



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-15201-TDI/1301**

**TESTES DE SENSIBILIDADE E AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES  
DE VENTO DO MODELO ETA PARA REGIÃO NORDESTE**

André de Arruda Lyra

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela  
Dr<sup>a</sup> Chou Sin Chan, aprovada em 14 de dezembro de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2008

Publicado por:

**esta página é responsabilidade do SID**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**Solicita-se intercâmbio  
We ask for exchange**

**Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-15201-TDI/1301**

**TESTES DE SENSIBILIDADE E AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES  
DE VENTO DO MODELO ETA PARA REGIÃO NORDESTE**

André de Arruda Lyra

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela  
Dr<sup>a</sup> Chou Sin Chan, aprovada em 14 de dezembro de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

L995t Lyra, André de Arruda  
Testes de sensibilidade e avaliação das previsões de vento do modelo ETA para Região Nordeste / André de Arruda Lyra. – São José dos Campos: INPE, 2007.  
104p. ; (INPE-15201-TDI/1301)

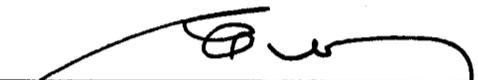
1.Camada limite atmosférica. 2.Vento. 3.Modelo ETA.  
4.Comprimento de rugosidade. 5.Teste de sensibilidade. I.Título.

CDU 551.55 (812/813)

---

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

**Dr. Enio Bueno Pereira**

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

**Dra. Chou Sin Chan**

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

**Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá**

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

**Dra. Vanessa Gonçalves Guedes**

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / CEPEL / Rio de Janeiro - RJ

**Aluno (a): André de Arruda Lyra**

**São José dos Campos, 14 de Dezembro de 2007**



*A meus pais  
e minha esposa.*



## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Dra. Chou, pela dedicação, paciência e amizade ao longo deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, pela oportunidade de estudos e utilização do super computador.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, pelo fornecimento dos dados das torres anemométricas.

Ao Dr. Gilberto Fisch, pelo fornecimento dos dados da torre anemométrica do Centro de Lançamento de Alcântara.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro recebido durante dois anos de mestrado.

À secretaria da Pós-Graduação em Meteorologia, em especial a Lílian Escobar, pela eficiência e dedicação.

À minha família, pelo constante apoio e incentivo.

Agradecimento especial à Izabelly, pelo amor, carinho e companheirismo.

Aos amigos de trabalho, Diego, Gustavo, Jorge e Josiane pela ajuda, pelo companheirismo e momentos de descontração.

Enfim, a todos que colaboraram de forma direta ou indireta para elaboração deste trabalho.



## RESUMO

A camada limite superficial é a parte da camada limite planetária mais influenciada pelas características da superfície da Terra. A previsão de vento nesta camada é útil em várias atividades humanas, no setor energético, no planejamento das operações de transporte aéreo, no lazer, entre outros. O objetivo principal desse estudo foi realizar testes de sensibilidade e avaliar as previsões da intensidade do vento próximo à superfície do Modelo Eta para a região Nordeste. Foram realizados experimentos numéricos com resoluções horizontais de 5 e 10 km, resoluções verticais com 38 e 50 níveis, mudanças na relação dos comprimentos de rugosidade, de calor e momentum, nas funções de estabilidade de Paulson do esquema de parametrização da camada limite superficial. Também foram realizados testes de sensibilidade com a estimativa da altura da camada limite atmosférica e com a substituição da cobertura de solo. Os resultados foram comparados com observações em cinco sítios observacionais localizados em Macau, Canto do Amaro e Minhoto no Rio Grande do Norte, Pacatuba em Sergipe e Alcântara no Maranhão. Os testes com 5 km de resolução horizontal obtiveram um maior desempenho que a versão de 10 km. Os testes com o parâmetro de Zilitinkevich mostraram que o aumento desse parâmetro trouxe melhorias na representação da temperatura de superfície na cidade de Macau no horário de maior aquecimento. O parâmetro que controla a altura da camada limite atmosférica apresentou impacto diferente sobre o oceano e o continente. O experimento com mudança na cobertura do solo apresentou diferenças pouco significativas, provavelmente devido à pequena área de cobertura de solo alterada. Em geral, os resultados do vento à 10 e 50 m de altura modelado pelo Eta mostraram alguma sensibilidade aos parâmetros testados, embora pequena.



# **SENSITIVITY TESTS AND EVALUATION OF ETA MODEL NEAR-SURFACE WIND FORECASTS FOR NORDESTE REGION**

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to carry out sensitivity tests and evaluate the Eta Model near-surface wind forecasts. Eta model forecasts were compared against observational sites located in Northeast of Brazil. The mean diurnal cycle, the root mean square errors, bias and correlation were calculated. The experiments compared the runs with 5 and 10 km of horizontal resolution, 38 e 50 levels of vertical resolution, change of momentum and heat relation, roughness length and stability function of Paulson in the surface boundary layer parameterization. Sensitivity tests were also carry out for boundary layer height estimation and change land cover type. Model outputs were compared against five stations: Macau, Canto do Amaro and Minhoto located in Rio Grande do Norte, Pacatuba in Sergipe and Alcântara in Maranhão. Comparisons among the resolution runs showed the advantage of increasing the horizontal and vertical resolution to the quality of near-surface wind forecast. The simulations changing Zilitinkevich parameter indicated that increase of this parameter value resulted in improvement of the surface temperature in Macau area. The parameter which controls the boundary layer height showed opposite impacts between ocean and continent. In general, the Eta modeled 10 and 50-m winds showed some sensitivity to the tested parameters, although marginal.



## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1 Objetivos .....	28
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>31</b>
2.1 Camada Limite Atmosférica .....	31
2.1.1 Subcamada Laminar ou Viscosa (SCI) .....	31
2.1.2 Camada Limite Superficial (CLS) .....	32
2.1.3 Camada Limite Convectiva (CLC) .....	32
2.1.4 Camada de Transição (CT) .....	33
2.2 Teoria da Similaridade .....	33
2.3 Comprimento de Rugosidade da Superfície .....	35
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>39</b>
<b>4 DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
4.1 Dados Observacionais .....	43
4.1.1 Torres Anemométricas .....	43
4.1.2 Experimento de Campo .....	44
4.2 O Modelo Eta .....	46
4.2.1 Esquema de Paulson .....	51
4.3 Experimentos Numéricos .....	53
4.3.1 Experimento Controle .....	54
4.3.2 Mudança na Resolução .....	55

4.3.3 Mudança nos Parâmetros de CLS .....	55
4.3.4 Mudança na Altura da CLA.....	56
4.3.5 Mudança do Tipo de Cobertura do Solo .....	56
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
5.1 O Experimento Controle (C1) .....	59
5.2 Sensibilidade a Diferentes Resoluções Espaciais .....	62
5.3 Sensibilidade do Modelo a Parâmetros .....	72
5.3.1 Parâmetros de CLS .....	73
5.3.2 Altura da CLA .....	82
5.3.3 Tipo de Cobertura de Solo .....	85
<b>6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Logaritmo natural da altura versus velocidade do vento .....	36
4.1 – Localização dos 5 sítios observacionais e domínio do Modelo Eta 5km ...	44
4.2 – Torre Micrometeorológica montada na cidade de Macau –RN .....	46
4.3 – Distribuição vertical e espessura das camadas atmosféricas representadas no modelo Eta com 50 (linhas vermelhas) e 38 níveis (linhas pretas) .....	47
4.4 – Grade do tipo “E” de Arakawa utilizada no modelo Eta e a distribuição dos pontos de massa (H) e de velocidade (V) .....	48
4.5 – Representação esquemática do método da silhueta, utilizada para calcular a altura de cada degrau na topografia do modelo Eta .....	50
4.6 – Seção vertical idealizado da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis na vertical (u, T, Ps) .....	51
4.7 – Vegetação ao redor da torre em Macau – RN .....	57
5.1 – Média da velocidade do vento (m/s) a (a) 10 m de altura e a (b) 50 m de altura para o experimento controle. Os campos médios se referem a previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 .....	60
5.2 – Série temporal da velocidade do vento a 10 m de altura (m/s) simulada para as 24 horas (linha azul) e 48 horas (linha laranja) de integração no experimento controle e observada (linha preta) em Macau .....	61
5.3 – Série temporal da direção do vento a 20,5 m de altura (graus) simulada para as 24 horas (linha azul) e 48 horas (linha laranja) de integração no experimento controle e observada (linha preta) em Macau .....	62
5.4 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta10L38, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos controle e Eta10L38 e (c) detalhe sobre RN .....	63
5.5 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 e controle e (c) detalhe sobre RN I .....	64
5.6 – Diferença entre a topografia representada pelos modelos com 50 e 38 níveis de resolução vertical R .....	64

5.7 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linhas cheias) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos: controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento .....	65
5.8 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 20,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau .....	67
5.9 – Ciclo diário médio das componentes U (linhas sólidas) e V (linhas tracejadas) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau .....	67
5.10 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície (°C) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau .....	68
5.11 – Ciclo diário médio da temperatura do ar (°C) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau .....	68
5.12 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para (a) Canto do Amaro, (b) Minhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento .....	70
5.13 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelo experimento controle para São Luís – MA .....	70
5.14 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 CZ=0,7, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7 e controle e (c) detalhe sobre RN .....	74
5.15 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 CZ=1,0, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 CZ=1,0 e controle e (c) detalhe sobre RN .....	74
5.16 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 $\gamma=50$ , (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 $\gamma=50$ e controle .....	75

5.17 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 50 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 $\gamma=50$ , (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 $\gamma=50$ e controle .....	75
5.18 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento .....	77
5.19 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 20,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para Macau .....	77
5.20 – Ciclo diário médio das componentes U (linhas sólidas) e V (linhas tracejadas) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para Macau .....	78
5.21 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para Macau .....	78
5.22 – Ciclo diário médio da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para Macau .....	79
5.23 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50 $\gamma=50$ (linha cinza) para (a) Canto do Amaro, (b) Minhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento .....	80
5.24 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 FH=0,5, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 FH=0,5 e controle e (c) detalhe sobre RN .....	83
5.25 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 FH=1,5, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 FH=1,5 e controle e (c) detalhe sobre RN .....	84

5.26 – Temperatura potencial (K) em Macau, prevista pelo C1 (linha preta) e pelo Eta5L38 FH=0,5 (linha vermelha) e pelo Eta5L38 FH=1,5 (linha verde), para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 .....	84
5.27 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 vegmod, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle .....	85
5.28 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 50 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 vegmod, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle .....	86
5.29 – Diferença entre a magnitude do vento médio a (a) 10 m e (b) 50 m de altura as 1500 GMT dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle .....	86
5.30 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.	87
5.31 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 20,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau .....	88
5.32 – Ciclo diário médio das componentes U (linha sólida) e V (linha tracejada) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau .....	89
5.33 – Ciclo diário médio da temperatura do solo (°C) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau .....	89
5.34 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície (°C) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau .....	90
5.35 – Ciclo diário médio da temperatura do ar (°C) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau .....	90

5.36 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para (a) Canto do Amaro, (b) Minhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento .....



## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
4.1 – Instrumentos instalados na torre micrometeorológica do experimento ...	45
4.2 – Características dos experimentos numéricos .....	58
5.1 – Medidas estatísticas dos experimentos controle, Eta10L38 e Eta5L50 com relação à observação em Macau-RN .....	68
5.2 – Medidas estatísticas dos experimentos controle, Eta10L38 e Eta5L50 com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s) .....	72
5.3 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7, Eta5L50 CZ=1,0 e $\gamma=50$ com relação à observação em Macau-RN .....	79
5.4 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7, CZ=1,0 e $\gamma=50$ com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s) .....	82
5.5 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L38, Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod com relação à observação em Macau-RN .....	91
5.6 – Medidas estatísticas dos Eta5L38, Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s) .....	93



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

$c_{p,d}$	Calor específico do ar seco
$C_d$	Coefficiente de troca à superfície para o momentum
$C_e$	Coefficiente de troca à superfície para o vapor d'água
$C_h$	Coefficiente de troca a superfície para o calor
$CZ$	Constante Zilitinkevich
$d$	Altura de deslocamento do plano-zero
$D_h$	Coefficiente de difusão térmica molecular
$g$	Gravidade
$k$	Constante de Von Karman
$k_d$	Condutividade térmica do ar seco
$L$	Comprimento de Monin Obukhov
$p_s$	Pressão da fronteira inferior do modelo
$p_{ref}$	Pressão de referência
$p_T$	Pressão no topo do modelo
$R$	Razão entre os coeficientes de troca à superfície do momentum e calor
$Re^*$	Número de Reynolds da rugosidade
$R_{FC}$	Gradiente do número de Richardson crítico
$R_{ib}$	Número de Richardson volumétrico
$R_{ic}$	Fluxo do número de Richardson
$t$	Tempo
$TKE$	Energia cinética turbulenta
$u$	Velocidade zonal
$u^*$	Velocidade de fricção
$v$	Velocidade meridional
$z$	Coordenada espacial vertical
$z_{0h}$	Comprimento de rugosidade para o calor
$z_{0m}$	Comprimento de rugosidade para o momentum
$w'$	Perturbação da velocidade vertical
$\phi_T$	Gradiente adimensional de velocidade para condições neutras

$\eta$	Coordenada vertical do modelo
$\theta$	Temperatura potencial
$\theta_{av}$	Temperatura potencial virtual em uma altura de referência
$\theta_{sv}$	Temperatura potencial virtual a superfície
$\theta_v$	Temperatura potencial virtual
$\theta_*$	Temperatura escalar
$\rho$	Densidade
$\tau_0$	Tensão de cisalhamento superficial
$\zeta$	Parâmetro de estabilidade
$\Psi_m$	Função de estabilidade para o momentum
$\Psi_h$	Função de estabilidade para o calor
$\gamma$	Parâmetro de estabilidade de Paulson

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AL	Atmosfera Livre
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLP	Camada Limite Planetária
CLS	Camada Limite Superficial
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CT	Camada de Transição
FIFE	First ISLSCP Field Experiment
GMT	Greenwich Mean Time
HAPEX	Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in Sahel
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
RMSE	Root Mean Square Error
SCI	Subcamada Interfacial ou Viscosa
TSMO	Teoria da Similaridade de Monin Obukhov



## 1 INTRODUÇÃO

A previsão de vento é uma informação essencial em diversos setores da sociedade: no setor elétrico auxilia o planejamento minucioso da produção de energia eólica; na aviação, é necessário nas operações aeronáuticas, na decolagem e nas aproximações para pouso; em diversos esportes e competições ao ar livre necessita-se de previsões do vento para obter melhor desempenho.

O desenvolvimento de modelos de mesoescala com parametrizações físicas avançadas vem, cada vez mais, tornando as previsões de vento mais acuradas. Entretanto, estes modelos ainda apresentam alguma deficiência com relação a tais previsões que devem ser estudadas.

As previsões de vento em baixos níveis a partir de modelos de mesoescala apresentam deficiências associadas com a representação inadequada da superfície e com as parametrizações da camada limite planetária e superficial. Nesta última camada são encontrados diversos problemas dinâmicos. Em primeiro lugar, a proximidade da superfície implica que o vento de superfície é normalmente turbulento. Outro fator significativo é a natureza extremamente variável da superfície, o que torna muito difícil qualquer especificação matemática escrita para o contorno inferior. Deste modo, constitui um tema de grande interesse científico estudar e compreender melhor os esquemas de parametrização de camada limite superficial para melhorar a previsão do campo de vento e da circulação atmosférica próxima à superfície alcançando assim previsões numéricas de tempo mais confiáveis.

A comparação de campos de vento, temperatura, etc. de modelos numéricos com observações é crucial para a verificação e aceitação dos esquemas de parametrização física utilizados nos modelos (Garratt e Pielke, 1989). Entretanto, a rede de estações em algumas regiões não é densa o suficiente para permitir uma comparação correta. Portanto, diversos experimentos de campo têm sido realizados com o objetivo de extrair, através das observações, as características e os parâmetros descritores da atmosfera, especialmente da camada limite planetária, de uma certa localidade.

A velocidade e a direção do vento variam no tempo e no espaço, em virtude da situação geográfica do local, da rugosidade da superfície, do relevo, da vegetação e do clima (Vendramini, 1986). A região de estudo é o Nordeste do Brasil que é afetado pela brisa marítima nas áreas costeiras e pela Zona de Convergência Intertropical. Nesta região predominam os ventos alísios em baixos níveis, que são ventos fortes e persistentes. Segundo Hastenrath e Lamb (1977), a atuação da alta subtropical é mais intensa no mês de julho aumentando a intensidade da Zona de Convergência Intertropical nesta região. Estes fenômenos têm uma forte influência na evolução temporal e espacial da velocidade do vento, assim o modelo a ser utilizado deve apresentar uma resolução horizontal e temporal suficiente para representá-los. Além disso, o modelo deve possuir sensibilidade adequada para representar os processos da camada superficial.

Ao longo dos últimos anos o modelo Eta tem sido aplicado para previsão numérica de tempo operacional e para investigações climáticas (Chou et al., 2000; Tanajura e Shukla, 2000; Chou et al., 2002), além de estar sendo usado nos mais variados estudos, como por exemplo, no estudo do impacto do uso de diferentes parametrizações nos resultados e sua influência em variáveis meteorológicas específicas (Chen et al., 1997; Yucel et al., 1998).

## **1.1 Objetivo**

O objetivo principal do presente trabalho é aprimorar as previsões da intensidade e da direção de vento à superfície, a partir de mudanças nos parâmetros nos esquemas de parametrização da camada limite superficial.

Para atingir a meta principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever o regime de ventos na camada limite superficial a partir de observações realizadas em campanhas experimentais.
- Realizar testes de sensibilidade com parâmetros no esquema de camada limite superficial do modelo Eta.

- Avaliar o desempenho do modelo Eta com diferentes resoluções e com diferentes parâmetros da camada limite superficial.

Neste contexto, através da presente dissertação, pretende-se colaborar com subsídios para uma melhoria da previsão numérica do tempo, em particular, do campo de vento próximo à superfície. No capítulo 2 desse trabalho é abordada a parte teórica que envolve a estrutura e o desenvolvimento da camada limite planetária. A revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 3. O capítulo 4 contém uma descrição dos dados e dos locais onde foram medidos, além da metodologia na qual consta uma breve descrição do modelo Eta e uma descrição dos experimentos numéricos realizados. No capítulo 5 são apresentados os resultados de comparações entre os experimentos numéricos e os dados observados. Finalmente, o capítulo 6 sumariza as principais conclusões e são apresentadas algumas sugestões para investigações futuras.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Camada Limite Atmosférica**

Na atmosfera, a troposfera possui características físicas e químicas próprias, sendo que, nos quilômetros mais baixos essas características são diretamente influenciadas pela superfície subjacente. A troposfera, região próxima à superfície, pode ser dividida em duas partes: Camada Limite Atmosférica (CLA) ou Camada Limite Planetária (CLP), com características turbulentas, e a Atmosfera Livre (AL), que é dominada por processos associados a sistemas de larga escala.

A camada limite atmosférica é a camada de ar situada logo acima da superfície terrestre e que, assim, sofre mais diretamente a sua influência, via aquecimento, resfriamento e atrito, e responde às forçantes superficiais em escalas temporais menores do que uma hora ou menos (Stull, 1988). Essas forçantes incluem o arrasto devido ao atrito, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e topografia. A espessura da CLA é variável no tempo e espaço, variando de centenas de metros a alguns quilômetros e depende da intensidade do vento, topografia, taxa de aquecimento ou resfriamento da superfície, da advecção horizontal de umidade e calor, etc. (Stull, 1988). A determinação da altura da CLA é um componente essencial no estudo da turbulência em modelos de previsão de tempo e circulação geral da atmosfera.

A natureza geral da CLA é ser mais fina em regiões de alta pressão que em regiões de baixa pressão. As profundidades mais rasas estão frequentemente associadas com regiões de céu claro. No caso da presença de nuvens, essas são normalmente nuvens de bom tempo, cumulus ou stratocumulus. A estrutura vertical da CLA apresenta características distintas e pode ser dividida em várias partes:

#### **2.1.1 Subcamada Laminar ou Viscosa (SCI)**

É a camada que se encontra logo acima da superfície (nos primeiros milímetros), sendo que sua espessura varia dependendo do tipo de superfície. Caracteriza-se por apresentar movimentos turbulentos verticais praticamente inexistentes (velocidade vertical nula),

por possuir grandes valores de gradiente de velocidade e pela existência da tensão de cisalhamento somente devido à viscosidade molecular.

### **2.1.2 Camada Limite Superficial (CLS)**

Esta camada está contida nos primeiros metros da atmosfera, a partir da SCI até cerca de 20 a 100 m, com pouca influência da viscosidade. Sua profundidade depende principalmente das características da superfície terrestre e da estabilidade atmosférica. Esta camada apresenta fluxos verticais turbulentos de calor e de momentum relativamente quase constantes com a altura e é, portanto, freqüentemente chamada de camada de fluxos constantes. Os fluxos turbulentos e a fricção apresentam pouca variação com a altura, considerando-se, em média, um decréscimo de 10% de sua magnitude no topo da camada (Stull, 1988). Grandes variações com a altura da temperatura, umidade, cisalhamento do vento etc., fazem com que as trocas turbulentas mais intensas de momentum, calor e umidade também aconteçam nessa camada (Arya, 1988). De acordo com o tipo de cobertura da superfície, esta camada pode apresentar estruturas diferentes. A CLS pode ser subdividida em quatro camadas: inercial, de rugosidade, do dossel e a sub-dossel. A camada inercial ocupa a região externa da CLS e as características são bem descritas pela teoria da similaridade de Monin-Obukov. A camada de rugosidade está localizada imediatamente acima da superfície definida pelo topo da cobertura do solo (vegetação, edifícios, etc.) e é onde a turbulência é determinada pela ação individual dos elementos de rugosidade. As demais subcamadas da CLS estão localizadas entre a superfície do solo e o topo da cobertura do solo (Hogstrom, 1996; Mahrt, 2000).

### **2.1.3 Camada Limite Convectiva (CLC)**

A camada limite convectiva estende-se até, aproximadamente, 1-2 km de altura, onde a viscosidade molecular deixa de atuar. Caracteriza-se também pela presença de perfis verticais aproximadamente constantes da temperatura potencial e, em alguns casos, do campo de vento. A CLC apresenta também uma forte mistura vertical com turbulência intensa. As principais fontes convectivas responsáveis pela mistura desta camada são correntes ascendentes de ar quente (térmicas), que se deslocam a partir da superfície, e

as de ar frio que descem dos topos das nuvens convectivas (Stull, 1988). O topo desta camada é absolutamente estável e age como um tampão para a subida das térmicas, impedindo o domínio da turbulência.

#### **2.1.4 Camada de Transição (CT)**

A camada de transição encontra-se logo acima da CLC e localiza-se em uma região entre o fluxo perturbado da CLC e o escoamento homogêneo da atmosfera livre. Também é conhecida como Camada de Inversão Térmica e caracteriza-se por apresentar intensos gradientes verticais de temperatura e umidade específica, pois é uma região de transição entre a camada de mistura e a atmosfera livre. Essa camada apresenta uma pequena extensão vertical. Fitzjarrald e Garstang (1981) encontraram que, sobre regiões oceânicas, a espessura desta camada variava entre 50 a 100m e em regiões continentais ela pode chegar a 200m. Esta camada pode atuar como um contorno superior para as térmicas ascendentes geradas à superfície, restringindo, então, a extensão vertical da região de existência da turbulência (Eliana, 2003).

### **2.2 Teoria da Similaridade**

A teoria da similaridade vem sendo adotada desde a década de 60 como instrumento de análise micrometeorológica. A teoria da similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) foi desenvolvida para uma camada limite superficial estável sobre terrenos horizontalmente homogêneos (Monin e Obukhov, 1954). Segundo Monin e Yaglom (1971), essa teoria busca encontrar funções de validade universal para diversas grandezas micrometeorológicas médias da CLS e para os diversos momentos estatísticos associados às suas flutuações turbulentas. Quando estas funções são conhecidas, elas podem ser usadas como parte de esquemas de parametrização.

De acordo com essa teoria, a estrutura da turbulência é determinada pelo stress superficial cinemático  $\frac{\tau_0}{\rho}$ , o parâmetro de empuxo  $\frac{g}{\langle \theta \rangle}$ , o fluxo de calor à superfície  $\langle w' \theta' \rangle_0$ , e a altura acima da superfície  $z$ , em que  $\tau_0$  é o tensão de cisalhamento superficial,  $\rho$  é a massa específica do ar,  $g$  é aceleração devido a

gravidade,  $w'$  é a perturbação da velocidade vertical,  $\theta'$  é a temperatura de flutuação e  $\langle \rangle$  denota a média no tempo, o índice  $(_0)$  se refere à camada superficial e  $(\bar{\quad})$  a média da perturbação sobre um incremento de tempo finito. Esses parâmetros são necessários para definir a velocidade de fricção  $u_*$ , a temperatura escalar  $\theta_*$  e o comprimento de Monin-Obukhov  $L$ . Estes são definidos respectivamente como:

$$u_* = \left( \frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} = \sqrt[4]{\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}} \quad (2.1)$$

$$\theta_* = \frac{-\langle w'\theta' \rangle_0}{u_*} \quad (2.2)$$

$$L = \frac{-u_* \langle \theta \rangle}{k g \langle w'\theta' \rangle_0} \quad (2.3)$$

em que,  $u'$  é a velocidade longitudinal de flutuação,  $w'$  é a perturbação da velocidade vertical e  $k$  é a constante de Von Karman que a partir de dados observacionais é estimada em  $k = 0,4 \pm 0,01$  (Hicks, 1981).

O módulo de  $L$  fornece a espessura da camada onde os efeitos de fricção e cisalhamento são importantes na CLS. O comprimento de Monin-Obukhov é também uma medida da estabilidade,  $L > 0$  significa condições estáveis e  $L < 0$  indica instabilidade. O parâmetro de estabilidade  $\zeta$  de Monin-Obukhov (Monin e Yaglom, 1971), descrito na Eq. 2.4, tem papel fundamental na teoria da similaridade para a camada limite superficial da atmosfera e tem efeito de classificação da condição de estabilidade atmosférica. Este parâmetro é definido como:

$$\zeta = z/L \quad (2.4)$$

em que,  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov definido na Equação 2.3.

Segundo Thom et al. (1975), para superfícies com elementos de rugosidade elevados, o parâmetro de estabilidade é definido como:

$$\zeta = (z - d) / L \quad (2.5)$$

em que,  $d$  é a altura de deslocamento do plano-zero. Em termos do sinal de  $\zeta$ , pode-se ter as seguintes condições atmosféricas:

- i)  $\zeta = 0$ , tem-se uma condição de estratificação neutra;
- ii)  $\zeta < 0$ , a condição é instável. Se  $\zeta < -1$  tem-se o estágio de convecção livre;
- iii)  $\zeta > 0$ , a condição é estável. Se  $\zeta$  for elevado o suficiente para atingir um valor crítico, então tem-se um regime de transição do escoamento turbulento para outro laminar.

### 2.3 Comprimento de Rugosidade da Superfície

Os comprimentos de rugosidade da superfície para o momentum e calor são freqüentemente utilizados na parametrização da camada limite superficial. O comprimento de rugosidade para o momentum ( $z_{0m}$ ), ou rugosidade aerodinâmica como também é chamado, é a altura acima da superfície onde a velocidade do vento é igual a zero, utilizando o perfil logaritmo da velocidade do vento versus a altitude. Isto fornece uma medida da turbulência vertical que ocorre quando um vento horizontal flui sobre uma superfície rugosa. Quanto maior  $z_{0m}$ , maior será a turbulência devido ao elemento de rugosidade. Para uma superfície completamente lisa, o comprimento de rugosidade é zero, e a turbulência mecânica é minimizada. Para superfícies com elementos de rugosidade escassos,  $z_{0m}$  é a altura acima da base do elemento de rugosidade (Brutsaert, 1982).

A Figura 2.1 descreve um método para estimar  $z_{0m}$  a partir de um perfil de velocidade do vento observado. O comprimento de rugosidade é calculado tomando medidas de vento em várias alturas em uma dada localidade. Os dados são plotados como logaritmo natural da altura versus a velocidade do vento. As velocidades do vento são extrapoladas até o vento nulo cruzando com o eixo das alturas. A altura em que isto ocorre é o comprimento de rugosidade para o momentum ( $z_{0m}$ ).

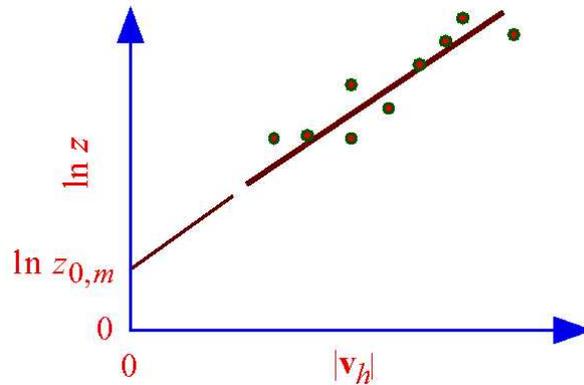


Figura 2.1 – Logaritmo natural da altura versus velocidade do vento.  
 Fonte: Adaptada de Jacobson (2005)

O comprimento de rugosidade para o momentum caracteriza a habilidade dos elementos de superfície de absorver momentum. O comprimento de rugosidade para o calor ( $z_{0h}$ ) caracteriza a habilidade dos elementos da superfície de absorver calor, relativo à sua habilidade de absorver momentum (Kaimal e Finnigan, 1994). Brutsaert (1982) fornece parametrizações de  $z_{0h}$  baseados em medidas sobre diferentes terrenos. Uma expressão mais geral para o comprimento de rugosidade para o calor é:

$$z_{0h} = \frac{D_h}{k u_*} \quad (2.6)$$

em que,  $D_h$  é o coeficiente de difusão térmica molecular. O coeficiente de difusão térmica molecular por sua vez é definido como:

$$D_h = \frac{k_d}{\rho_a c_{p,d}} \quad (2.7)$$

em que,  $k_d$  é a condutividade térmica do ar seco,  $\rho_a$  é a massa específica do ar e  $c_{p,d}$  é o calor específico do ar seco a pressão constante.

Para superfícies muito suaves,  $z_{0m}$  é ligeiramente menor que  $z_{0h}$ . Em superfícies rugosas, os elementos de superfície são mais eficientes em absorver momentum que

calor. A relação entre  $z_{0m}$  e  $z_{0h}$  para uma série de superfícies naturais foi discutida por Garratt e Hicks (1973), com dados adicionais apresentados em Garratt e Francey (1978).



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para prever parâmetros importantes como temperatura da superfície, vento, altura da camada limite, etc., necessita-se de uma boa representação da primeira camada do modelo. Esta camada, próxima ao solo, responde rapidamente a variações nas propriedades da superfície e por isso sua parametrização necessita de um certo grau de complexidade. Neste capítulo são abordados alguns trabalhos com testes de parâmetros no esquema de camada superficial.

A parametrização de camada superficial fornece os coeficientes de troca à superfície para momentum ( $C_d$ ), calor ( $C_h$ ) e vapor d'água ( $C_e$ ), usados para determinar os fluxos dessas quantidades entre a superfície e a atmosfera. Baseado em observações, as funções de estabilidade são formuladas para obter os coeficientes de troca à superfície (Paulson, 1970). Muitos pesquisadores têm sugerido que, na parametrização da camada superficial, o comprimento de rugosidade para o calor ( $z_{0h}$ ) deve ser diferente do comprimento de rugosidade para o momentum ( $z_{0m}$ ) (Brutsaert, 1982; Garratt, 1992; Sun e Mahrt, 1995; Mahrt, 1996).

Enquanto a idéia de diferenciação de  $z_{0h}$  e  $z_{0m}$  é suportada por diversos estudos observacionais, por outro lado, especificar  $z_{0h}$  em modelos numéricos aplicados a escala continental é mais uma dificuldade. Diversos autores sugeriram simples aproximações assumindo  $z_{0h}$  como sendo uma fração fixa de  $z_{0m}$ .

Garratt (1992) sugeriu  $z_{0m}/z_{0h} \approx e^2$  para aplicações práticas. Baseados em testes unidimensionais de acordo com observações em diferentes sítios, Beljaars e Viterbo (1994) e Braud et al. (1993), através de estudos com simulações em um modelo solo-superfície unidimensional e desacoplado, mostraram que usando um valor de  $z_{0h}$  menor que  $z_{0m}$  pode-se melhorar a simulação dos fluxos de superfície e a temperatura à superfície. Segundo eles a razão  $z_{0m}/z_{0h}$  deveria ser prescrita como uma função da vegetação e do tipo de solo.

Entretanto, outros autores como, por exemplo, Kubota e Sugita (1994) e Zilitinkevitch (1995) propuseram uma razão  $z_{0m}/z_{0h}$  dependente do fluxo de calor ou do número de

Reynolds. Zilitinkevich (1995) propôs a seguinte formulação dependente do número de Reynolds escrita como:

$$\frac{z_{0m}}{z_{0h}} = \exp(k CZ \sqrt{Re^*}) \quad (3.1)$$

$$Re^* = \frac{u_0^* z_{0m}}{\nu} \quad (3.2)$$

em que,  $k$  é a constante de Von Karman,  $\nu$  é viscosidade molecular cinemática,  $Re^*$  é o número de Reynolds do escoamento,  $u_0^*$  é a velocidade de fricção à superfície e  $CZ$  é uma constante empírica que modula quão forte a razão  $z_{0m}/z_{0h}$  depende do  $Re^*$ .

Chen et al. (1997) utilizando a formulação de Zilitinkevich (Eq. 3.1), descrita acima, realizaram testes de sensibilidade do modelo Eta com valores diferentes para a constante CZ (0,01; 0,1 e 1) comparando com dados observacionais do experimento FIFE (First ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) Field Experiment) no Kansas-E.U.A. Eles observaram que para CZ=1, a simulação reduziu o fluxo de calor latente máximo cerca de  $100 \text{ Wm}^{-2}$  e aumentou a temperatura à superfície em  $10^\circ\text{C}$ , quando comparado com CZ=0,1. O aumento da temperatura à superfície ocorre devido ao decréscimo de  $z_{0h}$  e  $C_h$ , a superfície da terra é mais desacoplada da atmosfera e a temperatura à superfície é aumentada cada vez mais como resultado do balanço entre a radiação líquida à superfície e o fluxo de calor no solo. Quando os autores testaram CZ=0,01 encontraram resultados semelhantes quando se assume  $z_{0m} = z_{0h}$ .

Marshall et al. (2003), propuseram um estudo para avaliar os impactos sobre o ciclo diário da camada limite atmosférica modelada, baseado em dados do Oklahoma Mesonet. As saídas do modelo Eta foram avaliadas a partir de observações de campo próximo à superfície e abaixo da superfície. Comparando-se o modelo com os perfis verticais termodinâmicos observados, foram confirmados os resultados de Chen et al. (1997). Além disso, os autores observaram que com as implementações dos esquemas de superfície no modelo Eta, simulações mais realísticas das interações entre a

superfície e atmosfera foram obtidas, especialmente na representação do ciclo diário da CLA.

Três esquemas de parametrizações de camada superficial têm sido bastante usados em modelos de circulação geral e de mesoescala. O primeiro é um esquema implícito baseado no comprimento de Monin-Obukhov (Paulson, 1970; Garratt, 1992). O segundo esquema também se baseia no comprimento de Monin-Obukhov, porém derivado da formulação de Mellor-Yamada nível 2 (Lobocki, 1993). Por último, um esquema explícito baseado no número de Richardson totalizador que foi primeiramente desenvolvido por Louis (1979) e então modificado por Mahrt (1987) para um caso estável e por Holtslag e Beljaars (1989) para um caso instável.

Chen et al. (1997) testaram esses três esquemas de parametrização no esquema de superfície do modelo Eta do NCEP, confrontando com observações de longo prazo dos experimentos FIFE e HAPEX. Baseado nestas simulações, em 1996, implementaram operacionalmente o esquema de Paulson no modelo Eta do NCEP com as formulações de Zilitinkevich para especificar o comprimento de rugosidade para o calor.

Estudos importantes têm tentado avaliar o desempenho do modelo Eta nas previsões de variáveis próximas à superfície. Yucel et al. (1998) realizaram comparações entre simulações com o modelo Eta e duas redes de observações localizadas em Oklahoma e sul do Arizona nos Estados Unidos. Eles encontraram que o erro do modelo poderia estar relacionado à discrepância entre a elevação assumida pelo modelo e a real elevação em que às observações foram feitas.

Chou et al. (2007) realizaram comparações entre dados de observações do experimento LBA em Rondônia e previsões dos modelos Eta e MGC (Modelo Global do CPTEC) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para um período seco. Eles perceberam que a temperatura próxima à superfície bem como a radiação de ondas curtas eram superestimadas em ambos os modelos. Entretanto, a relação entre os fluxos de calor latente e sensível foram melhor representados pelo modelo Eta.



## **4 DADOS E METODOLOGIA**

Neste capítulo faz-se uma descrição dos dados utilizados para verificação dos resultados do modelo Eta, a descrição do modelo utilizado e também dos experimentos numéricos que foram realizados com o modelo.

### **4.1 Dados Observacionais**

Os dados utilizados neste trabalho foram medidos por anemômetros localizados em cidades da região Nordeste do Brasil. Sendo cinco torres anemométricas permanentes e uma torre montada apenas durante o experimento de campo realizado na cidade de Macau no Rio Grande do Norte. Nesta última torre, foram coletadas diversas variáveis meteorológicas de forma intensiva com o objetivo de caracterizar, pelo menos para essa região, a camada limite superficial.

#### **4.1.1 Torres Anemométricas**

Foram utilizados dados de quatro sítios observacionais de responsabilidade da PETROBRAS e cedidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), localizados nas cidades de Pacatuba, em Sergipe, Canto Amaro, Macau e Minhoto, no Rio Grande do Norte. As torres de medição das velocidades do vento nestas localidades possuem medições em alturas próximas a 50 m que podem ser comparadas com os ventos de 50 m obtidos dos experimentos numéricos, o que justifica a utilização desses dados.

Em Alcântara no Maranhão foram utilizados dados da torre anemométrica do Centro de Lançamento de Alcântara. Esta torre possui altura de 70 m e sensores de velocidade (tipo *propeller*) instalados em seis níveis, nas alturas de 6,0 m, 10,0 m, 16,3 m, 28,5 m, 43,0 m e 70,0 m. A torre está a 200 m de distância de uma falésia de aproximadamente 40 m de altura. A vegetação na região do CLA é característica de região de restinga, com altura média em torno de 2,0 - 3,0 metros (Fisch, 1999).

Foram selecionadas as séries temporais da média horária da velocidade do vento para o período de 15 a 28 de setembro de 2005, sendo o vento medido a 50 m de altura em

Minhoto e Pacatuba, e a 46, 42 e 43 m de altura nas cidades de Macau, Canto do Amaro e Alcântara, respectivamente. A localização geográfica das cidades pode ser vista na Figura 4.1.

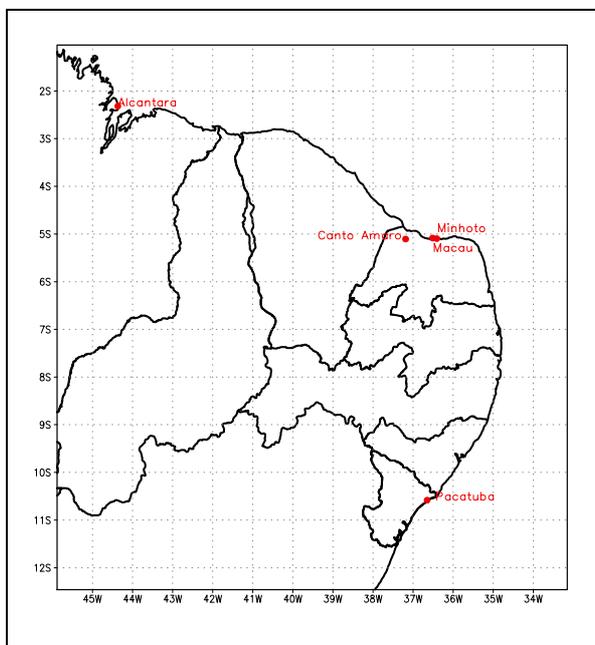


Figura 4.1 – Localização dos cinco sítios observacionais e domínio do Modelo Eta 5km.

#### 4.1.2 Experimento de Campo

Foram realizadas medições micrometeorológicas na cidade de Macau, Rio Grande do Norte, durante o período de 10 a 28 de setembro de 2005. Estas medições fizeram parte de um projeto entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o CEPEL denominado “Desenvolvimento de Ferramentas Integradas para Análise de Inserção de Sistemas Eólicos na Matriz de Geração da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), Incorporando Previsão de Curto Prazo da Velocidade dos Ventos”. Para esse estudo, as medições serviram para extrair as características e parâmetros descritores da atmosfera, especialmente da camada limite planetária da região. Esta caracterização foi necessária para fornecer subsídios a fim de corrigir as previsões do modelo Eta, especialmente de vento. O período da campanha, por ocorrer num período de inverno e mais seco, é caracterizado pela ocorrência de ventos mais intensos. As normais climatológicas do período de 1961 a 1990 para a cidade de Macau mostram valores de

precipitação total mensal igual a 5.1 mm e 68 % de umidade relativa do ar no mês de setembro (Normais Climatológicas, 1992). As variáveis coletadas durante a campanha e utilizadas nesse estudo são apresentadas na Tabela 4.1 e a torre de medições mostrada na Figura 4.2. Os dados foram armazenados em um *datalogger* acoplado a torre e programado para efetuar leituras a cada minuto.

Tabela 4.1 – Instrumentos instalados na torre micrometeorológica do experimento.

	<b>Variáveis</b>	<b>Sensores</b>	<b>Altura (metros)</b>	<b>Unidade</b>
1	Vento	Anemômetro direcional	21,50	m/s
2	Intensidade do Vento	Anemômetro de copo	8,83	m/s
3	Temperatura	Termo-higrômetros	2,05	°C
4	Temperatura da Superfície	Termômetro de IR	10,00 apontado para superfície	°C
5	Temperatura do Solo	Termômetro do solo	-0,10	°C

A torre foi montada em uma região litorânea de dunas suaves típica do norte do Nordeste. O solo é coberto de areia fina e branca típica de dunas com vegetação escassa. A vegetação ao redor da torre micrometeorológica é basicamente composta por plantas de porte baixo do tipo halófilas. Esta vegetação apresenta altura média em torno de 0.7 m. A torre micrometeorológica foi montada com 21,5 metros de altura tendo uma das faces voltada para o norte geográfico.



Figura 4.2 – Torre Micrometeorológica montada na cidade de Macau – RN.

#### 4.2 O Modelo Eta

O Modelo Eta é um modelo de área limitada, que utiliza a coordenada vertical  $\eta$  (Eta), desenvolvida por Mesinger (1984) com o intuito de reduzir os erros que ocorrem nos cálculos de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais, ao longo de uma superfície de coordenada muito inclinada. A coordenada  $\eta$  é fundamentada na normalização da pressão com a vantagem de que, nesta coordenada, as superfícies constantes estão dispostas quase na horizontal, tanto nas áreas planas quanto nas montanhosas. Matematicamente a coordenada  $\eta$  é definida pela expressão:

$$\eta = \left( \frac{p - p_T}{p_s - p_T} \right) \left[ \frac{p_{ref}(z) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right] \quad (4.1)$$

em que,  $p_T$  é a pressão no topo do modelo (25 hPa),  $p_s$  e  $z$  são a pressão e a elevação da fronteira inferior do modelo, respectivamente,  $p_{ref}$  é a pressão de um estado de referência em relação ao nível médio do mar. O primeiro termo do lado direito da

Equação (4.1) é a definição padrão da coordenada sigma e o segundo é o termo de conversão da coordenada vertical sigma na Eta ( $\eta$ ).

Na Figura 4.3 é apresentada a configuração da estrutura vertical do modelo Eta com 38 e 50 camadas na vertical. A pressão no lado esquerdo indica as posições das camadas de acordo com a altura.

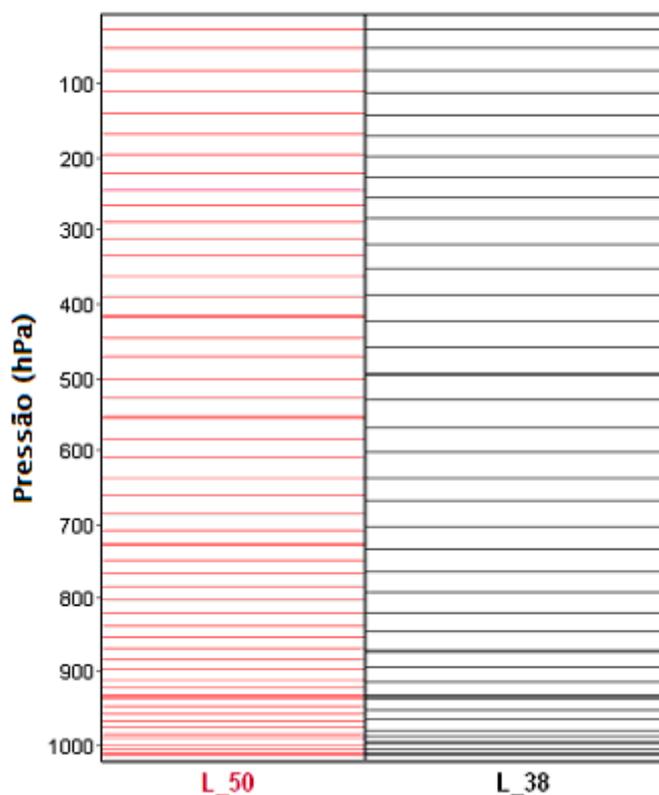


Figura 4.3 – Distribuição vertical e espessura das camadas atmosféricas representadas no modelo Eta com 50 (linhas vermelhas) e 38 níveis (linhas pretas).

A camada mais baixa é configurada com aproximadamente 20 metros dentro da atmosfera padrão. As camadas acima aumentam de espessura gradualmente até a alta troposfera para em seguida começar a reduzir a espessura novamente. O máximo gradiente de espessura próximo à superfície é para obter uma melhor representação da camada limite, enquanto o máximo gradiente de espessura próximo à tropopausa possibilita uma melhor representação da inversão em altos níveis (Black, 1994).

As variáveis prognósticas do modelo são: pressão à superfície, componentes horizontais do vento, temperatura, umidade específica, energia cinética turbulenta e hidrometeoros de nuvens. As variáveis do modelo são distribuídas de acordo com a grade *E* de Arakawa (Figura 4.4). A grade-E de Arakawa é definida sobre um sistema de coordenadas de latitude e longitude que sofreu uma rotação (Arakawa e Lamb,1977). O ângulo de rotação para o novo sistema de coordenadas é determinado pelo ângulo formado entre o Equador e a reta que liga o centro do domínio do modelo ao meridiano de 0°. Os pontos de massa e de velocidade são determinados na camada intermediária entre dois níveis, enquanto que a velocidade vertical é determinada nas interfaces. Cada ponto H define um ponto de massa, enquanto cada ponto V define um ponto de velocidade. A distância (*d*) entre dois pontos equivalentes e adjacentes define a resolução horizontal do modelo.

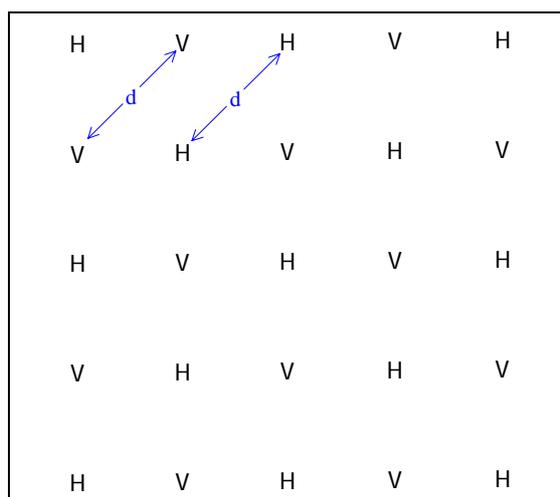


Figura 4.4 – Grade do tipo “E” de Arakawa utilizada no modelo Eta e a distribuição dos pontos de massa (H) e de velocidade (V).

Fonte: Black (1994).

A topografia é representada por degraus discretos cujos topos coincidem exatamente com as interfaces das camadas do modelo. A altura de cada degrau é obtida a partir do método de silhueta, que consiste nos seguintes passos:

- a) Divisão de cada grade horizontal em 16 subgrades, de tal maneira que apresente uma configuração de 4 linhas e 4 colunas;

- b) Cálculo do valor de altura média de cada subgrade obtido a partir dos dados de elevação do terreno com aproximadamente 1 km de resolução (GTOPO30);
- c) Escolha do maior valor de elevação para cada linha e cada coluna da grade resultando em oito valores máximos;
- d) Determinação de uma altura intermediária a partir da média destes oito valores máximos;
- e) A altura final será obtida movendo, para cima ou para baixo, a altura intermediária em direção à interface da camada que estiver mais próxima.

As alturas das interfaces das camadas do modelo são previamente determinadas de acordo com a atmosfera padrão. A distribuição da resolução vertical é especificada de acordo com o modelo. A Figura 4.5 ilustra, em forma de um diagrama esquemático, o método de silhueta para permitir um melhor entendimento.

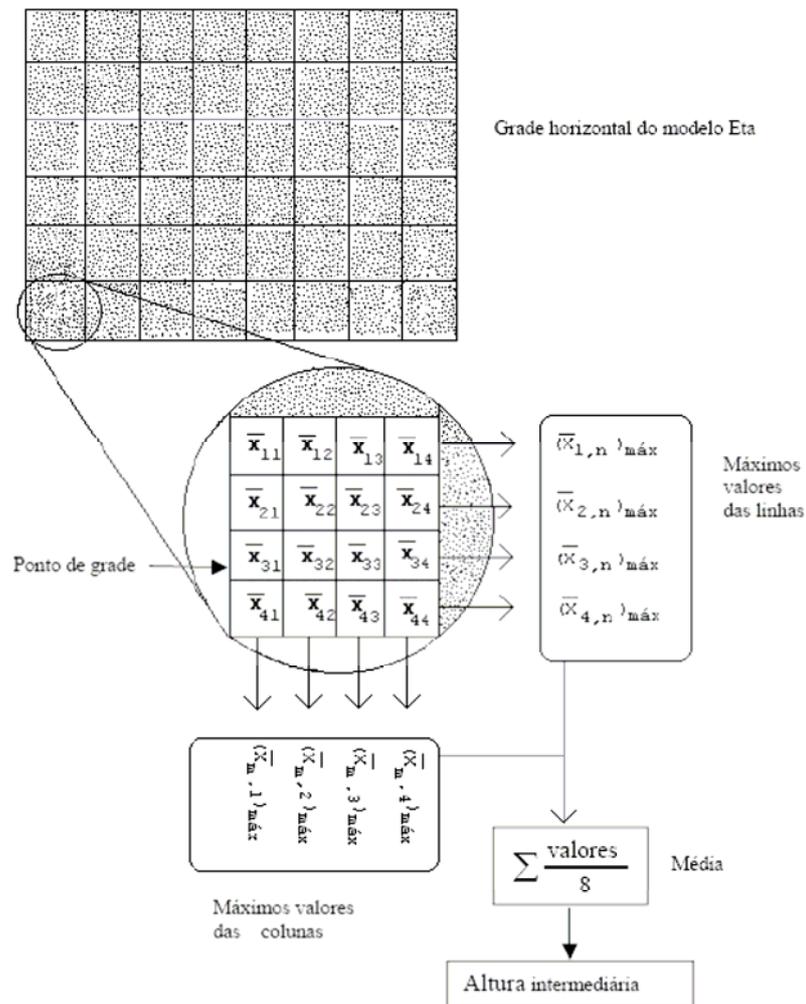


Figura 4.5 – Representação esquemática do método da silhueta, utilizada para calcular a altura de cada degrau na topografia do modelo Eta.  
 Fonte: Rozante (2001).

A Figura 4.6, mostra uma seção vertical em que a topografia e as superfícies  $\eta$  são representadas. As variáveis de massa e do vento horizontal são distribuídas no meio das camadas, enquanto que a velocidade vertical e energia cinética turbulenta são representadas nas interfaces das camadas. Cada degrau possui um ponto de massa no centro e quatro pontos de velocidade localizados nos vértices. Os pontos de ventos que estão situados nos vértices de cada degrau são tidos como zero.

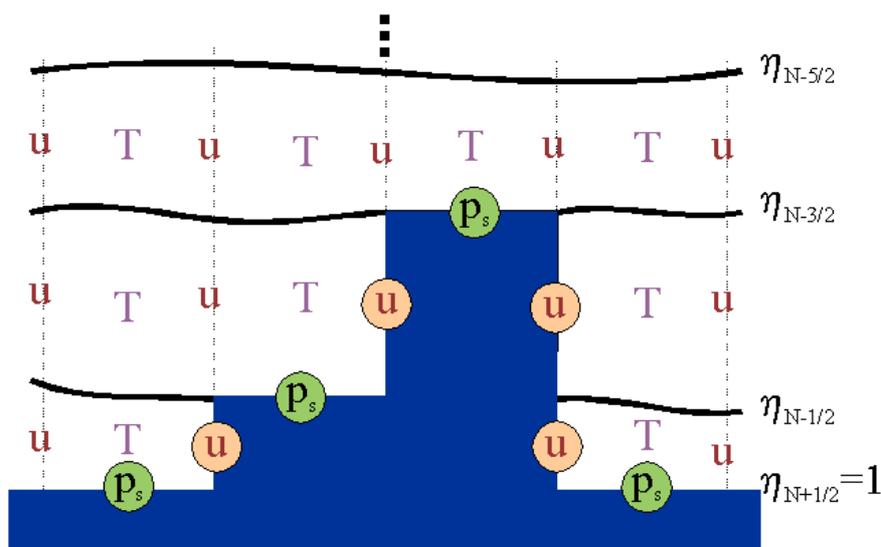


Figura 4.6 – Seção vertical idealizado da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis na vertical (u, T, Ps).

O pacote físico do modelo compreende os esquemas de convecção de Betts-Miller (Betts and Miller, 1986), Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994), ou Kain-Fritsch (Kain, 2004). A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Ferrier (Ferrier et al. 2002). O esquema de radiação inclui tratamento para radiação de onda curta (Lacis e Hansen, 1974) e onda longa (Fels e Schwarzkopf, 1975). O esquema de superfície é o Noah (Mitchell, 2001), com 4 camadas de solo e 13 tipos de cobertura de superfície. A turbulência atmosférica é representada pelo esquema de Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1982). Na camada superficial utiliza-se a teoria de Monin-Obukhov com as funções de estabilidade de Paulson (1970) com comprimentos de rugosidade separados para o momento e calor. A formulação de Zilitinkevich com  $CZ=0,2$  é usada para especificar a razão entre os comprimentos de rugosidade para o momento e calor.

#### 4.2.1 Esquema de Paulson

O esquema de Paulson é detalhado melhor, uma vez que este foi implementado no modelo Eta em substituição as funções de estabilidade de Mellor-Yamada (Lobocki, 1993). Segundo Yucel et al. (1998), a utilização deste esquema melhora os fluxos de momentum, calor e umidade na superfície. Este esquema usa diretamente a teoria da similaridade baseada nas funções de estabilidade para o momentum ( $\psi_m$ ) e para o calor

( $\psi_h$ ). Quando valores de comprimento de rugosidade distintos são definidos para momento e calor, a formulação dos coeficientes de troca de momentum e calor a superfície podem ser expressos em termos de  $\psi_m$  e  $\psi_h$ :

$$C_d = \frac{k^2/R}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right]^2} \quad (4.2)$$

$$C_h = \frac{k^2/R}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right] \left[ \ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right) - \Psi_h\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right]} \quad (4.3)$$

em que,  $z_{0m}$  e  $z_{0h}$  são os comprimentos de rugosidade para momentum e calor respectivamente,  $k$  é a constante de Von Karman,  $z$  é altura de referência dentro da camada superficial (primeiro nível do modelo), e  $R$ , estimado em 1, é a razão entre os coeficientes de momento e calor no limite neutro.  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov definido na Equação 2.3.

O módulo de  $L$  fornece a espessura da camada em que os efeitos de fricção e cisalhamento são importantes na CLS. O comprimento de Monin-Obukhov é também uma medida da estabilidade,  $L > 0$  significa condições estáveis e  $L < 0$  indica instabilidade.

A teoria da similaridade de Monin e Obukhov (1954) tem sido bastante usada como base para descrever a velocidade média do vento e temperatura como função da altura na camada superficial atmosférica. Paulson (1970) integrou um conjunto de expressões analíticas que especificavam o gradiente adimensional da velocidade do vento e o gradiente de temperatura potencial como funções de estabilidade. Baseado em Paulson (1970), Sun e Mahrt (1995) definiram as funções de estabilidade como:

$$\psi_m = \begin{cases} -5\zeta & 0 < \zeta < 1 \\ 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2\tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} & -5 < \zeta < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\psi_h = \begin{cases} -5\zeta & 0 < \zeta < 1 \\ 2\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) & -5 < \zeta < 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\zeta = z/L \quad (4.6)$$

$$x = (1 - \gamma \zeta)^{1/4} \quad (4.7)$$

em que,  $\gamma = 16$ .

### 4.3 Experimentos Numéricos

Os experimentos numéricos foram realizados com o modelo Eta para o prazo de integração de 48 horas para o período de 14 a 28 de setembro de 2005. Cada simulação numérica foi iniciada às 0000 GMT e gerou saídas horárias. O modelo foi configurado para o domínio que abrange grande parte da região Nordeste do Brasil, entre 12,46°S e 1,04°S de latitude e entre 45,88°W e 33,15°W de longitude conforme ilustrado na Figura 4.1. O modelo Eta inclui no seu conjunto de variáveis as componentes meridional e zonal do vento a 10 m de altura e nos níveis padrões de pressão. Contudo, foram inseridos nas subrotinas os cálculos que tratam a camada superficial do modelo para obter o vento a 50 m de altura. Desta forma, o vento a 50 m de altura foi obtido a

partir do conhecimento das condições de estabilidade simuladas pelo modelo e do perfil logarítmico.

Como as primeiras 24 horas de previsão sofrem fortes ajustes dos campos de condição inicial, apenas as previsões horárias de 24 a 48 horas da velocidade do vento a 10 e 50 m de altura de cada simulação numérica foram extraídas de cada caixa de grade que contém os sítios observacionais, com a finalidade de construir a série temporal do período de 14 a 28 de setembro de 2005. As condições iniciais e de contorno necessárias às previsões foram provenientes do modelo Eta 40 km que roda operacionalmente no CPTEC atualizadas de 6 em 6 horas. O ponto central do domínio para o experimento foi  $39^{\circ}$  W de longitude e  $7^{\circ}$  S de latitude.

Neste estudo, os experimentos numéricos realizados foram divididos em quatro fases: a primeira consistiu na realização do experimento controle; a segunda fase foi voltada para experimentos numéricos em que mudanças na resolução horizontal e vertical foram efetuadas; já a terceira fase se concentrou em verificar a sensibilidade do modelo com relação às mudanças em parâmetros referentes ao esquema de camada limite superficial. Finalmente, na quarta fase pretendeu-se estudar o impacto da altura da camada limite e a alteração da vegetação de uma pequena região.

O ajuste do modelo requer realizar testes de sensibilidade com os parâmetros que foram modificados. A sensibilidade de cada parâmetro foi avaliada através da diferença entre o experimento controle e cada experimento numérico. A seguir, apresenta-se detalhadamente cada experimento numérico efetuado.

#### **4.3.1 Experimento Controle**

O experimento controle foi configurado com resolução horizontal de 5 km e 38 níveis de resolução vertical. A altura e a espessura de cada nível podem ser vistas na Figura 4.2. Este conjunto de simulações numéricas serviu como controle para os experimentos que apresentam mesmo número de níveis verticais, mas variam outros parâmetros, e para comparar mudanças na resolução espacial.

### **4.3.2 Mudança na Resolução**

Para testar a mudança na resolução horizontal, o modelo foi configurado com resolução horizontal de 10 km e mantido os 38 níveis verticais. Para isso, os números de pontos de grade nas direções zonal e meridional foram reduzidos pela metade, de forma que o domínio do modelo fosse igual. Assim, o custo computacional é reduzido devido o menor número de pontos de grade e o valor do passo de tempo do modelo que aumenta de 10 para 20 segundos. Espera-se que ao reduzir a resolução haja uma perda de desempenho nas previsões em relação ao experimento com maior resolução espacial, entretanto o resultado desta previsão deve ser avaliado a fim de verificar se o ganho em relação ao tempo da simulação numérica é vantajoso apesar da diminuição da resolução.

Em seguida, foi testado apenas o aumento da resolução vertical, ou seja, o número de níveis verticais passou de 38 para 50 níveis e a resolução horizontal foi mantida em 5 km. O modelo Eta representa a orografia por degraus discretos, cujos topos coincidem com a interface das camadas do modelo. A distribuição da resolução vertical é especificada de acordo com o número de níveis verticais do experimento numérico. O aumento da resolução vertical representa grande aumento da resolução na camada limite com a inserção de mais níveis nesta camada. Algumas variáveis meteorológicas como, por exemplo, precipitação, vento, umidade e temperatura são fortemente afetadas pela altitude. Portanto, o aumento da resolução vertical pode gerar impactos nestas variáveis.

### **4.3.3 Mudança nos Parâmetros de CLS**

Nos experimentos foram avaliados dois parâmetros que afetam o escoamento na camada limite superficial: o comprimento de rugosidade, que relaciona os fluxos mecânicos e os térmicos, conhecido como coeficiente de Zilitinkevich (Eq. 3.1) e a constante  $\gamma$  (gamma) nas funções de estabilidade de Paulson (Eq. 4.8). O primeiro parâmetro permite o ajuste da resistência aerodinâmica da camada limite superficial. O aumento deste coeficiente resulta no aumento da resistência aerodinâmica. O experimento controle tem como padrão no modelo Eta do CPTEC o valor 0,2 para este coeficiente. Os experimentos realizados com este coeficiente foram Eta5L50 CZ=0,7 e Eta5L50 CZ=1,0, ambos com 5 km de resolução horizontal e 50 níveis verticais.

As funções de Paulson indicam o fator de correção dependente da estabilidade atmosférica para o ajuste nos perfis de vento, temperatura e umidade. O parâmetro  $\gamma$  foi baseado na revisão proposta por Dyer (1974) proveniente de observações e podem não ser adequados para a região de estudo. Assim, foi testado o valor 50, enquanto no experimento controle esse valor era igual a 16. Este experimento também foi configurado com 5 km de resolução horizontal e 50 níveis verticais. Na comparação para estes três experimentos numéricos ( $CZ=0,7$ ;  $CZ=1,0$  e  $\gamma=50$ ) utilizou-se o experimento Eta5L50 que tem as mesmas resoluções vertical e horizontal visando assim identificar apenas o impacto relativo à mudança nos parâmetros. A maior resolução vertical refere-se a melhor representação da camada limite planetária.

#### **4.3.4 Mudança na Altura da CLA**

A altura da camada limite está relacionada com o parâmetro FH. A altura da CLA é calculada a partir de um valor mínimo para a TKE na qual o nível onde o TKE atinge este valor é a altura da CLA (Eq. 4.8). Foram realizados dois experimentos com valores de FH iguais a 0,5 e 1,5, ou seja, aumentando e diminuindo respectivamente o valor do FH do experimento controle ( $FH=1,01$  J) em aproximadamente 50 %. Espera-se assim avaliar o impacto do aumento e da redução da altura da CLA no campo de vento a partir do parâmetro FH.

$$TKE_{\min} = 0,2 * FH \quad (4.8)$$

em que,  $TKE_{\min}$  é o limiar para indicar a altura da camada limite atmosférica. Então a redução de FH para 0,5 J, deverá elevar a altura da camada limite atmosférica e o contrário ocorre para o aumento de FH.

#### **4.3.5 Mudança do Tipo de Cobertura do Solo**

Observa-se que o solo na região da torre onde foram instalados os sensores é coberto de areia fina e branca, típica de dunas, com vegetação escassa. A vegetação ao redor da torre é basicamente composta por plantas de porte baixo do tipo halófilas (Figura 4.7). Esta vegetação quando presente apresenta altura média em torno de 0,7 m e parece

apresentar pouca cobertura vegetal. Assim, a mudança no tipo de cobertura de solo no modelo foi realizada através da substituição da vegetação pelo tipo 11 (solo nu) compreendida entre 5,13° e 5,03° de latitude sul e 36,56° e 36,46° de longitude oeste no mapa que contem os dados de vegetação com resolução de 1 km que o modelo utiliza. Espera-se que a mudança na cobertura do solo apresente impactos importantes na amplitude do ciclo de temperatura e vento da região.



Figura 4.7 – Vegetação ao redor da torre em Macau – RN

A Tabela 4.2 sumariza os experimentos numéricos realizados, incluindo a nomenclatura adotada e os parâmetros modificados em cada um deles. Os experimentos descritos nos itens anteriores definem os testes no modelo Eta realizados no presente trabalho.

Tabela 4.2 – Características dos experimentos numéricos.

<b>Nº</b>	<b>Parâmetros Siglas do Exp.</b>	<b>Res. H. (km)</b>	<b>Res V. (níveis)</b>	<b>CZ</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>FH</b>	<b>Mudança Vegetação</b>
1	<b>Eta5L38 (C1)</b>	5	38	0,2	16	1,01	Não
2	<b>Eta10L38</b>	10	38	0,2	16	1,01	Não
3	<b>Eta5L50 (C2)</b>	5	50	0,2	16	1,01	Não
4	<b>Eta5L50 CZ=0,7</b>	5	50	0,7	16	1,01	Não
5	<b>Eta5L50 CZ=1,0</b>	5	50	1,0	16	1,01	Não
6	<b>Eta5L50 <math>\gamma=50</math></b>	5	50	0,2	50	1,01	Não
7	<b>Eta5L38 FH=0,5</b>	5	38	0,2	16	0,50	Não
8	<b>Eta5L38 FH=1,5</b>	5	38	0,2	16	1,50	Não
9	<b>Eta5L38 vegmod</b>	5	38	0,2	16	1,01	Sim

## 5 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados do conjunto de experimentos numéricos citados na Tabela 4.2 do capítulo anterior. Os campos médios da magnitude do vento de cada experimento numérico e suas diferenças com relação ao experimento controle são apresentados com o intuito de determinar as respostas do modelo a cada ajuste. Assim, apresentam-se a sensibilidade do modelo para as mudanças nas resoluções espaciais e nos parâmetros modificados no esquema de camada limite, bem como a alteração no tipo de cobertura de solo para uma pequena área na região do experimento de campo. Estes experimentos têm por objetivo realizar testes de sensibilidade no modelo e verificar os impactos nos ventos próximos à superfície. Para identificar o ciclo diário na região também são mostradas as médias horárias das simulações comparadas com os dados observacionais de cinco sítios e as medidas estatísticas para cada um deles. Inicialmente, são apresentados os campos médios para as simulações numéricas do experimento controle. Os experimentos numéricos foram integrados por 48 horas com condição inicial em cada dia do período de 14 a 28 de setembro de 2005.

### 5.1 O Experimento Controle (C1)

O experimento controle foi produzido na resolução de 5 km e 38 níveis verticais. Este experimento serviu de base para comparação com os experimentos Eta10L38, Eta5L50, Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod. A avaliação dos experimentos se baseou principalmente na comparação da velocidade do vento a 10 e 50 m de altura com observação.

No período da integração, os ventos médios previstos a 10 m de altura foram entre 7 e 8 m/s em áreas costeiras do norte da Região Nordeste (Figura 5.1a). No interior do continente o vento é bastante variável, porém sua magnitude não ultrapassa os 8 m/s. As maiores magnitudes do vento médio a 10 m são encontradas no oceano, principalmente na parte norte do domínio com valores em torno de 10 m/s. A direção média predominante em todo o domínio está compreendida nos quadrantes leste e sul. A Figura 5.1b mostra o campo do vento médio a 50 m de altura, cujas características são semelhantes àsquelas do campo de vento a 10 m, porém, com valores mais elevados.

Como era de se esperar, sobre o oceano a magnitude do vento não varia muito devido à característica de superfície mais homogênea, com quase ausência de rugosidade.

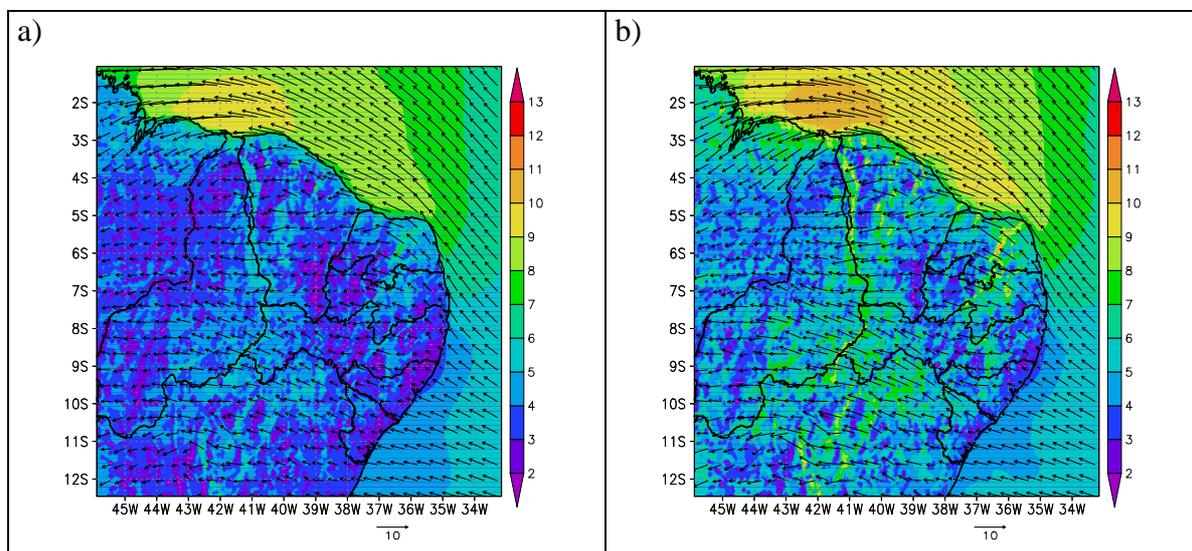


Figura 5.1 – Média da velocidade do vento (m/s) a: (a) 10 m de altura e (b) 50 m de altura para o experimento controle. Os campos médios se referem as previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005.

A série temporal da velocidade do vento a altura de 10 m em Macau, localizada no litoral norte do RN, foi obtida durante o experimento de campo e mostra que a velocidade do vento variou entre 2 e 14 m/s (Figura 5.2). As previsões para o segundo dia de integração do modelo sistematicamente subestimam esta variável no horário de maior intensidade e atrasa em poucas horas o aumento da velocidade do vento nas primeiras horas do dia. Os mínimos são razoavelmente simulados. Para as primeiras 24 horas de integração o modelo tem um erro maior no período da madrugada proveniente das condições iniciais.

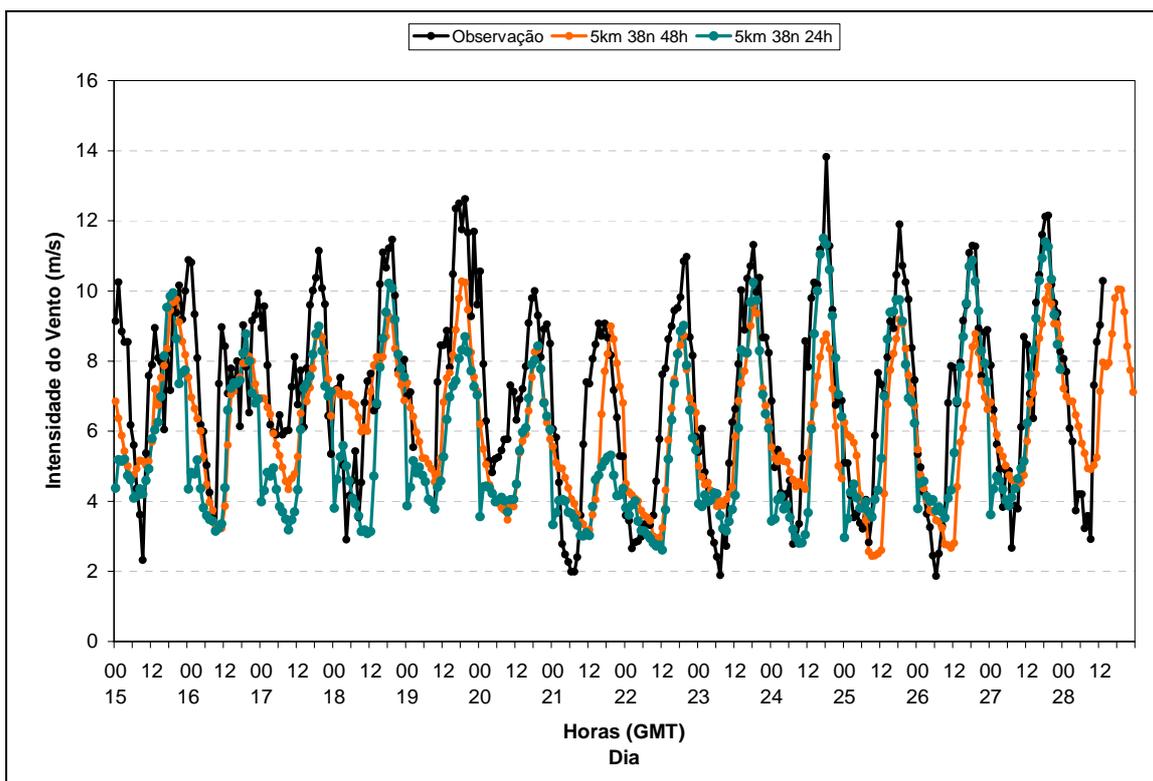


Figura 5.2 – Série temporal da velocidade do vento a 10 m de altura (m/s) simulada para as 24 horas (linha azul) e 48 horas (linha laranja) de integração no experimento controle e observada (linha preta) em Macau.

A Figura 5.3 mostra a série temporal da direção do vento medida na altura de 20,5 m, durante o experimento de campo em Macau. Nota-se que a direção do vento nesta região varia no quadrante leste-sul sendo predominante de sul nos horários da madrugada e manhã e tornando-se de leste nos horários de maior aquecimento diurno. As previsões de 24 e 48 horas do experimento controle apresentam ventos variando nas direções leste-sudeste, portanto, com pouca componente de sul. Nota-se que, assim como ocorre com a velocidade do vento, há um atraso da previsão em relação à observação no horário em que o vento começa a mudar a direção e adquirir a componente de sul. Em geral, as previsões do modelo apresentam direção de aproximadamente  $30^\circ$  a menos que a observação.

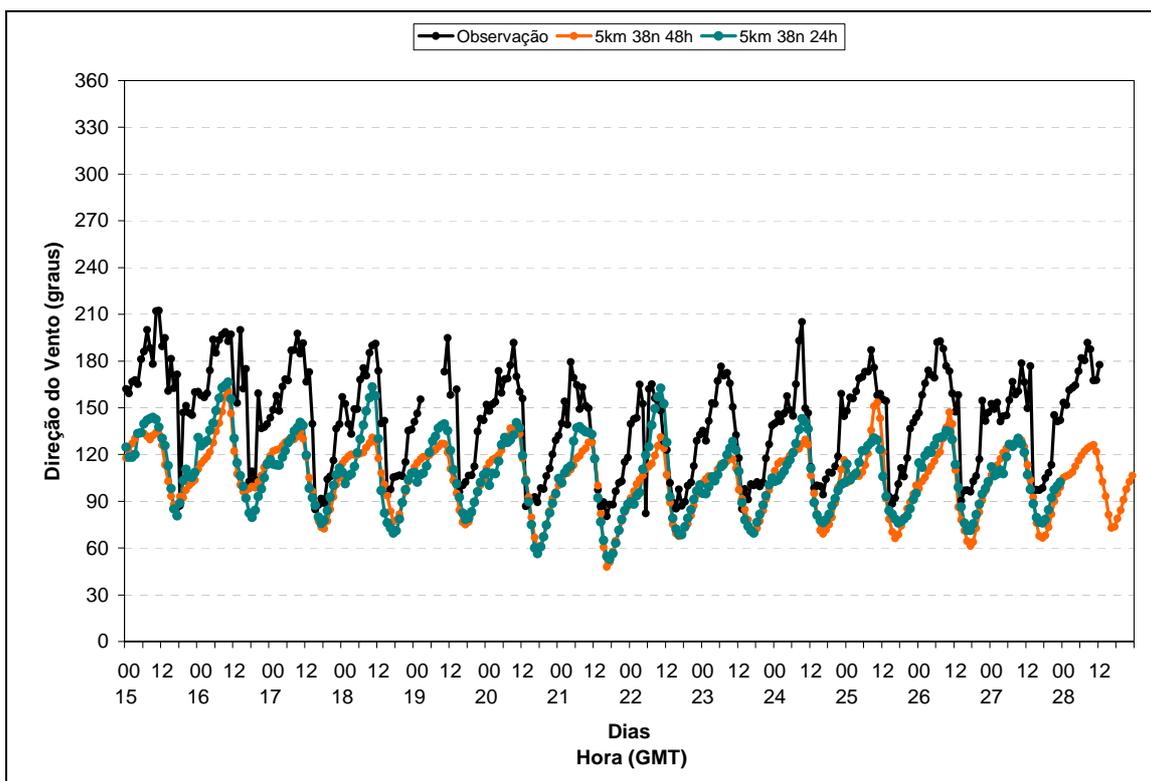


Figura 5.3 – Série temporal da direção do vento a 20,5 m de altura (graus) simulada para as 24 horas (linha azul) e 48 horas (linha laranja) de integração no experimento controle e observada (linha preta) em Macau.

## 5.2 Sensibilidade a Diferentes Resoluções Espaciais

Nesta seção são verificados os impactos nas mudanças na resolução horizontal e vertical do modelo sobre os ventos. O modelo, com baixa resolução horizontal, apresentou diferenças significativas na velocidade do vento em todo o domínio continental e parte do oceano com relação à simulação controle (Figura 5.4). Estas diferenças se devem à representação espacial da topografia, ou seja, no modelo com maior resolução espacial, a topografia é mais detalhada porque é representada por uma caixa de grade de 5 x 5 km contra os 10 x 10 km no modelo de baixa resolução. Portanto, os picos e vales podem ser melhor representados no modelo com maior resolução espacial. Para obter mais detalhes, a Figura 5.4c mostra um detalhe sobre a região norte do Rio Grande do Norte onde se observa que a degradação da resolução horizontal ocasionou diferenças de aproximadamente +1,5 m/s no litoral leste e de até -1,5m/s no oceano e interior do continente.

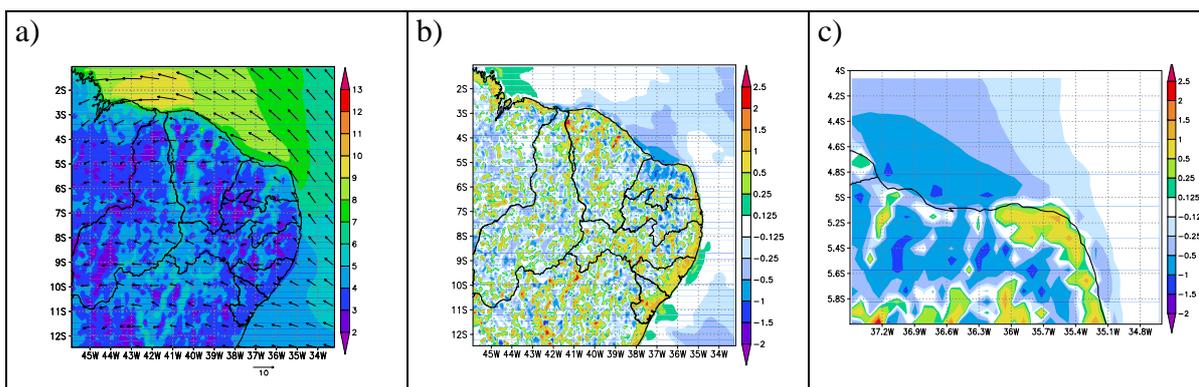


Figura 5.4 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta10L38, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos controle e Eta10L38 e (c) detalhe sobre RN.

No modelo com maior resolução vertical as diferenças são observadas na parte continental onde está presente a topografia, entretanto, essas diferenças tiveram magnitude menor quando comparadas com as diferenças do vento do modelo com menor resolução horizontal (Figura 5.5). As diferenças entre as topografias representadas pelos modelos com 38 e 50 níveis de resolução vertical são apresentadas na Figura 5.6, onde nota-se que a discrepância da velocidade do vento, entre os experimentos, pode estar associada com a diferença de altitude entre as caixas de grade dos experimentos. Assim, percebe-se que as maiores diferenças entre as topografias representadas pelos modelos estão em regiões mais elevadas, principalmente, porque nos níveis mais altos a distância entre um nível do modelo e outro é maior, o que faz com que as diferenças sejam maiores nas altitudes maiores.

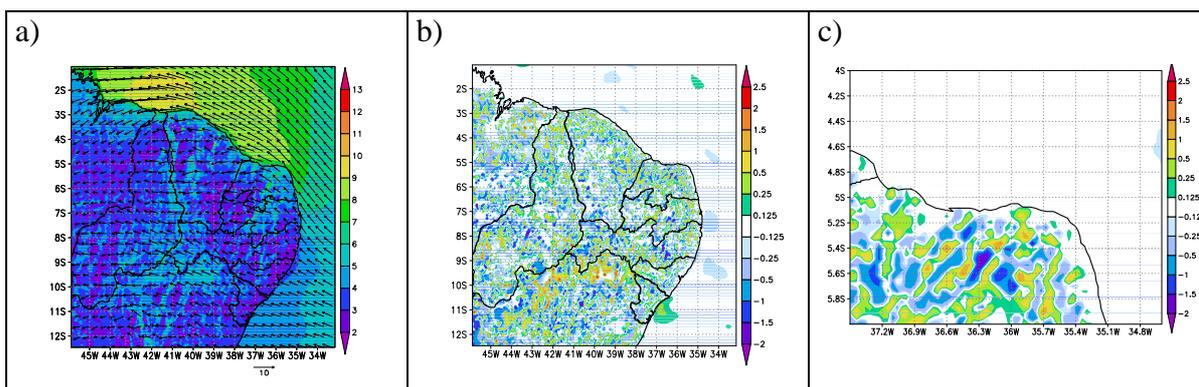


Figura 5.5 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 e controle e (c) detalhe sobre RN.

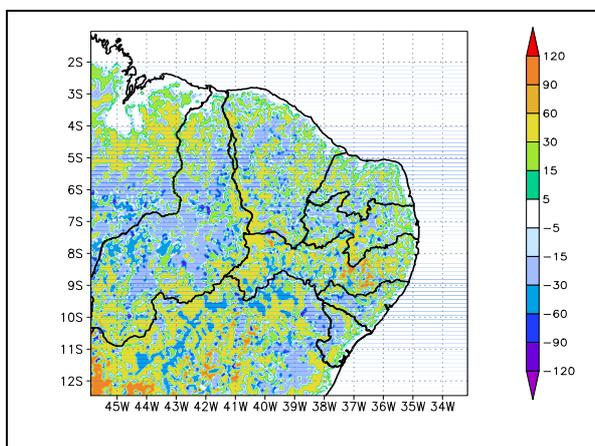


Figura 5.6 – Diferença entre a topografia representada pelos modelos com 50 e 38 níveis de resolução vertical.

As Figuras 5.7a e 5.7b mostram o ciclo diário médio do vento a 10 e a 50 m de altura, respectivamente, das observações e dos experimentos numéricos com diferentes resoluções espaciais. Para a cidade de Macau, localizada no litoral, observa-se que nas duas alturas a curva da observação apresenta um máximo principal no meio da tarde às 1800 GMT e um pico secundário às 1100 GMT que equivalem respectivamente a 15:00h e 8:00h no horário local. A causa para ocorrência do primeiro pico parece estar associada ao formato do litoral e do sítio observacional que se situa em uma região de transição entre o continente e o oceano, com escoamento mudando a direção nos horários de aquecimento da superfície, ou seja, o efeito da brisa modela a variação do vento.

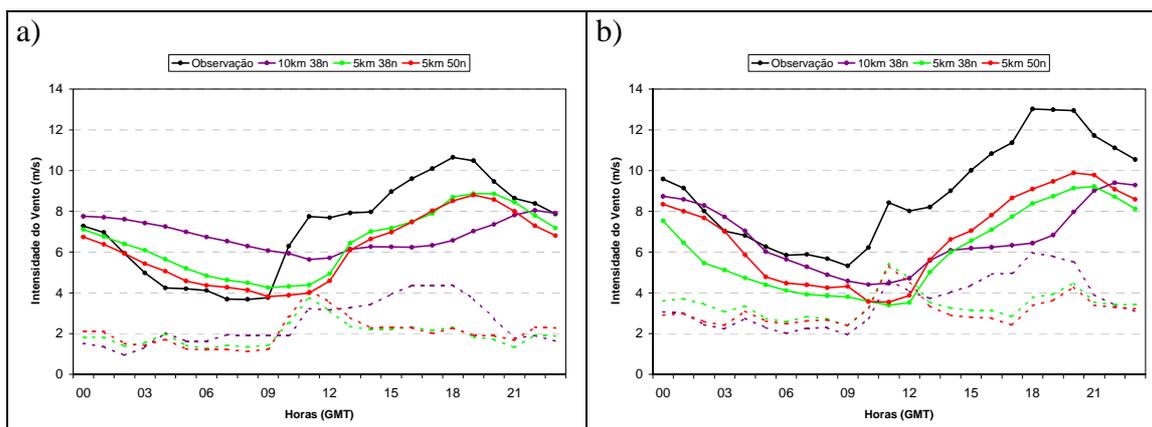


Figura 5.7 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linhas cheias) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos: controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

A Figura 5.8 mostra a mudança na direção do vento a partir das 0800 GMT e 1100 GMT na observação e nos experimentos, respectivamente. Para verificar qual das componentes do vento, zonal ou meridional, causa diferença na direção do vento e compreender melhor o comportamento do vento, é mostrado na Figura 5.9 o ciclo diário médio das componentes zonal e meridional do vento. Entre 0600 e 0800 GMT, o vento observado possui apenas a componente meridional e de sul, neste horário a velocidade do vento apresenta seu valor mínimo. A partir das 0900 GMT, o módulo da componente meridional, no sentido sul, aumenta e a componente zonal começa a ganhar força na direção leste formando a direção resultante de sudeste e a partir desse horário a velocidade do vento aumenta gradativamente. Nota-se que nos horários em que a diferença de temperatura entre a superfície do mar e a superfície terrestre é maior e, conseqüentemente, a atuação da brisa marítima é mais intensa, a componente meridional do vento diminui. Isto ocorre porque o local onde encontra-se a torre observacional, do experimento de campo no Rio Grande do Norte, está voltado para norte e a brisa marítima enfraquece a componente meridional dos ventos alísios. Assim, a componente meridional do vento é responsável pelo aparecimento dos dois picos no gráfico da velocidade do vento.

A variação diurna média da temperatura da superfície é mostrada na Figura 5.10. Observa-se que no horário de maior aquecimento da superfície, a diferença entre a

temperatura observada e prevista pelo experimento é bem evidente, sendo que o modelo subestima em, aproximadamente, 10 °C no horário das 1500 GMT. A amplitude térmica diurna também é maior na observação. Nota-se também um atraso de 1 hora no pico da temperatura de superfície. Chou et al. (2007) encontraram também um atraso de aproximadamente 1 hora no pico da temperatura da superfície em relação à observação num sítio observacional em Rondônia, acredita-se que o atraso seja devido à deficiência na radiação do modelo Eta. O tipo de solo com pouca cobertura vegetal no local onde a torre foi montada favorece um forte aquecimento da superfície nos horários da tarde.

Os experimentos numéricos com maiores resoluções horizontais e verticais apresentaram melhora na representação da curva da temperatura do ar a 2 m de altura nos horários entre 1300 e 1800 GMT, em relação ao modelo Eta10L38 (Figura 5.11). Entretanto, há uma defasagem entre o modelo e a observação que pode ser devido aos experimentos não captarem a entrada de ar frio com a mudança da circulação.

Quando se analisam os experimentos com 38 e 50 níveis de resolução vertical, pode-se notar que a 10 m de altura as curvas dos dois experimentos são muito próximas, porém para o vento a 50 m de altura verificamos que o experimento com 50 níveis apresenta uma melhora na representação da curva nos horários da madrugada quando comparado com a observação, obtendo valores menores de RMSE durante todos os horários (Figura 5.7b). Segundo Rozante (2001), o aumento da resolução vertical pode trazer alguma melhoria, no entanto o desempenho da versão com maior resolução vertical pode ser afetada pelas interpolações na vertical, uma vez que os dados da condição inicial têm apenas 20 níveis.

A curva da velocidade do vento a 10 m de altura do experimento com menor resolução horizontal apresenta a menor amplitude. Os valores médios das medidas estatísticas RMSE, viés e correlação para estes experimentos são mostrados na Tabela 5.1. As células sombreadas indicam o menor valor de viés e RMSE e a maior correlação entre os experimentos. Todos os experimentos apresentaram viés negativo, isso significa que em média o vento previsto está mais fraco que a observação. As correlações foram

melhores nos experimentos com maior resolução horizontal e o experimento Eta5L50 foi o que apresentou os melhores resultados para a velocidade do vento a 50 m de altura.

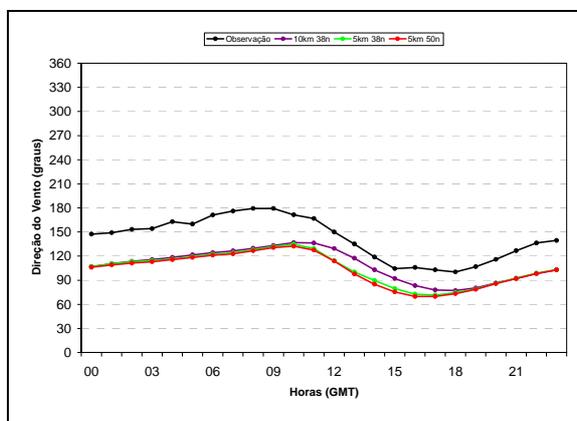


Figura 5.8 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 20,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau.

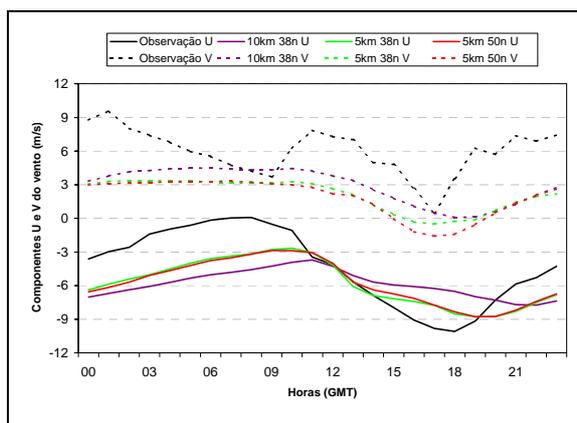


Figura 5.9 – Ciclo diário médio das componentes U (linhas sólidas) e V (linhas tracejadas) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau.

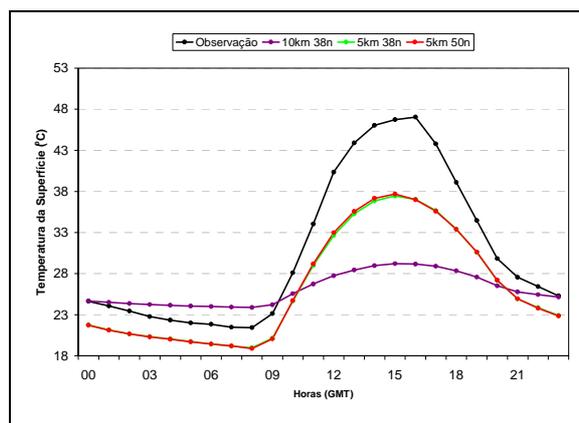


Figura 5.10 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau.

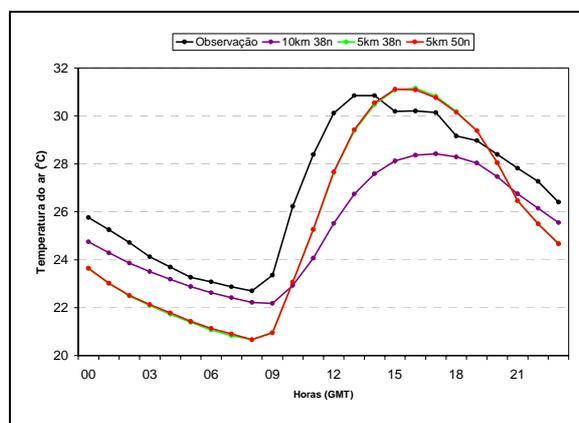


Figura 5.11 – Ciclo diário médio da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para Macau.

Tabela 5.1 – Medidas estatísticas dos experimentos controle, Eta10L38 e Eta5L50 com relação à observação em Macau-RN.

Exp.	Vento a 10 m (m/s)			Vento a 50 m (m/s)		
	Eta5L38	Eta10L38	Eta5L50	Eta5L38	Eta10L38	Eta5L50
RMSE	2,06	2,71	2,20	3,50	3,76	3,21
Viés	-0,97	-1,27	-1,32	-3,00	-3,09	-2,63
Correlação	0,73	0,44	0,75	0,79	0,69	0,79

Em Canto do Amaro, a curva do ciclo diário médio observado da velocidade do vento (Figura 5.12a) durante o período de 15 a 28 de setembro de 2005 apresenta um pico máximo no horário das 1700 GMT com valor médio de 8,9 m/s. Os experimentos numéricos apresentam valores máximos no horário das 2000 GMT com valores próximos a 6,8 m/s. A torre anemométrica, localizada na cidade de Minhoto, apresentou ventos máximos em torno de 12,6 m/s no horário das 1900 GMT (Figura 5.12b). Por outro lado, os experimentos numéricos em Minhoto apresentaram valores máximos menores que 10 m/s. Os experimentos com maior resolução horizontal apresentaram melhores resultados com valores de RMSE menores no período da tarde. Nos sítios de Minhoto e Canto do Amaro, ambos situados no litoral norte do RN, observam-se também os picos de velocidade do vento em dois horários do dia como no sítio de Macau, um se deve a componente meridional e o outro a componente zonal do vento.

Nas cidades de Pacatuba e Alcântara, as curvas da observação apresentaram pequena variação diurna, no período de estudo, com ventos de magnitude entre 6 e 8 m/s. Entretanto, os experimentos numéricos apresentaram valores máximos entre 5 e 6 m/s em Pacatuba, 10 m/s em Alcântara e ciclo diário bem definido (Figuras 5.12c e 5.12d). As cidades estão situadas em regiões distantes, porém nos dois sítios as torres anemométricas estão posicionadas próximas ao litoral. No caso de Pacatuba e Alcântara a proximidade do litoral pode trazer esse regime de ventos relativamente moderados durante todo o dia, porém espera-se alguma influência da brisa marítima o que não corresponde com a observação. Os experimentos numéricos para o sítio de Pacatuba subestimaram a velocidade do vento em todos os horários, enquanto que no sítio de Alcântara a velocidade foi superestimada durante quase toda a faixa horária pelos três experimentos numéricos. A Figura 5.13 mostra o ciclo diário da velocidade do vento a 10 m de altura na cidade de São Luís, no Maranhão, no sentido de comparação com o vento observado em Alcântara pelo fato da proximidade entre as cidades. Observa-se que em São Luís o ciclo diário do vento a 10 m de altura apresenta um regime com maior variação durante o dia chegando a valores máximos de aproximadamente 7 m/s, enquanto que a torre de Alcântara apresenta pouca variação durante o dia e valores máximos de 7 m/s a 50 m de altura, em que se esperaria valores mais elevados. O ciclo

diário do vento previsto pelo modelo controle acompanha bem a tendência da curva apesar de subestimar os valores da velocidade do ciclo diário observado para São Luís.

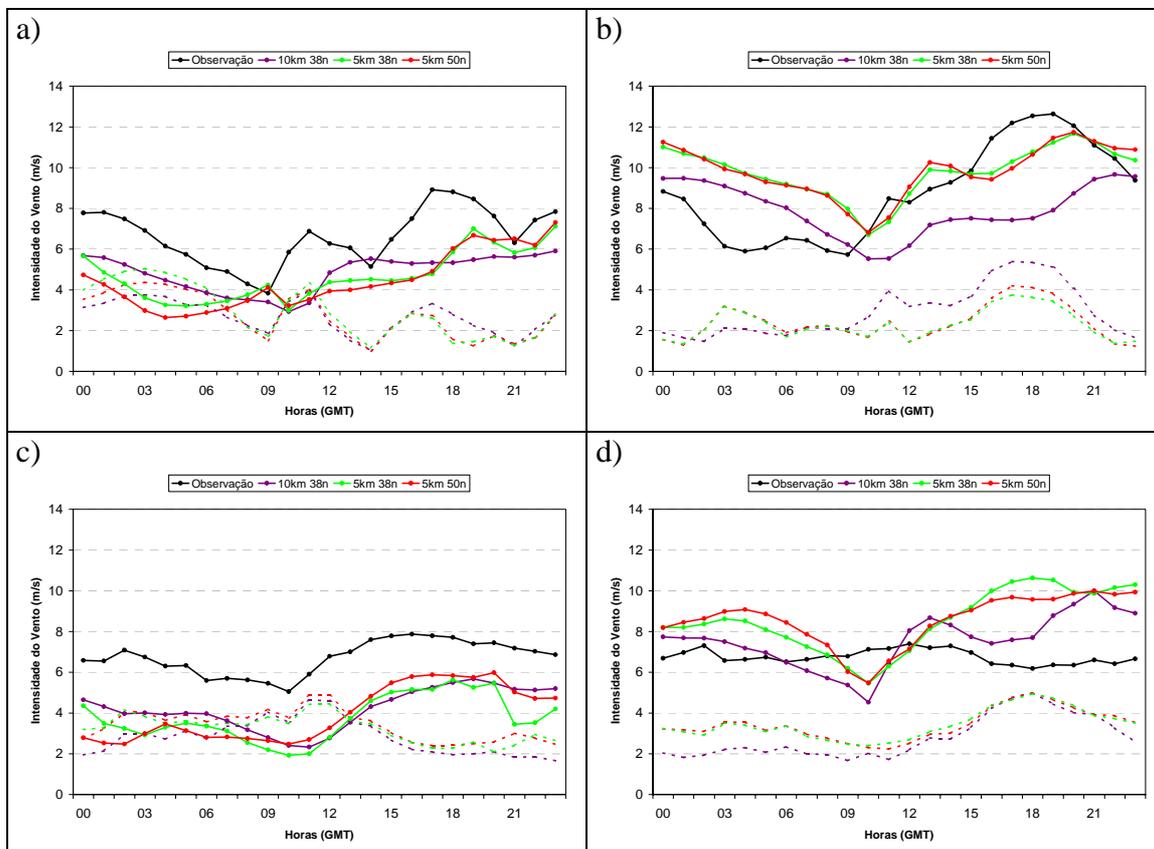


Figura 5.12 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta10L38 (linha roxa) e Eta5L50 (linha vermelha) para (a) Canto do Amaro, (b) Mínhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

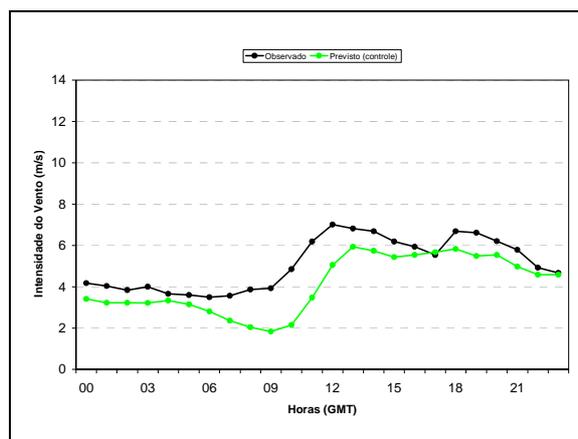


Figura 5.13 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelo experimento controle para São Luís – MA.

A avaliação estatística para o vento a 50 m de altura nos sítios de medidas de Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara mostrou que não houve um experimento que tivesse as melhores medidas estatísticas em todos os sítios de observação (Tabela 5.2). Em Canto do Amaro, Alcântara e Pacatuba o experimento Eta10L38, mesmo com baixa resolução horizontal, apresentou melhores resultados obtendo os menores valores de RMSE nos horários da madrugada. Por outro lado, em Minhoto e Macau, a configuração do experimento Eta5L50 foi mais eficaz apresentando os menores RMSE e viés. Os erros RMSE e viés, dos cinco sítios observacionais de cada experimento, foram somados para obter um valor geral que indique o experimento mais eficiente. Assim, o experimento Eta5L50 foi o que obteve o melhor desempenho.

Tabela 5.2 – Medidas estatísticas dos experimentos controle, Eta10L38 e Eta5L50 com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s).

Sítio	Medida	Eta5L38	Eta10L38	Eta5L50
Canto do Amaro	RMSE	2,95	2,81	3,21
	Viés	-1,93	-1,87	-2,15
	Correlação	0,46	0,43	0,43
Minhoto	RMSE	2,54	3,20	2,43
	Viés	-0,29	-2,07	-0,19
	Correlação	0,47	0,52	0,51
Pacatuba	RMSE	3,48	2,94	3,31
	Viés	-2,84	-2,16	-2,63
	Correlação	0,42	0,46	0,42
Alcântara	RMSE	3,49	2,96	3,50
	Viés	2,94	2,10	3,02
	Correlação	0,10	0,14	0,15
Soma do RMSE*		15,96	15,67	15,66
Soma do Viés*		-5,12	-7,09	-4,58

\*Incluindo os erros do vento da cidade de Macau a 50 m da tabela 5.1.

### 5.3 Sensibilidade do Modelo a Parâmetros

A partir de uma comparação objetiva dos experimentos numéricos com os dados observacionais de cada estação, será fornecida uma visão da sensibilidade do modelo, com relação a diferentes resoluções e aos diversos parâmetros modificados nos esquemas de camada limite. Em geral, os experimentos numéricos com o modelo Eta apresentaram pequena variação para a variável vento a 10 e 50 m de altura. Entretanto, como visto no item anterior, o aumento da resolução horizontal proporciona um ganho

maior quando comparados com os dados observados. Nos próximos itens são avaliados os experimentos numéricos com mudança no coeficiente, que relaciona o comprimento de rugosidade entre os fluxos mecânicos e térmicos (CZ), e mudança no parâmetro gama das funções de estabilidade de Paulson presente no esquema de camada limite, no parâmetro que relaciona a altura da camada limite (FH) e também um teste com mudança do tipo de vegetação, de caatinga para solo nu, em 3 pontos de grade próximo à região de Macau.

### **5.3.1 Parâmetros de CLS**

Os resultados apresentados neste tópico foram produzidos através de mudanças no valor do parâmetro (CZ) que controla a relação entre os comprimentos de rugosidade para o calor e momentum, chamado de coeficiente de Zilitinkevich, e no valor do fator de estabilidade ( $\gamma$ ), ambos com a finalidade de melhorar o campo de vento. Para o primeiro parâmetro, foram utilizados os valores CZ=0,7 e CZ=1,0, que representam superfícies com habilidades de transferir mais eficientemente o calor que o momentum, do que quando CZ é igual a 0,2 (controle).

No caso do segundo parâmetro modificado, utilizou-se o valor  $\gamma=50$  no lugar de  $\gamma=16$  (controle). Visando minimizar as diferenças devido à representação da topografia e priorizar as diferenças referentes às mudanças dos parâmetros, os resultados destes dois experimentos foram comparados com o experimento com mesma resolução vertical, 50 níveis, e mesma resolução horizontal, 5 km, ou seja, foi considerado o experimento Eta5L50 como controle (C2) de acordo com a tabela 4.2.

#### **- Coeficiente de Zilitinkevich**

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram as diferenças entre o experimento Eta5L50 (controle para os experimentos com 50 níveis verticais) e os experimentos Eta5L50 CZ=0,7 e Eta5L50 CZ=1,0, respectivamente. Os experimentos com aumento do valor de CZ apresentaram maiores diferenças em relação ao Eta5L50, principalmente sobre o continente, tornando o vento mais forte nas regiões costeiras do Maranhão, Ceará e Rio Grande do Norte. Quando comparados os dois experimentos com mudança no

parâmetro CZ, percebe-se que nas regiões em que a velocidade do vento diminuiu, a diminuição é mais intensa no experimento com CZ=1,0 e nas regiões em que a velocidade do vento aumentou, o aumento foi maior para o experimento com CZ=0,7.

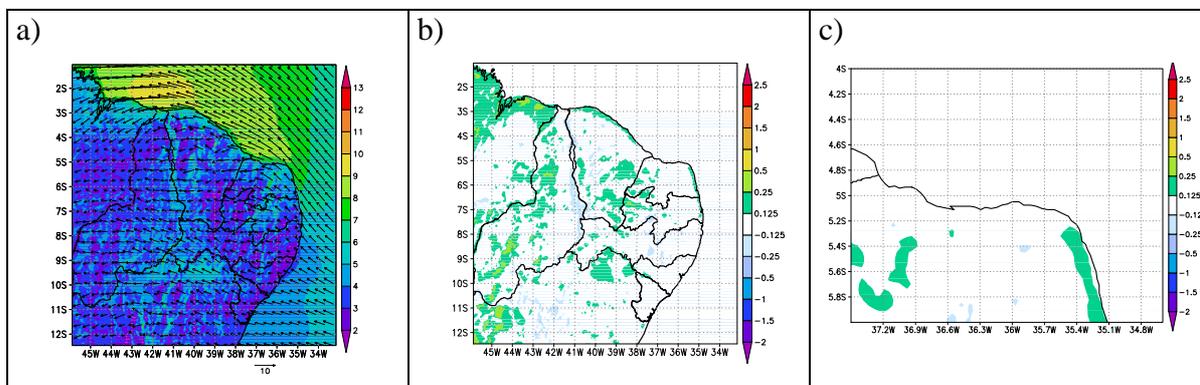


Figura 5.14 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 CZ=0,7, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7 e controle e (c) detalhe sobre RN.

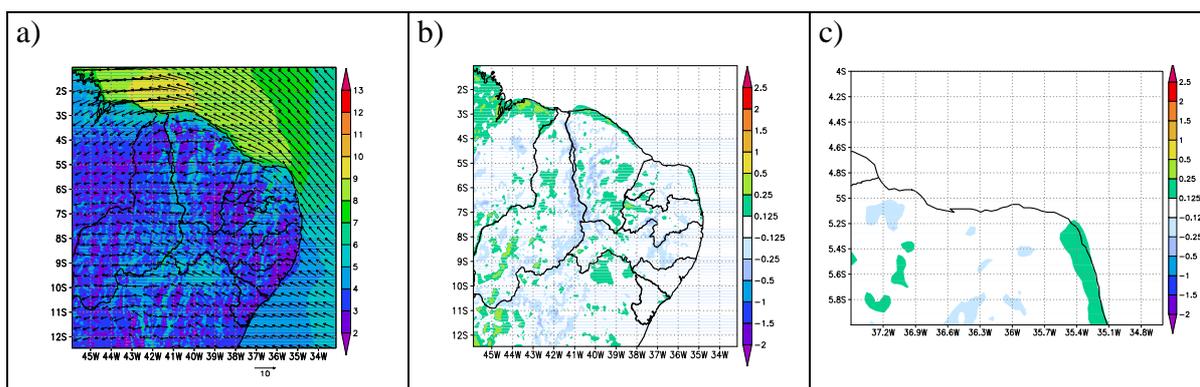


Figura 5.15 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50 CZ=1,0, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50 CZ=1,0 e controle e (c) detalhe sobre RN.

#### - Funções de Estabilidade de Paulson

O efeito da modificação do coeficiente de instabilidade de Paulson não apresentou diferenças significativas com relação ao experimento Eta5L50, para o campo médio da velocidade do vento a 10 m de altura (Figura 5.16). Nota-se algumas regiões com pequena diminuição na velocidade do vento a 10 m de altura. Por outro lado, a mudança

no parâmetro mostrou que o impacto foi maior no campo de vento a 50 m de altura. A Figura 5.17b mostra que, sobre quase toda área continental, a velocidade do vento a 50 m em Eta5L50  $\gamma=50$  foi reduzida em relação ao experimento Eta5L50.

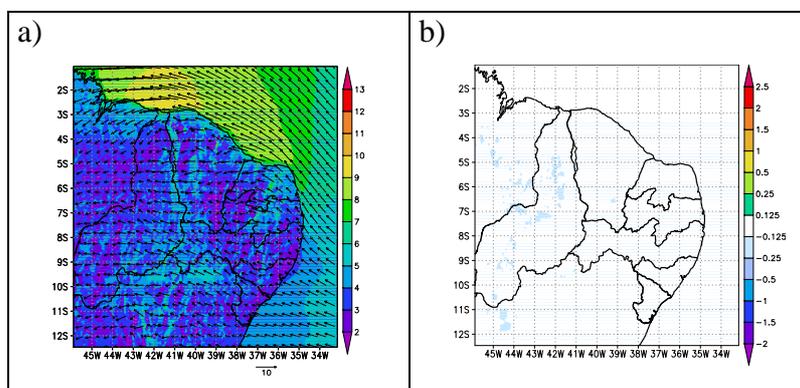


Figura 5.16 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50  $\gamma=50$ , (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50  $\gamma=50$  e controle.

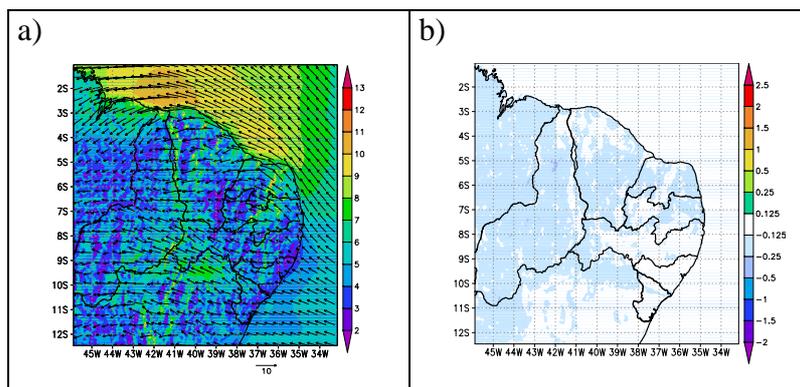


Figura 5.17 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 50 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L50  $\gamma=50$ , (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L50  $\gamma=50$  e controle.

As Figuras 5.18a e 5.18b mostram o ciclo diário médio do vento a 10 e 50 m de altura, respectivamente, para a cidade de Macau. Nota-se que o experimento com  $\gamma=50$  mostrou as menores diferenças em relação ao experimento Eta5L50 que utiliza um valor de gama igual a 16. Os dois experimentos com mudança no parâmetro CZ apresentaram pequenas diferenças entre si para o vento a 10 m de altura nos horários da madrugada.

Os experimentos com  $CZ=1,0$  e  $CZ=0,7$  resultaram em diminuição do vento a 10 m entre 1300 e 2000 GMT e diminuição do vento a 50m entre 1300 e 0000 GMT em relação ao experimento Eta5L50. A 10 m de altura, os ventos de todos os experimentos foram superestimados no horário da madrugada até as 0900 GMT e subestimados a partir desse horário, enquanto a 50 m de altura, a velocidade do vento estimada pelos experimentos numéricos foi subestimada em todos os horários na cidade de Macau. Nesta altura os experimentos com mudança no parâmetro CZ representaram melhor o vento entre 0300 e 0900 GMT.

A direção do vento nestes experimentos variou pouco em relação ao experimento Eta5L50 (Figura 5.19). Alguma diferença pode ser notada nos experimentos com  $CZ=0,7$  e  $CZ=1,0$  nos horários entre 1300 e 1600 GMT. Os experimentos apresentaram direções do vento concentradas entre  $70^\circ$  e  $130^\circ$ , aproximadamente, enquanto as direções preferenciais da observação estiveram entre  $110^\circ$  e  $180^\circ$ . A Figura 5.20 mostra que tanto a componente zonal quanto a componente meridional do vento apresentaram mudanças pequenas em relação aos demais experimentos, as maiores ocorrem durante o horário da tarde. O parâmetro CZ atua de forma mais importante nos horários em que há maiores trocas de calor entre a superfície e a atmosfera, portanto nos horários em que a superfície está mais aquecida. Estes experimentos pouco afetaram o período da manhã ou madrugada quando os fluxos são inibidos pela estabilidade atmosférica. O CZ maior,  $CZ=1,0$ , aproximou melhor a direção do vento no horário diurno, e aumentou a intensidade da componente meridional corretamente, entretanto, reduziu a velocidade do vento zonal, erroneamente.

O impacto foi maior na temperatura a 2 metros de altura e temperatura de superfície. O aumento do parâmetro CZ, em relação ao experimento controle, apresentou maior sensibilidade, aumentando significativamente a temperatura de superfície entre 1100 e 2000 GMT (Figura 5.21). O aumento de CZ para 1,0 foi suficiente para tornar a temperatura de superfície próxima da observação nos horários de maior aquecimento da superfície. A Figura 5.22 mostra a variação diurna da temperatura do ar a 2 m de altura. Nota-se que os experimentos Eta5L50  $CZ=0,7$  e Eta5L50  $CZ=1,0$  representaram bem a curva desta variável nos horários entre 1900 e 0000 GMT e durante o período da

madrugada produziram erros menores. Nota-se que apesar de não haver defasagem no pico da curva da temperatura de superfície, há uma defasagem de 2 a 3 horas na temperatura a 2 m de altura.

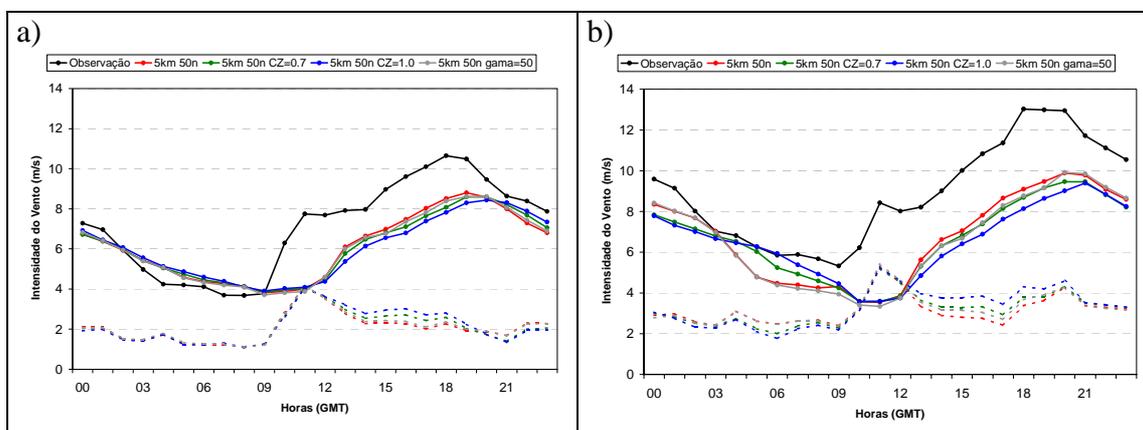


Figura 5.18 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50  $\gamma=50$  (linha cinza) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

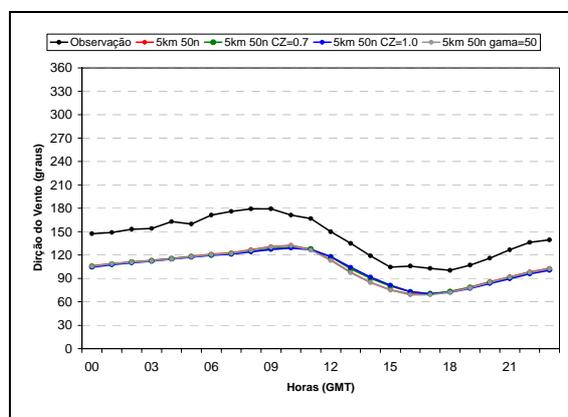


Figura 5.19 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 21,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50  $\gamma=50$  (linha cinza) para Macau.

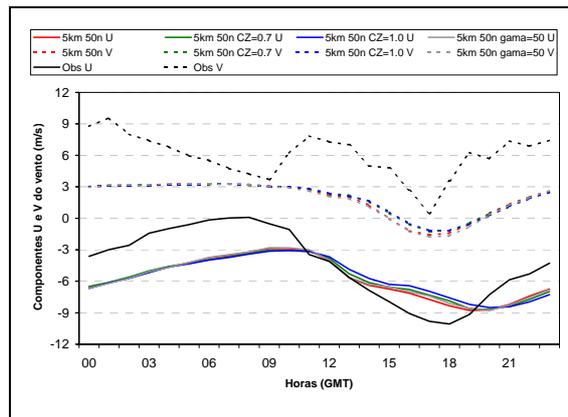


Figura 5.20 – Ciclo diário médio das componentes U (linhas sólidas) e V (linhas tracejadas) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50  $\gamma=50$  (linha cinza) para Macau.

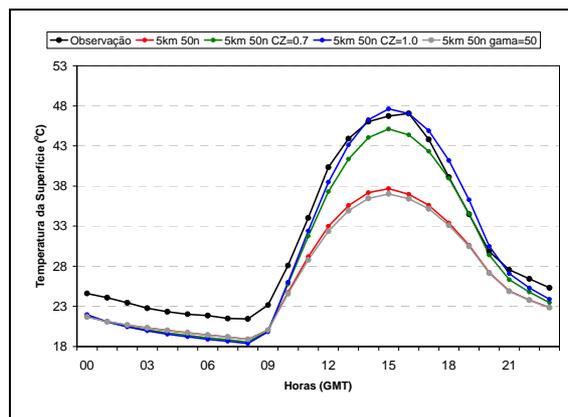


Figura 5.21 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50  $\gamma=50$  (linha cinza) para Macau.

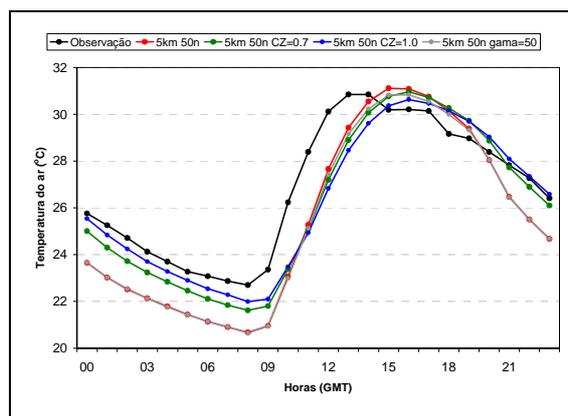


Figura 5.22 – Ciclo diário médio da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos Eta5L50 (linha vermelha), Eta5L50 CZ=0,7 (linha verde), Eta5L50 CZ=1,0 (linha azul) e Eta5L50  $\gamma=50$  (linha cinza) para Macau.

A Tabela 5.3 mostra as medidas estatísticas de desempenho do vento a 10 e 50 m de altura para os experimentos Eta5L50 CZ=0,7, Eta5L50 CZ=1,0 e Eta5L50  $\gamma=50$ , em relação à observação de Macau. Nota-se que o vento a 50 metros de altura teve boas correlações para a cidade de Macau nos três experimentos, com valores acima de 0,7. Entretanto, apresentou erros sistemáticos médios acima de 3 m/s. O experimento Eta5L50 CZ=0,7 apresentou melhores resultados para o vento a 50 m de altura e o experimento do gama maior foi melhor para o vento a 10 m de altura.

Tabela 5.3 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7, Eta5L50 CZ=1,0 e  $\gamma=50$  com relação à observação em Macau-RN.

Exp.	Vento a 10 m (m/s)				Vento a 50 m (m/s)			
	Eta5L50	CZ=0,7	CZ=1,0	$\gamma=50$	Eta5L50	CZ=0,7	CZ=1,0	$\gamma=50$
RMSE	2,20	2,25	2,31	2,23	3,21	3,28	3,42	3,29
Viés	-1,32	-1,33	-1,36	-1,32	-2,63	-2,66	-2,76	-2,70
Correlação	0,75	0,73	0,72	0,74	0,79	0,76	0,73	0,78

A Figura 5.23 compara os experimentos Eta5L50, Eta5L50 CZ=0,7, Eta5L50 CZ=1,0 e Eta5L50  $\gamma=50$  para outras quatro cidades: Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara. Os experimentos não apresentaram as mesmas características em todas as

estações, o que torna difícil a compreensão do efeito de cada parâmetro para o vento nesta altura. Porém, em geral os experimentos com  $CZ=0,7$  e  $CZ=1,0$  apresentaram menores valores para velocidade do vento nos horários de maior aquecimento diurno, e em algumas estações como Minhoto e Alcântara apresentaram diminuição da velocidade do vento no horário da madrugada também, aproximando-se da observação. Aparentemente este parâmetro atuou pouco sobre o vento e mais sobre a temperatura de superfície (Figura 5.21). O experimento  $\text{Eta5L50 } \gamma=50$  gerou resultados próximos ao experimento  $\text{Eta5L50}$  em todos os sítios de observação, exceto no horário de maior aquecimento em que apresentou pequena diferença.

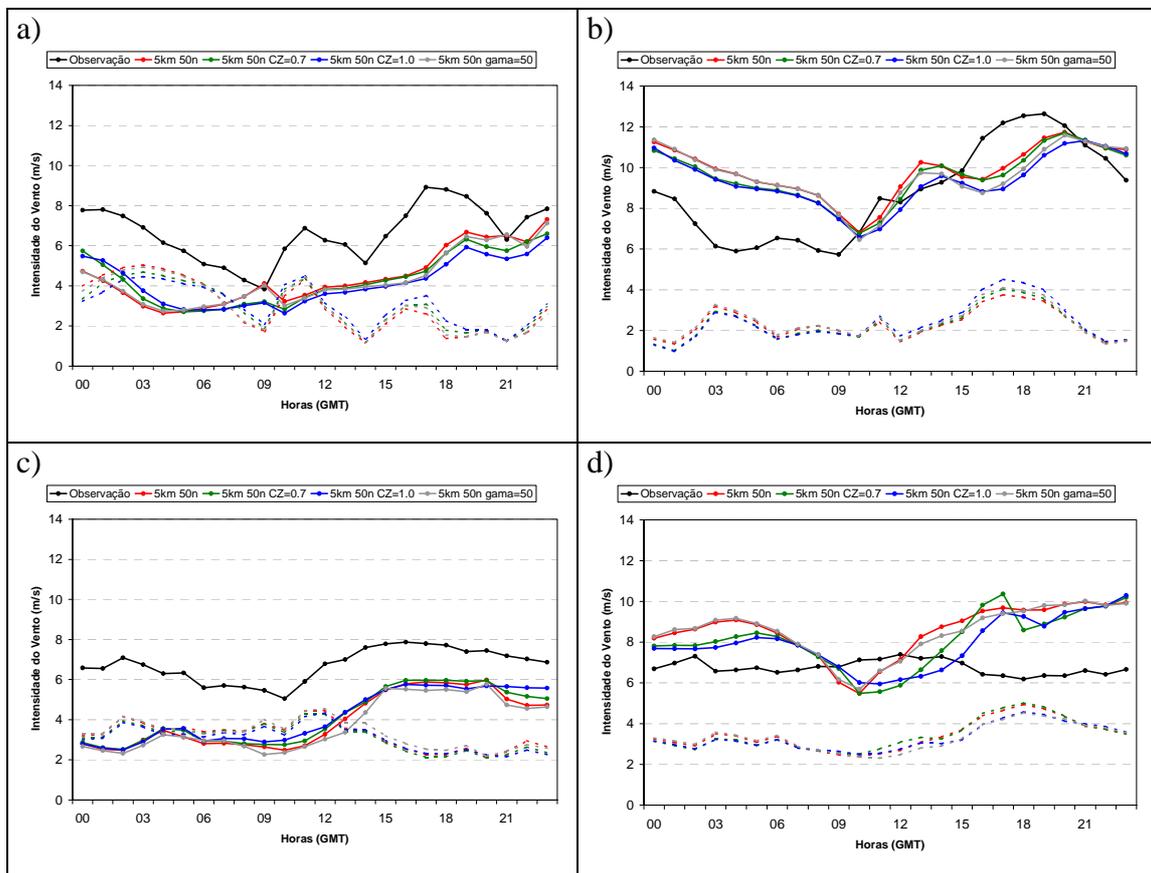


Figura 5.23 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos  $\text{Eta5L50}$  (linha vermelha),  $\text{Eta5L50 } CZ=0,7$  (linha verde),  $\text{Eta5L50 } CZ=1,0$  (linha azul) e  $\text{Eta5L50 } \gamma=50$  (linha cinza) para (a) Canto do Amaro, (b) Minhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

A Tabela 5.4 mostra as medidas estatísticas calculadas para o vento a 50 m de altura nas estações de Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara. Ocorreu um aumento, em relação ao experimento controle, da correlação entre a série observada e prevista nos experimentos com aumento do valor do CZ, nas cidades de Canto do Amaro e Alcântara. Em Pacatuba e Alcântara, os ganhos por esses experimentos foram no RMSE e viés. De acordo com essas medidas estatísticas, os melhores resultados para a cidade de Minhoto foram através do experimento Eta5L50. O aumento de CZ produziu melhoria na temperatura à superfície, mas não se observou na temperatura a 2m de altura e na intensidade do vento. Observa-se que o RMSE e o viés para o experimento Eta5L50  $\gamma=50$  foram sempre maiores que no experimento Eta5L50, aumentando o erro em relação à observação, exceto para a cidade de Alcântara.

Tabela 5.4 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L50 CZ=0,7, CZ=1,0 e  $\gamma=50$  com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s).

Sítio	Medida	Eta5L50	CZ=0,7	CZ=1,0	$\gamma = 50$
Canto do Amaro	RMSE	3,21	3,20	3,23	3,21
	Viés	-2,15	-2,28	-2,40	-2,24
	Correlação	0,43	0,47	0,48	0,45
Minhoto	RMSE	2,43	2,43	2,59	2,56
	Viés	-0,19	-0,36	-0,57	-0,32
	Correlação	0,51	0,51	0,44	0,45
Pacatuba	RMSE	3,31	3,18	3,15	3,39
	Viés	-2,63	-2,46	-2,44	-2,72
	Correlação	0,42	0,41	0,41	0,40
Alcântara	RMSE	3,50	3,51	3,36	3,38
	Viés	3,02	2,95	2,82	2,91
	Correlação	0,15	0,21	0,22	0,14
Soma do RMSE*		15,66	15,60	15,75	14,83
Soma do Viés*		-4,58	-4,81	-5,35	-5,07

\*Incluindo os erros do vento da cidade de Macau a 50 m da tabela 5.3.

### 5.3.2 Altura da CLA

Nesta seção é apresentada uma análise comparativa entre o experimento controle Eta5L38 (FH=1,01) e os experimentos numéricos com o parâmetro FH igual a 0,5 e 1,5. O parâmetro FH está relacionado com a altura da camada limite (Eq. 4.8) e apresentou diminuição da velocidade do vento em todo continente e aumento no oceano, quando reduzido ao valor de 0,5 (Figura 5.24). Em algumas regiões continentais a intensidade do vento médio para o período de estudo foi de 1 m/s menor que no experimento

controle. Isto ocorre principalmente porque a diminuição do parâmetro FH de 1,01 para 0,5 implica que a definição da altura da camada limite será baseada em limiares menores de TKE do que no caso controle, acarretando num aumento da altura da camada limite planetária, causando enfraquecimento do vento sobre o continente. Entretanto sobre o oceano os ventos se intensificaram. No caso de aumento do FH para 1,5, o impacto foi diferente e casou diminuição no valor do vento médio sobre o oceano (Figura 5.25). As Figuras 5.24c e 5.25c mostram em detalhe a diferença entre os experimentos com redução e aumento do valor do parâmetro FH, respectivamente. Nota-se claramente a diferença entre os experimentos que pode ser devido a diferenças no cálculo da altura da camada limite para o oceano e continente. O aumento da altura da camada limite convectiva indicado pelo experimento Eta5L38 FH=0,5 e a diminuição indicada pelo experimento Eta5L38 FH=1,5 podem ser vistos na Figura 5.26 através do nível em que o perfil da temperatura potencial cresce rapidamente.

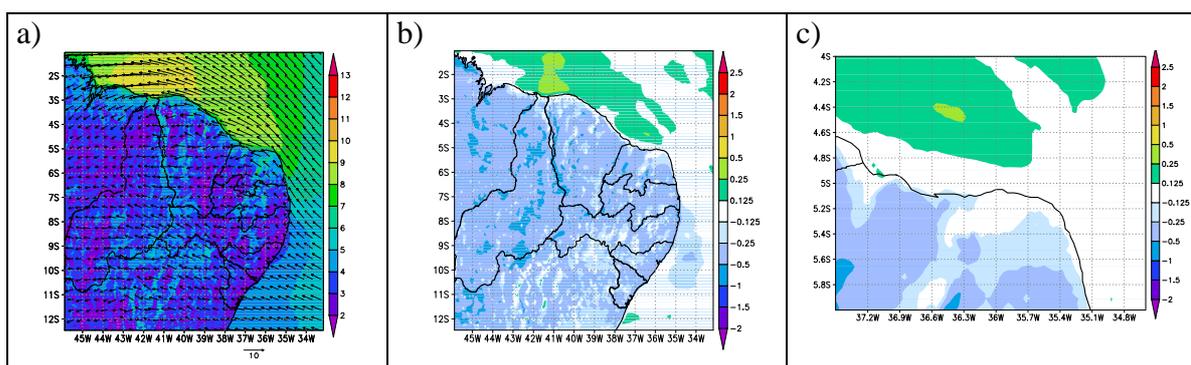


Figura 5.24 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 FH=0,5, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 FH=0,5 e controle e (c) detalhe sobre RN.

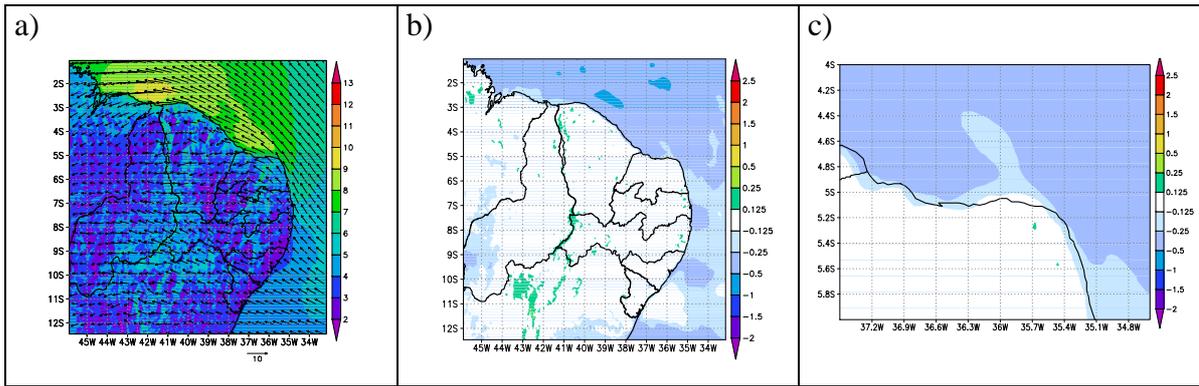


Figura 5.25 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 FH=1,5, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 FH=1,5 e controle e (c) detalhe sobre RN.

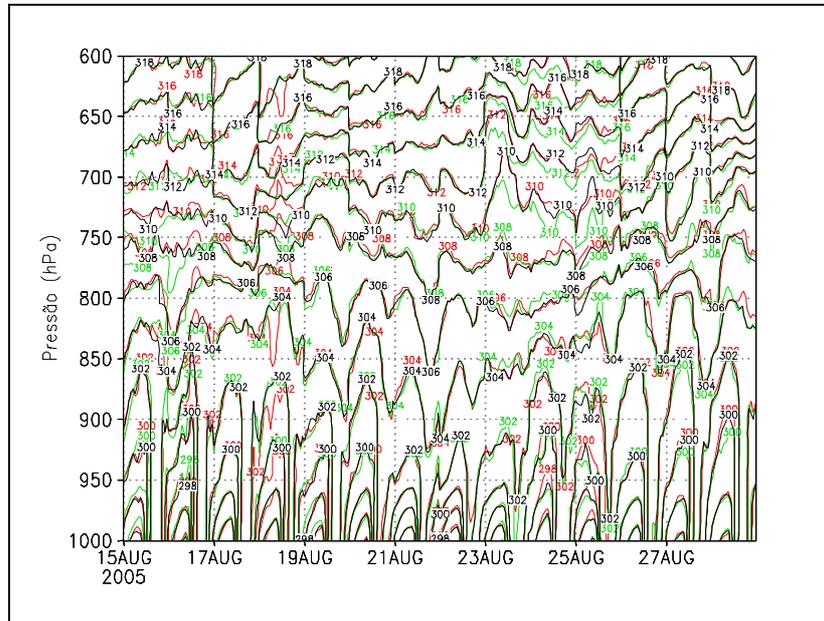


Figura 5.26 – Temperatura potencial (K) em Macau, prevista pelo C1 (linha preta) e pelo Eta5L38 FH=0,5 (linha vermelha) e pelo Eta5L38 FH=1,5 (linha verde), para o período de 15 a 28 de setembro de 2005.

As Figuras dos ciclos diários médios serão apresentadas no próximo item junto com os experimentos de mudança do tipo de cobertura vegetal em comparação com o experimento controle C1.

### 5.3.3 Tipo de Cobertura de Solo

Nesta seção aborda-se a análise referente ao experimento com mudança do tipo de vegetação em 3 pontos de grade do modelo próximos a torre anemométrica de Macau. Nestes três pontos, o valor 8 referente a arbustos latifoliados com cobertura herbácea, existente no mapa de vegetação, foi trocado pelo valor 11 de solo exposto (solo nu). Observa-se pouca variação, em relação ao experimento controle, principalmente no campo de vento médio a 10 m de altura (Figura 5.27). O campo da diferença entre a velocidade do vento médio a 50 m de altura do experimento controle e o experimento Eta5L38 vegmod (Figura 5.28) apresenta diferenças maiores em relação ao campo do vento a 10 m de altura. Entretanto, essas diferenças apresentam ainda valores muito pequenos de cerca de  $-0,25$  m/s. Uma justificativa para isso pode ser a pequena área de vegetação modificada que não foi capaz de gerar diferenças significativas e o campo médio apresentado pode estar mascarando diferenças maiores de um certo horário do dia. Assim serão mostradas na Figura 5.29 as diferenças do campo médio do vento para a região norte do Rio Grande do Norte levando em consideração somente o horário das 1500 GMT, em que a superfície está aquecida. Nota-se nesta figura que, às 1500 GMT, as diferenças são mais evidentes, enfraquecendo a velocidade do vento, principalmente na região oceânica próxima aos pontos de grade com cobertura de solo modificada.

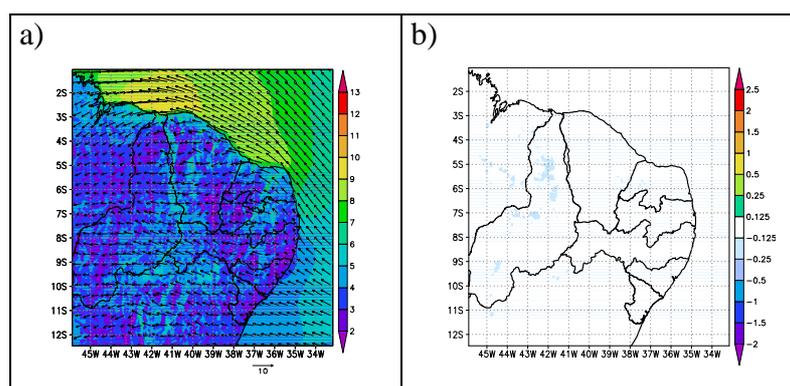


Figura 5.27 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 10 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 vegmod, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle.

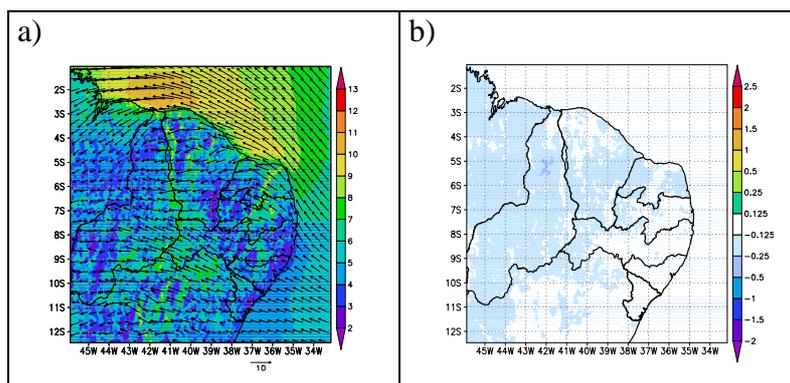


Figura 5.28 – (a) Média do campo de vento (m/s) a 50 m de altura das previsões de 24-48h para o período de 15 a 28 de setembro de 2005 do experimento Eta5L38 vegmod, (b) diferença entre a magnitude do vento médio dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle.

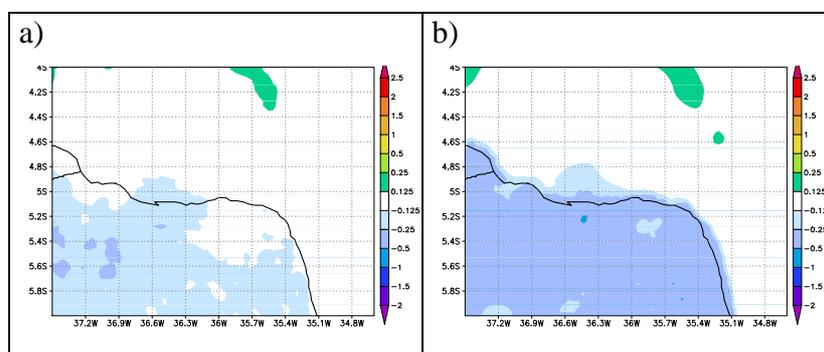


Figura 5.29 – Diferença entre a magnitude do vento médio a (a) 10 m e (b) 50 m de altura as 1500 GMT dos experimentos Eta5L38 vegmod e controle.

A seguir serão mostrados os ciclos diários para a velocidade do vento a 10 e 50 m de altura em Macau previstos pelos experimentos Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod (Figura 5.30). Nota-se que os experimentos com FH=0,5 e FH=1,5 apresentaram diferenças em relação ao experimento controle na velocidade do vento a 10 m de altura, principalmente por volta das 1200 GMT, em que o aumento da velocidade do vento foi mais forte nestes experimentos, inclusive intensificando no horário de aumento da velocidade do vento em relação ao controle, mostrando-se mais próximo do observado. Nos horários de maior convecção, o experimento Eta5L38 FH=0,5 apresenta valores um pouco menores para a velocidade do vento a 10 m de altura. Estas diferenças também são observadas na velocidade do vento a 50 m de altura, porém, com menor intensidade. A 50 m de altura, o experimento Eta5L38 FH=1,5

apresentou velocidades do vento maiores durante grande parte do dia, o que leva a crer que o aumento do FH aumenta a velocidade do vento independente do aquecimento diurno (Figura 5.30b).

O experimento Eta5L38 vegmod apresenta as maiores diferenças nos horários da tarde em que a troca da vegetação por solo nu favoreceu o aumento da brisa marítima que diminui a componente meridional do vento. Isto é, a orientação geográfica do litoral do norte do Rio Grande do Norte diminuiu a velocidade do vento em relação ao experimento controle nos horários em que a brisa estava atuando.

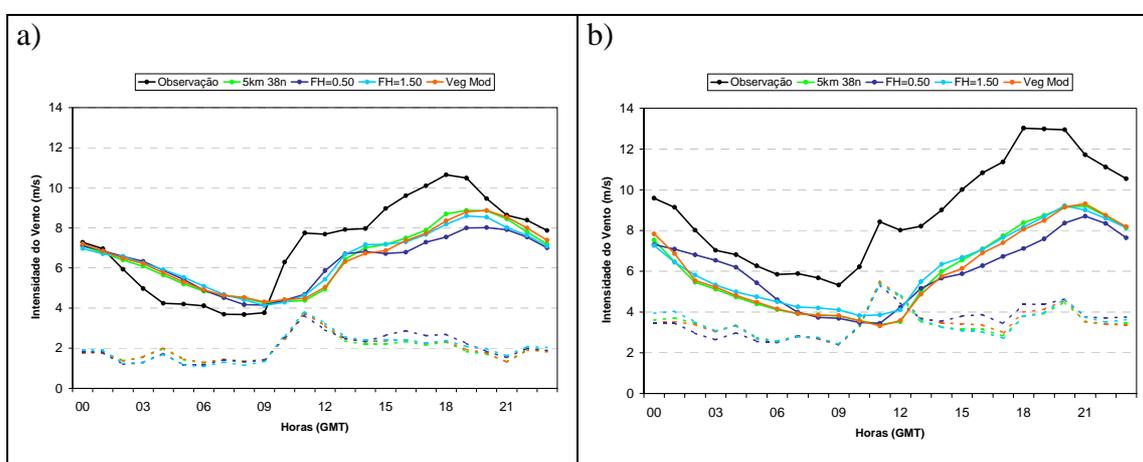


Figura 5.30 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a (a) 10 m e (b) 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

Apesar de ter ocorrido diferenças na velocidade do vento a 10 e 50 m de altura em alguns horários, a direção do vento não apresentou diferenças significativas entre os experimentos Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5, Eta5L38 vegmod e o controle para o sítio de Macau (Figura 5.31). No experimento Eta5L38 vegmod (Figura 5.32), a componente zonal do vento teve um ligeiro aumento e a componente meridional do vento uma pequena diminuição entre 1500 e 2100 GMT.

O ciclo diário da temperatura do solo em Macau para observação e os experimentos numéricos é apresentada na Figura 5.33, pelo fato dessa temperatura ser bastante afetada com a mudança da cobertura do solo. Observa-se que o experimento vegmod acarretou

em uma menor temperatura do solo à noite e pela madrugada, devido a maior perda radiativa que o solo nu permite. A partir das 1000 GMT, é possível notar nitidamente o aumento da temperatura do solo no experimento vegmod que recebe mais diretamente a energia que chega à superfície. As temperaturas de superfície e a 2m de altura também apresentaram diferenças significativas (Figuras 5.34 e 5.35), ficando menores que no experimento controle nos horários de maior aquecimento. No experimento Eta5L38 FH=0,5 as temperaturas do solo, superfície e a 2m de altura apresentaram-se menores que o experimento controle durante o período da tarde, nos outros horários não ocorrem diferenças significativas. O experimento Eta5L38 FH=1,5 apresenta apenas variação das temperaturas em relação ao experimento controle no horário da madrugada, notadas nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35.

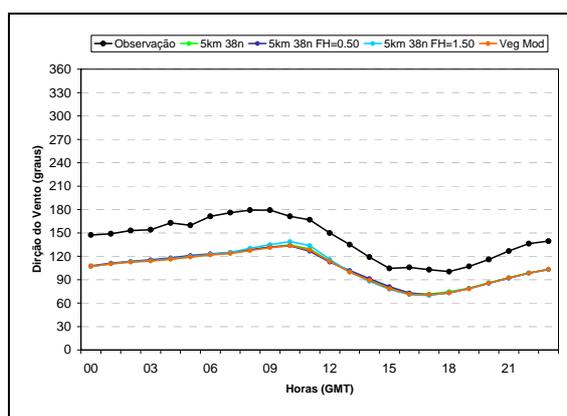


Figura 5.31 – Ciclo diário médio da direção do vento (graus) observado a 20,5 m de altura e previsto de 24-48h a 10 m de altura pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau.

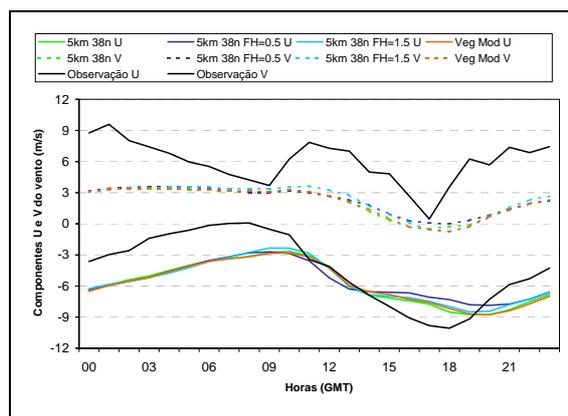


Figura 5.32 – Ciclo diário médio das componentes U (linha sólida) e V (linha tracejada) do vento (m/s) a 10 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau.

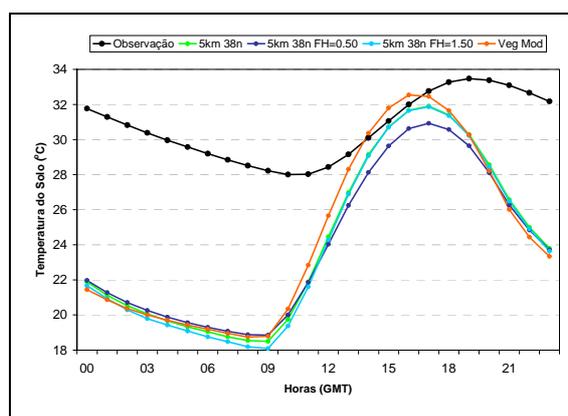


Figura 5.33 – Ciclo diário médio da temperatura do solo (°C) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau.

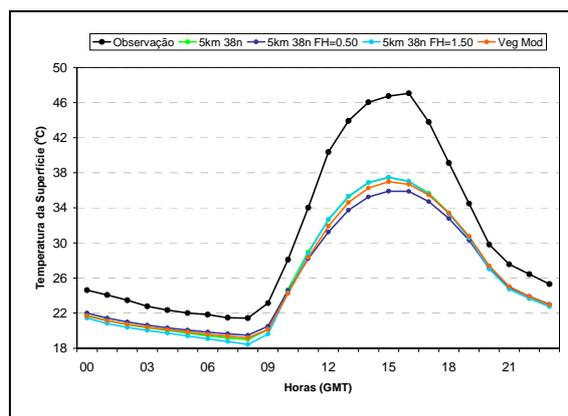


Figura 5.34 – Ciclo diário médio da temperatura da superfície (°C) observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau.

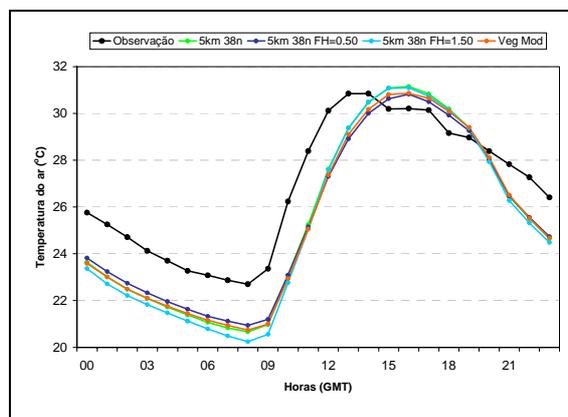


Figura 5.35 – Ciclo diário médio da temperatura do ar (°C) a 2 m de altura observada e prevista de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para Macau.

Os valores do RMSE, viés e correlação da velocidade do vento a 10 e 50 m de altura calculados para Macau são mostrados na Tabela 5.5. Os experimentos apresentaram viés negativo e os menores valores de viés e RMSE foram observados no experimento controle. As correlações foram melhores no experimento Eta5L38 FH=1,5 aumentando em 0,2 em relação ao controle.

Tabela 5.5 – Medidas estatísticas dos experimentos Eta5L38, Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod com relação à observação em Macau-RN.

Exp.	Vento a 10 m (m/s)				Vento a 50 m (m/s)			
	Eta5L38	FH=0,5	FH=1,5	vegmod	Eta5L38	FH=0,5	FH=1,5	Vegmod
RMSE	2,06	2,13	2,12	2,08	3,50	3,60	3,56	3,55
Viés	-0,97	-1,16	-1,16	-0,98	-3,00	-3,10	-3,11	-3,03
Correlação	0,73	0,74	0,75	0,72	0,79	0,79	0,81	0,78

Na Figura 5.36 são apresentados os ciclos diários do vento a 50 m de altura previstos pelos experimentos Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod para as cidades de Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara. Nota-se que em Canto do Amaro e Pacatuba o experimento Eta5L38 FH=1,5 se aproximou mais da observação. A troca da vegetação não resultou em grandes diferenças nessas cidades, apenas em Canto do Amaro e Minhoto devido à proximidade com a cidade de Macau, o vento apresentou uma pequena diferença nos horários da tarde. O experimento Eta5L38 FH=0,5 apresentou diminuição do vento nos horários da tarde em todas as cidades.

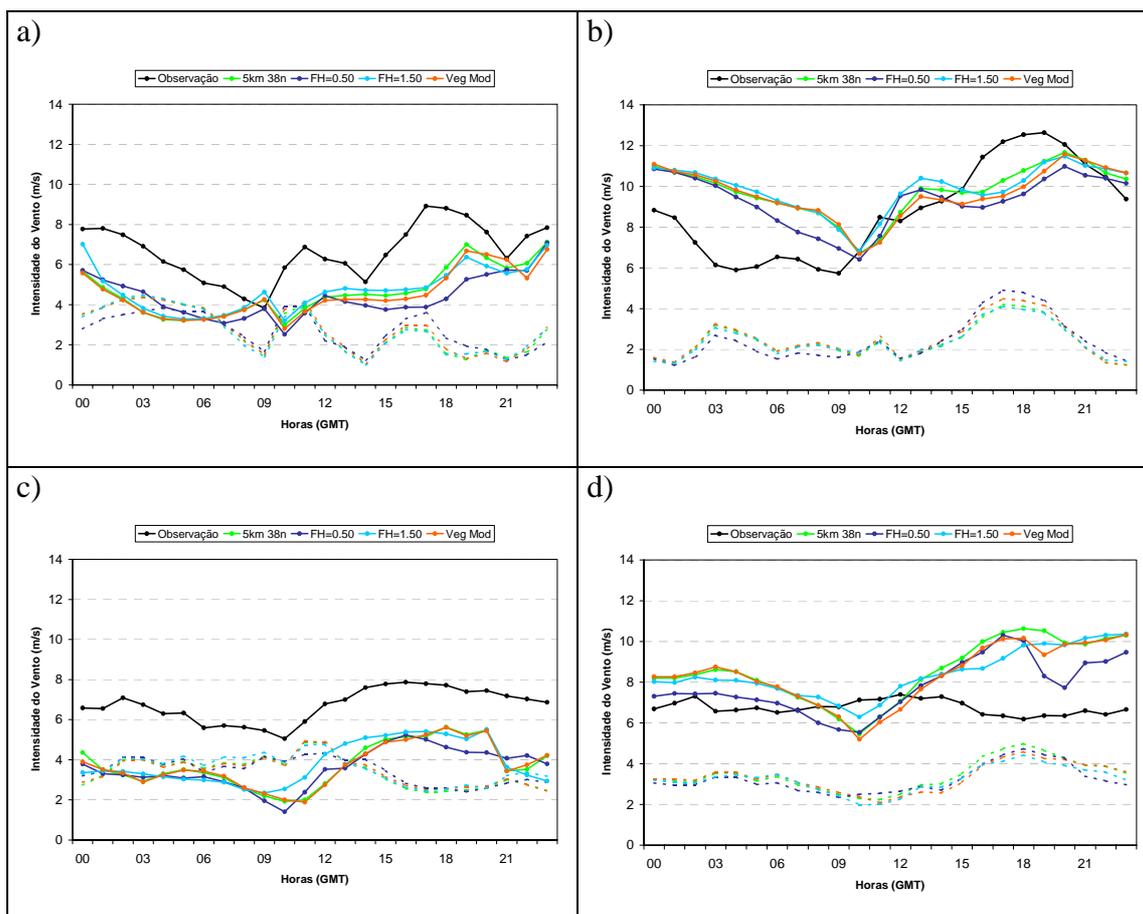


Figura 5.36 – Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) (linha cheia) a 50 m de altura observado e previsto de 24-48h pelos experimentos controle (linha verde), Eta5L38 FH=0,5 (linha azul escura), Eta5L38 FH=1,5 (linha azul clara) e Eta5L38 vegmod (linha laranja) para (a) Canto do Amaro, (b) Minhoto, (c) Pacatuba e (d) Alcântara. A linha tracejada indica o ciclo diário do RMSE para cada experimento.

A Tabela 5.6 mostra as medidas estatísticas nos outros sítios observacionais. Observa-se que em Canto do Amaro e Alcântara, o experimento Eta5L38 FH=0,5 apresenta melhores medidas estatísticas, enquanto que em Minhoto e Pacatuba os melhores resultados ficam por conta do experimento controle e Eta5L38 FH=1,5.

Tabela 5.6 – Medidas estatísticas dos Eta5L38, Eta5L38 FH=0,5, Eta5L38 FH=1,5 e Eta5L38 vegmod com relação à observação em Canto do Amaro, Minhoto, Pacatuba e Alcântara para o vento a 50 m de altura (m/s).

Sítio	Medida	Eta5L38	FH=0,5	FH=1,5	vegmod
Canto Do Amaro	RMSE	2,95	2,85	2,93	3,00
	Viés	-1,93	-1,87	-1,90	-2,03
	Correlação	0,46	0,48	0,45	0,46
Minhoto	RMSE	2,54	2,66	2,52	2,68
	Viés	-0,29	-0,83	-0,35	-0,43
	Correlação	0,47	0,47	0,48	0,41
Pacatuba	RMSE	3,48	3,52	3,63	3,50
	Viés	-2,84	-3,00	-3,10	-2,89
	Correlação	0,42	0,48	0,48	0,43
Alcântara	RMSE	3,49	3,27	3,28	3,39
	Viés	2,94	2,59	2,79	2,81
	Correlação	0,10	0,16	0,14	0,11
Soma do RMSE*		15,96	15,90	15,92	26,12
Soma do Viés*		-5,12	-6,12	-5,67	-5,57

\*Incluindo os erros do vento da cidade de Macau a 50 m da tabela 5.5.



## 6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Visando buscar melhorias nas simulações dos ventos em baixos níveis e verificar a sensibilidade do modelo a alguns parâmetros, neste estudo foram abordados alguns testes com o modelo Eta com relação à mudança nas resoluções horizontal e vertical, alteração na relação dos comprimentos de rugosidade de calor e momentum, nas funções de estabilidade de Paulson do esquema de parametrização da camada limite superficial. Também foram realizados testes de sensibilidade com a estimativa da altura da camada limite atmosférica e com a substituição da cobertura de solo existente no mapa de vegetação do modelo numa pequena área próxima a torre montada em Macau por solo nu.

A partir dos dados dos sítios observacionais, realizou-se a avaliação dos experimentos numéricos através de medidas estatísticas. A avaliação com pontos observacionais mostrou que os testes com 5 km de resolução horizontal conseguem um maior detalhamento, obtendo melhor desempenho que a versão de 10 km. Das 5 estações utilizadas na verificação, o modelo Eta5L38 tende a subestimar sistematicamente o vento no horário de maior intensidade e atrasa em poucas horas o aumento da velocidade do vento nas primeiras horas do dia. A exceção foi em Alcântara, em que as observações se apresentam mais fracas que os experimentos.

O aumento da resolução vertical de 38 níveis para 50, favorece na representação do vento, no entanto, a configuração com 50 níveis tem aumento no custo computacional. O desempenho do experimento Eta5L50 pode ter sido limitado pelas interpolações na vertical, uma vez que os dados da condição inicial e de contornos têm apenas 20 níveis.

A partir dos experimentos numéricos, mostrou-se que o modelo apresenta forte sensibilidade com a mudança dos parâmetros de Zilitinkevich e FH, enquanto que houve pouca sensibilidade no parâmetro  $\gamma$  e na substituição da cobertura do solo nos três pontos de grade próximos a Macau. A análise dos resultados das simulações com o parâmetro de Zilitinkevich, CZ, mostraram que para a mesma resolução espacial, o aumento de CZ para 0,7 e 1,0 trouxeram melhorias na representação da temperatura da

superfície em Macau no horário de maior aquecimento e na temperatura de 2 m de altura no período da madrugada.

O modelo mostrou-se bastante sensível ao parâmetro FH que controla a altura da camada limite atmosférica. Quando reduzido, este parâmetro diminuiu a velocidade do vento sobre o continente e aumentou a velocidade do vento sobre o oceano. Quando o valor de FH foi aumentado de 1,01 para 1,50, o impacto foi diferente, houve redução da velocidade do vento sobre as regiões costeiras e oceânicas.

Os experimentos numéricos Eta5L50  $\gamma=50$  e Eta5L38 vegmod foram os que apresentaram menor diferença quando comparados aos respectivos experimentos controle. O experimento com mudança na cobertura do solo apresentou diferenças maiores no horário de maior aquecimento, diminuindo a velocidade do vento sobre o continente e na região oceânica próxima aos pontos de grade com cobertura de solo modificada. Entretanto, as diferenças no horário de maior aquecimento não ultrapassaram o valor de 0,25. Acredita-se que a área de cobertura do solo alterada foi pequena, e resultou em resposta pequena do modelo.

O Ciclo diário médio da direção do não apresentou diferenças significativas em todos os experimentos numéricos testados. Em geral, os resultados do vento à 10 e 50 m de altura modelado pelo Eta mostraram alguma sensibilidade aos parâmetros testados, embora pequena. O padrão de escala maior definido pelas condições de temperatura da superfície do mar de baixa resolução além das condições de umidade do solo podem ter dificultado a obtenção de respostas sobre o ciclo diário do vento.

Considerando as discussões apresentadas, alguns trabalhos futuros podem ser sugeridos, como por exemplo:

- Introduzir mapas de vegetação e topografia com maior resolução e mais atualizados do que aqueles utilizados neste trabalho, a fim de se obter um melhor detalhamento da superfície e, conseqüentemente, uma melhor representação das características da região.

- Realizar experimentos numéricos e avaliar o modelo Eta para outras estações do ano utilizando uma maior número de sítios observacionais.
- Realizar um estudo para verificar a causa do atraso, do modelo em relação à observação, do horário de aumento da velocidade do vento durante o dia nas localidades do litoral norte do Rio Grande do Norte.
- Introduzir um parâmetro de  $C_z$  dependente do tipo de cobertura de solo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational Physics**, v. 17, Academic Press, p. 173-265, 1977.

ARYA, S. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic-Press, p. 307, 1988.

BELJAARS, A. C. M.; VITERBO, P. The sensitivity of winter evaporation to the formulation of aerodynamic resistance in the ECMWF model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 71, n. 1-2, p. 135-149, 1994.

BELJAARS, A. C. M.; HOTSLAG, A. A. M. Flux parameterization over land surface for atmospheric models. **Journal of Applied Meteorology**, v. 30, n. 3, p. 327-341, 1991.

BETTS, A. K.; MILLER M. J. A New convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 677-691, 1986.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale ETA-model: description and forecast Examples. **Weather Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994.

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia.. **Normais Climatológicas**. Brasil, Brasília, 1992. 84 p.

BRAUD, I.; NOILHAN, J.; BESSENOULIN, P.; MASCART, P. Bare-ground surface heat and water exchange under dry conditions: observations and parameterization. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 66, n. 1-2, p. 173-200, 1993

BRUTSAERT, W. A. **Evaporation into the atmosphere**. Dordrecht: Reidel, p. 299, 1982.

- CHEN, F.; JANJIC Z.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 85, n. 3, p. 391-421, 1997.
- CHOU S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI I. F. A. Extended forecasts over South America using Regional Eta Model. **Journal of Geophysical Research Atmosphere**, v. 105, p. 10147-10160, 2000.
- CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y. K.; NOBRE, C. A. On the Validation of the Eta/SSiB over South America. **Journal of Geophysical Research Atmosphere**, v. 107, n. d20, p. 1-20, 2002.
- CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; DEREZYNSKI, C. P.; WALDHEIM, P. V.; MANZI, A. O. Comparison of CPTEC GCM and Eta model results with observational data from the Rondônia LBA reference site, Brazil. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85A, p. 25-42, 2007.
- DYER, A. J. A review of flux-profile relationships. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 7, n. 3, p. 363-372, 1974.
- FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, 1975.
- FERRIER, S. B.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: CONF. ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 19./CONF. ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 15., 2002, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: AMS, 2002.
- FITZJARRALD, D. R.; GARSTANG, M. Vertical structure of the tropical boundary layer. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 7, p. 1512-1526, 1981.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

GARRATT, J. R.; FRANCEY, R. J. Bulk characteristics of heat transfer in the unstable baroclinic atmosphere boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 15, n. 4, p. 399-421, 1978.

GARRATT, J. R.; HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. v. 99, p. 680–687, 1973.

GARRATT, J. R.; PIELKE, R. A. On the sensitivity of mesoscale models to surface-layer parameterization constants. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 48, n. 4, p. 377-387, 1989.

HASTENRATH S.; LAMB. **Climatic atlas of the tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans**. Wisconsin: University of Wisconsin Press, 1977.

HICKS, B. B. **An analysis of Wangara micrometeorology**: surface stress, sensible heat, evaporation, and dewfall. Tennessee: NOAA, 1981 (NOAA Technical Memorandum, ERL ARL-104).

HOGSTROM, U. Review of some basic characteristic of the atmospheric surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 78, n. 3-4, p. 215-246, 1996.

HOLTSLAG, A. A. M.; BELJAARS, A. C. M. **Surface flux parameterization schemes; developments and experiences at KNMI**. In: ECMWF WORKSHOP ON PARAMETERISATION OF FLUXES OVER LAND SURFACE, 1988, Reading. **Proceedings...** Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, p. 121-147.

HOPWOOD, W. P. Surface transfer of heat and momentum over an inhomogeneous vegetated land. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, n.121, n. 527, p.1549-1574, 1995.

- JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**. 2.ed. New York: Published by Cambridge University Press, 2005.
- JANJIC, A. I. The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.
- KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmosphere boundary layer flows: their structure and measurement**. New York: Oxford University Press, 1994.
- KAIN, J. S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 1, p. 170–181, 2004.
- KUBOTA, A.; SUGITA, M. Radiometrically determined skin temperature and scalar roughness to estimate surface heat flux. Part I: Parameterization of radiometric scalar roughness. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 69, n. 1-2, p. 397-416, 1994.
- LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A Parameterization of the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 11, p. 118-133, 1974.
- LOBOCKI, L. A Procedure for the derivation of surface-layer bulk relationships from simplified second order closure models. **Journal of Applied Meteorology**, v. 32, n. 1, p. 126-138, 1993.
- LOUIS, J. F. A Parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 17, n. 2, p. 187-202, 1979.
- MARHT, L. Grid averaged surface fluxes. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1550-1560, 1987.
- MAHRT, L. The bulk aerodynamic formulation over heterogeneous surfaces. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 78, n. 1-2, p. 87-119, 1996.

MAHRT, L. Surface heterogeneity and vertical structure of the boundary layer.

**Boundary-Layer Meteorology**, v. 96, n. 1-2, p. 33-62, 2000.

MARSHALL, C. H.; CRAWFORD, K. C.; MITCHELL, K. E.; STENSRUD, D. J. The Impact of the land surface physics in the operational NCEP Eta simulating the diurnal cycle: evaluation and testing using Oklahoma data. **Weather and Forecasting**, v. 18, n. 5, p. 748-768, 2003.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Review of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851-875, 1982.

MESINGER, F. A Blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronaut.**, v. 44, p. 195-202, 1984.

Mitchell, K.,2001: The Community NOAA Land Surface Model (LSM) – [Disponível on-line: [ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/gcp/ldas/noahlsm/ver\\_2.2](ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/gcp/ldas/noahlsm/ver_2.2)] .

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. **Trudy Geofiz**, inst. AN SSSR, v. 24, n. 151, p. 163-187, 1954.

MONIN, A. S.; YAGLOM, A. M. **Statistical fluid mechanics: mechanics of turbulence**. Cambridge, Massachussets: MIT Press, p. 769, 1971.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970.

ROZANTE, J. R. **O impacto do aninhamento no modelo Eta nas previsões de tempo**. 2001-05-16. 130 p. (INPE-11432-TDI/953). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/11.23.15.00>>. Acesso em: 07 dez. 2007.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 670 p., 1988.

SUN, J.; MARTH, L. Determination of surface fluxes from the surface radiative temperature. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 8, p. 1096-1104, 1995.

TANAJURA, C. A. S.; SHUKLA, J. **Modeling the effect of the Andes on the South American summer climate**. Calverton, MD: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 2000. 44 p. . Tech Rep. 83.

THOM, A. S.; STEWART, J. B.; OLIVER, H. R; GASH, J. H. C. Comparison of aerodynamic and energy budget estimates of fluxes over a pine forest. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 101, n.427, p. 93-105, 1975.

VENDRAMINI, E. Z. **Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico**. Botucatu: UNESP, p. 110. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1986.

YUCEL, I.; SHUTTLEWORTH, W. J.; WASHBURNE, J.; CHEN, F. Evaluating NCEP Eta model-derived data against observations. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 7, p. 1977-1991, 1998.

ZILITINKEVICH, S. S. Non local turbulent transport: pollution dispersion aspects os coherent structure os convective flows. In: Power, H.; Moussiopoulos, N.; Brebbia, C. A. (eds.). **Air pollution theory and simulation, computational mechanics**, v. 1, p. 53–60, 1995. Air Pollution III.