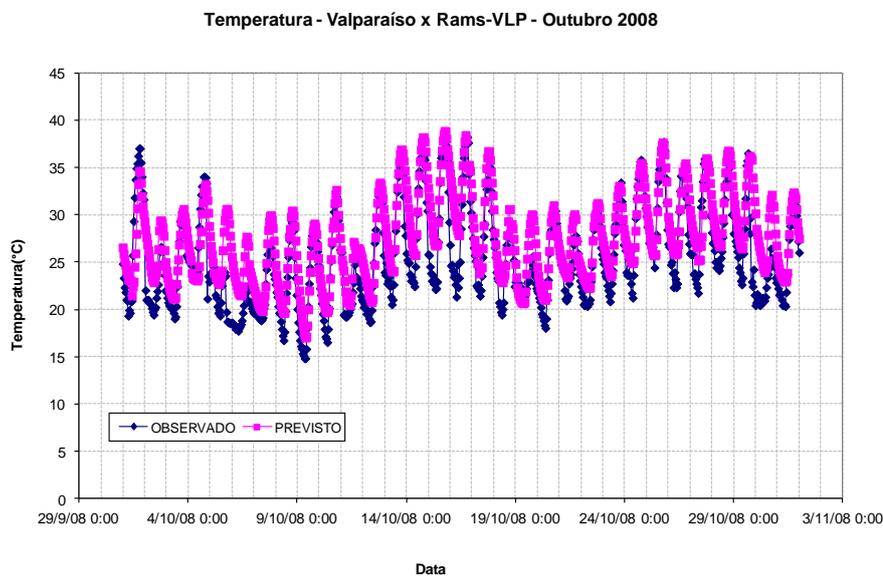


Figura 4.3 – Continuação.

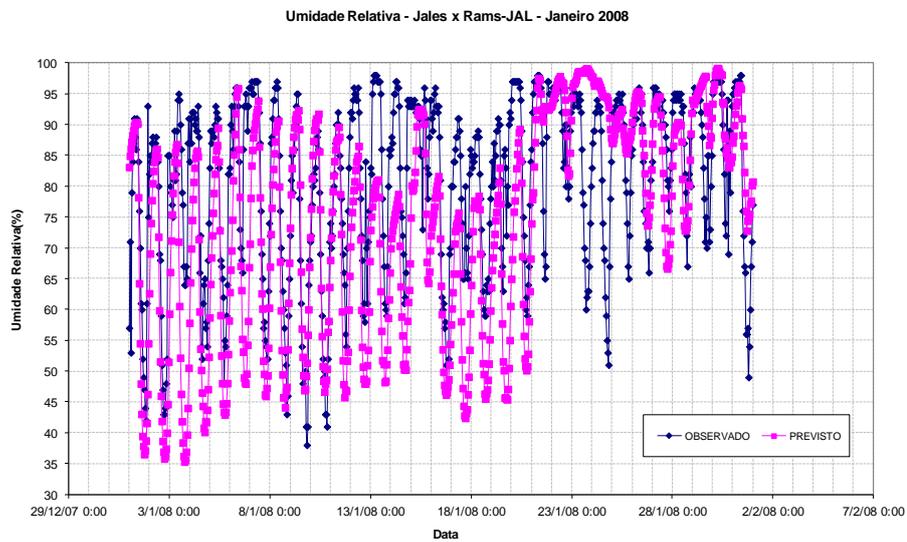
- Análise das séries de umidade relativa

Os valores de umidade relativa diferem um pouco das observações, principalmente nas estações Jales (SP) e Três Lagoas (MS) nos meses de janeiro (Figuras 4.4-a e 4.5-a) e abril de 2008 (Figuras 4.4-b e 4.5-b) e na estação Valparaíso (SP) em outubro (Figura 4.6-d). Porém, as fases dos máximos e mínimos dos dados de umidade relativa foram bem representadas pelo modelo.

Já para os meses de julho (inverno) e outubro (primavera), as simulações foram mais satisfatórias, pois os dados simulados acompanharam os dados de umidade relativa

observados nas estações Jales (SP) e Três Lagoas (MS) durante todo o período. (Figuras 4.4-c, 4.4-d, 4.5-c e 4.5-d)

(a)



(b)

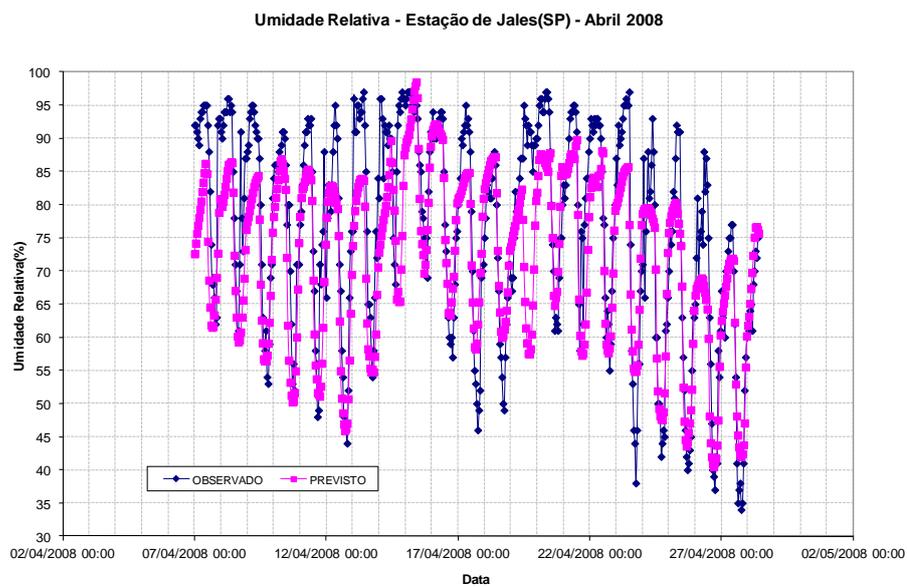
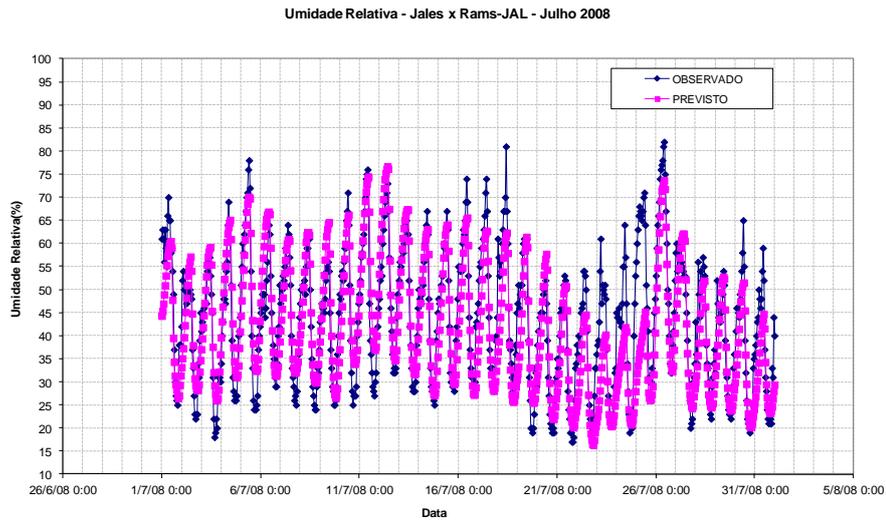


Figura 4.4 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Jales (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(c)



(d)

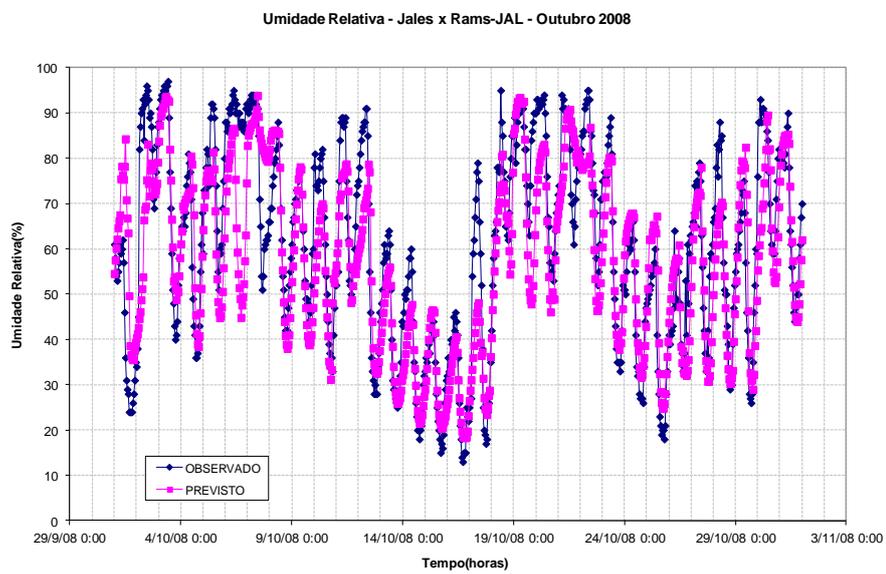


Figura 4.4 – Continuação.

(a)

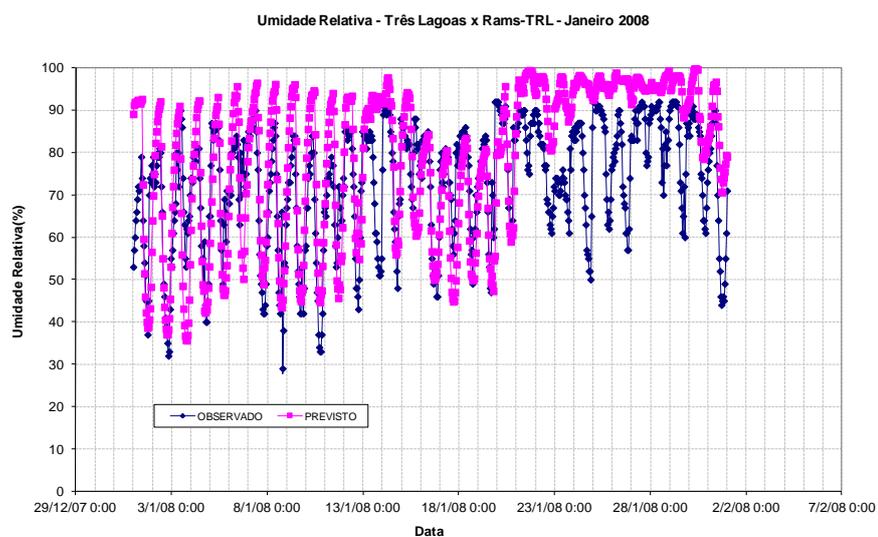
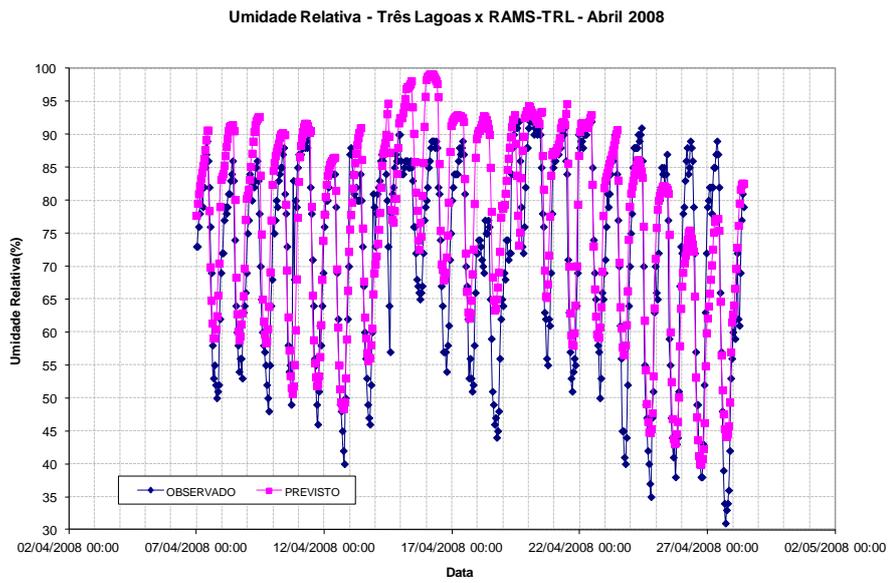
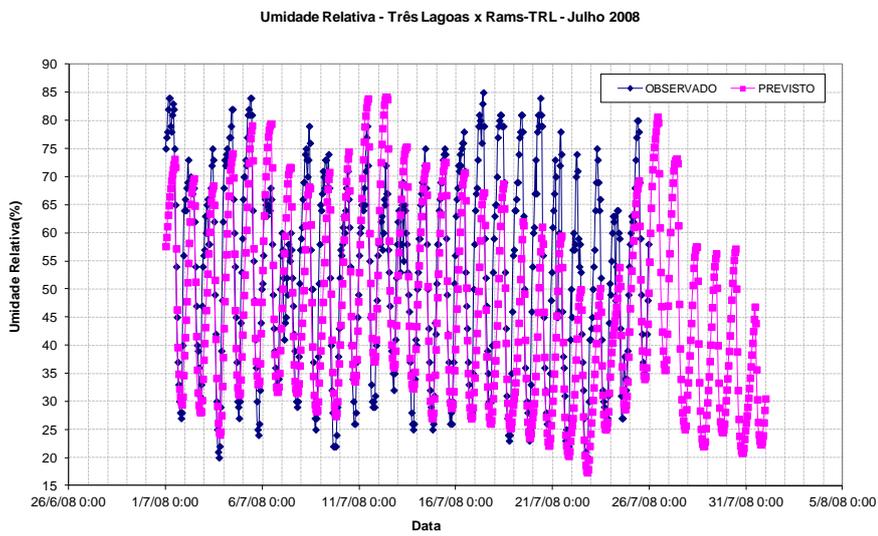


Figura 4.5 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Três Lagoas (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(b)



(c)



(d)

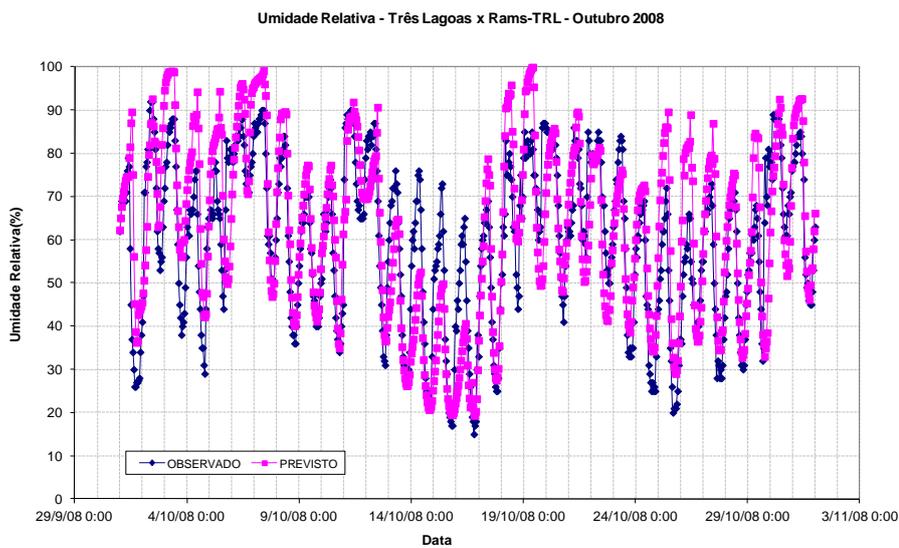
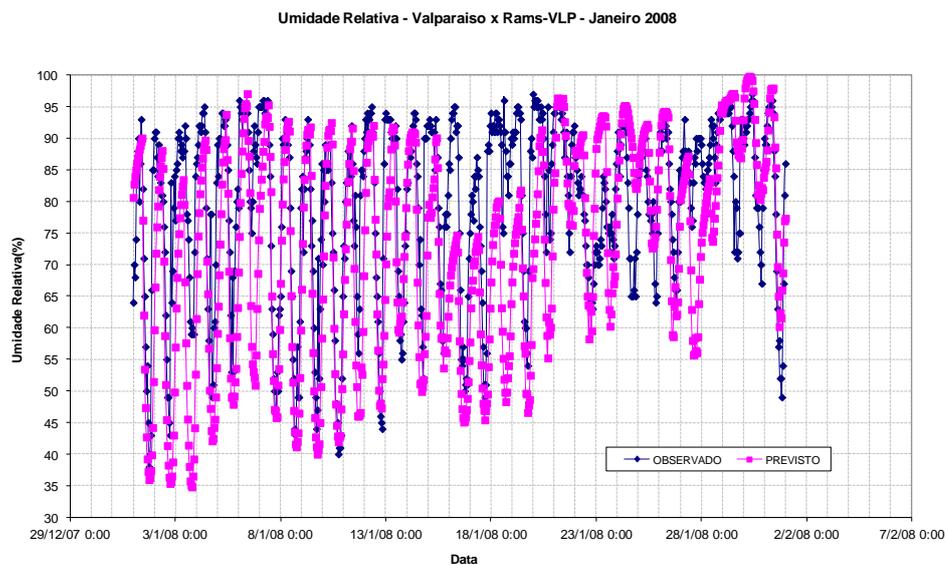


Figura 4.5 – Continuação.

(a)



(b)

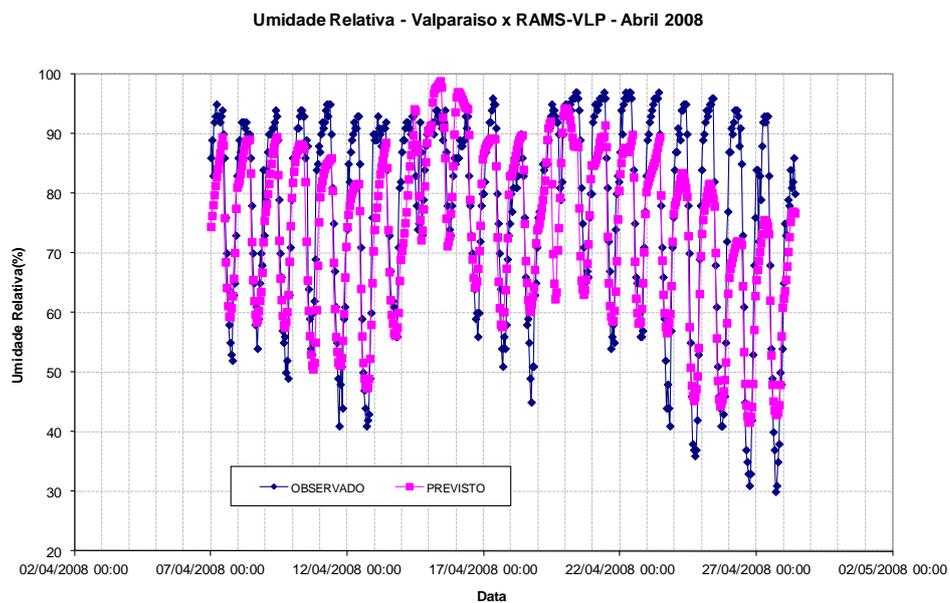
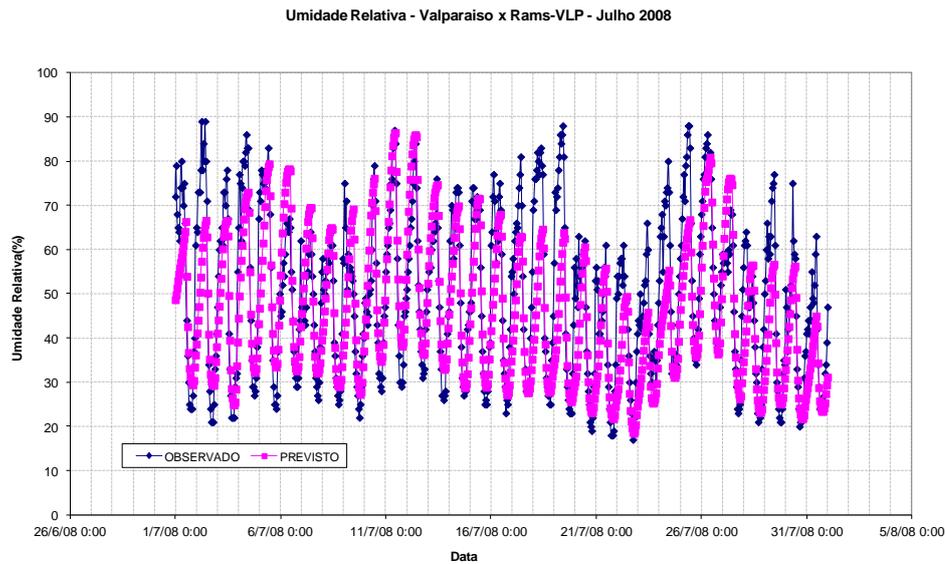


Figura 4.6 – Comparação entre os dados de umidade relativa observados na estação Valparaiso (linha em azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha em rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

(c)



(d)

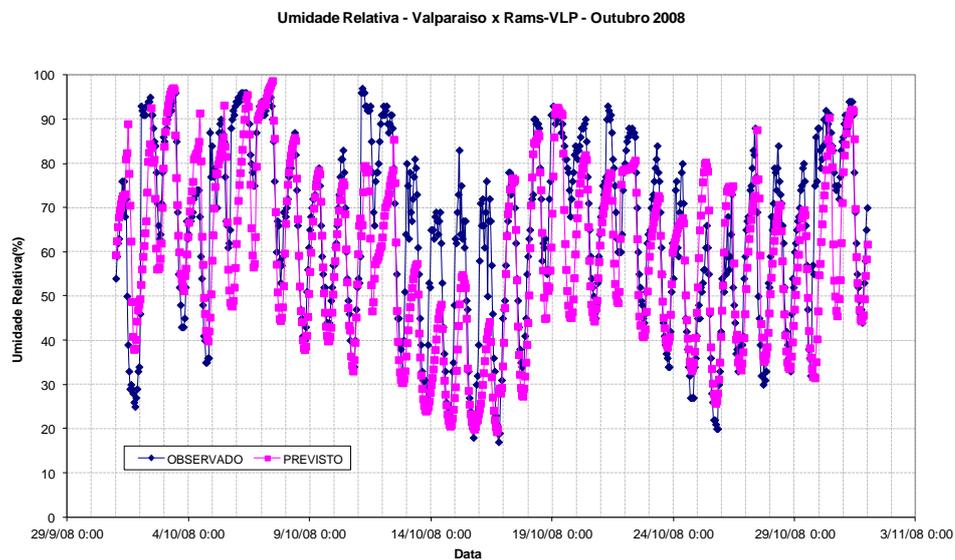


Figura 4.6 – Continuação.

- Análise dos dados de vento

Neste trabalho, o vento é a variável meteorológica de maior relevância. Pois é a sua permanência (tempo), pista (distância na qual o vento possui velocidade e direção constantes), direção, magnitude e variabilidade espaço-temporal que vai determinar a direção e altura das ondas no reservatório.

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam a comparação entre os dados de vento observados nas três estações meteorológicas mais próximas ao reservatório de Ilha Solteira e simulados com o modelo RAMS para os quatro meses representativos das estações do ano. Para facilitar a visualização, os dados do vento estão sendo representados pelas suas componentes zonal

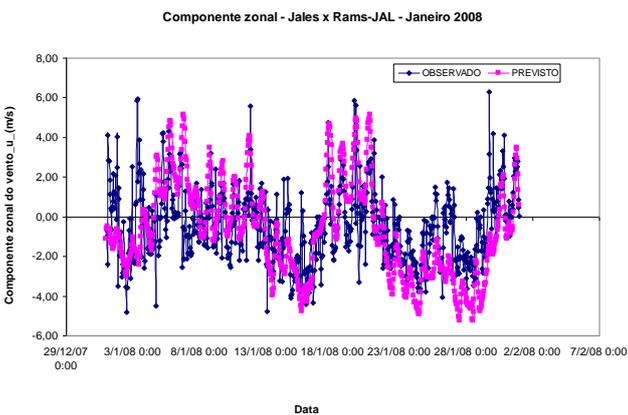
(coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita). Assim, valores positivos da componente zonal do vento correspondem ventos de oeste para leste, e valores negativos ventos de leste para oeste. Já para a componente meridional, valores positivos estão associados a ventos de sul para norte, e valores negativos, ventos de norte para sul.

Nota-se nas figuras a seguir que para quase todos os meses analisados, o modelo atmosférico RAMS conseguiu representar de forma satisfatória as mudanças na direção do vento. Em quase todas as verificações, os dados simulados acompanharam a mudança do sinal das componentes zonal e meridional do vento. Essa “concordância” não é observada na comparação entre os dados da componente meridional simulados pelo modelo e registrados na estação Valparaíso (SP) no mês de abril. Os resultados do modelo apresentaram os sinais da componente meridional do vento (norte-sul) diferentes, opostos aos dos dados observados na estação Valparaíso durante quase todo o mês de abril. (Figura 4.9 – b – coluna do lado direito).

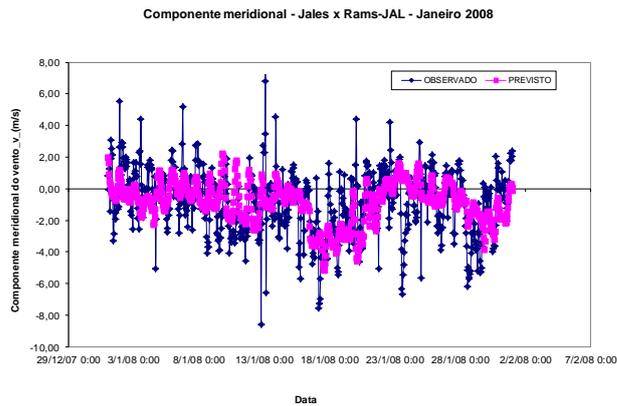
Os valores da componente zonal simulados com o modelo também foram diferentes dos valores observados na estação Três Lagoas (MS) durante o mês de julho de 2008. (Figura 4.8 – c – coluna do lado esquerdo)

Avaliando a intensidade, na maioria dos casos analisados, os dados simulados pelo modelo RAMS apresentaram valores menores do que os dados observados. Entretanto, há situações que o contrário é verificado, como é ilustrado na comparação entre os valores simulados e observados da componente zonal na estação de Três Lagoas (MS) na segunda quinzena de janeiro e nos meses de julho e outubro de 2008. (Figura 4.8 – a, c, d – coluna da esquerda).

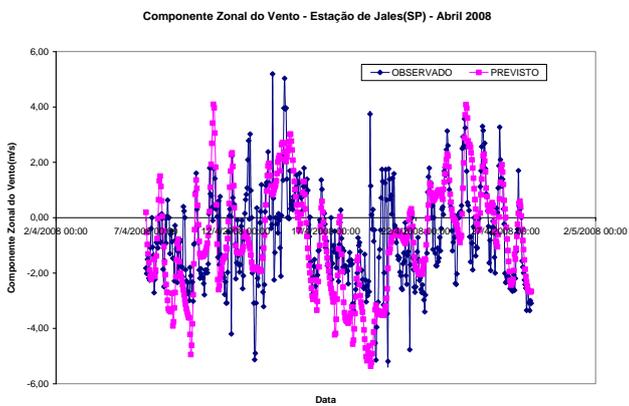
(a) Componente zonal – Jales – JAN/08



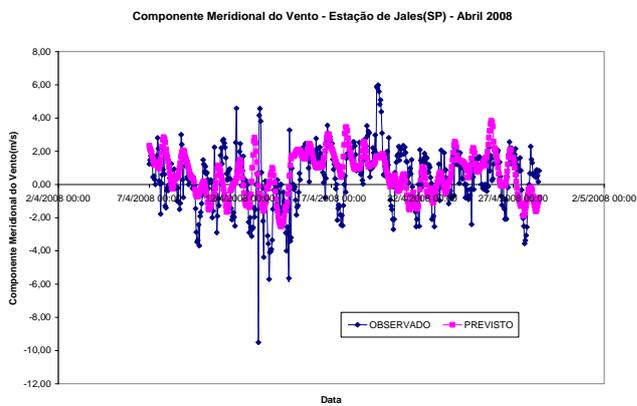
(b) Componente meridional – Jales – JAN/08



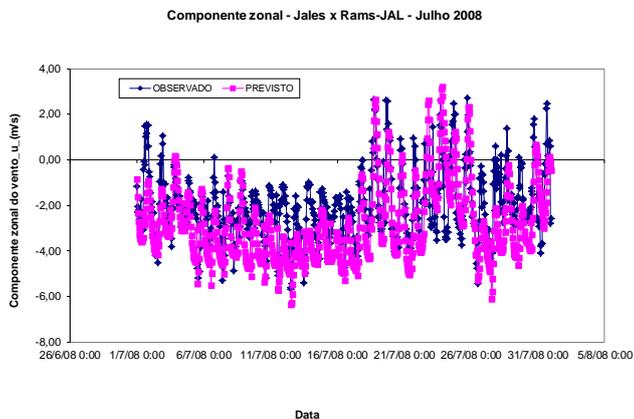
(b) Componente zonal – Jales – ABR/08



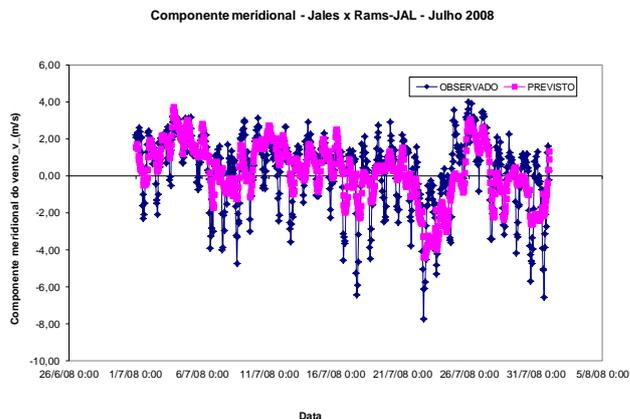
(b) Componente meridional – Jales – ABR/08



(c) Componente zonal – Jales – JUL/08



(c) Componente meridional – Jales – JUL/08



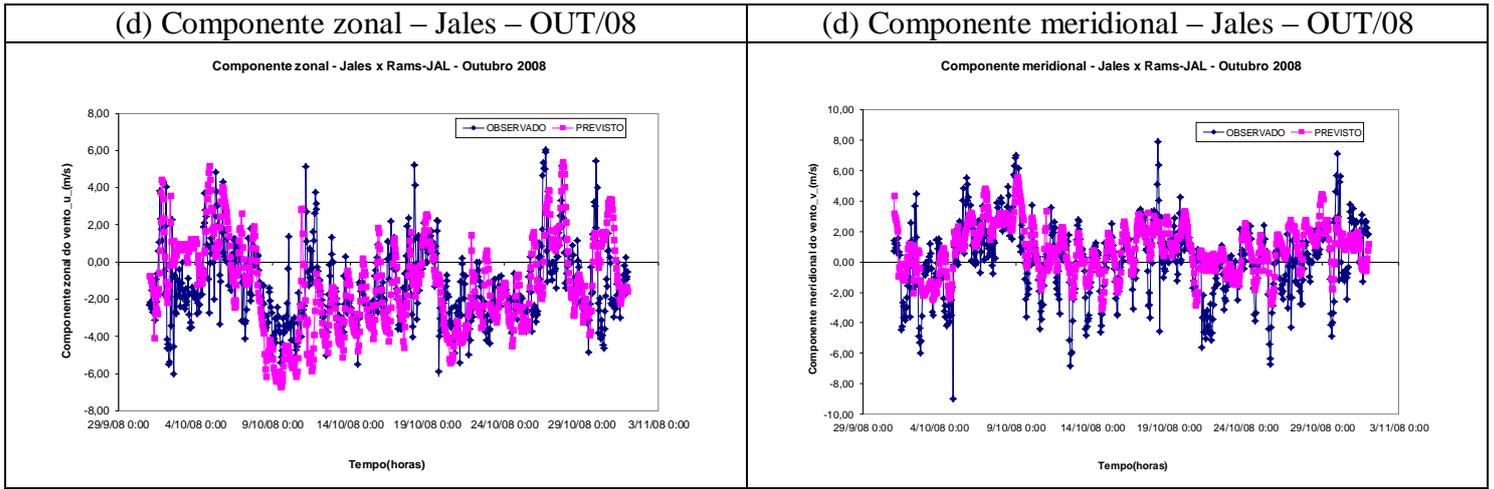
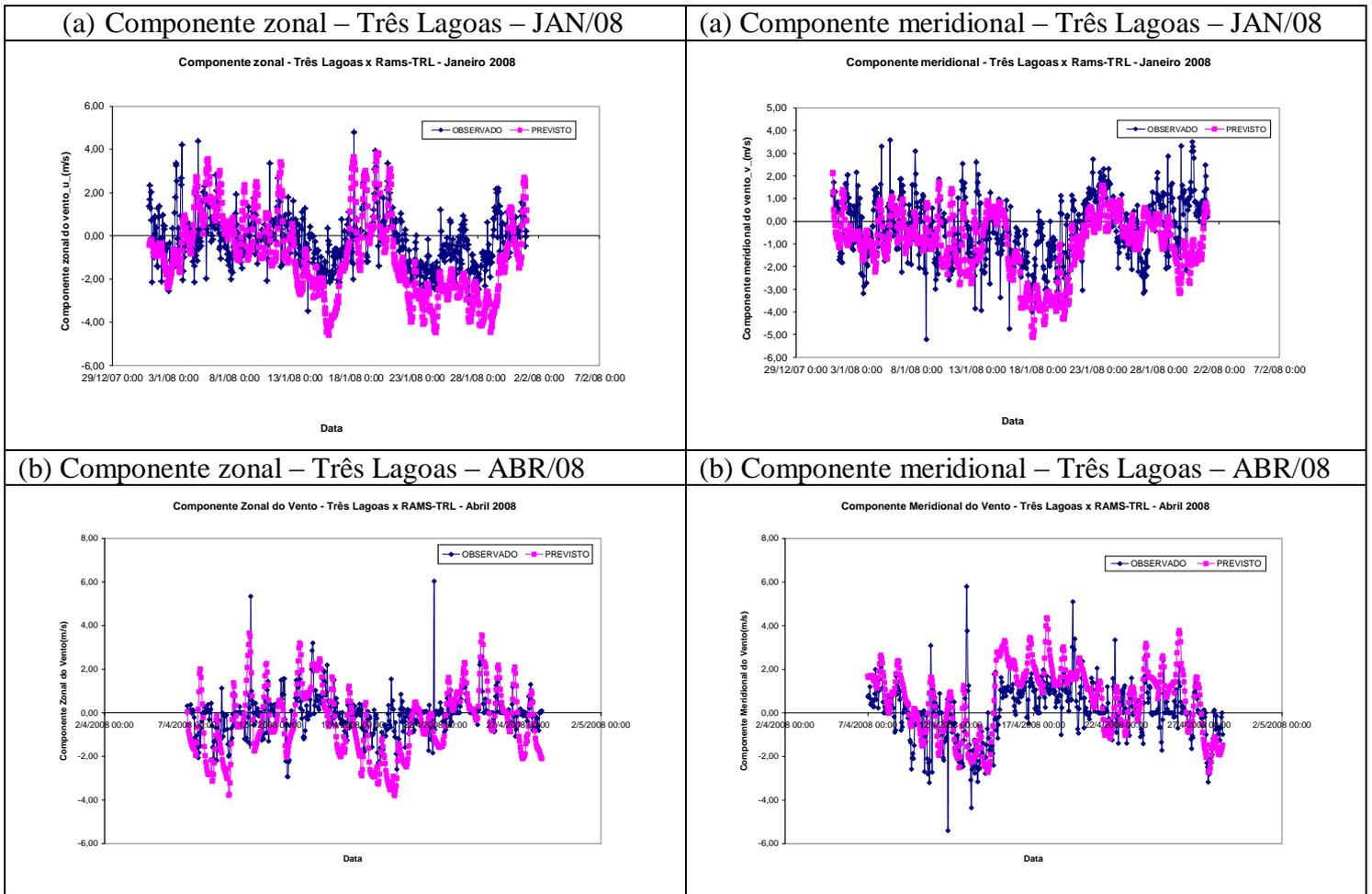


Figura 4.7 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Jales (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.



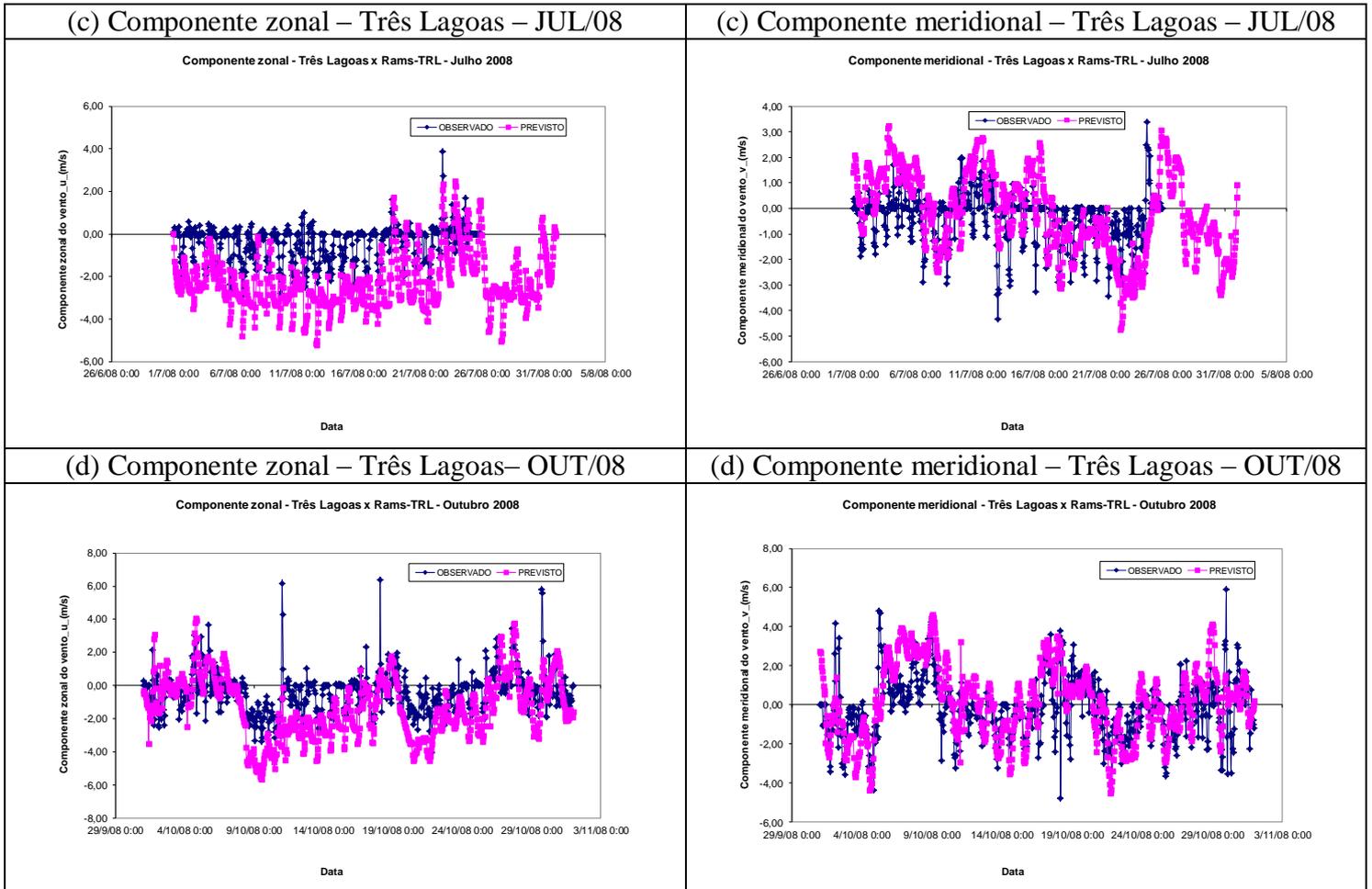
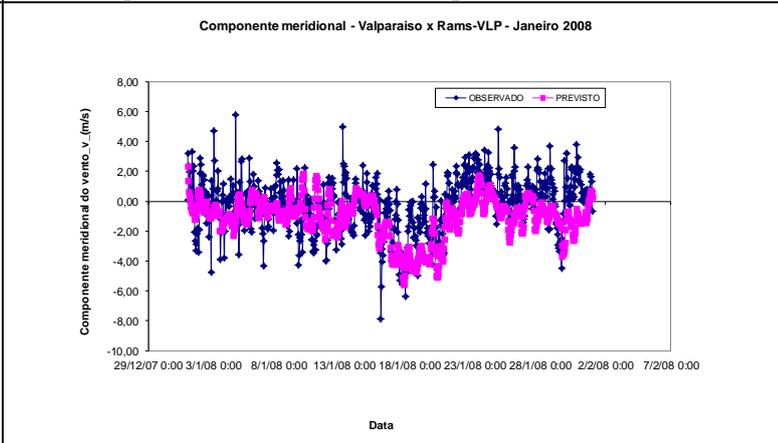
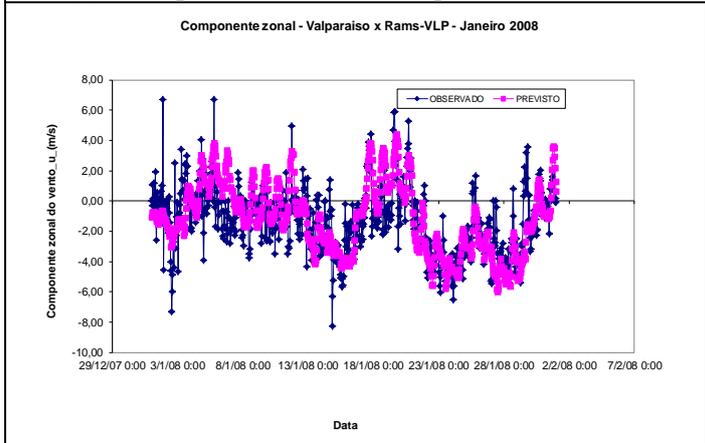


Figura 4.8 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Três Lagoas (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

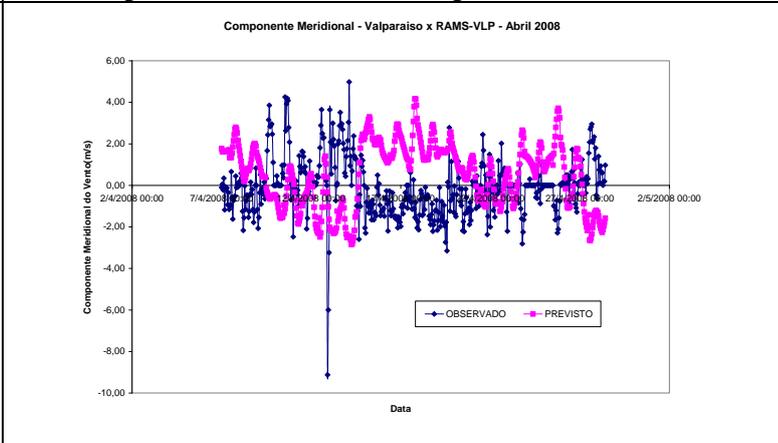
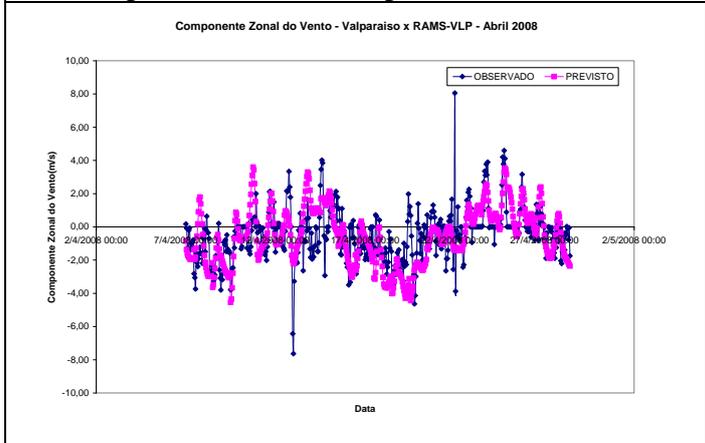
(a) Componente zonal – Valparaiso – JAN/08

(a) Componente meridional – Valparaiso – JAN/08



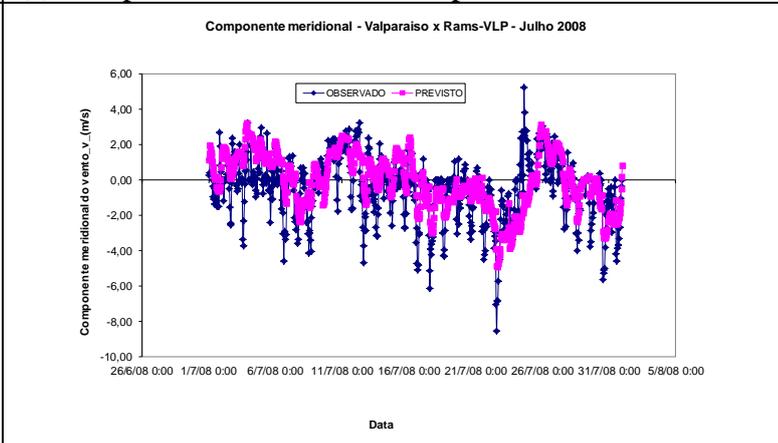
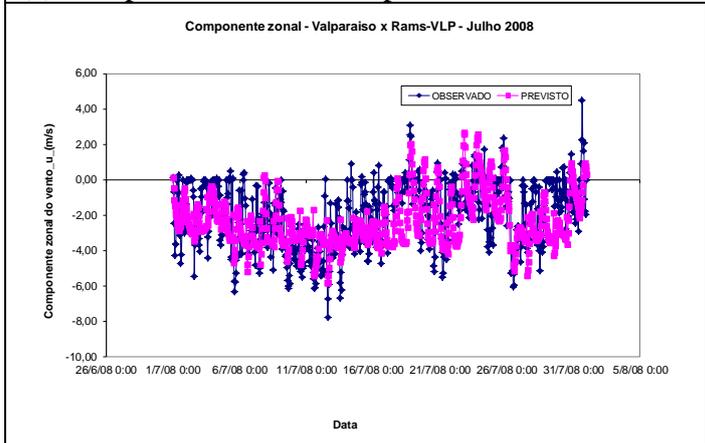
(b) Componente zonal – Valparaiso – ABR/08

(b) Componente meridional – Valparaiso – ABR/08



(c) Componente zonal – Valparaiso – JUL/08

(c) Componente meridional – Valparaiso – JUL/08



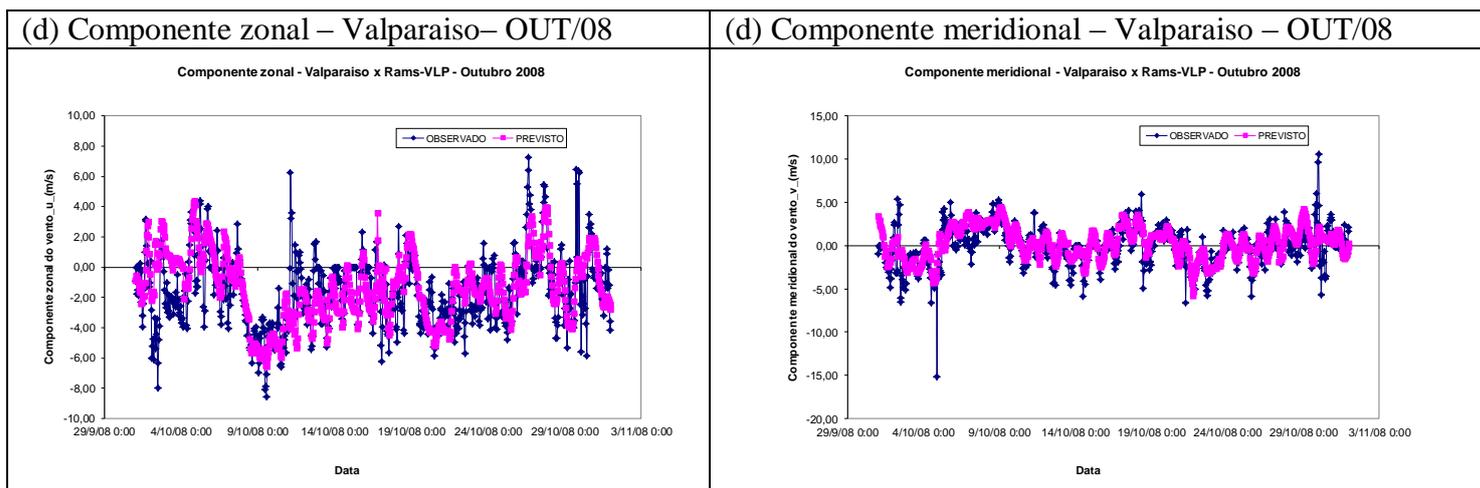


Figura 4.9 – Comparação entre os dados das componentes zonal (coluna da esquerda) e meridional (coluna da direita) do vento observados na estação Valparaíso (linha azul) e simulados pelo modelo RAMS (linha rosa) para: (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro de 2008.

4.1.2 Resultados Quantitativos

Além da comparação apresentada na seção anterior, foram calculados alguns índices estatísticos, como a correlação linear de Pearson entre observações e simulações, o erro médio, a raiz quadrada do erro médio quadrático com e sem *skill*, com a finalidade de avaliar o desempenho do modelo atmosférico RAMS configurado para a região do Lago de Ilha Solteira (SP).

As tabelas que serão apresentadas nesta seção mostram os resultados da aplicação do teste estatístico, discutido no capítulo de Materiais e Métodos, na comparação entre os dados observados nas três estações (Três Lagoas, Jales e Valparaíso) e os dados simulados com o modelo numérico RAMS.

Nas tabelas 4.1 a 4.16: $\sigma_{\text{observado}}$ é o desvio padrão da série observada, σ_{previsto} é o desvio padrão da série prevista, r_{xy} é o valor da correlação linear de Pearson, ME é o erro médio, RMSE é a raiz quadrada do erro médio quadrático e o RMSEub é a raiz quadrada do erro médio quadrático com *skill*, u é a componente zonal do vento, v é a componente meridional, ● significa “Dentro do Padrão” e ● significa “Fora do Padrão” para os resultados do teste estatístico aplicado aos dados de vento .

- Temperatura

Analisando os dados de temperatura nas três estações meteorológicas e nos quatro meses, nota-se que, em geral, as comparações entre os dados observados e simulados

apresentaram valores de correlação próximos a um (1), indicando boa associação linear entre as duas séries.

Os outros parâmetros estatísticos também apresentaram valores satisfatórios para os dados de temperatura. Os valores do erro médio (ME) foram mais próximos de zero (0) na comparação entre os dados simulados e os dados observados nas estações Três Lagoas (MS) e Jales (SP) nos meses de janeiro e abril. Em todos os casos analisados, os valores ME foram positivos, indicando que os dados simulados apresentaram valores maiores do que os dados observados.

A raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) na estação de Três Lagoas (MS) apresentou valor alto para o mês julho de 2008, indicando maior discrepância entre os dados simulados e observados. (Tabela 4.3)

Os resultados do modelo atmosférico RAMS para a temperatura foram satisfatórios, pois a maioria dos casos analisados apresentou “Dentro do Padrão” nas três condições que demonstram a habilidade (*skill*) de uma simulação (PIELKE, 2002): $\sigma_{sim} \approx \sigma_{obs}$, $RMSE < \sigma_{obs}$, $RMSE_{ub} < \sigma_{obs}$.

Tabela 4.1 - Avaliação de *skill* para os dados de temperatura (°C) – Janeiro 2008

Temperatura			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaiso(SP)	Jales(SP)
σ observado	3,27	3,23	3,08
σ previsto	3,04	3,13	3,11
r_{xy}	0,75	0,78	0,71
ME	0,29	1,49	0,80
RMSE	2,28	2,58	2,50
RMSE_{ub}	1,21	0,81	0,45
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs}$.	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
$RMSE < \sigma_{obs}$.	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
$RMSE_{ub} < \sigma_{obs}$.	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.2 - Avaliação de *skill* para os dados de temperatura (°C) – Abril 2008

Temperatura			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	3,96	4,44	3,71
σ previsto	2,83	2,85	2,52
r_{xy}	0,89	0,90	0,84
ME	0,53	1,40	0,71
RMSE	2,00	2,66	2,21
RMSE_{ub}	2,78	3,40	2,72
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.3 - Avaliação de *skill* para os dados de temperatura (°C) – Julho 2008

Temperatura			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	5.24	5.47	4.68
σ previsto	4.90	4.91	4.62
r_{xy}	0.87	0.83	0.85
ME	1.33	0.93	0.06
RMSE	11.55	3.25	2.54
RMSE_{ub}	1.36	2.41	0.72
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Fora do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.4: Avaliação de *skill* para os dados de temperatura (°C) – Outubro 2008

Temperatura			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	5,10	5,17	4,98
σ previsto	4,55	4,57	4,32
r_{xy}	0,91	0,88	0,88
ME	1,04	2,03	1,18
RMSE	2,35	3,17	2,68
RMSE_{ub}	2,29	2,42	2,47
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

- Umidade Relativa

A correlação entre os dados observados e simulados de umidade relativa também apresentou valores próximos a 1 em todos os casos analisados. As estações meteorológicas

Valparaiso (SP) e Jales (SP) apresentaram valores negativos de erro médio para todos os quatro meses, indicando que a simulação realizada com o modelo numérico RAMS subestimou os dados de umidade relativa nessas localidades. Já para a estação de Três Lagoas (MS), os valores de ME foram positivos, ou seja, a simulação superestimou os valores de umidade relativa para este caso.

Para a umidade relativa, as estações de Três Lagoas (MS) e Valparaiso (SP) apresentaram o valor da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) maior que o valor do desvio padrão da série observada no mês de janeiro de 2008 (verão no hemisfério sul), sendo indicado por “Fora do Padrão” neste item do teste estatístico aplicado. (Tabela 4.5)

O RMSE é uma medida de acurácia, portanto valores elevados de RMSE indicam alto nível de discrepância entre simulações e observações, isso é verificado para o mês de julho na estação de Três Lagoas (MS), na qual apresentou valor alto de RMSE e este foi maior do que o valor do desvio padrão da série observada. (Tabela 4.7)

Os meses de abril e outubro apresentaram os melhores resultados na comparação entre os dados de umidade relativa simulados pelo modelo RAMS e observados nas três estações meteorológicas utilizadas nesse estudo, pois apresentaram “Dentro do Padrão” nos três itens do teste estatístico aplicado. (Tabelas 4.6 e 4.8)

Tabela 4.5 - Avaliação de *skill* para a umidade relativa (%) – Janeiro 2008

Umidade Relativa			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaiso(SP)	Jales(SP)
σ observado	14,23	13,93	14,31
σ previsto	17,76	16,93	17,78
r_{xy}	0,69	0,70	0,66
ME	6,38	-6,60	13,93
RMSE	14,49	13,85	14,94
RMSE_{ub}	10,62	9,62	10,54
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Fora do Padrão	Dentro do Padrão	Fora do Padrão
RMSE_{ub} < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.6 - Avaliação de *skill* para a umidade relativa (%) – Abril 2008

Umidade Relativa			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	15,17	16,91	15,87
σ previsto	14,68	13,85	12,88
r_{xy}	0,86	0,88	0,85
ME	4,66	-3,43	-4,55
RMSE	9,27	8,79	9,53
RMSE_{ub}	3,80	9,71	9,25
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.7 - Avaliação de *skill* para a umidade relativa (%) – Julho 2008

Umidade Relativa			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	17.77	18.26	14.38
σ previsto	16.62	15.98	13.78
r_{xy}	0.77	0.81	0.85
ME	-6.84	-4.01	-1.98
RMSE	23.11	11.60	8.08
RMSE_{ub}	4.68	8.84	4.11
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Fora do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

Tabela 4.8 - Avaliação de *skill* para a umidade relativa (%) – Outubro 2008

Umidade Relativa			
Índices	Estações		
	Três Lagoas(MS)	Valparaíso(SP)	Jales(SP)
σ observado	18,82	20,48	21,99
σ previsto	20,80	19,36	19,41
r_{xy}	0,81	0,79	0,84
ME	2,71	-6,07	-3,17
RMSE	12,56	14,19	12,43
RMSE_{ub}	8,85	6,68	10,31
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSE < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão	Dentro do Padrão

- Vento

A correlação entre os dados de vento observados nas três estações e simulados pelo modelo numérico RAMS apresentou valores menores do que para as outras variáveis analisadas (temperatura e umidade relativa). O menor valor da correlação linear de Pearson (-0.52) foi encontrado na comparação entre os dados da componente meridional do vento (norte-sul) modelados pelo RAMS e observados na estação Valparaíso (SP) no mês de abril/2008 (Tabela 4.10). E o maior valor de correlação (0.71) foi encontrado para os dados da componente meridional registrados na estação Jales (SP) no mês de julho. (Tabela 4.11)

Os valores do erro médio (ME) foram próximos de zero em quase todos os casos analisados no estudo, exceto para a comparação entre os dados da componente meridional observados na estação Três Lagoas (MS) no mês de janeiro e os resultados da simulação, na qual apresentou o maior valor de 2,35 m/s (Tabela 4.9). Nos meses de janeiro, abril e julho, o modelo atmosférico RAMS subestimou os valores da componente zonal do vento (leste – oeste), pois apresentou valores negativos do erro médio. Já para a componente meridional, na maioria dos casos, os valores do erro médio foram positivos, indicando que o modelo RAMS superestimou essa componente do vento.

Avaliando os dados de vento, quase todos os casos estudados apresentaram-se “Fora do Padrão” em pelo menos um requisito das condições que avaliam a habilidade (*skill*) de uma simulação (PIELKE, 2002), exceto para o vento meridional (v) simulado para o mês de outubro de 2008, onde as três estações apresentaram resultados satisfatórios. De forma geral, a componente meridional do vento foi melhor simulada do que a componente zonal pelo modelo atmosférico RAMS, pois apresentou “Dentro do Padrão” em quase todas as condições do teste estatístico aplicado.

Tabela 4.9 - Avaliação de *skill* para os dados de vento (m/s) – Janeiro 2008

Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaiso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	1,19	1,39	2,14	1,83	1,85	2,05
σ previsto	1,92	1,35	2,35	1,40	2,41	1,33
r_{xy}	0,51	0,38	0,66	0,45	0,55	0,37
ME	-0,64	-2,35	0,12	-0,86	-0,25	0,01
RMSE	1,79	1,66	1,87	1,93	2,09	1,98
RMSE_{ub}	1,50	0,30	0,98	1,17	1,54	1,55
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.10 - Avaliação de *skill* para os dados de vento (m/s) – Abril 2008

Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaiso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0,92	1,28	1,57	1,39	1,67	1,80
σ previsto	1,56	1,54	1,71	1,53	1,93	1,26
r_{xy}	0,42	0,58	0,54	-0,52	0,55	0,36
ME	-0,35	0,59	-0,11	0,61	-0,11	0,23
RMSE	1,48	1,44	1,58	2,62	1,72	1,80
RMSE_{ub}	1,27	0,86	0,67	0,65	0,95	1,28
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.11 - Avaliação de *skill* para os dados de vento (m/s) – Julho 2008

Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaiso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0.85	1.01	1.88	1.79	1.53	1.93
σ previsto	1.30	1.62	1.49	1.60	1.74	1.56
r_{xy}	0.31	0.54	0.43	0.65	0.67	0.71
ME	-1.81	0.18	-0.45	0.34	-0.79	-0.09
RMSE	2.31	1.46	1.88	1.47	1.56	1.38
RMSE_{ub}	1.06	1.35	1.15	0.80	0.84	1.14
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.12 - Avaliação de *skill* para os dados de vento (m/s) – Outubro 2008

Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaiso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	1,23	1,56	2,41	2,31	2,04	2,36
σ previsto	1,88	1,88	2,22	1,85	2,48	1,63
r_{xy}	0,53	0,63	0,59	0,66	0,47	0,63
ME	-0,89	0,30	0,24	0,39	0,06	0,66
RMSE	1,83	1,54	2,12	1,81	2,35	1,96
RMSE_{ub}	1,42	1,05	0,93	1,37	1,41	1,71
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE_{ub} < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

4.2 Resultados dos Filtros Numéricos

Técnicas de filtragem (filtro de Thompson) foram aplicadas na comparação entre os dados de vento observados nas três estações meteorológicas mais próximas ao reservatório de Ilha Solteira (SP) e simulados na grade 2, de 12 km de resolução, do modelo RAMS. A utilização de filtros numéricos teve como finalidade separar informações em escalas temporais ou espaciais selecionadas que se encontram superpostas.

As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram os resultados da aplicação do filtro 1 aos dados observados (linhas em vermelho) nas estações e aos dados simulados (linhas em verde e em azul para o mês de abril) com o modelo atmosférico RAMS para os meses de janeiro(verão), abril(outono), julho(inverno) e outubro(primavera) de 2008. O filtro 1 preservou fenômenos com periodicidade superior a cinco dias e eliminou fenômenos com periodicidade inferior a um dia e meio, ou seja, preservou fenômenos de escala sinótica, como passagens de frente fria.

As cores das linhas das hodógrafas temporais referentes aos dados simulados são diferentes para o mês de abril, de cor azul, pois são associadas aos resultados do segundo teste realizado com *nudging* intenso.

As curvas hodógrafas (gráfico da componente zonal do vento no eixo x “versus” a componente meridional no eixo y), apresentadas nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12, ao contrário das séries temporais de cada componente, permitem identificar os ciclos e os padrões de rotação do vento.

Verifica-se nas figuras 4.10(c-d), 4.11(c) e 4.12(c) que as curvas dos resultados do modelo RAMS (linhas em verde e azul para o mês de abril) são semelhantes às dos dados observados, pois apresentam formatos parecidos. Isso indica que o modelo atmosférico RAMS conseguiu simular as mudanças da direção do vento em três pontos distintos da região do Lago de Ilha Solteira (SP).

Analisando as hodógrafas, nota-se também que o mês de outubro foi melhor simulado pelo modelo RAMS, pois as curvas referentes aos resultados do modelo (linhas em verde) ficaram mais próximas das curvas dos dados observados (linha em vermelho). Para os outros meses, apesar das curvas dos dados simulados apresentarem forma semelhante às dos dados observados, o modelo atmosférico RAMS superestimou a intensidade do vento na maioria dos casos.

(a)

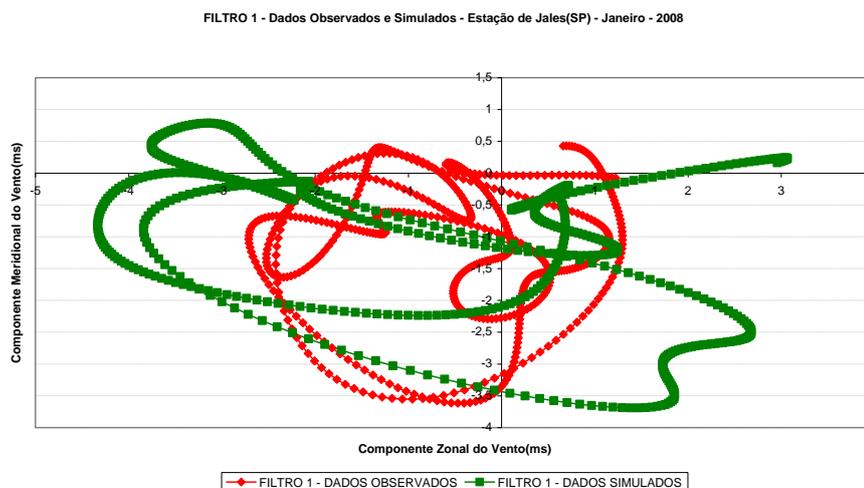
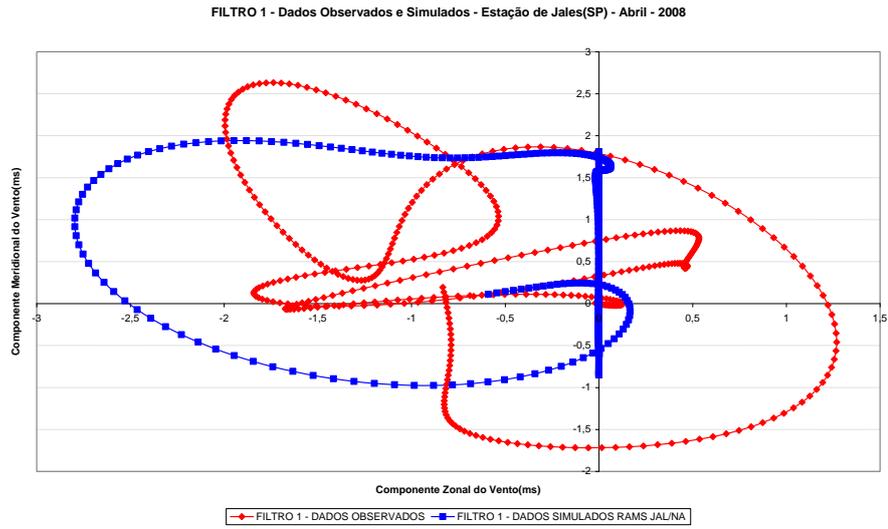
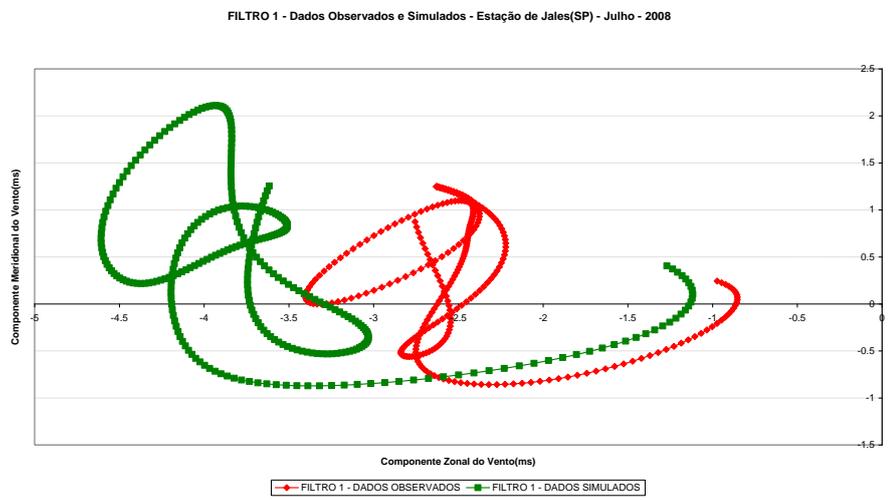


Figura 4.10 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Jales (SP): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.

(b)



(c)



(d)

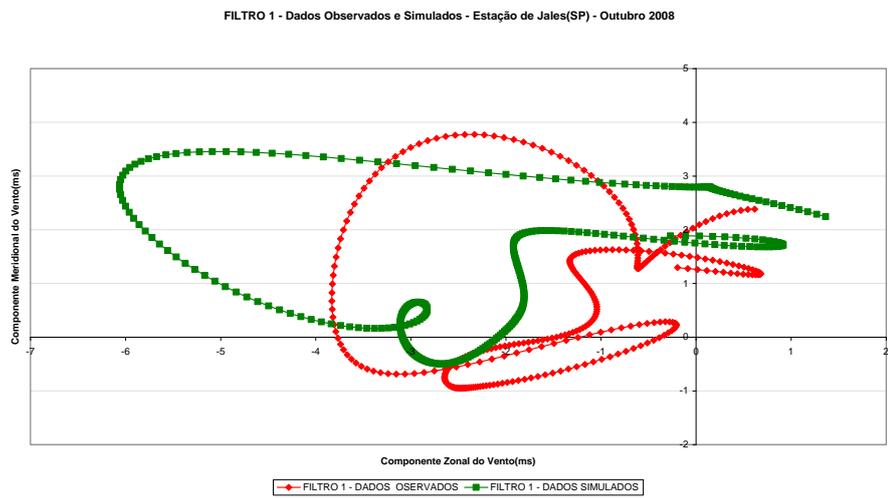
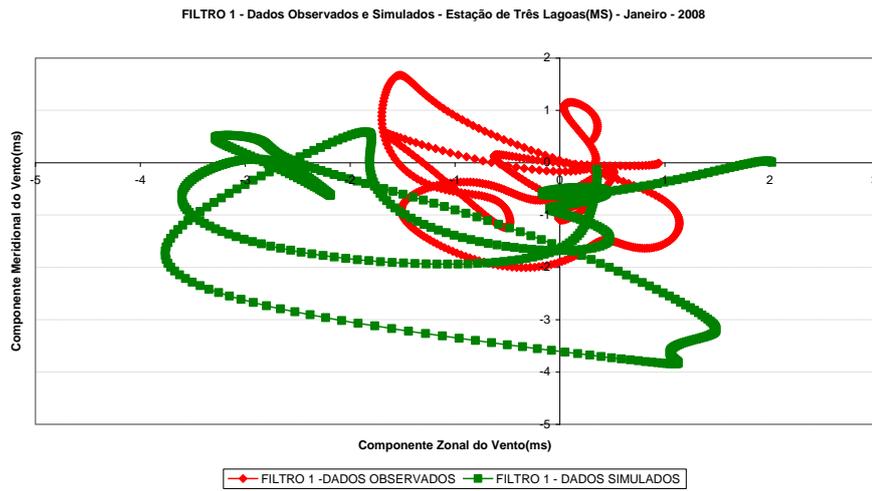
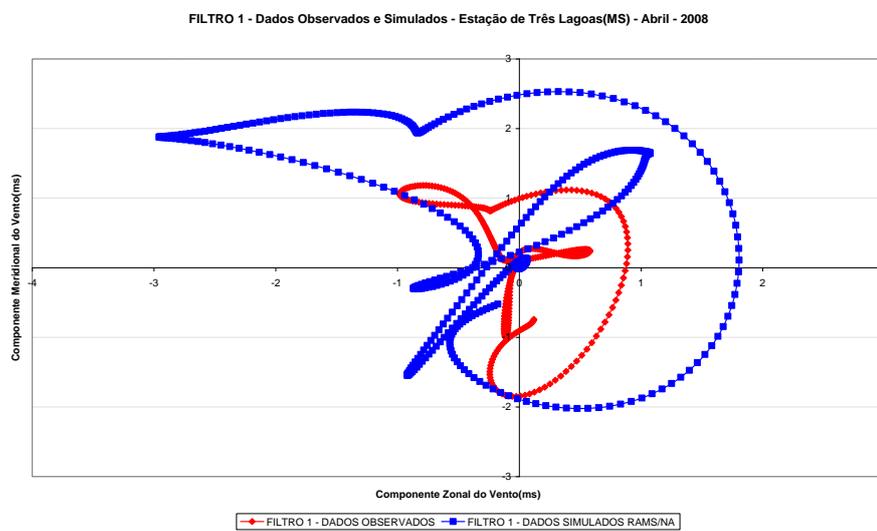


Figura 4.10 – Continuação.

(a)



(b)



(c)

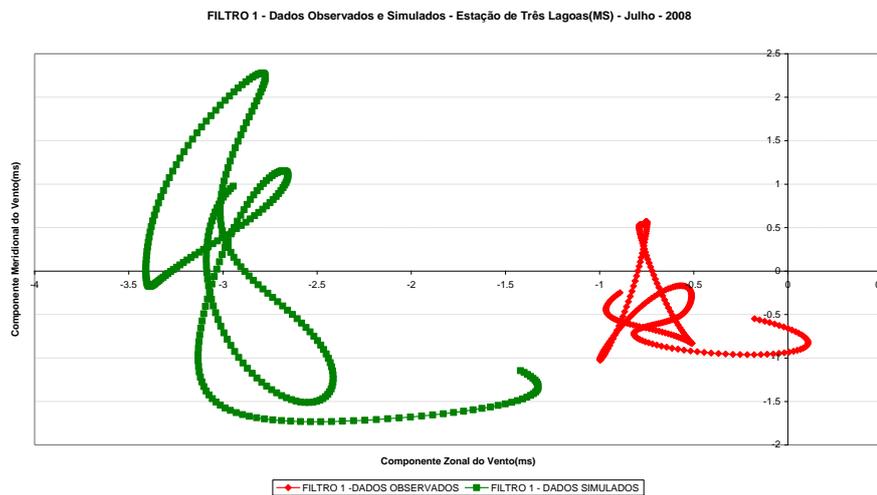


Figura 4.11 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Três Lagoas (MS): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.

(d)

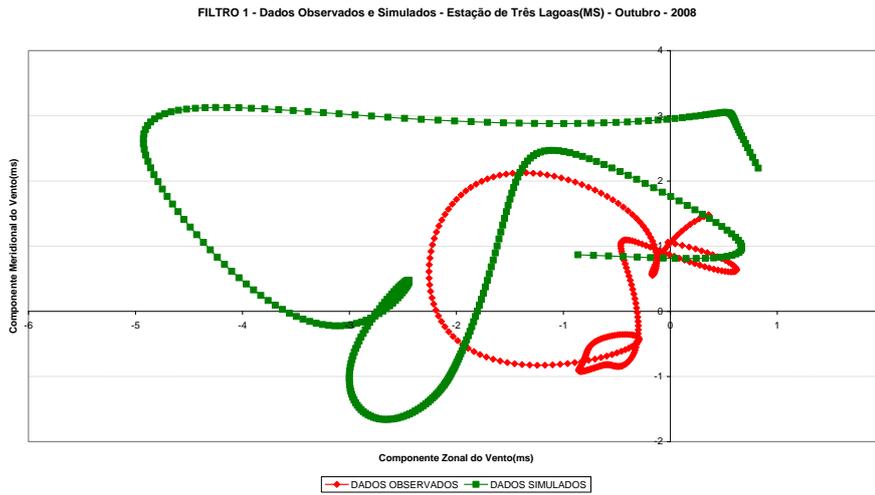
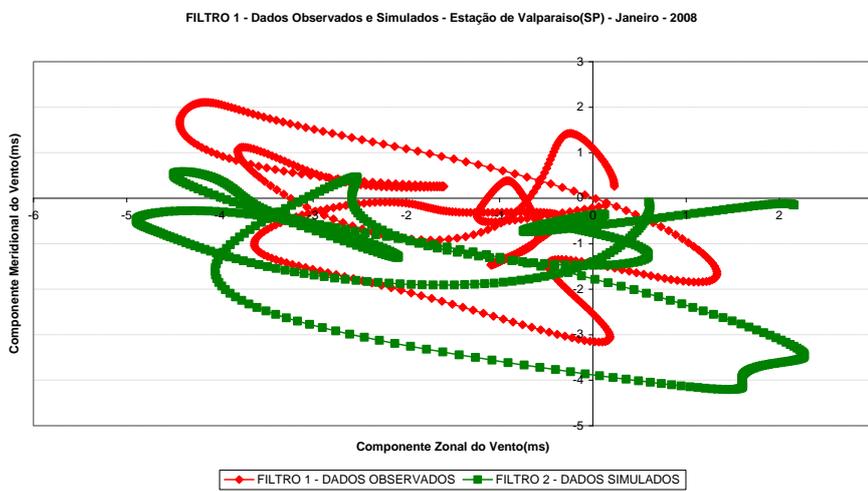


Figura 4.11 – Continuação.

(a)



(b)

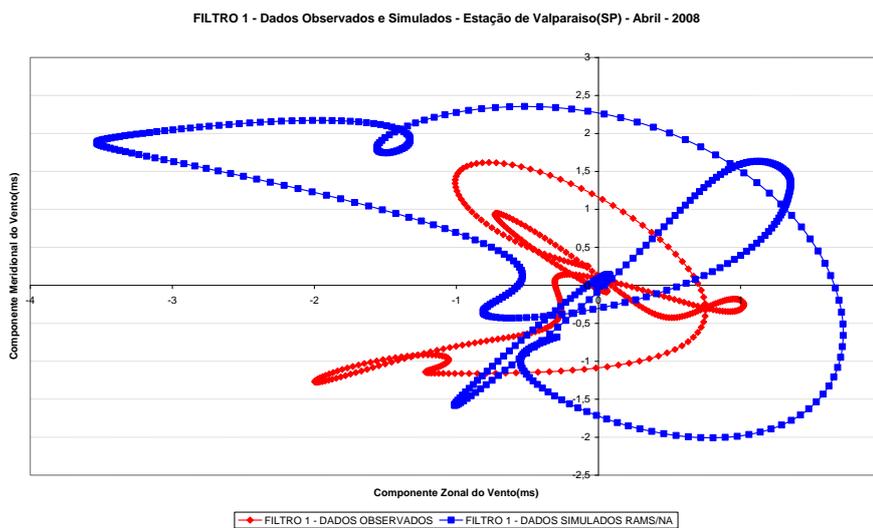
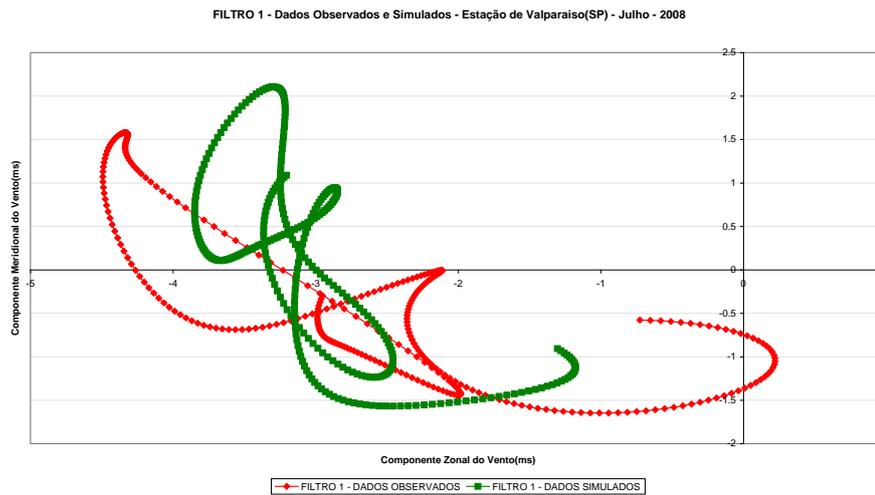


Figura 4.12 – Comparação entre os dados filtrados (Filtro 1) observados e simulados para a estação Valparaíso (SP): (a) janeiro/2008, (b) abril/2008, (c) julho/2008 e (d) outubro/2008.

(c)



(d)

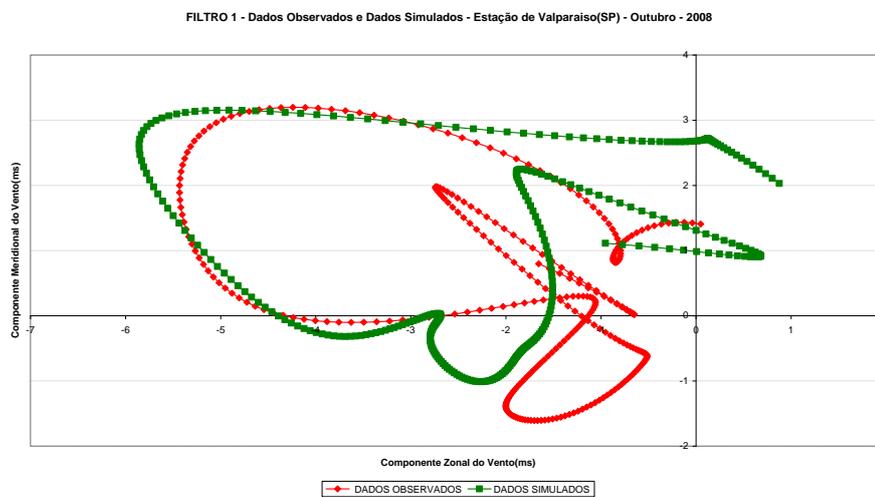


Figura 4.12 – Continuação.

As tabelas a seguir mostram os resultados do filtro “passa-banda”, este preservou fenômenos com periodicidade superior a meio dia e inferior a um dia e meio e apresentou melhor resultado dos três filtros utilizados no estudo (filtro1, 2 e passa-banda) no teste estatístico aplicado. Ou seja, a comparação entre os dados observados e simulados filtrados (filtro passa-banda) apresentou melhores resultados, em comparação aos dados sem filtragem, nos itens do teste estatístico utilizado no estudo (seção 3.4 – Teste Estatístico). O filtro Passa-Banda preserva fenômenos como a variação diurna da direção e intensidade do vento na região do reservatório e o ciclo diurno da temperatura.

A simulação realizada pelo modelo atmosférico RAMS para o mês de outubro de 2008 apresentou sistematicamente os melhores resultados na comparação entre os dados simulados pelo modelo e os dados observados, com e sem filtragem, nas três estações meteorológicas consideradas. Sistematicamente, os meses de janeiro e de julho apresentaram resultados de qualidade intermediária, embora os testes com filtro indicassem melhor ajuste do que sem

filtro, principalmente para a estação meteorológica Jales (SP), na qual apresentou melhores resultados nas condições que avaliam a habilidade de uma simulação com os dados filtrados (Filtro Passa Banda).

Tabela 4.13 – Avaliação de *skill* para os dados de vento - Janeiro 2008 – Filtro Passa Banda

FILTRO BANDA						
Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaíso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0,40	0,60	0,78	0,77	0,72	0,99
σ previsto	0,79	0,49	0,87	0,55	0,94	0,59
r_{xy}	0,21	0,13	0,47	0,26	0,61	0,31
ME	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
RMSE	0,74	0,66	0,79	0,76	0,69	0,90
RMSE_{ub}	0,62	0,31	0,35	0,50	0,55	0,73
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.14 – Avaliação de *skill* para os dados de vento - Abril 2008 – Filtro Passa Banda

FILTRO BANDA						
Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaíso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0,32	0,37	0,50	0,38	0,70	0,79
σ previsto	0,57	0,55	0,54	0,56	0,59	0,53
r_{xy}	0,35	0,54	0,43	-0,55	0,64	0,31
ME	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
RMSE	0,50	0,43	0,51	0,76	0,51	0,74
RMSE_{ub}	0,43	0,38	0,20	0,38	0,33	0,53
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.15 – Avaliação de *skill* para os dados de vento - Julho 2008 – Filtro Passa Banda

FILTRO BANDA						
Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaíso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0,45	0,48	0,71	0,96	0,99	1,17
σ previsto	0,74	0,54	0,86	0,52	1,03	0,53
r_{xy}	0,01	0,47	0,26	0,71	0,75	0,71
ME	-0,01	0,00	-0,02	0,00	-0,01	0,00
RMSE	0,79	0,48	0,88	0,63	0,66	0,81
RMSE_{ub}	0,54	0,21	0,44	0,74	0,25	0,96
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

Tabela 4.16 – Avaliação de *skill* para os dados de vento - Outubro 2008 – Filtro Passa Banda

FILTRO BANDA						
Índices	Estações					
	Três Lagoas(MS)		Valparaíso(SP)		Jales(SP)	
	u	v	u	v	u	v
σ observado	0,53	0,65	0,95	0,97	0,95	1,19
σ previsto	0,65	0,81	0,85	0,91	1,08	0,85
r_{xy}	0,32	0,62	0,49	0,65	0,24	0,69
ME	-0,01	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00
RMSE	0,64	0,60	0,83	0,72	1,15	0,79
RMSE_{ub}	0,35	0,44	0,39	0,29	0,47	0,76
$\sigma_{sim.} \approx \sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSE < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●
RMSEub < $\sigma_{obs.}$	●	●	●	●	●	●

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A simulação realizada com o modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) para o mês de outubro de 2008 (primavera no hemisfério sul) apresentou os melhores resultados na comparação entre os dados simulados e os dados observados nas três estações meteorológicas (Jales, Três Lagoas, Valparaíso) mais próximas ao reservatório de Ilha Solteira (SP).

Comparando os resultados obtidos pelo modelo nas três estações utilizadas no estudo para os quatro meses representativos das estações do ano, nota-se que a estação de Três Lagoas (MS) apresentou os piores resultados enquanto que em Valparaíso (SP) foram obtidos os melhores resultados.

A estação de Três Lagoas (MS) apresentou sempre o pior desempenho, seja sem filtro, seja com os três filtros considerados (filtro 1, 2 e passa banda). Isto leva a suspeita de que algum fator não esteja sendo adequadamente modelado e, neste caso, acredita-se que seja a influência da presença de um lago na circulação atmosférica.

Analisando a eficiência do modelo RAMS adaptado para a região de Ilha Solteira, conclui-se que as simulações numéricas apresentaram resultados satisfatórios em relação à temperatura e à umidade relativa. Apesar das componentes do vento ficarem “Fora do Padrão” em alguns itens do teste estatístico aplicado, o modelo RAMS consegue simular as escalas de tempo das mudanças de direção do vento.

A comparação entre os dados simulados e observados de temperatura e umidade relativa apresentou menor valor de correlação para o mês de janeiro nas três estações meteorológicas utilizadas no estudo. No mês de abril/2008, nota-se que o modelo RAMS simulou ciclos diurnos de temperatura e umidade menos amplos do que o observado.

Para os dados de vento, o mês de outubro de 2008 foi melhor representado pelo modelo numérico RAMS. A comparação entre os dados simulados e observados apresentou melhor resultado com os dados filtrados (Filtro Passa-Banda) nos meses de janeiro e julho/2008. Ou seja, nesses meses o modelo simulou de forma satisfatória fenômenos com periodicidade superior a meio dia e inferior a um dia e meio.

O modelo RAMS em algumas ocasiões subestima ou superestima a intensidade do vento, porém consegue prever no tempo correto a mudança da direção do vento. De forma geral, a comparação entre os dados de vento simulados e observados apresentou valores baixos da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), indicando pequena discrepância entre os resultados do modelo e os dados registrados nas três estações meteorológicas.

Portanto, os dados de vento modelados pelo RAMS poderão ser utilizados como dados de entrada para o modelo numérico de geração ou previsão de ondas SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). A próxima etapa do estudo é realizar testes com o modelo SWAN utilizando os dados de vento previstos pela grade de maior resolução (grade 4 de 1 km de resolução sobre o reservatório de Ilha Solteira) do modelo atmosférico RAMS e comparar esses resultados com os dados de alturas de ondas observados no lago.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTI, E. P. ; GANDU, A. W. ; AZEVEDO, P.V., 2002: Transporte e Balanço de Vapor d'Água Atmosférico sobre o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.2, p. 207-217.

COSTA, M. C., 2010: **Influência das Tensões do Vento na Variação do Nível Médio do Mar na Região Costeira de Cananéia (SP): Filtragem Numérica e Análise Espectral**. Tese (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá.

FERREIRA, A. N., 2000: **Estudo de Acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná: Aspectos Preventivos**. Tese (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo: Universidade de São Paulo.

FREITAS, E. D., 2003: **Circulações Locais em São Paulo e sua Influência sobre a Dispersão de Poluentes**. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Departamento de Ciências Atmosféricas. São Paulo: Universidade de São Paulo.

HOKE, J. E.; ANTHES, R. A., 1976: The Initialization of Numerical Models by a Dynamic Initialization Technique. **Monthly Weather Review**, v. **104**, p. 1551-1556.

Instituto Hidrográfico da Marinha de Portugal. Disponível em: <http://www.hidrografico.pt/>. Acesso em: 27 dez. 2011.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GADIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JONAWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWISK, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLD, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D., 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the Meteorological Society**, v. **77**, p. 437-471.

KLEMP, J. B. & WILHELMSON, R. B., 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. **35**, p.1070-1096.

KUO, H. L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. **31**, p. 1232-1240.

LIMA, G. B.; OLIVEIRA, E. B.; TROVATI, L. R., 2011: Monitoramento Telemétrico de Ondas Geradas por Ventos em Lagos de Barragens para Segurança Hidroviária e Transposição de Barragens. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5233-5238. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <http://urlib.net/3ERPFQTRW/3A39QJ5>. Acesso em: 22 jun. 2011.

MACIEL, G. F. ; SOBRINHO, M.D. ; MARCON, C. N. ; MARQUES, M., 2006: Previsão Automatizada de Ondas em Lagos de Barragens . *In: XXII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA*, 2006, Guayana - Venezuela. **Anais...** Guayana. Disponível em: <http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2006/43.pdf>. Acesso em: 24 out. 2011.

MACIEL, G. F. ; TROVATI, L. R. ; SOBRINHO, M.D. ; NEVES, C. F. ; CUNHA, E. F. ; MORAES, V. S., 2009: Alerta de Ventos e Ondas para a segurança da navegação . *In: VI SEMINÁRIO DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR*, 2009, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Engenharia Naval.

MARQUES, M., 2005: **Sistema Automatizado para Estimativa de Ondas Geradas por Vento em Reservatórios de Barragens**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. São Paulo: Universidade Estadual Paulista.

MARQUES, M. ; MACIEL, G. F. ; SOBRINHO, M.D., 2007: Estimativa das Máximas Pistas de Vento no Reservatório da Barragem de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. **Revista Maringá**, Paraná, v. **29**, n. 1, p. 79-84.

MARTINS, J. A., 2006: **Efeito dos Núcleos de Condensação na Formação de Nuvens e o Desenvolvimento da Precipitação na Região Amazônica durante a Estação Seca**. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Departamento de Ciências Atmosféricas. São Paulo: Universidade de São Paulo.

MENEZES, W. F; SILVA DIAS, P.L., 2004: Um Estudo do Impacto das Opções Físicas do Modelo RAMS na Simulação Numérica do “Ciclone Catarina”. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia. Disponível em:

http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=12&totalRows_Recordset_busca=694&cgid=22&imageField2.x=40&imageField2.y=7. Acesso em: 04 nov. 2011.

MENEZES, D. C., 2006: **Contribuições Metodológicas para a Análise de Flutuações Atmosféricas e Oceanográficas de Baixa Frequência na Costa do Estado do Rio de Janeiro**. Tese (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, G. A.; COELHO, D. G. & JUSTI DA SILVA, M.G.A., 2000: Avaliação dos Erros das Previsões Numéricas sobre o Estado do Rio de Janeiro. *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 2000, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-c3c39d736dd860b5b1d7ef97c46a4175.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2012.

PIELKE, R. A. SR., 2002: **Mesoscale Meteorological Modeling**. 2. ed. San Diego: Academic Press. (International Geophysics Series 78).

SANTOS, I. A., 1998: **Controles de Larga e Mesoescala na Precipitação Amazônica no ABLE2B**. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Departamento de Ciências Atmosféricas. São Paulo: Universidade de São Paulo.

SMAGORINSKY, J, 1963: General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. **Monthly Weather Review**, v. **91**, p. 99-164.

WALKO, R. L; TREMBACK, C. J., 2000: Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) version 4.3/4.4 – Model Input Namelist Parameters.

WILKS, D. S., 1995: **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 467 p.

ANEXO

PESOS DOS FILTROS NUMÉRICOS

Nesse anexo são apresentadas três tabelas com os valores dos pesos dos filtros numéricos utilizados no estudo.

Tabela 1: Pesos do filtro 1 de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.

k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)
0	0,036105						
1	0,036015	31	-0,00264	61	0,000553	91	0,000171
2	0,035746	32	-0,0032	62	0,000574	92	0,000189
3	0,035299	33	-0,00364	63	0,000577	93	0,000204
4	0,034682	34	-0,00399	64	0,000564	94	0,000215
5	0,033898	35	-0,00423	65	0,000538	95	0,000223
6	0,032957	36	-0,00439	66	0,0005	96	0,000226
7	0,031869	37	-0,00446	67	0,000454	97	0,000226
8	0,030644	38	-0,00445	68	0,000403	98	0,000221
9	0,029295	39	-0,00437	69	0,000348	99	0,000213
10	0,027836	40	-0,00424	70	0,000292	100	0,000202
11	0,02628	41	-0,00405	71	0,000236	101	0,000187
12	0,024643	42	-0,00381	72	0,000183	102	0,000171
13	0,022941	43	-0,00354	73	0,000134	103	0,000152
14	0,021191	44	-0,00325	74	8,97E-05	104	0,000131
15	0,019407	45	-0,00293	75	5,17E-05	105	0,00011
16	0,017607	46	-0,00261	76	2,03E-05	106	8,81E-05
17	0,015805	47	-0,00228	77	-3,9E-06	107	6,64E-05
18	0,014019	48	-0,00195	78	-2,1E-05	108	4,53E-05
19	0,012262	49	-0,00162	79	-3,1E-05	109	2,51E-05
20	0,010548	50	-0,00131	80	-3,4E-05	110	6,42E-06
21	0,00889	51	-0,00102	81	-3,1E-05	111	-1,1E-05
22	0,007301	52	-0,00075	82	-2,2E-05	112	-2,5E-05
23	0,00579	53	-0,0005	83	-8E-06	113	-3,8E-05
24	0,004368	54	-0,00027	84	9,95E-06	114	-4,8E-05
25	0,003041	55	-7,5E-05	85	0,000031	115	-5,6E-05
26	0,001817	56	9,53E-05	86	5,42E-05	116	-6,2E-05
27	0,000701	57	0,000239	87	7,87E-05	117	-6,5E-05
28	-0,0003	58	0,000355	88	0,000103	118	-6,6E-05
29	-0,0012	59	0,000445	89	0,000128	119	-6,5E-05
30	-0,00198	60	0,00051	90	0,000151	120	-6,2E-05

Tabela 2: Pesos do filtro 2 de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.

k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)
0	0,111116						
1	0,108559	31	0,000599	61	2,55E-05	91	1,17E-05
2	0,101131	32	0,000645	62	6,54E-06	92	2,03E-05
3	0,089527	33	0,000581	63	4E-08	93	2,43E-05
4	0,074811	34	0,000426	64	6,06E-06	94	2,36E-05
5	0,058288	35	0,000217	65	2,12E-05	95	1,92E-05
6	0,041346	36	-3E-07	66	3,97E-05	96	1,27E-05
7	0,025301	37	-0,00018	67	5,54E-05	97	6,26E-06
8	0,011255	38	-0,0003	68	6,31E-05	98	1,66E-06
9	-4E-06	39	-0,00034	69	5,99E-05	99	4E-08
10	-0,00806	40	-0,00032	70	4,62E-05	100	1,61E-06
11	-0,01288	41	-0,00025	71	2,46E-05	101	5,63E-06
12	-0,01477	42	-0,00016	72	-4E-08	102	1,07E-05
13	-0,01427	43	-7,4E-05	73	-2,3E-05	103	1,51E-05
14	-0,01208	44	-1,9E-05	74	-3,9E-05	104	1,75E-05
15	-0,00895	45	4E-08	75	-4,6E-05	105	1,69E-05
16	-0,00556	46	-1,6E-05	76	-4,5E-05	106	1,32E-05
17	-0,00245	47	-5,7E-05	77	-3,6E-05	107	7,15E-06
18	1,76E-06	48	-0,0001	78	-2,4E-05	108	1E-08
19	0,001633	49	-0,00014	79	-1,2E-05	109	-6,7E-06
20	0,002441	50	-0,00016	80	-3E-06	110	-1,2E-05
21	0,002557	51	-0,00015	81	4E-08	111	-1,4E-05
22	0,002193	52	-0,00011	82	-2,8E-06	112	-1,4E-05
23	0,001583	53	-6E-05	83	-1E-05	113	-1,1E-05
24	0,000939	54	1,9E-07	84	-1,9E-05	114	-7,5E-06
25	0,000416	55	5,38E-05	85	-2,7E-05	115	-3,7E-06
26	9,86E-05	56	9,11E-05	86	-3,1E-05	116	-9,3E-07
27	4E-08	57	0,000107	87	-3E-05	117	4E-08
28	7,82E-05	58	0,000102	88	-2,3E-05	118	-9,1E-07
29	0,000258	59	8,13E-05	89	-1,2E-05	119	-3,4E-06
30	0,000455	60	5,28E-05	90	9E-08	120	-6,5E-06

Tabela 3: Pesos do filtro passa-banda (filtro 2 menos filtro 1) de Thompson calculados para a análise da série temporal dos dados de vento.

k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)	k	w(k)
0	0,075011						
1	0,072544	31	0,00324	61	-0,00053	91	-0,00016
2	0,065385	32	0,00384	62	-0,00057	92	-0,00017
3	0,054227	33	0,004224	63	-0,00058	93	-0,00018
4	0,04013	34	0,004412	64	-0,00056	94	-0,00019
5	0,02439	35	0,004449	65	-0,00052	95	-0,0002
6	0,008389	36	0,004386	66	-0,00046	96	-0,00021
7	-0,00657	37	0,004274	67	-0,0004	97	-0,00022
8	-0,01939	38	0,004148	68	-0,00034	98	-0,00022
9	-0,0293	39	0,004028	69	-0,00029	99	-0,00021
10	-0,0359	40	0,003915	70	-0,00025	100	-0,0002
11	-0,03916	41	0,003797	71	-0,00021	101	-0,00018
12	-0,03941	42	0,003655	72	-0,00018	102	-0,00016
13	-0,03721	43	0,00347	73	-0,00016	103	-0,00014
14	-0,03327	44	0,00323	74	-0,00013	104	-0,00011
15	-0,02836	45	0,002934	75	-9,8E-05	105	-9,3E-05
16	-0,02317	46	0,002591	76	-6,5E-05	106	-7,5E-05
17	-0,01826	47	0,002219	77	-3,2E-05	107	-5,9E-05
18	-0,01402	48	0,001842	78	-2,7E-06	108	-4,5E-05
19	-0,01063	49	0,001481	79	1,94E-05	109	-3,2E-05
20	-0,00811	50	0,001154	80	3,11E-05	110	-1,8E-05
21	-0,00633	51	0,000871	81	3,08E-05	111	-3,7E-06
22	-0,00511	52	0,000634	82	1,9E-05	112	1,16E-05
23	-0,00421	53	0,000438	83	-2,1E-06	113	2,68E-05
24	-0,00343	54	0,000274	84	-2,9E-05	114	4,1E-05
25	-0,00263	55	0,000129	85	-5,8E-05	115	5,27E-05
26	-0,00172	56	-4,2E-06	86	-8,5E-05	116	6,09E-05
27	-0,0007	57	-0,00013	87	-0,00011	117	6,5E-05
28	0,000383	58	-0,00025	88	-0,00013	118	6,5E-05
29	0,001455	59	-0,00036	89	-0,00014	119	6,15E-05
30	0,00243	60	-0,00046	90	-0,00015	120	5,55E-05