

**UTILIZAÇÃO CONJUNTA DO MODELO DE PROGNÓSTICO MM5 E DO MODELO
DE DISPERSÃO AERMOD PARA A REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE
JANEIRO**

FILIPE FERNANDES DE CARVALHO SOUZA

**ORIENTADOR: HENRIQUE DE MELO LISBOA
CO-ORIENTADOR: LUIZ CLAUDIO GOMES PIMENTEL
CO-ORIENTADOR: MAGNUN MACIEL VIEIRA**

2011/1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

FILIFE FERNANDES DE CARVALHO SOUZA

**UTILIZAÇÃO CONJUNTA DO MODELO DE PROGNÓSTICO
MM5 E DO MODELO DE DISPERSÃO AERMOD PARA A
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador:

Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa

Co-orientador:

Prof. Dr. Luiz Claudio Gomes Pimentel

Co-orientador:

Eng^oMagnun Maciel Vieira

FLORIANÓPOLIS/SC
AGOSTO/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO CONJUNTA DO MODELO DE PROGNÓSTICO
MM5 E DO MODELO DE DISPERSÃO AERMOD PARA A REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

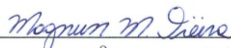
FILIPE FERNANDES DE CARVALHO SOUZA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

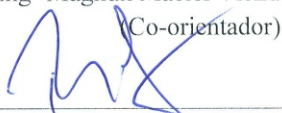
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa
(Orientador)



Engº Magnun Maciel Vieira
(Co-orientador)



Prof. Dr. Paulo Belli Filho
(Membro da Banca)



Msc. Leonardo Hoinaski
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS/SC
AGOSTO/2011

RESUMO: Este trabalho baseia-se na avaliação do uso de dados do modelo MM5 CommunityModel (MM5) para a realização de estudos de dispersão atmosféricos com o modelo regulatório AERMOD. A fim de atingir este objetivo, uma simulação da bacia aérea III da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro foi realizada, abrangendo o período de 03-23 de maio de 2011. Para verificar se o modelo MM5 foi capaz de reproduzir corretamente as variáveis meteorológicas da região, uma comparação de meteorogramas e rosas dos ventos simulados e observados foi feita para cinco localidades incluídas na área simulada (Aeroporto Internacional do Galeão, Aeroporto Santos Dumont, Aeroporto de Jacarepaguá, Aeroporto de Campos dos Afonsos e Jardim Primavera - Polícia Rodoviária Federal). Uma comparação entre a temperatura simulada e observada também foi feita para cada um dos quatro aeroportos listados acima. Posteriormente, uma comparação da utilização clássica do AERMOD foi feita com a substituição da direção e intensidade do vento observados com aquelas simuladas pelo MM5. Uma comparação entre o uso clássico do modelo também foi realizada com a substituição da direção e intensidade do vento observados no aeroporto Internacional do Galeão pelas direções e intensidade de vento das imediações das principais fontes emissoras do poluente dióxido de enxofre. Por fim, foi feita uma comparação dos resultados obtidos através da versão 11059 do AERMOD (EPA) versus a utilização da versão 6.0.0 da Lakes Environmental, e uma comparação das concentrações simuladas com as prescritas pelos padrões da legislação.

ABSTRACT:This work is based on the assessment of using MM5 Community Model (MM5) data for accomplishing atmospheric dispersion studies with the regulatory model AERMOD. To achieve this objective an MM5 simulation of air basin III of the metropolitan area of the city of Rio de Janeiro was done encompassing the period of 3-23 of May 2011. In order to check if the MM5 was reproducing properly the meteorological variables of the region, a comparison of meteograms and wind roses of simulated and observed wind was done for five locations included in the simulated area (Galeão International Airport, Santos Dumont Airport, Jacarepaguá Airport, Campos dos Afonsos Airport and Jardim Primavera – Federal Highway Police headquarters). A comparison of the simulated and observed temperature was also done for each of the four listed above airports. Afterwards a comparison of a classical use of AERMOD was done versus replacing the observed wind directions and speed with MM5 simulated data to accomplish the simulations. A comparison of the classical use of the model was also done versus replacing the observed wind directions and speed of the Galeão International Airport by the nearby observations of wind direction and speed of the major pollutant emissions of sulphur dioxide. Lastly a comparison of the results obtained through the AERMOD 11059 version (EPA) versus the Lakes Environmental 6.0.0 version was made, and a comparison of the simulated and legislation prescribed patterns was made.

Sumário

1.	Introdução	1
2.	Objetivos	2
2.1	Objetivo geral	2
2.2	Objetivos específicos	2
3.	Revisão bibliográfica	4
3.1	Utilização conjunta de modelos de mesoescala e de dispersão nos últimos anos.....	4
3.2	Descrição dos modelos	12
3.2.1	Modelo MM5	12
3.2.2	Modelo AERMOD	18
4.	Materiais e métodos	23
4.1	Caracterizaçãometeorológica.....	23
4.2	Configuração do MM5	25
4.2.1	TERRAIN	25
4.2.2	REGRID	26
4.2.3	INTERPF.....	27
4.2.4	MM5.....	28
4.3	Configuração do AERMOD	29
4.3.1	AERMET	29
4.3.2	AERMAP	30
4.3.3	AERMOD	33
4.4	Análise dos resultados	33
4.4.1	Comparação dos resultados do MM5	33
4.4.2	Comparação entre os resultados obtidos pelo AERMOD a partir de dados meteorológicos observados simulados	35
4.4.3	Comparação do AERMOD distribuído pela Lakes Environmental com a versão do AERMOD lançada em 2011 pela EPA	36

4.4.4	Comparação dos resultados das concentrações da simulação tradicional com o exigido na legislação.....	37
5.	Resultados.....	38
5.1	Comparação entre os dados observados e os resultados obtidos pelo modelo MM5, para setembro de 2007.....	38
5.1.1	Rosas dos Ventos	38
5.2	Comparação dos resultados simulados pelo MM5 em relação aos dados observados para maio de 2011.....	41
5.2.1	Rosas dos Ventos	42
5.2.2	Temperatura	45
5.3	Comparação dos resultados obtidos pelo AERMOD através de dados meteorológicos de entrada observados e simulados	50
5.4	Comparação entre os resultados do AERMOD distribuído pela Lakes Environmental e a versão lançada em 2011 pela EPA....	66
5.5	Comparação dos resultados obtidos através das simulações para o mês de maio de 2011 com a legislação	71
6.	Conclusão.....	72
7.	Bibliografia	74
8.	Anexos	79
8.1	Meteogramas Meteorogramas de setembro 2007	79
8.2	Meteogramas de maio 2011.....	107

Índice de Figuras

Figura 1 - Comparação das temperaturas estimadas pelo WRF e observadas para Pune no período de 11-19 de abril de 2005. Fonte: Kesarkaret al., (2006).	5
Figura 2 - Comparação dos ventos estimados pelo WRF e observados para Pune durante o período de 11-19 de abril de 2005. Fonte: Kesarkar et al., (2006).	6
Figura 3 - Comparação dos valores previstos pelo WRF-AERMOD em relação a valores observados. Fonte: Kesarkar et al., (2006).	7
Figura 4 - Comparação dos padrões de vento dos períodos: a) 1981-1990, b) 2001 c)MM5 2001, d) 10 anos 1981-1990 8 – 18 h, e) 2001 8 – 18 h, f) MM5 2001. Fonte:Toumaet al., (2007).	8
Figura 5 - Comparação de todas as concentrações horárias de benzeno para todos os pontos da grade ao longo de todo o período de simulação,organizadas em ordem crescente de valores de concentração de Benzeno estimada a partir do MM5 - AERMOD versus a utilização tradicional do AERMOD a partir de estações meteorológicas (NWS). Toumaet al., (2007).	9
Figura 6 - Desvio médio normalizado (%) das concentrações médias de Benzeno estimadas a partir do MM5-AERMOD e a partir do NWS-AERMOD. Fonte: Touma et al., (2007).	10
Figura 7 - Histograma de concentrações para cada hora e receptor a partir do método NWS-AERMOD e MM5-AERMOD. Fonte: Toumaet al., (2007).	11
Figura 8: Bacias aéreas da região metropolitana do Rio de Janeiro. Fonte: Relatório anual da qualidade do ar do estado do Rio de Janeiro produzido pelo INEA.	24
Figura 9: Dimensões de cada grade utilizada.	25
Figura 10: Fontes pontuais que representaram as emissões industriais e limites dos	32
Figura35: SBAF (Campos dos Afonsos). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.	39
Figura 36: SBGL (Galeão). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.	40
Figura 37: : SBJR (Jacarepaguá). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.	40
Figura 38: SBRJ (Santos Dumont). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.	41
Figura 59: SBAF (Campos dos Afonsos). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.	42

Figura 60: SBGL (Galeão). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.	43
Figura 61: SBJR (Jacarepaguá). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.	43
Figura 62: SBRJ (Santos Dumont). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.	44
Figura 63: PRF (Jardim Primavera). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.	45
Figura 64: SBAF (Campos dos Afonsos). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.	46
Figura 65: SBGL (Galeão). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.	47
Figura 66: SBJR (Jacarepaguá). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.	48
Figura 67: SBRJ (Santos Dumont). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.	49
Figura 68: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos observados para o aeroporto do Galeão.	50
Figura 69: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos simulados pelo MM5 para a localização do aeroporto do Galeão.	51
Figura 70: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos observados na estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) para a localização do aeroporto do Galeão.	52
Figura 71: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos simulados pelo MM5 para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).	53
Figura 72: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos observados para a localização do aeroporto do Galeão.	54
Figura 73: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos simulados para a localização do aeroporto do Galeão.	55
Figura 74: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos observados para a estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).	56
Figura 75: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos simulados para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).	57
Figura 76: Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos observados para o aeroporto do Galeão.	58
Figura 77: Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos simulados para o aeroporto do Galeão.	59

Figura 78:Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos observados para a estação de qualidade de Jardim Primavera (PRF).	60
Figura 79:Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos dados simulados para a estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).	61
Figura 80:Comparação da variação diária medida das concentrações de SO ₂ para a localização da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem METAR-AERMOD.	62
Figura 81: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO ₂ para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem MM5-SBGL-AERMOD.	63
Figura 82:Comparação da variação diária medida das concentrações de SO ₂ para a localização da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem METAR-PRF-AERMOD.	64
Figura 83: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO ₂ para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem MM5-PRF-AERMOD.	65
Figura 84: Primeiros máximos de 1 hora de SO ₂ . À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.....	67
Figura 85: : Primeiros máximos de 3 horas de SO ₂ . À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.....	68
Figura 86: Primeiros máximos de 8 horas de SO ₂ . À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.....	69
Figura 87: Primeiros máximos de 24 horas de SO ₂ . À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.....	70
Figura 88: Segundos máximos de 24 horas.....	71
Figura 11: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	80
Figura 12: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	81
Figura 13: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	82

Figura 14: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	83
Figura 15: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	84
Figura 16: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	85
Figura 17: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	87
Figura 18: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	88
Figura 19: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	89
Figura 20: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	90
Figura 21: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	91
Figura 22: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.....	92
Figura 23: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	94
Figura 24: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	95
Figura 25: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	96
Figura 26: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	97
Figura 27: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	98
Figura 28: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	99
Figura 29: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	101
Figura 30: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	102
Figura 31: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	103
Figura 32: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	104
Figura 33: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	105

Figura 34: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	106
Figura 39: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	108
Figura 40: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	109
Figura 41: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	110
Figura 42: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	111
Figura 43: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	113
Figura 44: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	114
Figura 45: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	115
Figura 46: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	116
Figura 47: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	118
Figura 48: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	119
Figura 49: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	120
Figura 50: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	121
Figura 51: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	123
Figura 52: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	124
Figura 53: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	125
Figura 54: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	126
Figura 55: PRF (Jardim Primavera). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	128
Figura 56: PRF (Jardim Primavera). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	129
Figura 57: PRF (Jardim Primavera). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.	130

Figura 58: PRF (Jardim Primavera).Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados. 131

Índice de Tabelas

Tabela 1: Descrição das variáveis utilizadas nas equações do modelo MM5.....	15
Tabela 2: Definição das Variáveis da Equação gaussiana utilizada pelo AERMOD.	22
Tabela 3: Dimensões das grades do domínio.	26
Tabela 4: Lista de níveis de pressão.	27
Tabela 5: Lista de níveis sigma.	28
Tabela 6: Lista de parametrizações utilizadas. Fonte: Moraes (2008). ...	28

1. Introdução

Segundo De Melo Lisboa (2007), a atmosfera é um meio no qual ocorrem diversas reações químicas entre substâncias que são emitidas ou que já estejam previamente presentes nela. Estas substâncias são provenientes de fontes antrópicas ou naturais, fixas ou móveis, específicas ou múltiplas, e se difundem e interagem na atmosfera.

Cada fonte emissora possui características específicas que, dependendo da concentração dos poluentes emitidos e das suas respectivas vazões, poderão vir a causar danos à saúde do homem e ao equilíbrio do meio ambiente.

Para prevenção da poluição e controle da qualidade do ar, utilizam-se modelos de dispersão de poluentes atmosféricos. A utilização desses modelos pode auxiliar na montagem de uma rede de monitoramento, permitir a quantificação de impactos ambientais, ser uma ferramenta de análise de projetos para futuros empreendimentos, e ainda determinar áreas mais impactadas por uma determinada emissão, dentre os seus muitos usos. Entretanto, apesar de já se dispor dessas ferramentas, muitas vezes não se dispõe dos dados necessários à realização desses estudos, principalmente, em países em desenvolvimento. Esses dados podem apresentar falhas de observação ao longo de um período ou estarem a uma distância superior à adequada para a realização de tais estudos (NEW ZEALAND, 2004).

Dentre os modelos utilizados para a realização de estimativa de concentrações de poluentes ao nível do solo, encontra-se o modelo regulatório AERMOD. O modelo AERMOD é um modelo gaussiano estacionário, que necessita dos seguintes dados para a realização de suas simulações: dados meteorológicos (de altitude e de superfície); dados referentes à topografia; ao uso do solo; e à emissão (tipo de fonte emissora e a altura, velocidade, taxa e temperatura de emissão). Para a realização das simulações, um dos conjuntos de dados mais importantes é o dos dados meteorológicos.

Assim, algumas empresas internacionais, percebendo a necessidade de dados meteorológicos para a realização de estudos de dispersão de poluentes, têm comercializado dados oriundos de simulações obtidas a partir de modelos de prognóstico¹ de meso-escala,

¹ Modelos de prognóstico ou modelos de previsão. São capazes de prever valores de temperatura, pressão, velocidade e direção do vento a partir de dados de previsão disponibilizados para escala global

como o MM5 Community Model (MM5) e o Weather Research and Forecasting (WRF).

Neste sentido, o estudo aqui proposto tem como objetivo verificar quão bem os dados simulados pelo MM5 representam os dados observados de vento e temperatura para a região metropolitana do Rio de Janeiro. É proposta ainda uma análise de sensibilidade verificando o impacto da substituição dos dados de direção e intensidade do vento observados, pela direção e intensidade de vento simuladas pelo MM5, no cômputo das concentrações simuladas pelo AERMOD.

Por fim, será realizado um estudo comparativo das concentrações do poluente dióxido de enxofre, obtidas através do AERMOD, com as concentrações medidas para uma estação de monitoramento da qualidade do ar em Jardim Primavera (Polícia Rodoviária Federal – PRF), e de sua relação com os padrões de qualidade do ar prescritos na legislação.

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

No presente trabalho, pretende-se verificar a viabilidade da utilização do modelo de prognóstico de mesoescala MM5 para o provimento de dados meteorológicos ao modelo de dispersão AERMOD. Para tal, será realizada uma aplicação ilustrativa à região metropolitana do Rio de Janeiro, RJ.

2.2 Objetivos específicos

Neste trabalho, tem-se como objetivos específicos:

-Fazer a comparação da temperatura, das intensidades e das direções de vento simuladas pelo MM5, com dados de temperatura, intensidade e direção de vento observados nos aeroportos do Galeão, Santos Dumont, Campos dos Afonsos e Jacarepaguá. Serão comparados ainda as direções e intensidades de vento simuladas e observadas para a estação de monitoramento de Jardim Primavera.

-Comparar os resultados das simulações, realizadas pelo AERMOD, a partir de quatro abordagens (METAR-AERMOD, MM5-SBGL-AERMOD, PRF-METAR-AERMOD, MM5-PRF-AERMOD),

com os dados de concentração de dióxido de enxofre medidos para a estação de monitoramento de Jardim Primavera, situada na Polícia Rodoviária Federal.

-Realizar um estudo comparativo entre a versão 11059 da EPA e a versão 6.0.0 da Lakes Environmental, com o fim de comparar os resultados gerados.

-Fazer um estudo comparativo dos dados obtidos, quais sejam, os resultados das simulações do AERMOD obtidos a partir de dados meteorológicos observados, com o que preconiza a resolução CONAMA 03/90 para o poluente dióxido de enxofre.

3. Revisão bibliográfica

3.1 Utilização conjunta de modelos de mesoescala e de dispersão nos últimos anos

Na última década, resultados interessantes foram obtidos por pesquisadores em diferentes estudos realizados em muitos lugares do mundo, como nos estados da Califórnia e da Pensilvânia, nos Estados Unidos, e em Pune, na Índia.

Isakov et al., (2006) realizaram um estudo comparativo, ao longo de oito dias, entre o provimento de dados meteorológicos para um modelo de dispersão similar ao AERMOD, a partir dos dados meteorológicos provenientes dos modelos Eta, MM5 e de estações meteorológicas, para a cidade de Wilmington, CA, USA, que se situa na proximidade do mar.

A grade do MM5, determinada por Isakov e colaboradores, apresentava duas grades aninhadas à grade principal, sendo que as dimensões de cada grade eram de 27, 9 e 3 km, respectivamente. A configuração do modelo dispunha de 36 níveis sigma², e suas principais parametrizações foram as seguintes:

- Microfísica de nuvens: simple ice;
- Camada limite atmosférica: Eta, esquema baseado nas formulações de Mellor-Yamada (1974, 1982) e Janjic (1990, 1994);
- Modelo de superfície: modelo de solo multi-camada.

No trabalho de Isakov e colaboradores, os dados meteorológicos para o MM5 foram extraídos a partir do modelo Eta, para cada 12 horas, com resolução de 40 km e contaram com a assimilação diária de dados de temperatura da superfície do mar, obtidos a partir da US Navy.

O estudo consistiu na comparação de diversos parâmetros. Dentre eles foram comparadas as rosas dos ventos observadas com as simuladas a partir do MM5 e do modelo Eta. As rosas dos ventos geradas pelo MM5 foram as que mais se assemelharam aos resultados observados nas estações meteorológicas de Wilmington.

² Níveis sigma: são obtidos a partir dos níveis de pressão e permitem que se considere a influência da topografia na simulação. Maiores detalhes na página 24.

Os ventos predominantes da região de Wilmington são oriundos das direções noroeste e sul. O MM5 foi capaz de captar as componentes oriundas do sul com algum desvio da direção principal, enquanto que não foi capaz de captar os ventos oriundos do noroeste. Já o modelo Eta captou as componentes oriundas do noroeste com algum desvio da direção principal, porém não captou as componentes oriundas do sul.

Segundo os autores, os modelos de prognóstico encontraram dificuldade em prever a direção do vento na cidade de Wilmington. O MM5 conseguiu prever as brisas marítimas melhor do que a previsão obtida pelo modelo Eta. O estudo concluiu que, para a localidade de Wilmington, quanto maior a resolução das grades melhor o desempenho do MM5 em relação ao modelo de prognóstico Eta.

Kesarkar et al., (2007) realizaram o acoplamento do modelo WRF ao modelo AERMOD a fim de utilizar este último em Pune, Índia. Foi realizada uma análise comparativa, no período de 13-17 de abril de 2005, da temperatura, da direção e da intensidade dos ventos, estimadas pelo modelo WRF em relação aos dados observados.

As simulações revelaram que o modelo de prognóstico WRF foi capaz de prever bem os dados observados de temperatura, como pode ser observado na Figura 1. As linhas em roxo correspondem as temperaturas observadas, enquanto que as em azul, as simuladas pelo WRF.

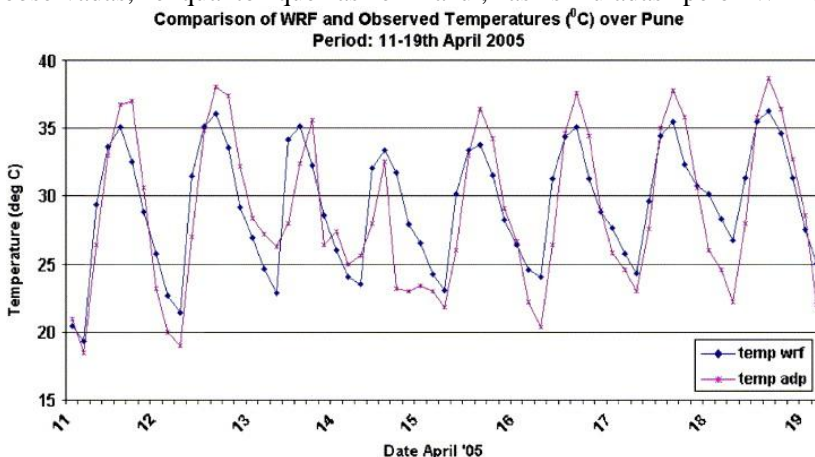


Figura 1 - Comparação das temperaturas estimadas pelo WRF e observadas para Pune no período de 11-19 de abril de 2005. Fonte: Kesarkaret al., (2006).

As intensidades dos ventos simulados subestimaram as observadas. Entretanto, as direções simuladas foram capazes de prever as direções predominantes de vento observadas ao longo dos cinco dias.

A Figura 2a apresenta as direções de vento observadas no período, enquanto que a Figura 2b, os ventos simulados pelo WRF para o período. Verificou-se que os ventos simulados puderam reproduzir as principais direções de vento, entretanto subestimaram as intensidades de vento observadas.

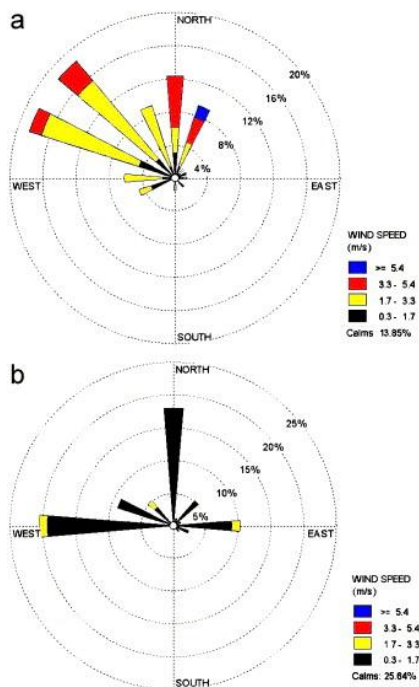


Figura 2 - Comparação dos ventos estimados pelo WRF e observados para Pune durante o período de 11-19 de abril de 2005. Fonte: Kesarkar et al., (2006).

Foi ainda realizada uma análise comparativa dos resultados simulados através da metodologia WRF-AERMOD, com os dados observados nas estações de qualidade do ar locais, para MP-10 (material particulado menor que 10 micra). Os resultados dessa comparação podem ser vistos na Figura 3, onde são apresentados os valores medidos diários e os simulados diários, para quatro localidades.

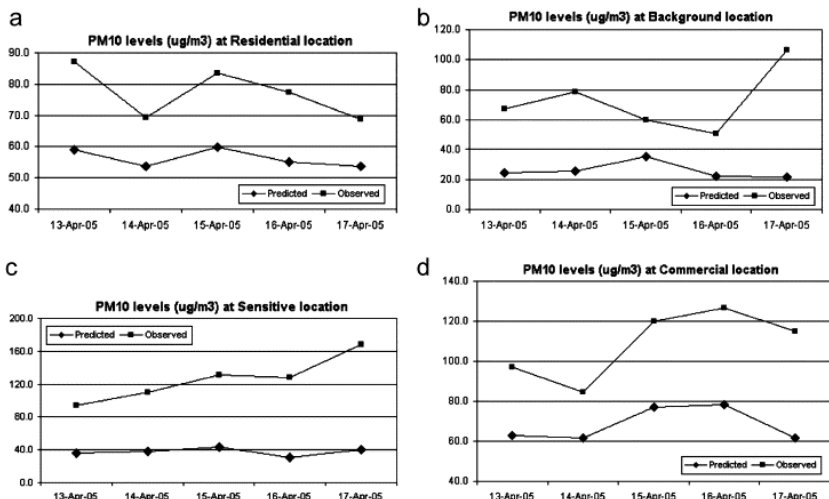


Figura 3 - Comparação dos valores previstos pelo WRF-AERMOD em relação a valores observados. Fonte: Kesarkar et al., (2006).

Touma et al., (2007) realizaram uma comparação entre o provimento de dados para o AERMOD a partir do MM5, e a partir de estações meteorológicas, para a Filadélfia, PA, USA.

A Figura 4a apresenta a rosa dos ventos média observada no período de 1981-1990, enquanto que a Figura 4b, a rosa dos ventos no ano de 2001, processada no AERMET. A Figura 4c apresenta os ventos simulados para o ano de 2001, porém simulados no MM5, enquanto que a Figura 4d, apresenta a rosa dos ventos referente aos mesmos dados da Figura 4a, porém apenas considerando os ventos que ocorreram entre às 8h e às 18 h. A Figura 4e apresenta a rosa dos ventos referente aos mesmos dados da Figura 4b, porém considerando apenas os ventos que ocorreram entre às 8h e às 18h. A Figura 4f apresenta a rosa dos ventos referente aos mesmos dados da Figura 4c, porém apenas considerandoos ventos que ocorreram entre às 8h e às 18h.

O ano de 2001 revelou ter um padrão de ventos similar ao do período de 1981-1990. Porém, os dados de vento simulados pelo MM5 apresentaram uma direção predominante de ventos um pouco distinta da direção predominante observada. Segundo o autor, isso se deve ao fato de serem desprezados os ventos abaixo de 1,5 m/s e devido o MM5 não representar tão bem a topografia da região. Esse padrão mostrou-se ainda mais acentuado para o período das 8h às 18h.

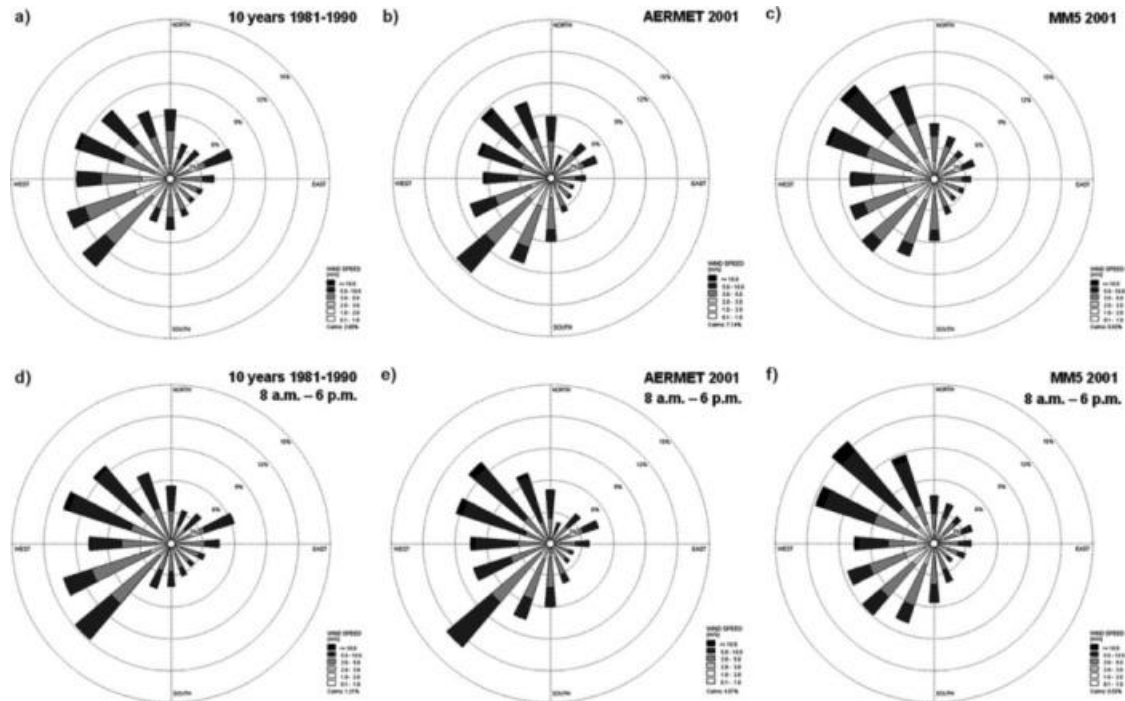


Figura 4 - Comparação dos padrões de vento dos períodos: a) 1981-1990, b) 2001 c)MM5 2001, d) 10 anos 1981-1990 8 – 18 h, e) 2001 8 – 18 h, f) MM5 2001. Fonte:Toumaet al., (2007).

A Figura 5 apresenta uma comparação das abordagens MM5 – AERMOD e NWS³-AERMOD (onde os dados meteorológicos são obtidos através de simples observação) de todas as concentrações horárias de benzeno para todos os pontos da grade ao longo de todo o período de simulação, organizadas em ordem crescente de valores de concentração. Segundo Toumaet al., (2007) os dados estimados a partir do método MM5-AERMOD apresentaram resultados com um fator de duas a três vezes maiores que os resultados estimados a partir do método NWS-AERMOD. Apesar de não ter sido feita uma comparação com dados medidos de concentração, o método MM5-AERMOD revelou-se para este caso mais restritivo que o método NWS-AERMOD, uma vez que as concentrações estimadas a partir do método MM5-AERMOD foram mais elevadas.

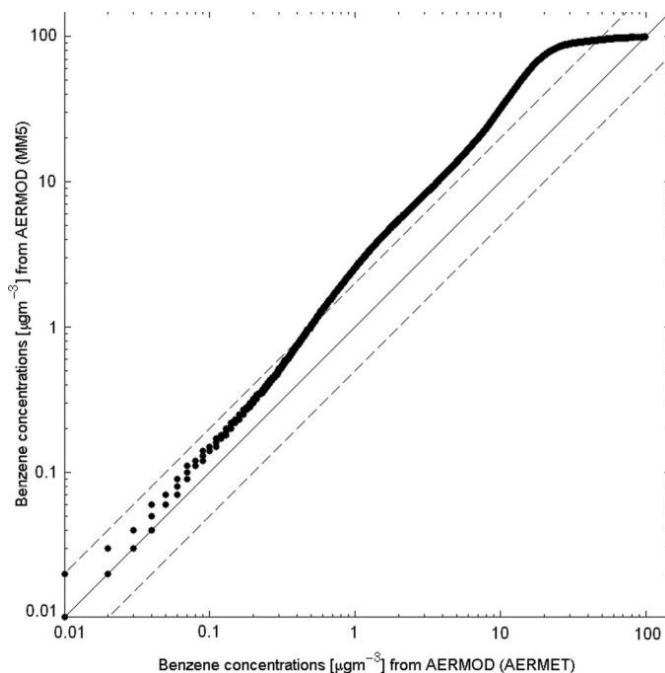


Figura 5 - Comparação de todas as concentrações horárias de benzeno para todos os pontos da grade ao longo de todo o período de simulação, organizadas em ordem crescente de valores de concentração de Benzeno estimada a partir do MM5 - AERMOD versus a utilização tradicional do AERMOD a partir de estações meteorológicas (NWS). Toumaet al., (2007).

³ NWS – National Weather Service. Dados provenientes das estações meteorológicas dos Estados Unidos.

A Figura 6 apresenta o desvio médio entre os resultados das concentrações calculadas a partir dos métodos MM5-AERMOD e NWS-AERMOD. Os resultados foram obtidos a partir da fórmula dada abaixo:

$$\text{Desvio médio normalizado} = 100 \cdot \left[\frac{(C_{MM5} - C_{AERMOD})}{\frac{(C_{MM5} + C_{AERMOD})}{2}} \right],$$

onde C_{MM5} é a concentração estimada a partir do método MM5-AERMOD, e C_{AERMOD} é a concentração estimada a partir do método NWS-AERMOD.

Os resultados apresentaram maiores valores de concentração na direção sudeste, o que, segundo Touma et al., (2007) se deve possivelmente a direções de vento noroeste do MM5.

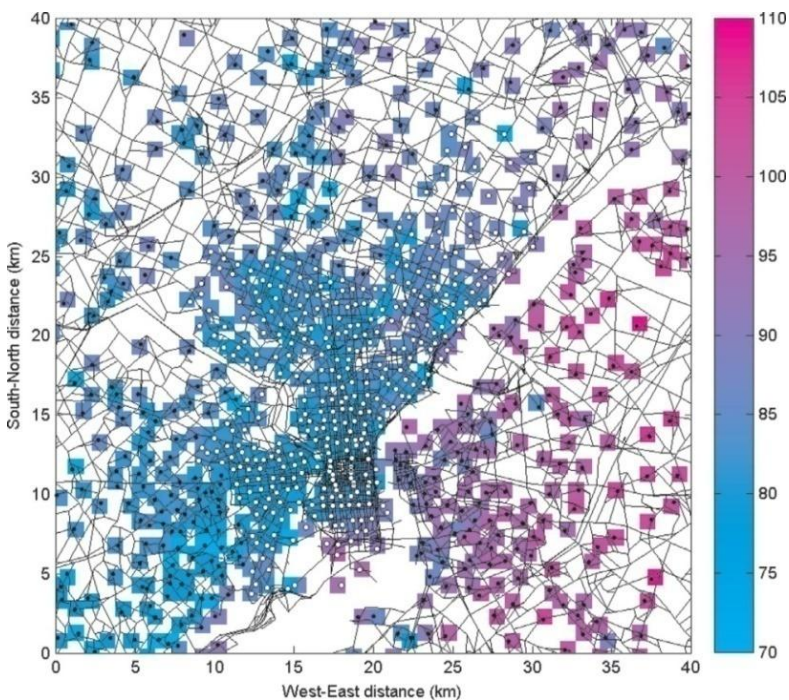


Figura 6 - Desvio médio normalizado (%) das concentrações médias de Benzeno estimadas a partir do MM5-AERMOD e a partir do NWS-AERMOD. Fonte: Touma et al., (2007).

A Figura 7 apresenta um histograma de frequências das concentrações obtidas nas simulações de Toumaet al., (2007). Para a confecção dos histogramas, selecionou-se todas as concentrações calculadas para todos os pontos da grade ao longo do período simulado e verificou-se a frequência de ocorrência de determinada concentração. As concentrações estimadas pelo método MM5-AERMOD apresentaram frequências de ocorrência maiores que as obtidas pelo método NWS-AERMOD. Esse fato se deve a uma maior disponibilidade de horas de simulação, uma vez que não houve ausência de horas simuladas no método MM5-AERMOD.

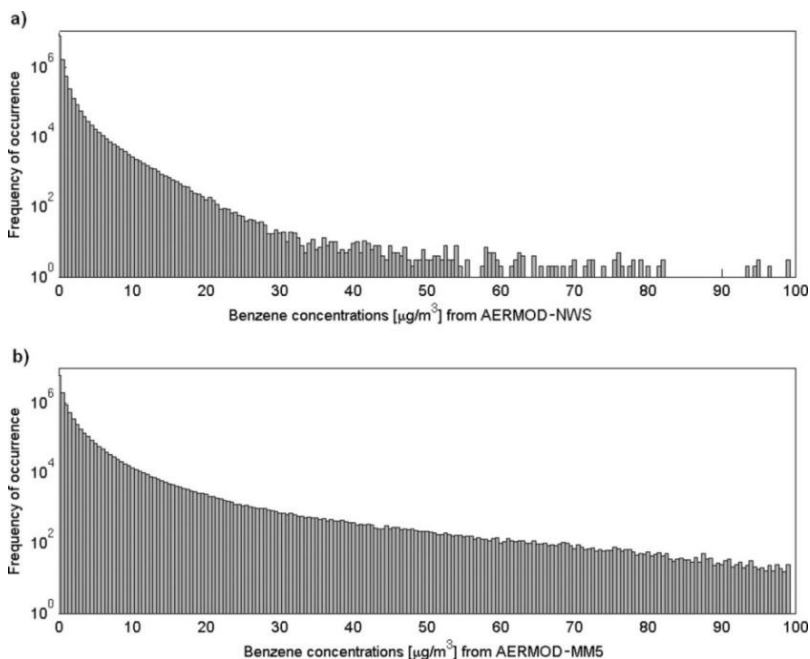


Figura 7 - Histograma de concentrações para cada hora e receptor a partir do método NWS-AERMOD e MM5-AERMOD. Fonte: Toumaet al., (2007).

Segundo os autores, as maiores concentrações estimadas pelo AERMOD, pelo método MM5-AERMOD, se devem ao fato dos ventos simulados serem menos intensos que os ventos observados.

3.2 Descrição dos modelos

3.2.1 Modelo MM5

O modelo MM5 é um modelo de prognóstico. Ele foi desenvolvido no final da década de 70 num esforço conjunto da Penn State University e da NCAR (National Center for Atmospheric Research).

O modelo encontra-se em sua quinta versão, sendo que foram implementadas as seguintes atualizações ao longo dos anos:

- Capacidade de múltiplos aninhamentos;
- Assimilação dos dados em quatro dimensões (x, y, σ e tempo);
- Dinâmica não hidrostática;
- Portabilidade em várias plataformas computacionais;
- Diversas parametrizações físicas (caracterizam melhor a região e os fenômenos simulados).

O modelo faz uso de um sistema de coordenadas denominado coordenadas sigma. Estas são obtidas em função dos níveis de pressão definidos em um dos seus módulos. As coordenadas sigma acompanham a topografia da região.

O modelo resolve as seguintes equações:

- Equação de Navier Stokes;
- Primeira Lei da termodinâmica;
- Conservação da Quantidade de Movimento.

O modelo demanda condições iniciais e de contorno que podem ser obtidas a partir das seguintes fontes:

- Dados de análise oriundos de modelos de grande escala (exemplo escala global);
- Simulações do próprio modelo que já tenham sido realizadas (ex. simulações para uma grade mais espaçada);
- Simulações provenientes de outro modelo de prognóstico.

O modelo MM5 foi desenvolvido em estrutura modular. Segue abaixo uma descrição de cada um dos módulos que serão utilizados na simulação.

3.2.1.1 TERRAIN

O módulo TERRAIN é o primeiro módulo a ser utilizado. Nele são definidos o número de grades, seus aninhamentos e o número de pontos por grade. As grades aninhadas⁴ serão definidas a partir das latitudes e longitudes centrais da grade principal. Nesse módulo, também é definida a resolução dos mapas que serão utilizados, e a partir daí, o módulo realiza a leitura da elevação do terreno e do uso e ocupação do solo.

3.2.1.2 REGRID

O módulo REGRID é o segundo módulo a ser utilizado. Ele é composto de dois sub-módulos, PREGRID e REGRIDDER. O sub-módulo PREGRID realiza a assimilação dos dados meteorológicos globais em níveis de pressão, e prepara esses dados para posterior leitura e acoplamento dos mesmos à grade de terreno no sub-módulo REGRIDDER.

3.2.1.3 INTERPF

O módulo INTERPF gera as condições iniciais e de fronteira para a grade principal e para cada uma das grades aninhadas. No módulo INTERPF são gerados os níveis sigma, que são função da elevação, a partir da interpolação dos níveis de pressão de superfícies isobáricas.

3.2.1.4 MM5

O módulo MM5 é o último módulo. Nele são definidas as parametrizações, que servem para melhor caracterizar os fenômenos atmosféricos que ocorrem na região. O módulo MM5 realiza o cálculo das equações de Navier-Stokes para as três dimensões da malha definida pelo usuário, bem como a resolução da equação da primeira lei da termodinâmica e da conservação da massa.

⁴ Aninhamento é o processo de implementação de grades de maior resolução que estejam contidas em grades de menor resolução. Isto é realizado caso haja interesse em se detalhar melhor a área de estudo.

3.2.1.5 *Formulação básica do MMS*

São apresentadas abaixo as principais equações que regem o modelo.

Pressão:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot V = -V \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left(\frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (3.2.1.5.1)$$

Quantidade de Movimento em (x,y,z):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -V \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{Terra}} + D_u \quad (3.2.1.5.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -V \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + e w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{Terra}} + D_v \quad (3.2.1.5.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\rho_0 g}{\rho p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{g p'}{\gamma p} = -V \cdot \nabla w + g \frac{p_0 T'}{p T_0} - \frac{g R_d p'}{c_p p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{Terra}} + D_w \quad (3.2.1.5.4)$$

Primeira lei da Termodinâmica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + V \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (3.2.1.5.5)$$

O termo advectivo pode ser expandido como:

$$V \cdot \nabla A \equiv m u \frac{\partial u}{\partial x} + m v + \sigma \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (3.2.1.5.6)$$

Onde

$$\sigma = \frac{D\sigma}{Dt} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} u - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} v \quad (3.2.1.5.7)$$

O termo divergente pode ser expandido como:

$$\nabla \cdot V = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (3.2.1.5.8)$$

O nível sigma pode ser descrito como:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_{top}}{p_{sup} - p_{top}} = \frac{p_0 - p}{p'} \quad (3.2.1.5.9)$$

Onde, as variáveis que apresentam o sub-índice “0” referem-se a valores de referência para essa variável. As variáveis que apresentam “” referem-se a variações dos valores de referência. Segue, na Tabela 1 a descrição das variáveis utilizadas.

Tabela 1: Descrição das variáveis utilizadas nas equações do modelo MM5.

\dot{Q}	taxa de aquecimento (calor sensível + calor latente).
ρ	Densidade
θ	Temperatura potencial
γ	$\gamma = c_p / c_v$
g	Aceleração da gravidade
D_x	Difusão horizontal
D_v	Difusão vertical
D_w	Mistura vertical
D_θ	Ajuste convectivo
e	Força de Coriolis ($e = 2\Omega \cos \theta \lambda$)
α	$\alpha = \varnothing - \varnothing_c$
λ	Latitude
\varnothing	Longitude
\varnothing_c	Longitude Central

O termo entre parêntesis na equação da pressão é desconsiderado e representa o aquecimento que faz com que as massas de ar expandam e tenham a sua pressão acrescida.

Os termos $u \frac{\partial u}{\partial y}$, $v \frac{\partial v}{\partial x}$, r_{Terra} referem-se aos efeitos de curvatura da terra, sendo que m é o fator da escala do mapa.

As equações da conservação do momento em x , em y e do termo de divergência expandido dispõe de termos para calcular superfícies sigma inclinadas quando for efetuado o cálculo de gradientes horizontais.

3.2.1.6 *Parametrizações físicas*

São cinco as possíveis parametrizações que o modelo MM5 pode receber. Segue abaixo uma breve descrição a respeito de cada uma delas. Será apresentado um panorama de cada um dos cinco tipos de parametrização e será dado maior atenção a descrição da parametrização escolhida para a rodagem do modelo. Maiores informações sobre o modelo MM5 podem ser encontradas em Corrêa (2005) e em PSU/NCAR (2011).

a) Parametrização de nuvens e microfísica:

As parametrizações do MM5 realizam a distribuição na grade simulada os valores de umidade, temperatura e calor, o que pode vir a

acarretar a formação de chuva. Além disso, as parametrizações são capazes de simular processos, como a formação das gotas e mudanças de fase (água-gelo). As parametrizações de nuvens permitem que se saiba se um ponto se encontra no interior ou no exterior da nuvem. Caso a umidade se encontre em 100% o modelo assume que o ponto está no interior da nuvem, o que faz com que a parametrização de microfísica seja ativada. As parametrizações de microfísica são capazes de prever precipitações de baixa e elevada intensidade.

Parametrização de cumulus: Grell

O modelo Grell simula as nuvens como dispendo de apenas dois tipos de movimento (ascendente e descendente). O fluxo de massa é considerado constante com a altura e toda a água condensada é transformada em chuva. Esta parametrização segundo Moraes (2008) não é adequada para domínios inferiores a 10 km.

Parametrização de microfísica: Dudhia

A parametrização de Dudhia é conhecida como Simple Ice. A parametrização baseia-se na parametrização WarmRain. No modelo Simple Ice toda a água que se encontra a uma temperatura acima de zero grau Celsius é considerada chuva e toda água encontrada a uma temperatura menor do que zero é considerada neve. Essa parametrização considera o tamanho e a velocidade de queda das gotas de chuva.

b) Parametrização da camada limite atmosférica (CLA):

Há diversos tipos de parametrização de camada limite. Uma das opções disponibilizadas pelo modelo MM5 é a da não utilização da parametrização de camada limite. Essa alternativa torna-se interessante quando se pretende a realização de testes de sensibilidade. Quando escolhida a utilização dessa parametrização, a mesma poderá simular algumas das opções abaixo listadas dependendo da configuração escolhida: estimacão dos fluxos de calor e umidade na superfície (esquema de Bulk); previsãoda mistura vertical do vento horizontal, da temperatura potencial e da razão de mistura da água e gelo das nuvens (esquema Blackadar de alta resolução); estimacão da turbulência acima da camada de superfície e abaixo da camada de superfície (esquema Eta); estimacão da altura da camada limite (esquema MRF).

Parametrização de CLA: Mellor Yamada

A parametrização de Mellor-Yamada também é conhecida como parametrização Eta. O esquema Eta é composto de seis camadas. A primeira camada é a camada de subsolo (essa camada só é estimada sobre a superfície do solo). A segunda camada é a camada viscosa atribuída pelo modelo à superfície do mar. A camada rasa de turbulência dinâmica é a terceira das cinco camadas. A quarta camada é considerada a camada rasa de turbulência dinâmica, por fim vem a camada de superfície e a atmosfera livre.

c) Parametrização de superfície:

As parametrizações de superfície podem simular a variação diária da temperatura nas camadas de solo e simular a umidade no interior do solo. Dependendo da parametrização escolhida o modelo poderá gerar um prognóstico de temperaturas e umidade de até quatro camadas de solo.

Parametrização de superfície: Modelo de solo NOAH LSM

A parametrização de solo NOAH LSM é um modelo que foi desenvolvido para trabalhar acoplado a estrutura modular do MM5. O modelo é capaz de prever dados de temperatura e umidade do solo em quatro profundidades.

d) Parametrização de radiação:

As parametrizações de radiação podem ser utilizadas para realizar testes de sensibilidade, simular o aquecimento da atmosfera por radiação ou determinar o fluxo radiativo num volume de ar.

Parametrização de radiação: Dudhia

A parametrização de Dudhia é também conhecida como esquema radiação de Nuvem. Nela são calculados os fluxos radiativos de superfície a fim de serem calculados os balanços energéticos de superfície e a divergência dos fluxos.

3.2.2 Modelo AERMOD

O modelo AERMOD é o resultado do esforço conjunto da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) e da Sociedade Americana de Meteorologia (AMS). Ambas as organizações montaram um grupo de trabalho denominado AERMIC (AMS/EPA RegulatoryModelImprovementCommittee) que desenvolveu o modelo.

O modelo conta com uma estrutura modular. Seus principais módulos são descritos a seguir: o módulo AERMAP (processa dados de topografia), AERMET (processa dados meteorológicos) e AERMOD (calcula a concentração ao nível do solo com base nas informações pré-calculadas nos módulos anteriores). Há ainda o módulo AERSURFACE (estima dados de albedo, razão de bowen e rugosidade com base em dados digitalizados de uso do solo) e BPIPRIME (calcula os efeitos de turbulência devido aos efeitos de edificações, conhecido como *buildingdownwash*). O modelo pode simular fontes pontuais (com lançamento vertical, com lançamento horizontal e que possuam alguma espécie de cobertura). As opções de emissão vertical e de emissão com presença de recobrimento no topo da chaminé encontram-se em teste e não podem ser utilizadas caso a opção DFAULT seja selecionada na rotação do modelo, a opção DFAULT é a opção regulatória.

3.2.2.1 AERMAP

O AERMAP é o módulo responsável pelo processamento dos dados topográficos. Esse módulo permite a simulação de terrenos simples (planos) e terrenos complexos. Para tal, devem ser definidas a projeção dos dados de entrada, o domínio da modelagem, a ancoragem da fonte e dos receptores, o número e a localização das fontes e receptores e a elevação dos receptores. O módulo calcula a altitude da base das fontes e dos receptores e a *hill height scale* (altura que mais influência na dispersão de um poluente). O módulo AERMAP dispõe da opção de serem extraídas as alturas das fontes e receptores a partir do arquivo digital de elevação, ou as alturas das fontes e dos receptores podem ser informadas manualmente.

3.2.2.2 AERMET

O AERMET é o módulo responsável por calcular diversos parâmetros referentes a camada limite planetária que serão utilizados

pelo módulo AERMOD no cálculo de concentrações do poluente na altura requerida pelo usuário. Ele dispõe de três fases de processamento. A primeira fase consiste na extração e avaliação dos dados. Na segunda, os dados de superfície e de altitude são mesclados para períodos de 24 horas (os dados de superfície possuem frequência horária, enquanto que os de altitude possuem frequência de duas vezes ao dia). Na terceira etapa são inseridos os valores de albedo⁵, rugosidade ou comprimento de rugosidade superficial⁶, e razão de Bowen⁷. Ao final da terceira etapa são gerados dois arquivos: .SFC (referente aos dados de superfície) e .PFL (referente aos dados de perfil atmosférico).

O módulo processa três categorias de dados meteorológicos: dados de superfície (dados horários de variáveis meteorológicas), dados de altitude (obtidos através de radiossondagens realizadas duas vezes ao dia), e dados locais (retirados de estações meteorológicas dispostas no local de estudo). Não havendo dados de altitude disponíveis, a empresa Lakes Environmental disponibiliza um estimador na versão comercial 6.0.0 do AERMOD.

A última versão do AERMOD disponibilizada pela EPA (versão 11059) não dispõe de um estimador de dados de altitude⁸ (apenas a versão 6.0.0 da Lakes Environmental). O estimador simula os dados de altitude a partir de dados de superfície. Maiores detalhes sobre o algoritmo, utilizado no estimador da versão distribuída pela Lakes Environmental, podem ser encontrados em Carbonell et al., (2010). O estimador é de grande importância para casos onde não se dispõe de dados de sondagem da atmosfera. Caso não haja dados de altitude (observados ou estimados), o modelo efetua os cálculos de concentração, da mesma forma que realizaria os cálculos caso os ventos fossem pouco intensos (modo de calmaria), o que acarreta numa subestimação de concentrações.

O AERMET pode ler os seguintes formatos de arquivos de superfície: CD-144, HUSWO, IHSD, SAMSON, SCRAM, TD-3280VB

⁵ Albedo - fração total refletida sem absorção para o espaço, da radiação que incide na superfície.

⁶ Comprimento de Rugosidade superficial - refere-se a altura em que a velocidade do vento horizontal é zero, o que ocorre em decorrência de obstáculos presentes na superfície.

⁷ Razão de Bowen - Indica a umidade da superfície e é usada para determinar os parâmetros de camada limite convectiva em condições convectivas. A razão de bowen é a razão entre calor sensível e o calor latente.

⁸ Estimador de dados de altitude: Estima os dados contidos nos arquivos .PFL quando não se dispuser de dados observados de altitude. Carbonelletall., (2010) descreve como estimar esses dados a partir de dados de superfície, o autor também relata que esse processo pode ser realizado a partir da extração de variáveis simuladas pelos modelos MM5 e WRF-ARW.

e TD-3280FB; e os seguintes formatos de perfil: FSL, TD-6201FB e TD-6201VB.

O arquivo .SFC ou arquivo de superfície informa ao módulo AERMOD o valor dos seguintes parâmetros: ano, mês, dia, dia juliano, hora, H (fluxo de calor sensível, W/m^2), u^* (velocidade de fricção superficial, m/s), w^* (velocidade de escala convectiva, m/s), VPTG (gradiente potencial de temperatura vertical acima da camada limite, K/m), Zic (altura da camada limite convectiva, m), Zim (altura da camada limite mecânica, m), L (comprimento de Monin-Obukhov, m), z_0 (comprimento de rugosidade superficial, m), Bo (razão de Bowen, m), r (albedo), Ws (velocidade do vento de referência, m/s), Wd (direção do vento de referência, graus), zref (altura de referência do vento ou altura do anemômetro, m), temp (temperatura de referência, K), ztemp (altura de referência da temperatura, K), ipcode (código de precipitação, 0-nenhuma; 11-líquido; 22-congelado; 99-faltante), pamt (quantidade de precipitação, mm/h), Rh (umidade relativa, %), pres (pressão da estação meteorológica, mb), ccvr (cobertura de nuvens, décimos), WSADJ (ajuste de velocidade do vento e notificação quanto a qualidade dos dados).

O arquivo .PFL ou arquivo de perfil informa ao módulo AERMOD o valor dos seguintes parâmetros: ano, mês, dia, hora, altura de medição (m), topo (informa 1 se esse for o nível mais elevado para a hora, caso contrário informa 0), WDnn (direção do vento no referido nível, graus), WSnn (velocidade do vento no referido nível, m/s), TTnn (temperatura no referido nível, Celsius), SAnn (desvio padrão da direção do vento, graus), SWnn (desvio padrão da velocidade do vento, m/s).

Tanto os dados referentes ao perfil quanto os dados referentes ao arquivo de superfície podem ser substituídos por outros criados no mesmo formato o que é útil no caso de serem utilizados dados provenientes de outro programa como o MM5.

3.2.2.3 *AERMOD*

O módulo AERMOD assimila os dados fornecidos pelos módulos AERMAP e AERMET e realiza o cálculo das concentrações para a altura estabelecida pelo usuário no módulo AERMAP. O modelo AERMOD é um modelo estacionário, pois não leva em consideração as concentrações calculadas na hora anterior, considera as condições atmosféricas estáveis ao longo de cada hora simulada e considera dispersão instantânea entre a fonte e o receptor. Devido a essas

simplificações provenientes da sua formulação o modelo apresenta resultados mais representativos para longos períodos de simulação.

Além das simplificações listadas anteriormente o modelo AERMOD não realiza o cômputo de concentrações para as horas de calmaria, sendo essas as de menor dissipação do poluente. Apesar disso, o AERMOD é um modelo regulatório e apresenta resultados confiáveis, desde que utilizado adequadamente

O módulo efetua o cálculo das concentrações do poluente na altura definida pelo usuário com base nas classes de estabilidade. O modelo é capaz de simular cinco tipos de plumas (direta, indireta, penetrada, injetada e estável). Dessas, três referem-se a condições convectivas, quando o comprimento de Monin-Obukhov é menor do que zero são elas direta, indireta e penetrada. As outras duas são referentes a condições estáveis.

As condições estáveis consideram a distribuição gaussiana horizontal e vertical, enquanto que as condições convectivas consideram a distribuição gaussiana apenas na horizontal e apresentam distribuição bi-gaussiana na vertical.

A pluma direta é emitida no interior da camada de mistura e apresenta ausência de interação da pluma com o topo da camada de mistura.

A pluma indireta também se encontra na camada de mistura, entretanto a sua parte superior apresenta interação com o topo da camada de mistura.

A pluma penetrada é liberada no interior da camada de mistura, porém penetra o nível mais estável acima devido a sua flutuabilidade.

A pluma injetada ocorre em situações convectivas, onde a altura de emissão da pluma é superior a altura de mistura. Os cálculos para esse tipo de pluma são realizados da mesma forma que para a pluma estável, mas são contabilizadas a turbulência e a heterogeneidade da camada de mistura, quando são calculadas as concentrações dos receptores.

Segue abaixo, a descrição da formulação gaussiana utilizada no modelo para calcular as condições estáveis.

$$C_s(x_r, y_r, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_{zs}} \cdot F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right]$$

As variáveis e parâmetros desta equação estão definidos na Tabela 2.

Tabela 2: Definição das Variáveis da Equação gaussiana utilizada pelo AERMOD.

C_s	concentração no ponto x,y,z
x_r, y_r	localização do receptor
z	altura acima do nível do mar (m)
Q	taxa de emissão da fonte (g/s)
\tilde{u}	velocidade média do vento (m/s)
σ_{zs}	dispersão vertical total na camada limete convectiva
m	número de fontes
h_{es}	altura da pluma (altura da chaminé + elevação da pluma)
z_{ieff}	altura de mistura mecânica da camada limite
m	número de imagens fonte(WEIL; CORIO; BROWER, 2011)

Maiores informações sobre o modelo AERMOD podem ser encontradas em Cunha (2009), e nos manuais do modelo (EPA, 2004).

4. Materiais e métodos

este capítulo, serão apresentadas a caracterização da região metropolitana do Rio de Janeiro, juntamente com as configurações utilizadas para os modelos MM5 e AERMOD, sendo descritas minuciosamente as opções escolhidas em cada módulo de cada modelo. Na parte final do capítulo, serão apresentadas as metodologias de avaliação dos resultados obtidos e a comparação dos mesmos com os padrões estabelecidos pela resolução CONAMA 03/90.

4.1 Caracterização meteorológica

A região metropolitana do Rio de Janeiro é densamente urbanizada. Segundo INEA (2009) a região conta com 17 municípios, sendo a segunda região mais densamente urbanizada do país. A região dispõe de área de aproximadamente 5500 km² e população de aproximadamente 12 milhões de habitantes (Fundação CIDE, 2007, apud INEA, 2009). A região conta também com grande número de indústrias e veículos, acarretando graves problemas de poluição do ar.

Ao longo dos meses de maio a setembro, a região sofre a atuação de altas pressões que dificultam a dispersão dos poluentes. Além disso, os maciços da Tijuca e da Pedra Branca bloqueiam a circulação dos ventos provenientes do mar, prejudicando a circulação atmosférica das áreas mais internas da região. A influência do oceano atlântico e de mais duas baías (Guanabara e Sepetiba), juntamente com a influência dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca, alteram a configuração dos ventos sinóticos na escala local. Por sua vez, a região ainda conta com o bioma mata atlântica (floresta da Tijuca). Todas essas interferências dificultam o processo de simulação da região, uma vez que os dados de uso do solo são influenciados diretamente pelas interferências acima citadas.

Na Figura 8, são apresentadas as bacias aéreas da região metropolitana do Rio de Janeiro, as quais foram delimitadas com base na topografia e na meteorologia da região. As simulações realizadas neste trabalho encontram-se inscritas na bacia aérea III, apresentada na figura abaixo.

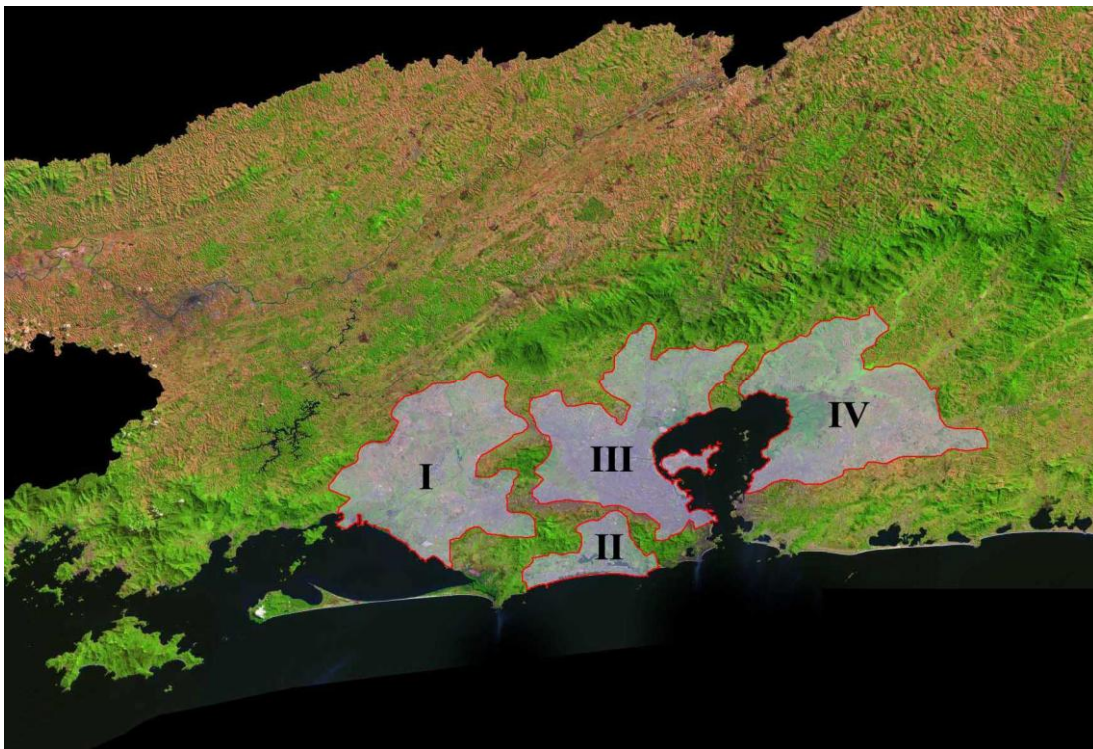


Figura 8: Bacias aéreas da região metropolitana do Rio de Janeiro. Fonte: Relatório anual da qualidade do ar do estado do Rio de Janeiro produzido pelo INEA.

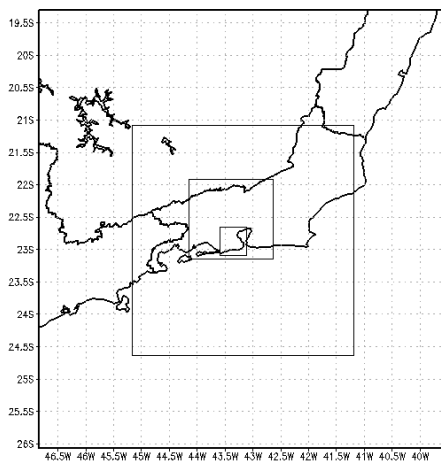
4.2 Configuração do MM5

O modelo MM5 foi configurado para realizar simulações a cada três dias, sendo descartadas as primeiras 24 horas e aproveitadas as 48 horas restantes. A única exceção foi a utilização das primeiras 24 da primeira simulação realizada, uma vez que não foi simulado nenhum período anterior. A primeira simulação realizada compreendeu os dias 3-5 de maio de 2011. Essa metodologia foi aplicada, pois o modelo tende a reproduzir resultados melhores a partir do segundo dia simulado. Metodologia semelhante foi aplicada em Moraes (2008).

4.2.1 TERRAIN

A grade principal foi centralizada em 22.73 S e 43.17 W. A projeção escolhida foi a de Mercator, por representar bem a região de latitudes entre 30 e 60 graus. A partir da grade principal foram configuradas três grades aninhadas com envio e recebimento de informações entre as grades (“two way”).

A Figura 9 apresenta os limites das quatro grades utilizadas nas simulações.



Q:\DS: OLA\10ES

2011-06-27-16:44

Figura 9: Dimensões de cada grade utilizada.

São descritas na Tabela 3 as dimensões de cada uma das grades (latitude e longitudes máximas e mínimas), o número de pontos e o espaçamento entre os pontos de cada grade (resolução) representados na figura acima, bem como a resolução do mapa utilizado para extrair os dados para cada uma das grades inseridas na simulação.

Tabela 3: Dimensões das grades do domínio.

Domínios	Pontos em x e y	Resolução da Grade (km)	Dimensões da Grade (lat./lon.)	Resolução do Mapa (km)
1	24x24	37	-26.0633 -19.3135	56
			-46.8308 -39.5092	
2	37x37	12.3	-24.6599 -21.0833	9
			-45.2777 -41.3962	
3	46x46	4.1	-23.4783 -21.9776	4
			-44.2054 -42.5274	
4	46x46	1.37	-23.082-22.5821	1
			-43.663 -43.1218	

4.2.2 REGRID

Para a realização das simulações baixaram-se os dados de análise gfs, com resolução de meio grau (~56 km), disponibilizados pela NCDC⁹ (National Climatic Data Center). Os dados da NCDC possuem intervalo de 3 horas para os dados de análise, e 6 horas para os dados de previsão. Foram baixadas, a primeira hora (hora zero 00Z) de cada dia dos dados de análise e o restante das horas do mesmo dia dos dados de previsão. Os dados baixados para esse período (maio 2011) encontravam-se no formato grib2 e foram transformados para o formato grib 1, uma vez que o modelo MM5 não lê dados no formato grib 2.

4.2.2.1 PREGRID

Configurou-se o namelist do módulo pregrid para que cada rodagem fosse realizada no intervalo de 3 dias. Configurou-se a V-Table de solo, para que a mesma pudesse ter quatro camadas de solo e, assim, extrair os dados gfs com mais precisão.

⁹Fonte: (http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php#hires_weather_datasets)

4.2.2.2 REGRIDDER

Configurou-se o namelist do regridder para o mesmo período do módulo pregrid, sendo inseridos os níveis de pressão, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Lista de níveis de pressão.

Número	Nível de Pressão
1	10000
2	95000
3	92500
4	90000
5	80000
6	75000
7	65000
8	60000
9	55000
10	45000
11	35000

4.2.3 INTERPF

Utilizaram-se os dados de saída do módulo REGRID, como dados de entrada para o módulo INTERPF. Configurou-se o módulo INTERPF para realizar simulações para um período de três dias, sendo inseridos os níveis sigma, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Lista de níveis sigma.

Número de níveis sigma					
1	1.000	19	0.968	37	0.895
2	0.9988	20	0.965	38	0.890
3	0.998	21	0.963	39	0.880
4	0.997	22	0.960	40	0.870
5	0.996	23	0.955	41	0.860
6	0.995	24	0.950	42	0.850
7	0.994	25	0.945	43	0.800
8	0.993	26	0.943	44	0.750
9	0.992	27	0.940	45	0.700
10	0.991	28	0.935	46	0.650
11	0.990	29	0.933	47	0.600
12	0.989	30	0.930	48	0.500
13	0.986	31	0.925	49	0.400
14	0.983	32	0.920	50	0.300
15	0.980	33	0.915	51	0.200
16	0.977	34	0.910	52	0.100
17	0.974	35	0.905	53	0.00
18	0.971	36	0.900		

4.2.4 MM5

Para configuração do último módulo, adotaram-se as mesmas parametrizações selecionadas em Moraes (2008). Segue-se, na Tabela 6, a listagem das configurações utilizadas.

Tabela 6: Lista de parametrizações utilizadas. Fonte: Moraes (2008).

Cumulus	Grell (1993) somente para os domínios 1 e 2
Microfísica de Nuvens	Dudhia (1989)
Radiação	Dudhia (1989)
Solo	Modelo de Solo NOAH LSM (Chen e Dudhia, 2001)
Camada Limite Atmosférica	Mellor Yamada (1974, 1982)

Segundo Moraes (2008) não se utiliza a parametrização de cumulusGrell para grades com espaçamento inferior a 10 km. Assim, os domínios 3 e 4 não receberam parametrização de cumulus.

Adotou-se passo de tempo baseado nos comentários descritos no namelist do módulo MM5:

$$\Delta x/c = T4.3 = T3.3 = T2.3 = T1,$$

onde Δx é a resolução da grade mais aninhada (em metros) e c é a velocidade do som (342 m/s).

Configurou-se o tempo máximo de rodagem do modelo para 4320 minutos para cada uma das grades, o que equivale a uma simulação de 3 dias.

4.3 Configuração do AERMOD

As seguintes versões do AERMOD foram utilizadas para a realização das simulações: a versão 11059 do AERMOD; e a versão 6.0.0, comercializada pela Lakes Environmental.

Ao longo das simulações, foi utilizada a versão 11059 do AERMOD, distribuída gratuitamente pela EPA (Environmental Protection Agency).

Uma vez que a versão escolhida para a realização das simulações não é tão simples de ser utilizada e mais susceptível a inserção de erros, também foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos para uma das simulações entre as versões 11059 e a versão 6.0.0, comercializada pela Lakes Environmental, a fim de comparar os resultados obtidos.

A maior parte das simulações foram desenvolvidas na versão 11059 da EPA.

4.3.1 AERMET

O pré-processador AERMET recebeu os seguintes dados meteorológicos de entrada:

- Dado CD 144 de superfície: o dado de superfície foi obtido a partir da base de dados METAR¹⁰. Foram selecionados os dados

¹⁰ Fonte: Site da aeronáutica do REDEMET (<http://www.redemet.aer.mil.br/>).

referentes ao período compreendido entre os dias 3 e 23 de maio de 2011, para o aeroporto do Galeão (SBGL). Os dados foram reprocessados para o formato CD-144, a fim de serem lidos pelo pré-processador AERMET;

- Dado FSL de altitude: o dado de sondagem foi obtido a partir da base de dados de radiosondagem da NOAA/ESRL¹¹. Selecionou-se, para a realização do download, os dados de 1 de janeiro a 8 de junho de 2011, do aeroporto do Galeão (WMO - 83746). Foi selecionada a opção de se baixar todos os níveis da sondagem, bem como a de baixar os dados de velocidade do vento em m/s.

Os dados de superfície e de altitude foram extraídos e avaliados na primeira etapa do módulo AERMET e mesclados na segunda etapa do mesmo módulo, ambas com sucesso. Na terceira etapa, escolheram-se os dados que melhor representariam o uso do solo da localidade, como Albedo, razão de Bowen e rugosidade superficial. Esses dados foram adotados a partir das tabelas fornecidas pelo manual do AERMET. Com base nas tabelas anexas no manual do AERMET, adotaram-se dados que representassem localidades urbanas com elevada umidade no verão. Como a cidade do Rio de Janeiro mantém uma temperatura razoavelmente estável ao longo do ano, entendeu-se que essas opções seriam apropriadas. O valor de Albedo adotado foi de 0.16, a razão de bowen igual a 1 e a rugosidade da superfície igual a 1 m. Foi adotado apenas um setor de uso do solo para a totalidade da simulação.

4.3.2 AERMAP

O pré-processador AERMAP foi rodado a partir de um arquivo digital de elevação ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) com resolução de 30 metros. Os modelos digitais de elevação ASTER são obtidos a partir de imagens obtidas do satélite TERRA, lançado em 1999 pela NASA e foram desenvolvidos pelo Ministério da Economia Comércio e Indústria do Japão, em parceria com a NASA. Os dados ASTER encontram-se no formato GEOTIFF e podem ser baixados após um breve cadastramento no site da NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>). Os dados originais encontram-se no sistema de coordenadas latitude e longitude e elipsóide WGS84. Os

¹¹Fonte: <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/>

dados foram mosaicados (colados), e foram transformadas as coordenadas de latitude e longitude para coordenadas UTM. Após serem mosaicados, os dados sofreram processo de tratamento de depressões espúrias¹² no ARCGIS, sendo que os valores que após o tratamento permaneceram com valor negativo foram convertidos para zero. Essa metodologia foi desenvolvida e executada pelo professor Gustavo Lyra e sua equipe da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Como região de estudo adotou-se uma área de 50x50 km, que foi ancorada em 643000 S e 7452000 W (canto inferior esquerdo). Considerou-se um receptor¹³ a cada 500 metros, o que totalizou 101 receptores no eixo x e mais 101 receptores no eixo y. A grade empregada para esta localidade, bem como a malha de receptores, são as mesmas consideradas por Vicentini (2011).

Foi inserido, ainda no domínio de modelização além da grade de receptores, um receptor discreto¹⁴. O mesmo é referente a estação de monitoramento da qualidade do ar da polícia rodoviária federal (PRF) de Jardim Primavera, localizada em 675990S 7491550W.

Como o receptor de SO₂ encontra-se elevado a aproximadamente uma altura de 3 metros, adotou-se a opção FLAGPOLE, que permite que receptores com elevação acima do nível do solo sejam inseridos. O restante dos receptores permaneceu no nível do solo.

A localização das fontes, inseridas para a rodagem do AERMOD, corresponde a 90% das emissões de SO₂ para a Bacia Aérea III, da região metropolitana do Rio de Janeiro, e baseia-se no inventário de fontes propostas por Vicentini (2011). As bacias aéreas foram delimitadas pelo órgão ambiental do Estado do Rio de Janeiro - INEA.

Na rodagem do programa, foi escolhida a opção de extração das alturas de fontes e receptores a partir do arquivo digital de elevação ASTER com resolução de 30 metros.

A Figura 10 revela como o modelo AERMOD visualiza a topografia da região. Na lateral direita observa-se uma parte da baía de Guanabara. A imagem não corresponde à realidade, pois os dados extraídos do mapa possuem espaçamento de 500 metros entre si. Caso houvesse necessidade de um maior detalhamento da topografia, deveria

¹²Depressões espúrias são depressões que se apresentam no modelo digital de elevação (MDE), mas que não se encontram na topografia do terreno. Elas podem ser oriundas de falhas no processo de interpolação ou de ausência de dados para um determinado ponto. Maiores detalhes em Fidalgo, Júnior e Godoy (2009).

¹³Receptor – são pontos da grade onde as concentrações são calculadas pelo modelo.

¹⁴Receptor discreto – é um receptor que é inserido no modelo para que seja calculada a concentração em apenas um ponto específico do domínio.

ter-se utilizado um espaçamento menor entre os pontos. Entretanto, isso iria aumentar o tempo de processamento do modelo. A figura também apresenta a localização das fontes simuladas (foram simuladas apenas as fontes inscritas na grade delimitada para o programa AERMOD), a localização de algumas estações de monitoramento da qualidade do ar (inclusive a da PRF de Jardim Primavera), e os limites da simulação realizada.

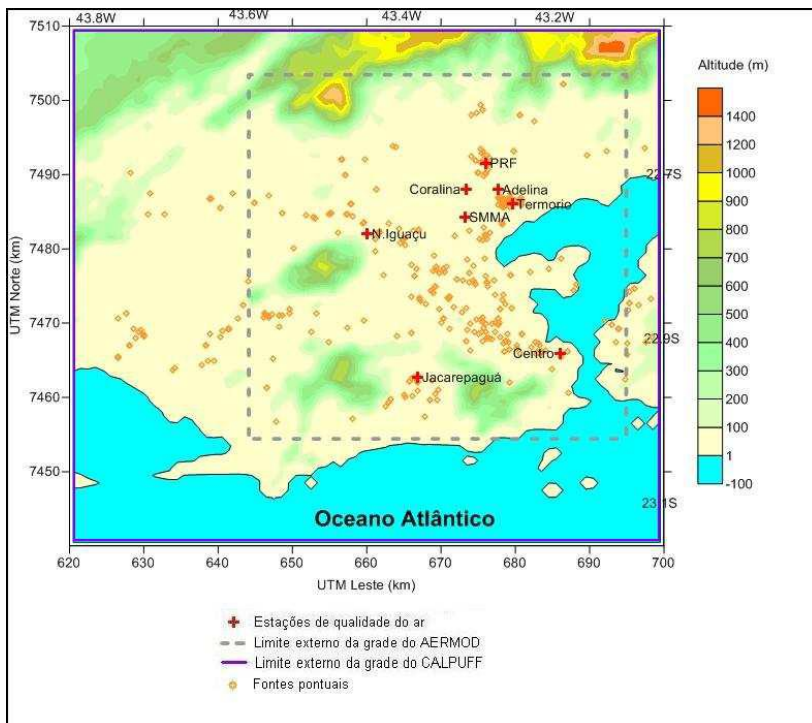


Figura 10: Fontes pontuais que representaram as emissões industriais e limites dos domínios do AERMOD. Fonte: Vicentini (2011).

4.3.3 AERMOD

O AERMOD foi configurado para realizar o cálculo de concentrações máximas, em cada receptor, nos períodos de 1 hora, 3 horas, 8 horas e 24 horas, e calcular os dados de concentração média ao longo de todo o período.

Foi escolhida a opção DEFAULT (padrão), por ser a opção regulatória, conforme informa o manual do AERMOD. Do mesmo modo como no módulo AERMET, o módulo AERMOD foi configurado para simular uma região urbana. Essa opção, juntamente com a opção DEFAULT, faz com que o modelo realize o cálculo de SO₂, para cada receptor, com a opção de meia vida de 4 horas¹⁵ para o SO₂. Tanto a versão paga quanto a versão gratuita contêm essa opção automatizada.

A opção URBANOPT, que é a opção que caracteriza a simulação urbana no módulo AERMOD, faz com que a rugosidade da superfície seja igual a 1 m, caso nenhuma rugosidade superficial seja incluída. Como nenhuma rugosidade foi incluída, o modelo assumiu rugosidade igual a 1 m. Para cada uma das chaminés também foi escolhida a opção URBANSRC, a fim de que todas elas pudessem ser simuladas como fontes urbanas. Todas as opções listadas anteriormente foram implementadas nas versões 11059 da EPA e 6.0.0 da Lakes Environmental, a fim de comparar os resultados obtidos.

4.4 Análise dos resultados

4.4.1 Comparação dos resultados do MM5

A fim de verificar se os dados simulados pelo MM5 representavam bem aqueles observados para a região em estudo, foram realizadas comparações para dois períodos distintos. Primeiramente, comparou-se os dados de direção e intensidade de ventos obtidos nas simulações de Moraes (2008), realizadas para o período de setembro de 2007 (mais especificamente os períodos de 2-13; 16-24; 25-30 de setembro), com os dados observados para o mesmo período. Essa comparação se deu através da construção de meteorogramas e de rosas dos

¹⁵ Opção de meia vida de quatro horas –simula o decaimento exponencial do SO₂ para fontes urbanas.

ventos para os aeroportos de Campos dos Afonsos-SBAF¹⁶ (UTM 666.194, 7.469.958), Galeão-SBGL (UTM 679.599, 7.475.432), Jacarepaguá-SBJR (UTM 667.085, 7.457.776) e Santos Dumont-SBRJ (UTM 685.650, 7.466.409) contidos na grade mais aninhada (resolução de 1,37 km) das simulações realizadas por Moraes (2008). Os meteorogramas permitiram uma análise mais detalhada dos resultados, enquanto que as rosas dos ventos auxiliaram na comparação dos dados do período como um todo. Uma vez que Moraes (2008) já havia realizado a comparação de temperatura observada com a temperatura simulada, não houve a necessidade de repetir-se essa análise.

Na segunda etapa, foram realizadas as rodagens do MM5 para o período de 3 a 23 de maio de 2011. As configurações utilizadas para realizar essas rodagens assemelham-se às configurações utilizadas por Moraes (2008) e foram descritas anteriormente no item 4.2.

Após terem sido realizadas as rodagens do MM5, os resultados simulados de temperatura, intensidade e direção do vento foram extraídos e comparados com os dados observados, através da confecção de meteorogramas, de rosas dos ventos e gráficos de temperatura. Essas comparações foram realizadas para os quatro aeroportos analisados na primeira etapa. Foi ainda realizada a comparação de meteorogramas e de rosas dos ventos do ponto de grade referente a estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Para que a comparação dos ventos (rosas dos ventos) e da temperatura observados e simulados fosse adequada, removeram-se as horas simuladas ou observadas que não dispusessem de dado correspondente. A fim de que os meteorogramas contivessem o mesmo número de horas, adicionou-se a direção de vento de 360 graus e velocidade do vento de zero metros por segundo, para cada hora faltante.

¹⁶ Código ICAO: é definido pela organização da aviação civil e designa a nomenclatura de um aeroporto a partir de 4 letras. Ex SBGL é referente ao aeroporto do Galeão.

4.4.2 Comparação entre os resultados obtidos pelo AERMOD a partir de dados meteorológicos observados simulados

Realizaram-se algumas comparações entre os resultados obtidos a partir de dados meteorológicos observados para o período de 3 a 23 de maio de 2011, e os dados simulados pelo modelo para o mesmo período.

Três substituições foram realizadas: na primeira, substituíram-se as direções e intensidades de vento observados na estação meteorológica do aeroporto do Galeão (abordagem tradicional¹⁷, METAR-AERMOD), por ventos simulados para o mesmo ponto a partir do MM5 (abordagem MM5-SBGL-AERMOD); na segunda, escolheu-se repetir o experimento, porém extraindo-se os ventos das coordenadas 22.67S e 43.29W (abordagem MM5-PRF-AERMOD) que correspondem a estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF); finalmente na terceira, como também havia dados de direção e intensidade do vento medidos para essa coordenada, repetiu-se o mesmo procedimento, porém substituindo-se os dados observados de vento para a localidade de Jardim Primavera no arquivo CD-144 (abordagem METAR-PRF-AERMOD). Essas coordenadas foram escolhidas por ter-se verificado que correspondem a localização das fontes que mais contribuem para as emissões de SO₂. O aeroporto do Galeão foi escolhido como fonte de dados observados por situar-se a uma distância de aproximadamente 10 km das principais fontes emissoras de SO₂.

As substituições de intensidade e direção do vento restringiram-se ao arquivo de entrada de dados meteorológico de superfície CD-144. Os arquivos modificados foram reprocessados no AERMET e inseridos de modo convencional (conforme indicado no manual do programa) no AERMOD.

Apesar de haver a possibilidade de se inserir todos os dados de entrada do AERMOD a partir de modelos como o MM5, conforme indica Touma et al., (2007), essa não foi a metodologia utilizada. Substituíram-se apenas a direção e a intensidade do vento simuladas, a fim de que fosse realizada uma análise do impacto da substituição desses parâmetros por parâmetros simulados. Cabe ainda ressaltar que, numa simulação de dispersão de poluentes atmosféricos,

¹⁷ Abordagem tradicional ou utilização convencional é a utilização clássica do modelo AERMOD conforme indica o manual do modelo.

um dos parâmetros mais determinantes no cômputo das concentrações são as direções e intensidades dos ventos.

A fim de se realizar uma comparação efetiva entre as quatro metodologias, eliminou-se do conjunto de horas simuladas (para as localidades do Galeão e de Jardim Primavera) e observadas (para a localidade de Jardim Primavera) a que correspondia a hora 18 do dia 11 do mês de maio que não foi observada no aeroporto do Galeão no período de 3 a 23 de maio de 2011. As demais opções de configuração do AERMET, AERMAP e AERMOD foram mantidas.

Foram comparadas as concentrações médias, máximas de 1 hora, e máximas de 24 horas, para o período de 3 a 23 de maio de 2011, simuladas pelo AERMOD, através das quatro abordagens anteriormente descritas.

4.4.3 Comparação do AERMOD distribuído pela Lakes Environmental com a versão do AERMOD lançada em 2011 pela EPA

Foi realizada a comparação de resultados de concentração de SO₂ entre a versão do AERMOD distribuída pela Lakes Environmental com aquela distribuída gratuitamente pela EPA. A versão do AERMOD disponibilizado pela EPA foi de número 11059. A fim de comparar os resultados, foi realizada uma simulação para o período do dia 1 ao dia 31 de maio de 2011, em ambas as versões do software.

Realizou-se a comparação dos resultados das concentrações máximas de 1, 3, 8 e 24 horas, a fim de verificar se os resultados expressos através da plotagem das plumas são equivalentes. Como não há um visualizador (plotador) de resultados na versão distribuída pela EPA, utilizou-se o software Surfer 9.

4.4.4 Comparação dos resultados das concentrações da simulação tradicional com o exigido na legislação

Foi realizada a comparação dos resultados das concentrações (abordagem METAR-ARMOD) obtidas ao nível do solo, para dióxido de enxofre, com os padrões de qualidade do ar preconizados na resolução CONAMA 03/90. Como o período de simulação realizado compreendeu apenas um mês, as comparações restringiram-se a verificar se os dados simulados das máximas concentrações, a cada 24 horas, estão de acordo com os padrões estabelecidos nesta resolução.

5. Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações realizadas. O capítulo é constituído de cinco partes. Na primeira, comparam-se os resultados das simulações realizadas por Moraes (2008), para o período de setembro de 2007, com os dados observados para esse mesmo período. Na segunda, comparam-se os dados simulados pelo MM5 com os observados, para o período de 3 a 23 de maio de 2011. Na terceira, comparam-se as simulações realizadas pelo AERMOD a partir das abordagens METAR-AERMOD, MM5-SBGL-AERMOD, PRF-METAR-AERMOD, MM5-PRF-AERMOD, para o período de 3 a 23 de maio de 2011. Na quarta, apresentam-se as comparações das versões do AERMOD distribuídas pela Lakes Environmental, versão 6.0.0, e da EPA, versão 11059. Por fim, é apresentada uma comparação das simulações realizadas para o período de 1 a 31 de maio de 2011, com os limites estabelecidos pela CONAMA 03/90.

5.1 Comparação entre os dados observados e os resultados obtidos pelo modelo MM5, para setembro de 2007

A seguir, serão apresentadas as rosas dos ventos de dados observados e simulados para os aeroportos de Campos dos Afonsos-SBAF, Galeão-SBGL, Jacarepaguá-SBJR e Santos Dumont-SBRJ. Serão apresentados nos anexos os meteogramas referentes a cada um desses aeroportos.

5.1.1 Rosas dos Ventos

As rosas dos ventos da Figura 11, referentes a localização do aeroporto de Campos dos Afonsos são apresentadas abaixo. A rosa dos ventos simulada para o período de setembro de 2007 conseguiu captar as direções predominantes de vento para o aeroporto de Campos dos Afonsos (SBAF). Entretanto, as intensidades simuladas tenderam a subestimar as intensidades observadas. Em ambas as rosas dos ventos, as direções predominantes foram provenientes de leste e sul. Entretanto,

enquanto as maiores intensidades observadas encontravam-se na faixa de 5,7 a 8,8 m/s, as simuladas encontravam-se na faixa de 3,6 a 5,7 m/s.

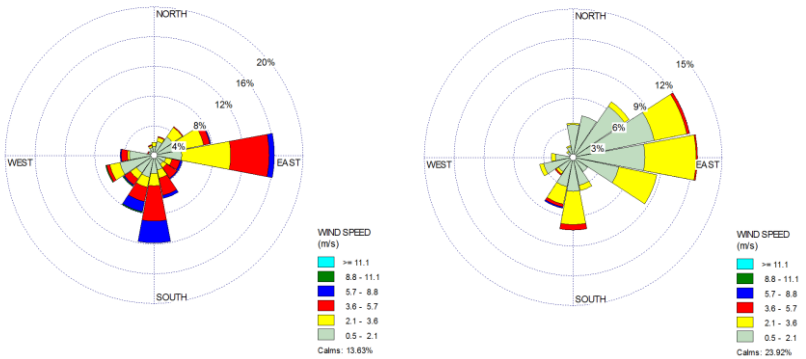


Figura11: SBAF (Campos dos Afonsos). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 12, referentes a localização do aeroporto do Galeão, são apresentadas abaixo. A rosa dos ventos simulada para o aeroporto do Galeão foi capaz de representar bem a referente aos dados observados, uma vez que reproduziu as direções predominantes do vento sudeste. Entretanto, assim como no caso do Aeroporto de Campos dos Afonsos, as simulações não conseguiram representar tão bem as intensidades, tendendo a subestimá-las. As máximas intensidades para o aeroporto do Galeão encontram-se na faixa de 8,8 a 11,1 m/s, enquanto que as intensidades máximas simuladas encontram-se na faixa de 2,1 a 3,6 m/s.

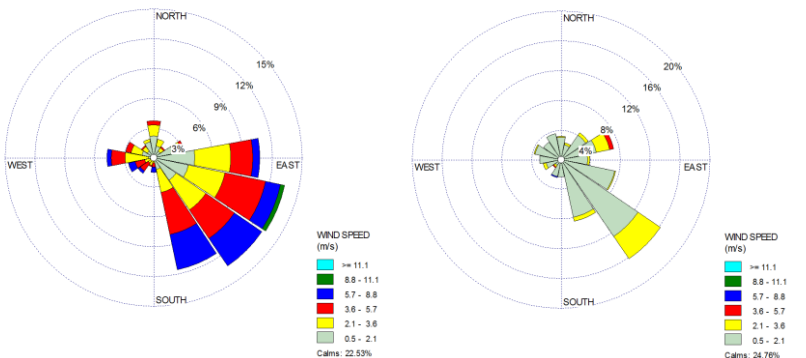


Figura 12: SBGL (Galeão). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 13, referentes a localização do aeroporto de Jacarepaguá são apresentadas abaixo. A rosados ventos simulada para o aeroporto de Jacarepaguá também foi capaz de representar as direções predominantes de vento. Entretanto, as intensidades foram superiores às intesidades observadas. Os ventos de sudeste foram mais frequentes na rosa dos ventos simulada do que na observada, e a frequência de intensidades nessa direção também foi superior aos resultados observados.

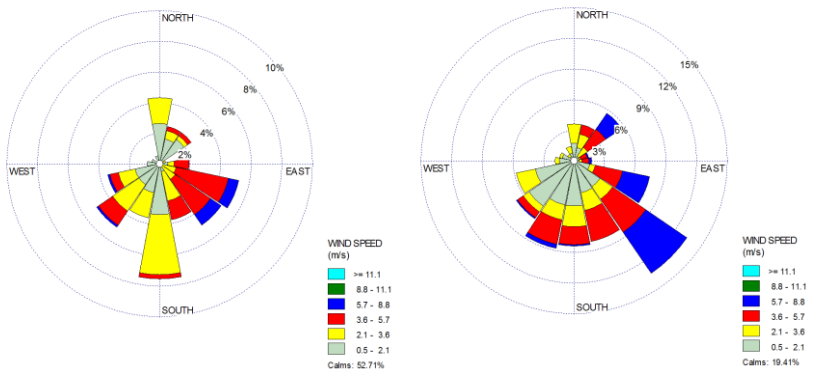


Figura 13: : SBJR (Jacarepaguá). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.

Os ventos simulados para o aeroporto Santos Dumont foram os que apresentaram piores resultados, uma vez que apresentaram desvio de cerca de 45 graus em relação a direção de vento predominante. Assim como para os aeroportos de Campos dos Afonsos e Galeão, as intensidades dos ventos foram subestimadas.

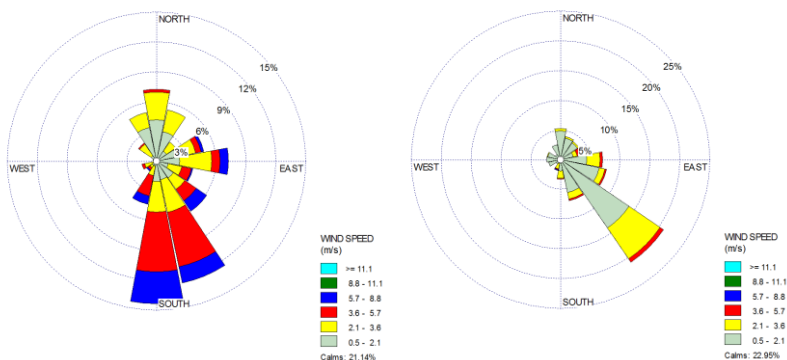


Figura 14: SBRJ (Santos Dumont). À esquerda, dado observado. À direita, dado simulado.

5.2 Comparação dos resultados simulados pelo MM5 em relação aos dados observados para maio de 2011

A seguir, são apresentados as rosas dos ventos referentes ao período de 3 a 23 de maio de 2011. Serão apresentadas primeiramente as rosas dos ventos referentes aos 4 aeroportos contidos na grade mais aninhada (SBAF, SBGL, SBJR, SBRJ) do MM5, assim como o meteograma referente a estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF). Nos anexos serão apresentadas as rosas dos ventos dos quatro aeroportos e a rosa dos ventos referente a estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF). O último tópico deste item irá apresentar a comparação das temperaturas simuladas pelo MM5 com as observadas para cada um dos aeroportos.

5.2.1 Rosas dos Ventos

As rosas dos ventos apresentadas abaixo comparam os ventos observados durante o período de 3 a 23 maio de 2011 com os ventos simulados pelo MM5 para o mesmo período. A fim de realizar uma comparação efetiva, foram removidas das horas simuladas aquelas que não possuíam correspondente nas horas observadas.

As rosas dos ventos da Figura 15, referentes a localização do aeroporto de Campos dos Afonsos, são apresentadas abaixo.

A rosa dos ventos referente aos dados observados apresentou uma direção predominante de ventos distinta da direção predominante apresentada nos dados simulados para o período de setembro de 2007. Apesar disso, o MM5 foi capaz de simular as direções predominantes de vento observadas para o período de maio de 2011. Entretanto, as intensidades dos ventos foram subestimadas para esse aeroporto, assim como foram subestimadas para o período de 2007, para o mesmo aeroporto.

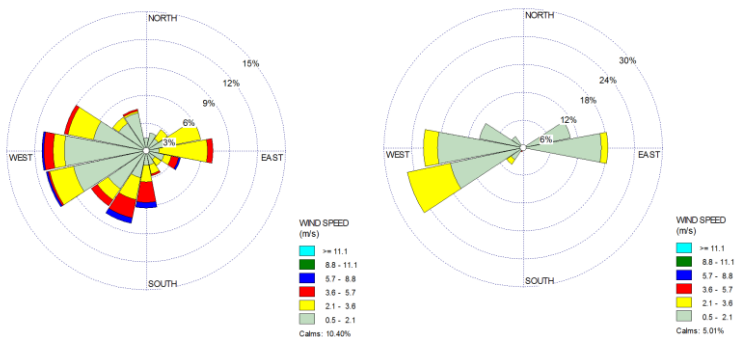


Figura 15: SBAF (Campos dos Afonsos). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 16, referentes a localização do aeroporto do Galeão são apresentadas abaixo. As rosas dos ventos referentes aos dados observados e simulados para essa localidade, apresentaram comportamento semelhante ao dos dados de setembro de 2007. Assim como para o período anterior o MM5 foi capaz de representar bem os dados observados, porém as intensidades foram subestimadas.

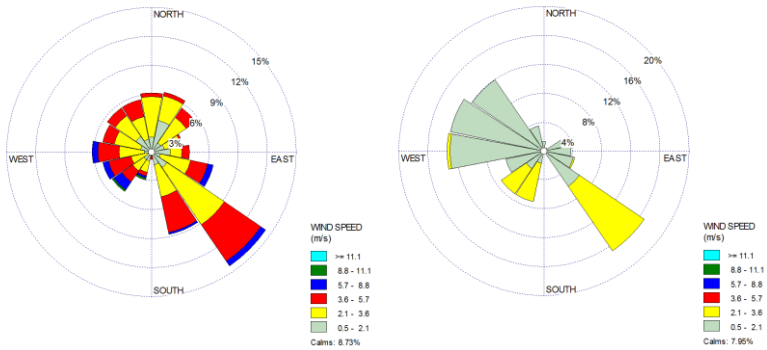


Figura 16: SBGL (Galeão). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 17, referentes a localização do aeroporto de Jacarepaguá são apresentadas abaixo.

A rosa dos ventos referente aos dados observados para essa localidade, apresentou comportamento semelhante ao dos dados observados para o período de setembro de 2007. Nas simulações, o MM5 subestimou a frequência da componente de norte e nordeste e superestimou a componente de sudeste.

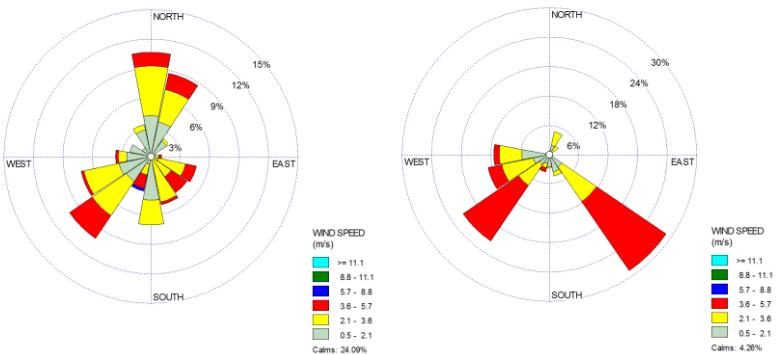


Figura 17: SBJR (Jacarepaguá). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 18, referentes a localização do aeroporto Santos Dumont são apresentadas abaixo.

A rosa dos ventos referente aos dados observados para essa localidade, apresentou comportamento semelhante ao dos dados observados para o período de maio de 2007. Assim como para o período

anterior, os dados simulados apresentaram um desvio de aproximadamente 45 graus em relação aos dados observados. Uma possível causa desse desvio seria a má representação da topografia da região por parte do modelo MM5.

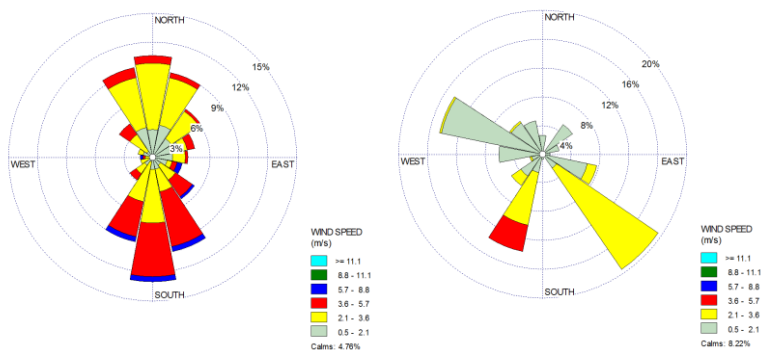


Figura 18: SBRJ (Santos Dumont). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.

As rosas dos ventos da Figura 19, referentes a localização da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) são apresentadas abaixo.

Devido a sua proximidade com o aeroporto do Galeão, os dados simulados para esta estação e os dados simulados para o aeroporto do Galeão apresentaram comportamento semelhante. Ambas as rosas dos ventos apresentaram ventos de baixa intensidade. Porém, a rosa dos ventos simulada apresentou desvio de 45 graus em relação a direção de vento predominante na rosa dos ventos observada. Assim como para o aeroporto Santos Dumont, esse desvio, na direção simulada dos ventos, pode ter sido ocasionado pela limitação do modelo em melhor detalhar a topografia da região.

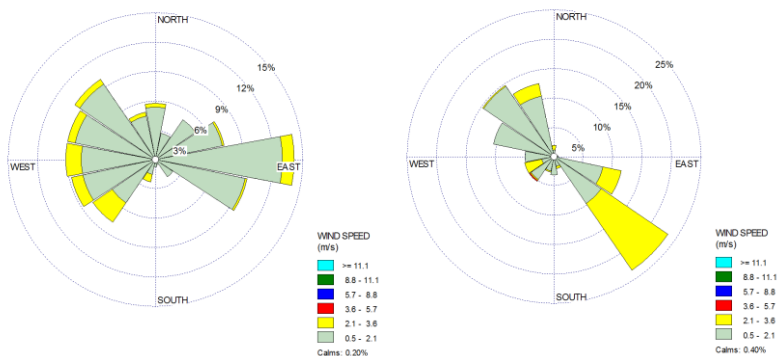


Figura 19: PRF (Jardim Primavera). À esquerda dado observado. À direita dado simulado.

5.2.2 Temperatura

Os gráficos das Figura 20-67 apresentam as comparações de temperaturas observadas com as simuladas.

A fim de que a comparação fosse realizada adequadamente, removeram-se das horas simuladas os dados de temperatura que não possuíam correspondente nas horas simuladas.

As temperaturas simuladas apresentaram menor variância que as temperaturas observadas. Entretanto, conseguiram representar a variação diária de temperatura.

Para todos os aeroportos simulados (SBAF, SBGL, SBJR, SBRJ) as faixas de temperaturas simuladas variaram de 20 a 25 graus. Verificou-se que as temperaturas observadas apresentaram máximos e mínimos mais intensos que os dados simulados para o mesmo período.

Dos quatro aeroportos, aquele que apresentou as menores temperaturas foi o aeroporto de Campos dos Afonsos (SBAF), registrando temperaturas inferiores a 15 graus Celsius.

As maiores temperaturas registradas foram observadas para o aeroporto de Campos dos Afonsos (SBAF). Tanto as máximas quanto as mínimas temperaturas registradas não foram reproduzidas nas simulações.

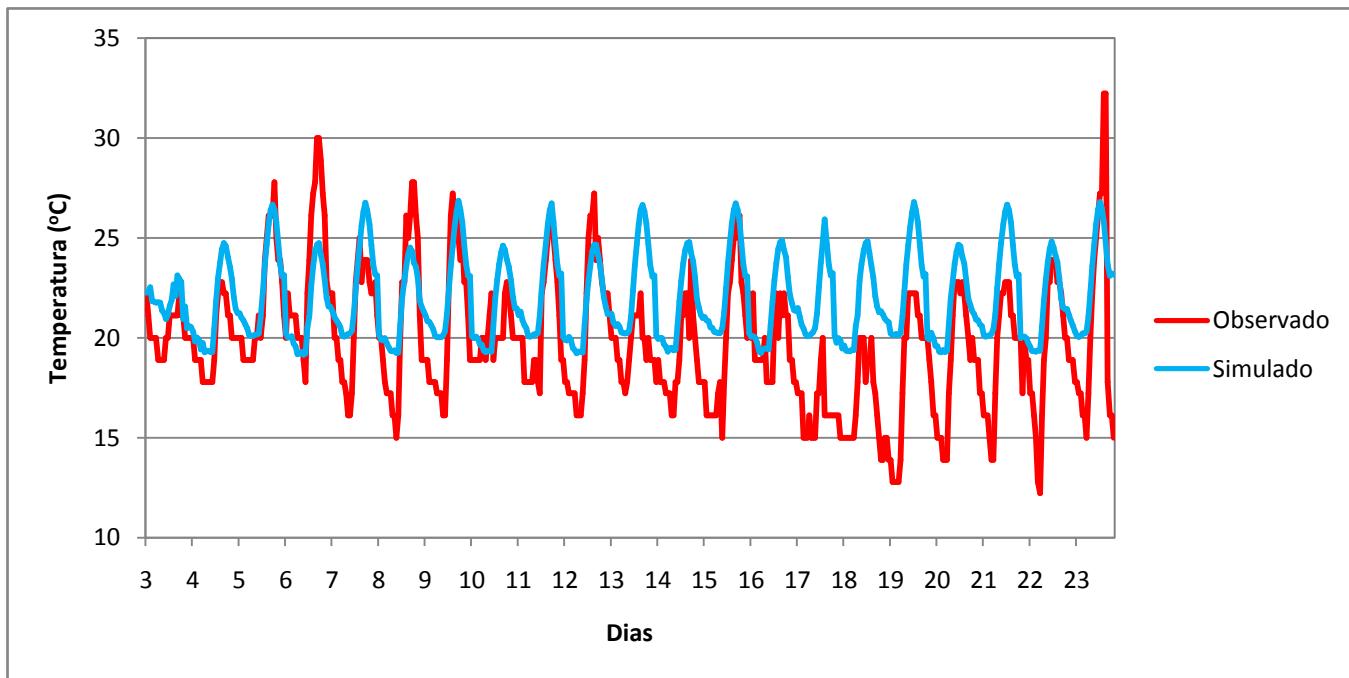


Figura 20: SBAF (Campos dos Afonsos). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.

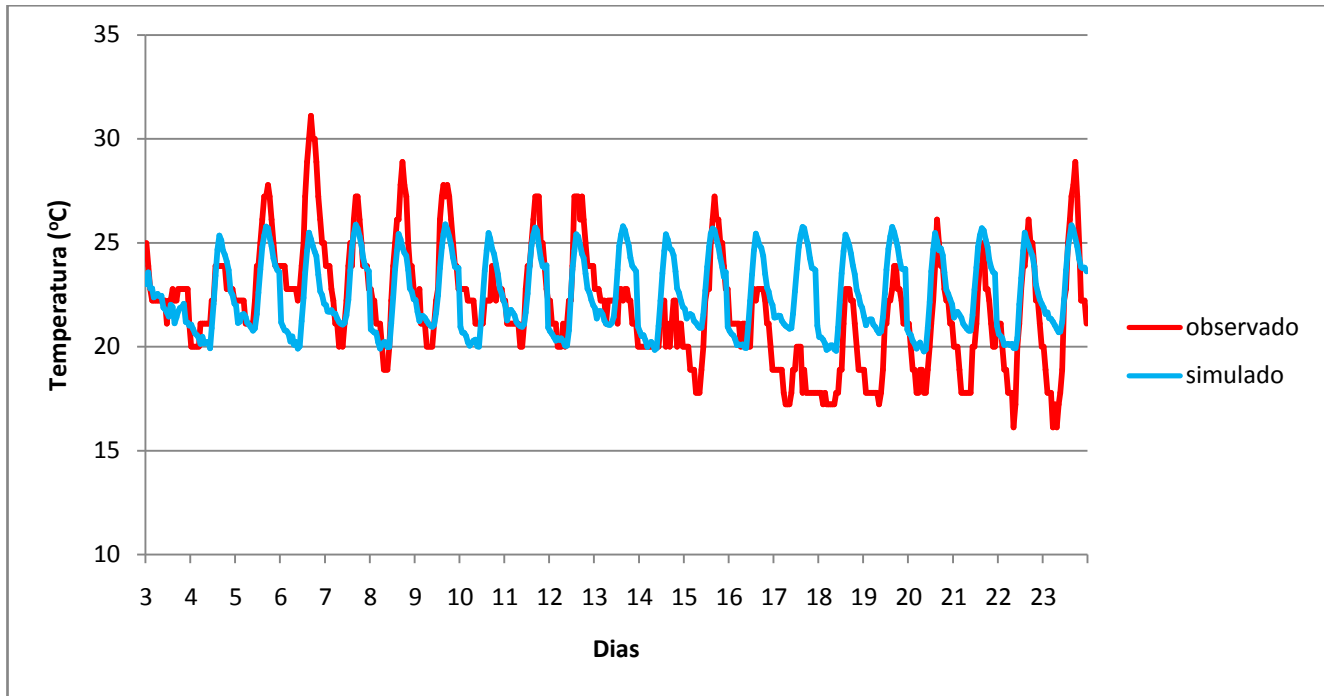


Figura 21: SBGL (Galeão). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.

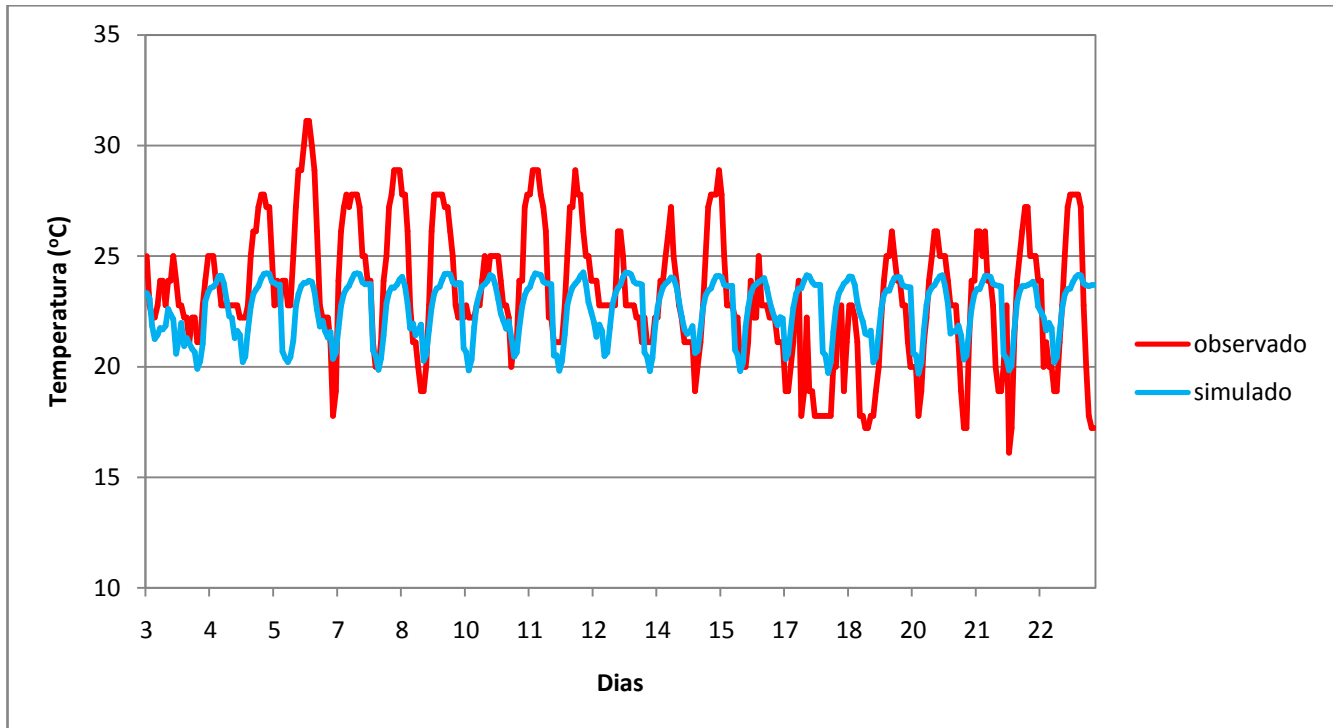


Figura 22: SBJR (Jacarepaguá). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.

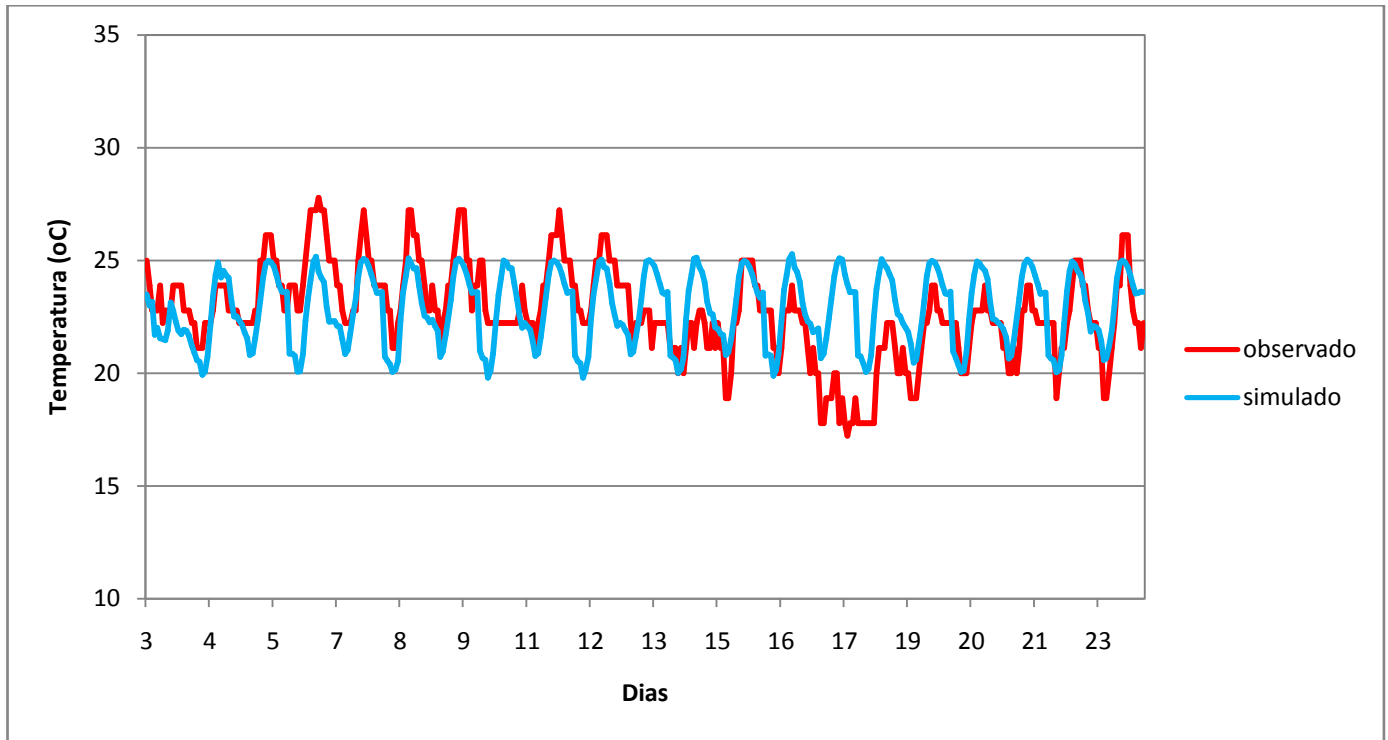


Figura 23: SBRJ (Santos Dumont). Comparação entre as temperaturas observadas e simuladas.

5.3 Comparação dos resultados obtidos pelo AERMOD através de dados meteorológicos de entrada observados e simulados

São apresentados abaixo os resultados das simulações realizadas pelo AERMOD, através de dados de entrada meteorológicos observados versus simulados, para o período de 3 a 23 de maio de 2011.

Concentrações horárias máximas: Abordagem METAR-AERMOD:

A Figura 24 apresenta os resultados das concentrações máximas de 1 hora ao longo do período simulado pela abordagem METAR-AERMOD, para o aeroporto do Galeão. As concentrações de dióxido de enxofre na proximidade da fonte emissora foram superiores a 440 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

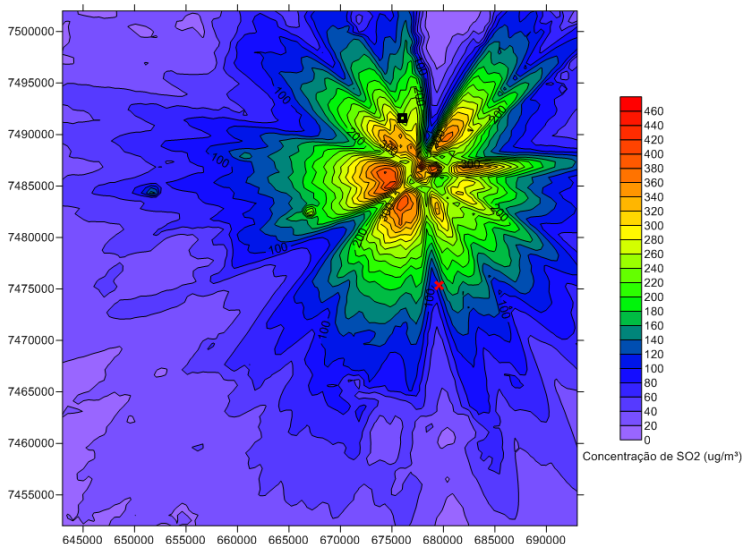


Figura 24: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos observados para o aeroporto do Galeão.

A dispersão do poluente se deu em todas as direções. O ponto “x”, em vermelho, na Figura 68, é a localização da estação meteorológica do aeroporto do Galeão. O quadrado, em preto, indica a

localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF). Esse resultado decorre da influência dos ventos observados no aeroporto do Galeão. Os mesmos apresentaram contribuições provenientes de todas as direções, consequentemente o espalhamento do poluente também se deu em todas as direções.

Abordagem MM5-SBGL-AERMOD:

A Figura 25 apresenta os resultados das concentrações máximas de 1 hora ao longo do período simulado para a abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

A simulação revelou predominância de concentrações a leste da localização das principais fontes de emissão de dióxido de enxofre. Esse resultado decorre da influência dos ventos simulados, uma vez que os mesmos apresentam como resultado componentes oriundos de oeste, de baixa intensidade, o que explica a dissipação do poluente nessa direção, e consequentemente eleva as concentrações calculadas ao nível do solo, pelo AERMOD, nas proximidades das fontes emissoras.

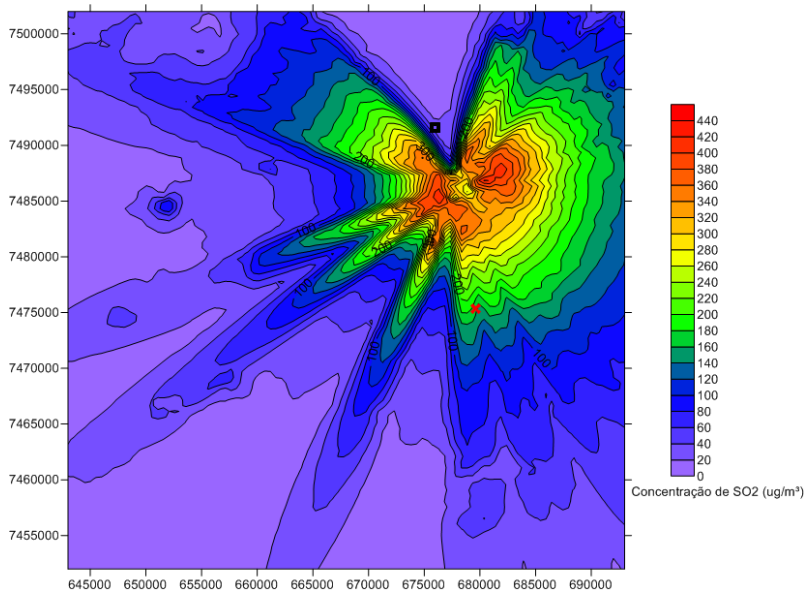


Figura 25: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos simulados pelo MM5 para a localização do aeroporto do Galeão.

Simulação para a PRF de Jardim Primavera (abordagem PRF-METAR-AERMOD):

A Figura 26 apresenta os resultados das concentrações máximas de 1 hora ao longo do período simulado para a abordagem PRF-SBGL-AERMOD.

A simulação realizada revelou comportamento de dispersão da pluma bastante semelhante ao apresentado para o aeroporto do Galeão pela abordagem METAR-AERMOD. Entretanto, nas proximidades das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre as concentrações revelaram-se mais altas, devido a dispersão do dióxido de enxofre ser menor. Esse resultado decorre da influência dos ventos observados para a localidade da estação meteorológica de Jardim Primavera (PRF), que foram de baixa intensidade.

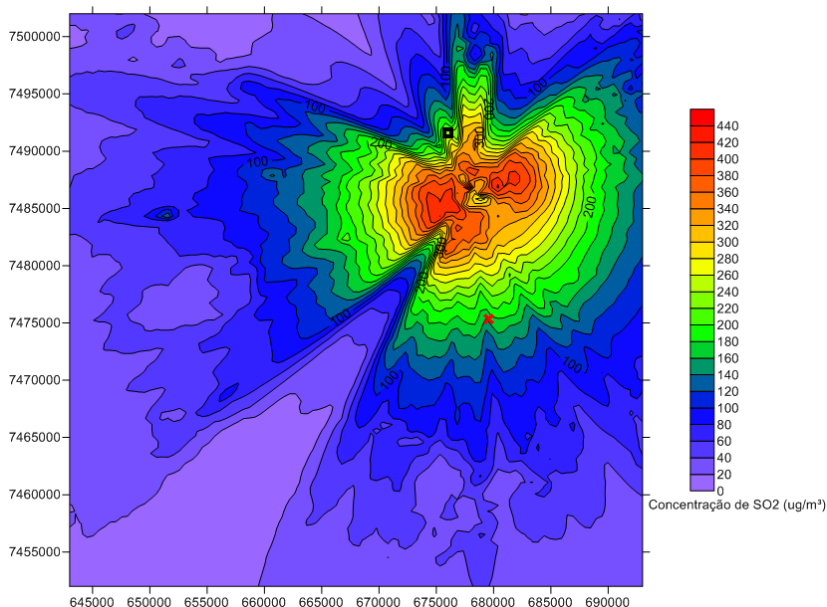


Figura 26: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos observados na estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) para a localização do aeroporto do Galeão.

Simulação para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (abordagem MM5-PRF-AERMOD):

A Figura 27 apresenta os resultados das concentrações máximas de 1 hora ao longo do período simulado para a abordagem MM5-PRF-AERMOD.

A simulação apresentou em seus resultados uma lacuna na direção correspondente a sudoeste das principais fontes de emissão. Essa ausência de dispersão de poluente nessa direção é uma influência direta das direções predominantes de ventos simuladas, apresentadas na rosa dos ventos simulados da região, que não contam com contribuições de direção de vento proveniente de nordeste.

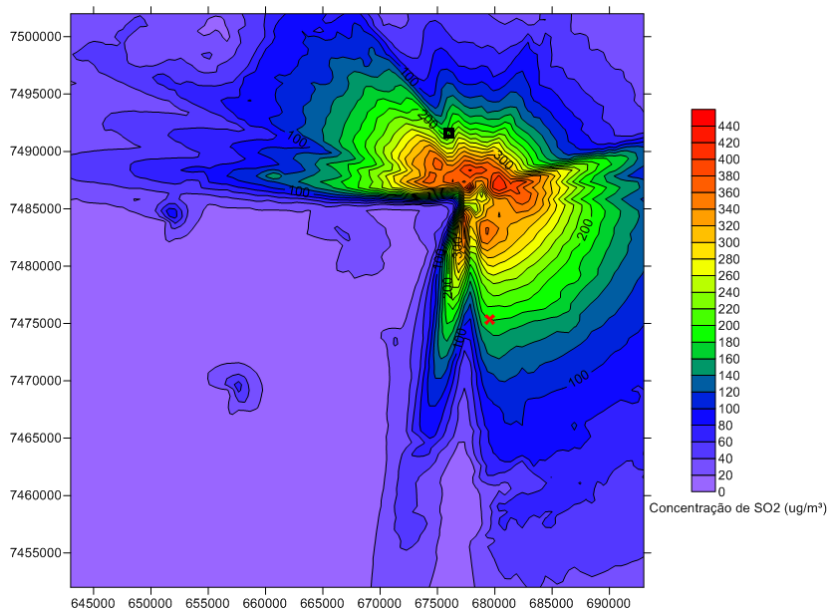


Figura 27: Simulação de primeiros máximos de 1 hora a partir de ventos simulados pelo MM5 para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Concentrações diárias máximas: Abordagem METAR-AERMOD:

A Figura 28 apresenta os resultados das concentrações máximas de 24 horas ao longo do período simulado para a abordagem METAR-AERMOD.

Os resultados apresentaram as maiores concentrações de dióxido de enxofre a noroeste das principais fontes emissoras do poluente. O poluente dispersou-se em praticamente todas as direções.

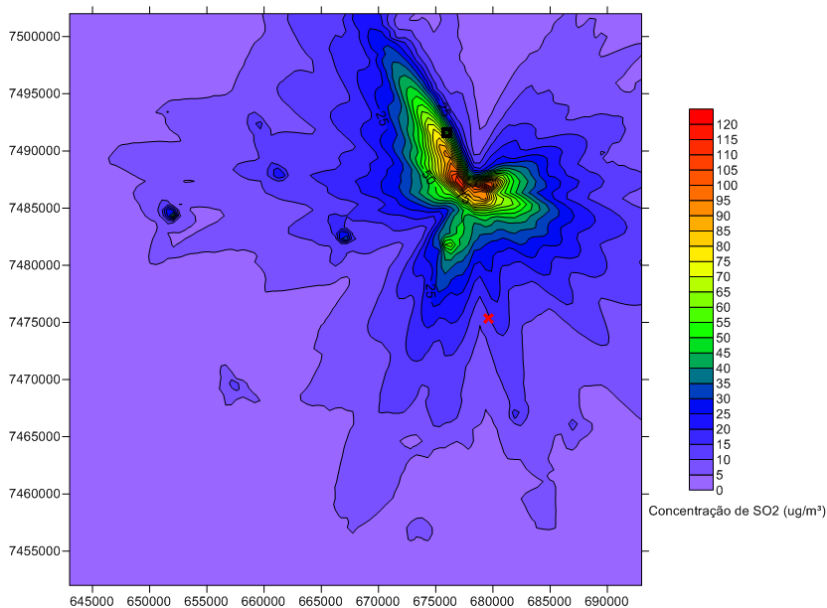


Figura 28: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos observados para a localização do aeroporto do Galeão.

Abordagem MM5-SBGL-AERMOD:

A Figura 29 apresenta os resultados das concentrações máximas de 24 horas ao longo do período simulado para a abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

Os resultados apresentaram as maiores concentrações a sudeste e a noroeste das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre. Verifica-se que as concentrações máximas diárias para o período foram superiores quando calculadas a partir dos dados simulados do que os resultados gerados a partir de dados observados. Os ventos simulados pelo MM5 apresentaram menor intensidade que os simulados, logo as concentrações foram maiores nas proximidades das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre, devido a dispersão ser menor.

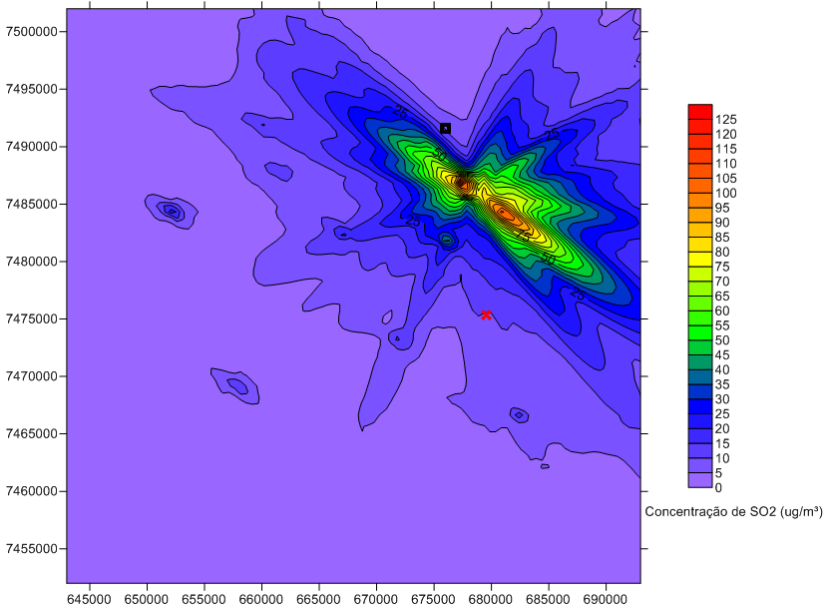


Figura 29: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos simulados para a localização do aeroporto do Galeão.

Abordagem PRF-METAR-AERMOD:

A Figura 30 apresenta os resultados das concentrações máximas de 24 horas ao longo do período simulado para a abordagem PRF-SBGL-AERMOD.

A dispersão dos poluentes sofreu uma rotação horária de aproximadamente 45 graus. Esse fato revela a influência da direção e intensidade de ventos observadas para a região da estação de monitoramento da qualidade do ar.

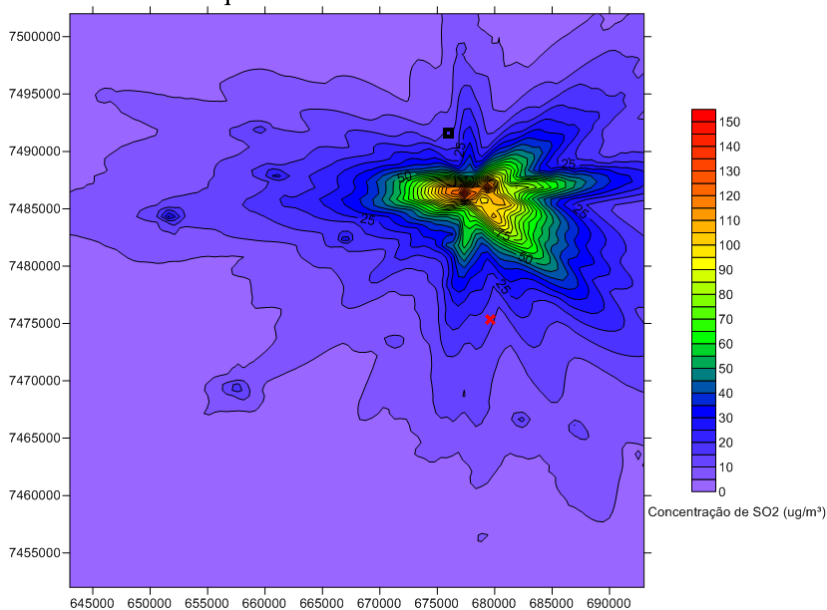


Figura 30: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos observados para a estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Abordagem MM5-PRF-AERMOD:

A Figura 31 apresenta os resultados das concentrações máximas de 24 horas ao longo do período simulado para a abordagem MM5-PRF-AERMOD.

Assim como pode ser observado na Figura 27, não houve significativa dispersão de poluente na direção de sudoeste devido a ausência de ventos provenientes de nordeste. As regiões onde se encontram as concentrações diárias mais elevadas de dióxido de enxofre são as de sudeste e nordeste.

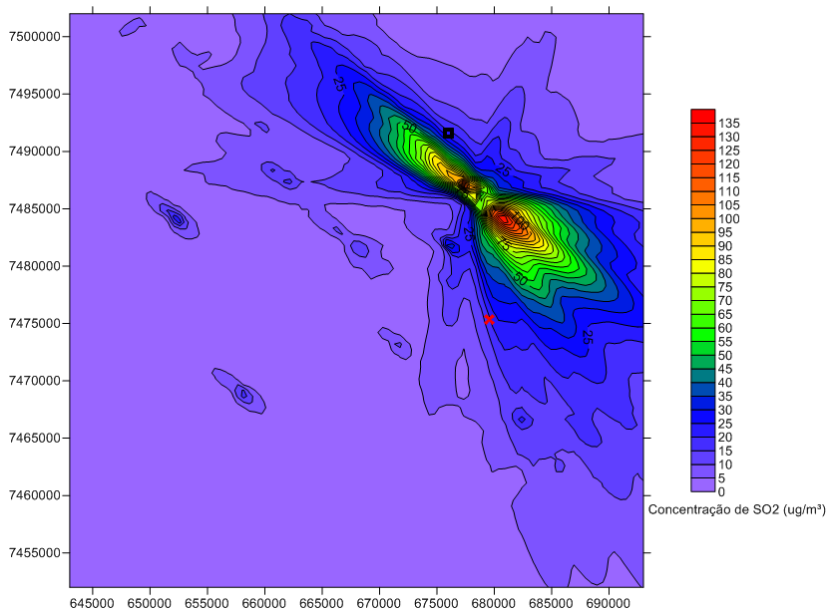


Figura 31: Simulação de primeiros máximos de 24 horas a partir de ventos simulados para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar Jardim Primavera (PRF).

Concentrações médias: Abordagem METAR-AERMOD:

A Figura 32 apresenta os resultados das concentrações médias ao longo do período simulado para a abordagem METAR-AERMOD.

Assim como nas Figura 24 e 72, os resultados abaixo revelam que as concentrações dissipam-se em todas as direções e que os maiores valores médios apresentados situam-se a noroeste das principais fontes de emissão.

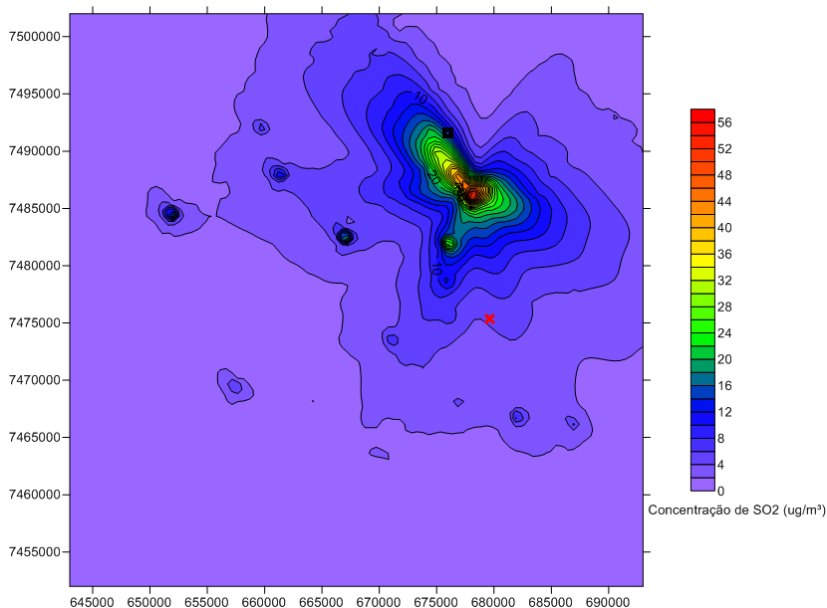


Figura 32: Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos observados para o aeroporto do Galeão.

Abordagem MM5-SBGL-AERMOD:

A Figura 33 apresenta os resultados das concentrações médias ao longo do período simulado para a abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

Os resultados das concentrações médias apresentaram dispersão de poluentes inferior aos apresentados na Figura 32. Como justificado anteriormente, isso se deve a baixa intensidade dos ventos simulados a partir do MM5 para a localidade do Galeão. As máximas concentrações médias também sofreram alteração, revelando valores mais altos que os calculados na figura anterior. Os valores médios de maior intensidade situam-se a sudeste das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre.

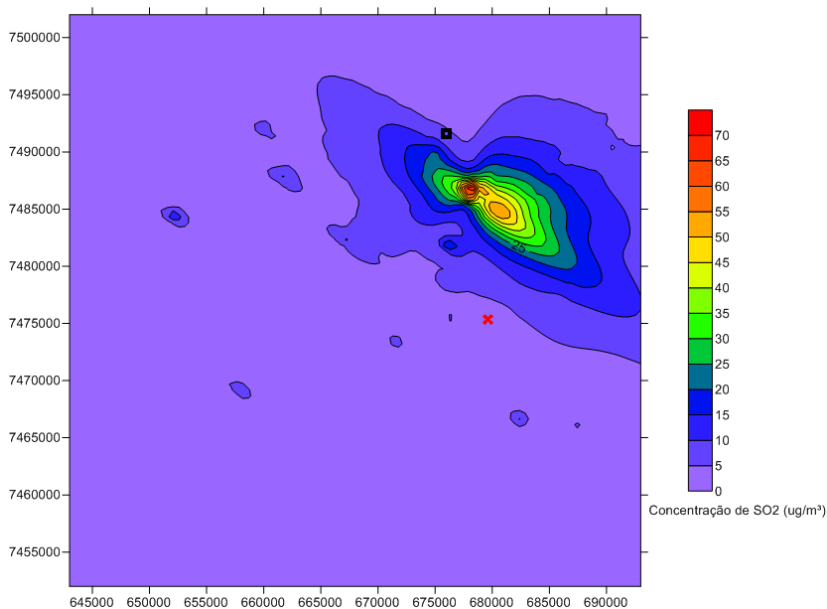


Figura 33: Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos simulados para o aeroporto do Galeão.

Abordagem PRF-METAR-AERMOD:

A Figura 34 apresenta os resultados das concentrações médias ao longo do período simulado para a abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

Os resultados assemelham-se aos da Figura 30. Assim como para as concentrações máximas de 24 horas calculadas por esse mesmo método, observou-se um de aproximadamente 45 graus no sentido horário em relação a abordagem METAR-AERMOD e em relação a abordagem MM5-SBGL-AERMOD, apresentadas respectivamente nas Figura 32 e 77. Verificou-se também que as concentrações médias do período calculadas pelo modelo AERMOD foram superiores as concentrações médias calculadas a partir da abordagem tradicional.

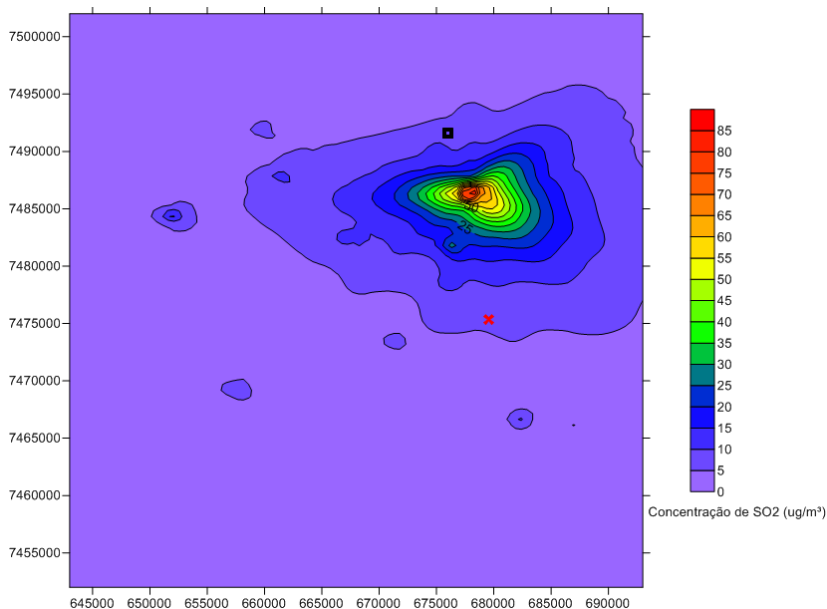


Figura 34:Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos ventos observados para a estação de qualidade de Jardim Primavera (PRF).

Abordagem MM5-PRF-AERMOD:

Por fim, a Figura 35 apresenta o resultado referente concentrações médias calculadas pelo AERMOD a partir da abordagem MM5-PRF-AERMOD.

Os resultados assemelham-se aos das Figura 27 e 75, onde não há dispersão do poluente na direção sudoeste e apresentaram desvio de 45 graus no sentido anti-horário em relação aFigura 34

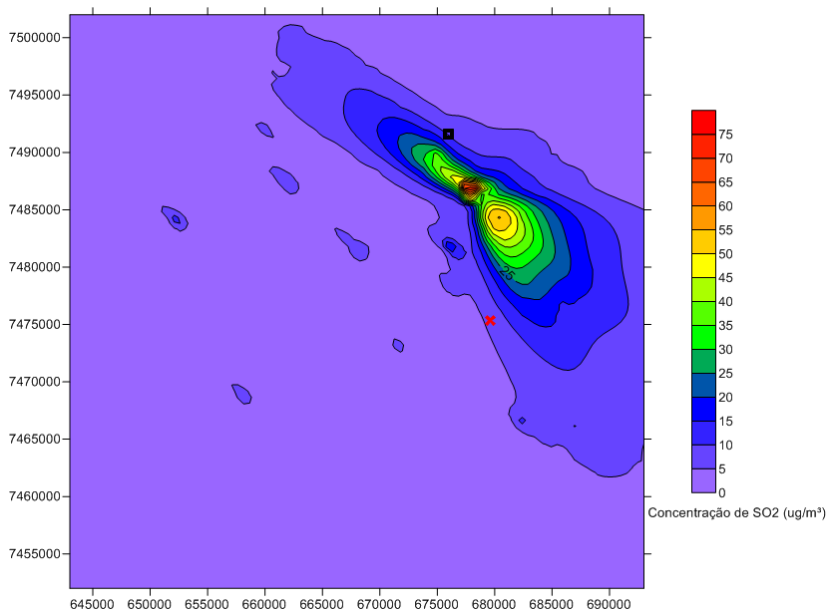


Figura 35:Média das Concentrações de 1 hora do período gerada a partir dos dados simulados para a estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Comparações diárias de concentração de dióxido de enxofre: Abordagem METAR-AERMOD

As Figura 36-83 apresentam as comparações das variações diárias das concentrações de dióxido de enxofre a calculadas a partir das quatro abordagens realizadas neste trabalho (METAR-AERMOD, MM5-SBGL-AERMOD, METAR-PRF-AERMOD E MM5-PRF-AERMOD) com as concentrações de dióxido de enxofre medida na estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Na Figura 36 os resultados simulados a partir da abordagem tradicional superestimaram os resultados medidos na maior parte do período simulado. Entretanto, houve uma concentração significativa no período compreendido entre os dias 15 e 19 que não foi registrada nos dados simulados a partir da abordagem tradicional. Como o modelo realiza simulações com melhor confiabilidade para longos períodos, entende-se que essa lacuna possa ter ocorrido devido a limitações do modelo.

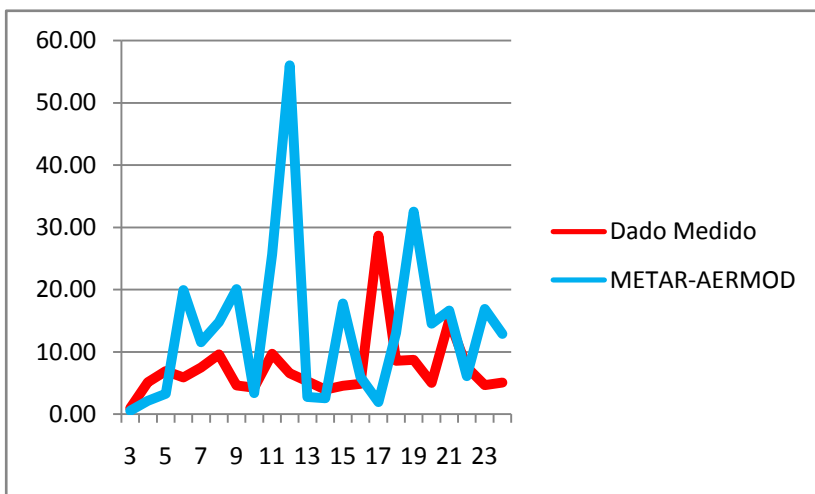


Figura 36: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO₂ para a localização da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem METAR-AERMOD.

Abordagem MM5-SBGL-AERMOD:

A Figura 37 apresenta a comparação dos resultados das concentrações medidas com as calculadas a partir da abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

As concentrações calculadas a partir dessa abordagem foram muito menos intensas que as calculadas a partir da abordagem anterior. As concentrações calculadas a partir da abordagem MM5-SBGL-AERMOD revelaram um padrão de aumento e decréscimo de concentrações diário que não se repetiu nos dados medidos. As concentrações calculadas a partir dessa abordagem foram baixas devido a pluma de poluentes apresentar uma faixa de baixa dispersão na direção norte, justamente onde se localiza a estação de monitoramento da qualidade do ar.

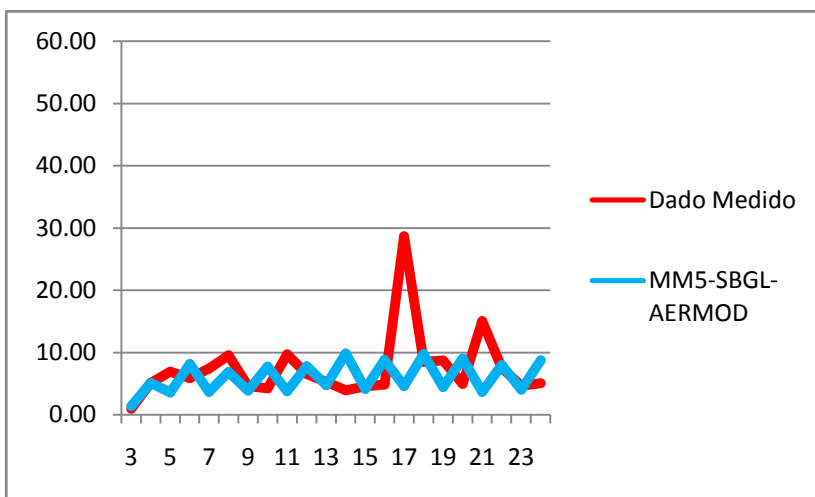


Figura 37: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO₂ para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem MM5-SBGL-AERMOD.

Abordagem PRF-METAR-AERMOD

A Figura 38 apresenta uma comparação entre as concentrações de dióxido de enxofre medidas e as calculadas a partir da abordagem METAR-PRF-AERMOD.

Na maior parte do período as simulações realizadas refletiram o padrão medido. No intervalo compreendido entre os dias 5 e 7 de maio o modelo superestimou os resultados e no período de 16 a 23 de maio o modelo AERMOD não reproduziu as concentrações observadas. Os picos de concentração não previstos através das simulações realizadas pelo modelo AERMOD entre os dias 16 e 23 de maio podem não ter sido previstos nas simulações devido a um possível aumento nas taxas de emissão de dióxido de enxofre ou as limitações do modelo de dispersão utilizado. As direções e as intensidades dos ventos utilizadas para realizar essa simulação foram observadas para a localidade de Jardim Primavera, que se situa nas imediações das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre, ou seja, Jardim Primavera está mais próxima das principais fontes emissoras de dióxido de enxofre do que o aeroporto do Galeão e conseqüentemente apresentou concentrações que refletem melhor as concentrações medidas do que as previstas a partir da abordagem tradicional (METAR-AERMOD).

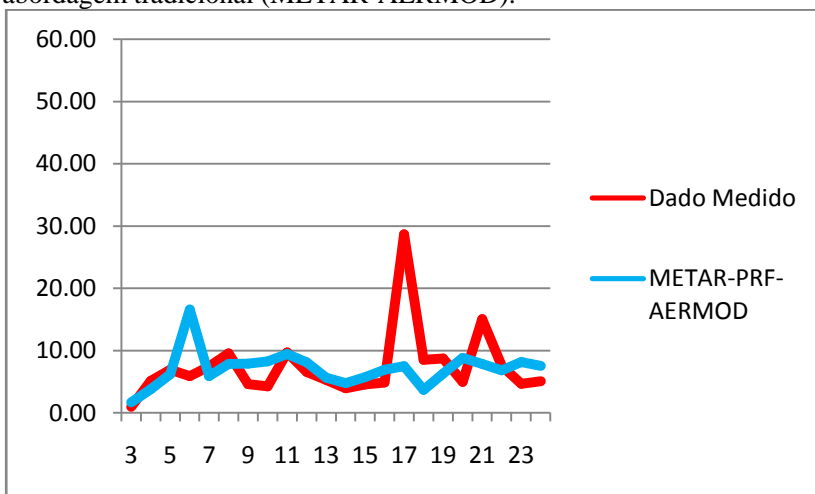


Figura 38: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO_2 para a localização da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem METAR-PRF-AERMOD.

Abordagem MM5-PRF-AERMOD:

A Figura 39 apresenta as comparações das concentrações de dióxido de enxofre medidas com as calculadas a partir da abordagem MM5-PRF-AERMOD.

Assim como na Figura 37, os resultados abaixo apresentaram em seus resultados uma variação diária de aumento e decréscimo de concentrações que não foi registrado pelas medições.

Assim como na Figura 38, a simulação não captou o pico de concentrações que se encontra entre os dias 15 e 19 de maio.

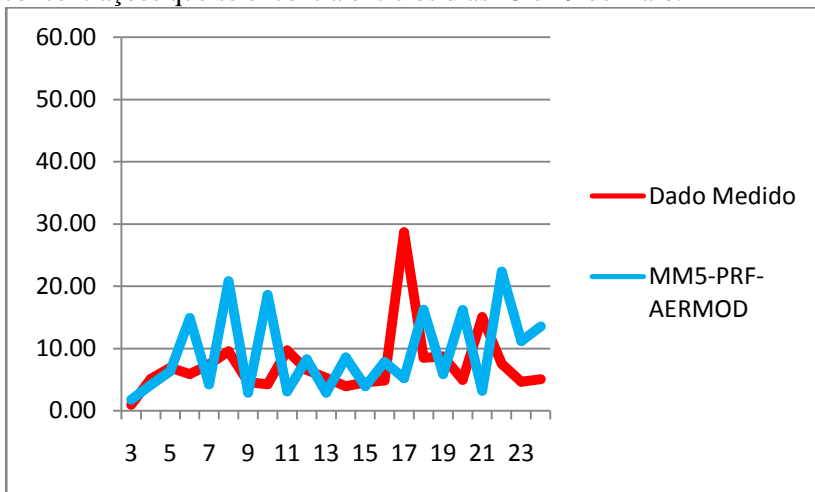


Figura 39: Comparação da variação diária medida das concentrações de SO₂ para a localização da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF) com a simulada pela abordagem MM5-PRF-AERMOD.

5.4 Comparação entre os resultados do AERMOD distribuído pela Lakes Environmental e a versão lançada em 2011 pela EPA

Nas Figura 40-87 são apresentados os resultados obtidos a partir das versões AERMOD 6.0.0, distribuída pela Lakes Environmental, e a versão 11059, lançada em 2011, distribuída gratuitamente pela EPA.

Apesar das escalas de cores serem ligeiramente distintas percebe-se que as plumas são exatamente as mesmas para ambas as simulações, ou seja os resultados foram iguais.

São apresentados, a seguir, os resultados obtidos para as simulações de máximas concentrações de 1, 3, 8 e 24 horas para o período de 1 a 31 de maio de 2011.

Todas as simulações realizadas, tanto através da versão 6.0.0 quanto através da versão 11059, foram realizadas a partir de dados observados para a estação meteorológica do aeroporto do Galeão (SBGL).

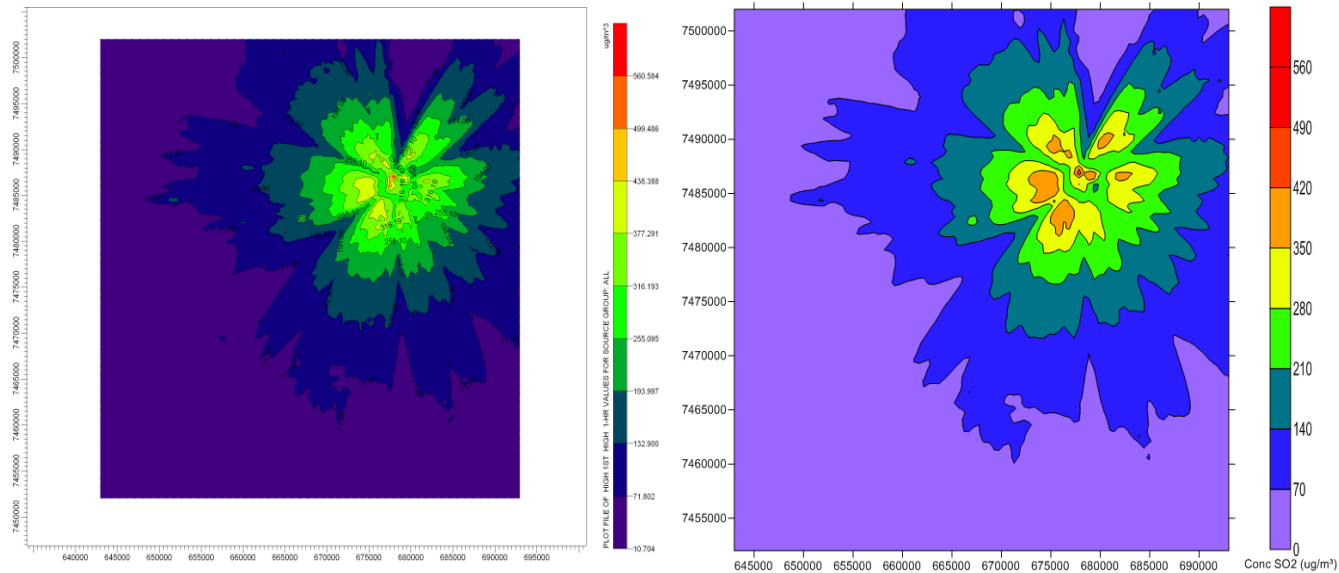


Figura 40: Primeiros máximos de 1 hora de SO₂. À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.

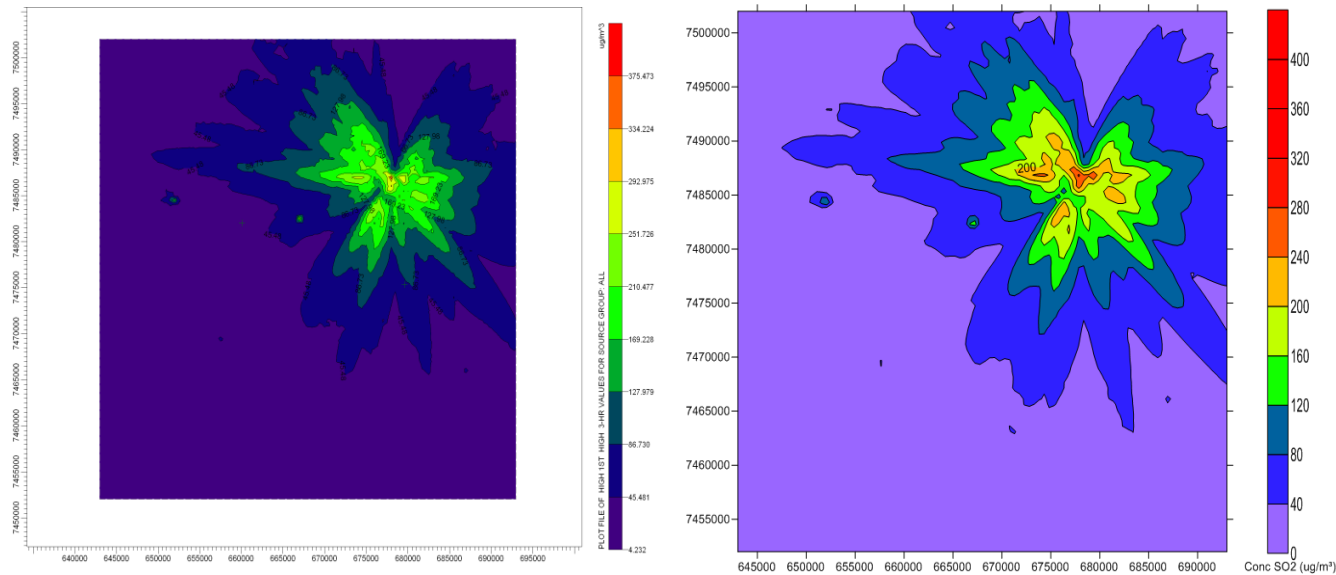


Figura 41: : Primeiros máximos de 3 horas de SO₂. À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.

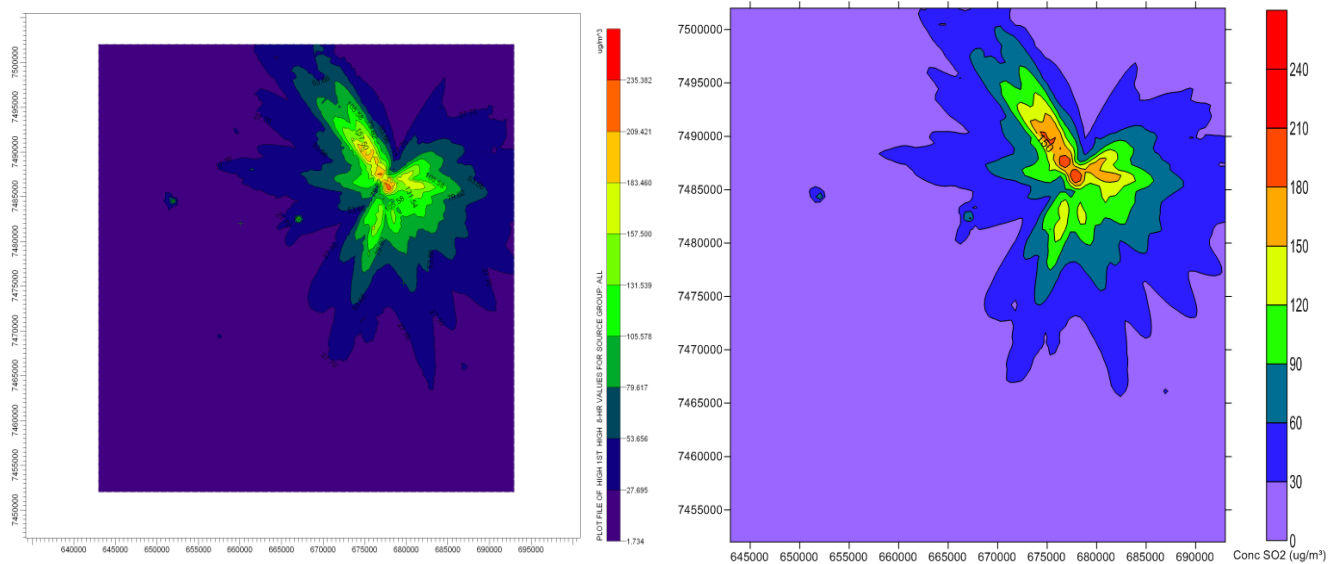


Figura 42: Primeiros máximos de 8 horas de SO₂. À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.

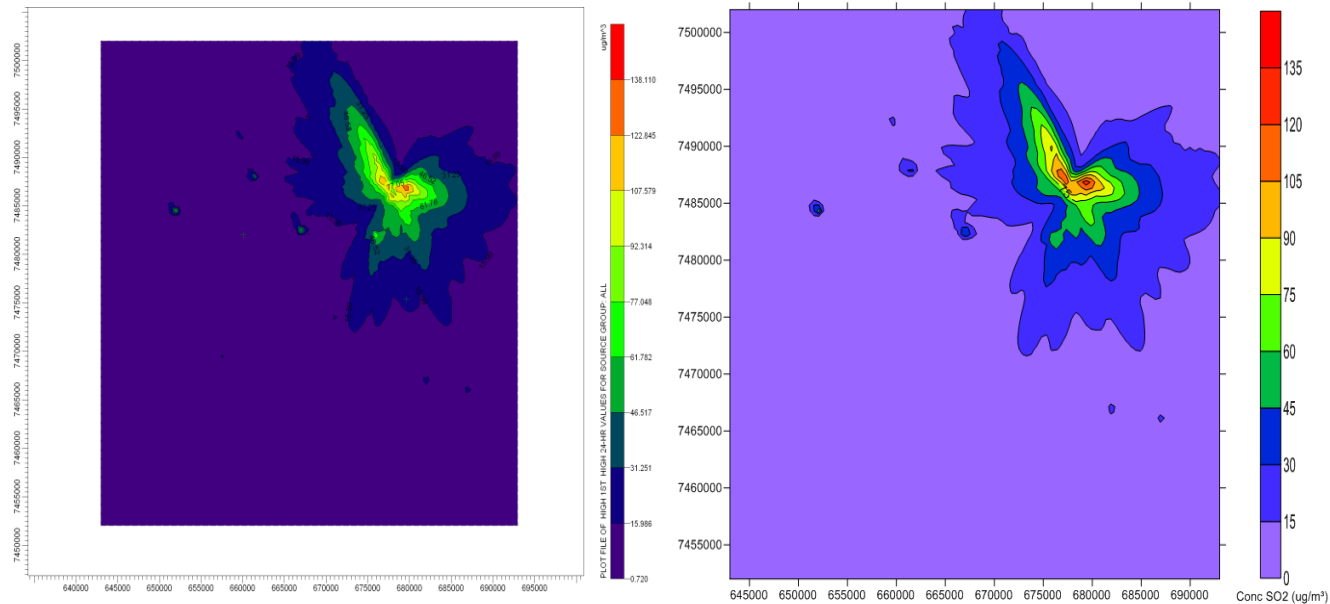


Figura 43: Primeiros máximos de 24 horas de SO₂. À esquerda versão distribuída pela Lakes Environmental e à direita versão disponibilizada gratuitamente pela EPA.

5.5 Comparação dos resultados obtidos através das simulações para o mês de maio de 2011 com a legislação

É apresentada na Figura 44, uma imagem referente às concentrações dos segundos máximos diários para o período de 1 e 31 de maio de 2011.

Comparando-se os resultados abaixo com o que recomenda a resolução CONAMA 03/90, verifica-se que os padrões primários de qualidade do ar são cumpridos, uma vez que as concentrações máximas secundárias não ultrapassam 100 microgramas por metro cúbico. A resolução estabelece que esses valores não podem ser ultrapassados mais do que uma vez no ano. Uma análise ao longo de um período de um ano torna-se necessária a fim de determinar se esses parâmetros são infringidos.

Apesar de se enquadrarem dentro dos parâmetros primários ao longo de 21 dias, recomenda-se que seja realizado um estudo ao longo de um período mais longo a fim de serem simuladas uma maior variedade de condições atmosféricas e possivelmente realizar as simulações em condições críticas (CONAMA 03/90).

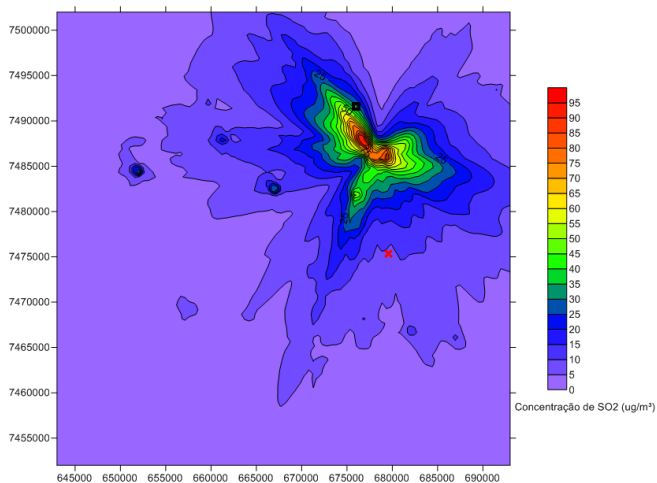


Figura 44: Segundos máximos de 24 horas.

6. Conclusão

Ao longo deste trabalho, foram realizadas diversas comparações entre os dados meteorológicos observados e os dados meteorológicos simulados pelo modelo MM5.

Compararam-se os dados de temperatura, direção e intensidade dos ventos.

Verificou-se que apesar da grande dificuldade de se simular a região metropolitana do Rio de Janeiro, o MM5 simulou satisfatoriamente os ventos observados nos quatro aeroportos contidos na grade mais aninhada da região (SBAF, SBGL, SBJR, SBRJ), bem como os ventos da estação de monitoramento da qualidade do ar de Jardim Primavera. Os melhores resultados foram obtidos nas comparações dos dados dos aeroportos de Campos dos Afonsos (SBAF) e Galeão (SBGL).

Os resultados revelaram o potencial da utilização do MM5 para completar séries de dados observados faltantes para os casos onde o modelo MM5 melhor representou as direções de vento desses aeroportos.

Os resultados das comparações das rosas dos ventos apresentaram desvio de até 45 graus entre os dados observados e os dados simulados. Embora essa variação possa ser tolerável para a simulação do modelo, isso pode acarretar uma diferença significativa na simulação da dispersão de um poluente.

As rosas dos ventos simuladas apresentaram variações de direção de vento menores que a dos pontos observados, ao longo da topografia da região considerada. Esse fato pode ser claramente observado ao serem comparadas as rosas dos ventos observadas para o aeroporto do Galeão e para a estação de monitoramento de Jardim Primavera, onde houve uma variação de cerca de 45 graus entre ambas as localidades. Entretanto, essa variação não foi constatada nos dados observados que permaneceram semelhantes na comparação das rosas dos ventos do Galeão e da localidade de Jardim Primavera.

Apesar dos resultados terem-se revelados satisfatórios, não recomenda-se a utilização de dados oriundos de modelos de mesoescala sem uma prévia validação dos dados para uma determinada região. Ou seja, utilizar dados provenientes de modelos de mesoescala para suprir a ausência de dados de uma determinada estação meteorológica de uma localidade, onde não se conhece o regime de ventos da região, não seria uma escolha sensata. Isto se deve em razão de que há regiões que são

melhor e pior representadas pelo modelo de mesoescala. Assim, a utilização sem uma validação adequada dos dados provenientes de um modelo de mesoescala pode induzir a estudos mal fundamentados que gerem resultados não representativos da dispersão de poluentes na região. Isto poderá acarretar em riscos à saúde das populações residentes nas vizinhanças dos empreendimentos potencialmente poluidores.

Apesar das simulações realizadas pelo AERMOD compreenderem o período de 3 a 23 de maio de 2011, acredita-se que seriam obtidos resultados mais confiáveis para fins de comparação, caso o período comparado fosse mais extenso (por exemplo um ano de dados). Não houve a possibilidade de se realizar isso, uma vez que o tempo de processamento, para cada 3 dias de dados no MM5, era de 24 horas. No entanto, como o AERMOD é um modelo gaussiano estacionário, o mesmo realiza uma série de simplificações no que diz respeito aos fenômenos atmosféricos observados, apresentando resultados mais confiáveis para maiores períodos de simulação.

Os resultados das simulações realizadas a partir das quatro abordagens realizadas apresentaram valores de concentração semelhantes entre si (para os valores máximos horários, diários e médios). Entretanto a pluma dispersou-se de modo diferente de acordo com a direção predominante dos ventos inseridos por cada abordagem. Consequentemente as populações e comunidades atingidas pelas respectivas dispersões simuladas por cada abordagem foram distintas. A abordagem que apresentou os melhores resultados foi a PRF-METAR-AERMOD. Ou seja, quanto mais próximo das fontes emissoras do poluente for realizada o monitoramento meteorológico melhor tendem a ser os resultados gerados pelas simulações.

As comparações entre as versões, 11059 da EPA e 6.0.0 da Lakes Environmental, demonstraram que os resultados obtidos a partir de ambas as versões do AERMOD são exatamente os mesmos.

Por fim, verificou-se que a região da Bacia Aérea III, referente a região metropolitana do Rio de Janeiro, é uma localidade susceptível a elevadas concentrações de dióxido de enxofre, devido ao grande número de fontes emissoras contribuintes e as elevadas concentrações calculadas para o período. A simulação de apenas 1 mês é insuficiente para constatar se a região encontra-se de acordo ou em desacordo com os padrões de qualidade do ar. A resolução CONAMA 03/90 estabelece padrões anuais e diários para o poluente dióxido de enxofre e, portanto, deveria ser simulado um período maior de tempo a fim de poder realizar-se um estudo mais conclusivo.

7. Bibliografia

CARBONELL, L. M. T.; GACITA, M. S.; OLIVA, J. J. R.; GAREA, L. C.; RIVERO, N. D., RUIZ, E. M. Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data. Atmospheric Pollution Research, Cuba, v. 1, n. 2, p.102-111, 2010. Disponível em:

<<http://www.atmospolres.com/articles/Volume1/issue2/APR-10-013.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2011.

CONAMA (1990), Resolução CONAMA nº 03, Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no – PRONAR – Data da Legislação: 28/06/90 – Publicação DOU: 22/08/90.

CORRÊA, E. B. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS DO MODELO MM5 À DIFERENTES MODELAGENS DOS FLUXOS TURBULENTOS NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA NO AEROPORTO INTERNACIONAL ANTONIO CARLOS JOBIM. 2005. 152 f. Monografia (Bacharel) - Curso de Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Ufrj, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/monografias>>. Acesso em: 05 jul. 2011.

CUNHA, B. D. . ESTRATÉGIAS DE USO DO MODELO AERMOD PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR. 2009. 91 f. Monografia (Bacharel) - Curso de Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Ufrj, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/monografias>>. Acesso em: 06 jul. 2011.

DE MELO LISBOA, H. (2008) - Poluição Atmosférica. Edição Eletrônica. Disponível na Internet. (www.lcqar.ufsc.br/aula.php). Acesso em: 04 jul. 2011.

EPA – Environmental Protection Agency. AERMOD: Description of model formulation. 2004. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#aermod>. Acesso em: 05 ago. 2011.

EPA – Environmental Protection Agency. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD. 2004. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#aermod>. Acesso em: 05 ago. 2011.

EPA – Environmental Protection Agency. User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor AERMAP. 2004. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_related.htm#aermap>. Acesso em: 05 ago. 2011.

EPA – Environmental Protection Agency. User's Guide for the AERMOD Meteorological PreProcessor AERMET. 2004. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/metobsdata_procaccprogs.htm#aermet>. Acesso em: 05 ago. 2011.

FIDALGO, E. C. C.; CARVALHO JÚNIOR, W.; GODOY, M. D. P. Análise da qualidade do modelo digital de elevação para representação da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal: Inpe, 2009. p. 3785 - 3791. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.11.15/doc/3785-3791.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2011.

FUNDAÇÃO CIDE, 2007. apud INEA. Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro – 2009. 108 p. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/downloads/relatorios/qualidade_ar_2009.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2011.

INEA. Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - 2009. 108 p. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/downloads/relatorios/qualidade_ar_2009.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2011.

ISAKOV, V.; VENKATRAM, A.; TOUMA, J. S.; KORACIN, D., OTTE, Tanya L. Evaluating the use of outputs from comprehensive meteorological models in air quality modeling applications. Atmospheric Environment, Research Triangle Park, n. , p.1689-1705, 17 out. 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/AMD/peer/products/160447_Isakov_AIR_PM.pdf>. Acesso em: 30 maio 2011.

JANJIC, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429-1443.apud CPTEC. ETA MODEL. Disponível em: <<http://etamodel.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

JANJIC, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes.*Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.apud CPTEC. ETA MODEL. Disponível em: <<http://etamodel.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

TOUMA, J. S.; Isakov, V.; CIMORELLI, A. J.; Brode. R. W.; Anderson, B. Using Prognostic Model-Generated Meteorological Output in the AERMOD Dispersion Model: An Illustrative Application in Philadelphia, PA. Philadelphia: Journal Of The Air & Waste Management Association, 2007. 10 p. Disponível em: <http://www.epa.gov/AMD/peer/products/157503_Touma_AIR.pdf>. Acesso em: 30 maio 2011.

KESARKAR, A. P.; DALVI, M.; KAGINALKAR, A; OJHA; A. Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling.A case study for PM10 dispersion over Pune, India.*Atmospheric Environment*, Pune, n. , p.1976-1988, 19 out. 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6VH3-4MSHTKX-1C&_cdi=6055&_user=687336&_pii=S1352231006010570&_origin=&_coverDate=03%2F31%2F2007&_sk=999589990&view=c&wchp=dGLbVzb-zSkWA&md5=90fb7f2e4f1bb9012781f7334603134d&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: 30 maio 2011.

MELLOR, G.L., YAMADA, T. “A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers”. *Journal Atmospheric Science*, v. 31, pp.1791-1806, 1974. apud MORAES, Nilton Oliveira. **MODELAGEM DO MECANISMO DE FORMAÇÃO E DESINTENSIFICAÇÃO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/dissertacoes>>. Acesso em: 30 maio 2011.

MELLOR, G. L., YAMADA, T. “Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems”. *Review Geophysical Space Physical*, v. 20, pp. 851-875, 1982. apud MORAES, Nilton Oliveira. **MODELAGEM DO MECANISMO DE FORMAÇÃO E DESINTENSIFICAÇÃO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/dissertacoes>>. Acesso em: 30 maio 2011.

MORAES, N. O.. **MODELAGEM DO MECANISMO DE FORMAÇÃO E DESINTENSIFICAÇÃO DE ILHA DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/dissertacoes>>. Acesso em: 30 maio 2011.

NEW ZEALAND. BLUETT, J.; GIMSON, N.; FISHER, G.; HEYDENRYCH, C.; FREEMAN, T.; GODFREY, J. Ministry For The Environment. *Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling*. Wellington, 2004. 152 p. Disponível em: <<http://www.mfe.govt.nz/publications/air/atmospheric-dispersion-modelling-jun04/atmospheric-dispersion-modelling-jun04.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2011.

PSU/NCAR (Estados Unidos). MM5 Online Tutorial. Disponível em: <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/On-Line-Tutorial/teachyourself.html>>. Acesso em: 08 maio 2011.

WEIL, J. C.; CORIO, L. A.; BROWER, R. P.. A PDF Dispersion Model for Buoyant Plumes in the Convective Boundary Layer. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, Boulder, Colorado, v. 36, n. , p.982-1003, 25 jul. 2011. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(1997\)036%3C0982%3AAPDMFB%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(1997)036%3C0982%3AAPDMFB%3E2.0.CO%3B2)>. Acesso em: 25 jul. 2011.

VICENTINI, P. C. USO DE MODELOS DE QUALIDADE DO AR PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DO PROCONVE ENTRE 2008 E 2020 NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO. 2011. 242 f. Tese (Doutor) - Departamento de Engenharia Mecânica, Coppe-ufrj, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/lamma.ufrj.br/ncqar/teses>>. Acesso em: 05 jul. 2011.

8. Anexos

8.1 Meteogramas Meteogramas de setembro 2007

Nas comparações abaixo, são apresentados os dados observados e simulados, de direção e intensidade do vento, para o período de setembro de 2007. Os dados simulados, no entanto, apresentam apenas as direções e intensidades dos períodos (2-13; 16-24; 25-30 de setembro).

Os dados observados para cada um dos aeroportos analisados apresentaram mudanças repentinas na direção e intensidade de ventos. Já os dados simulados permaneceram mais uniformes com mudanças de direção mais suaves.

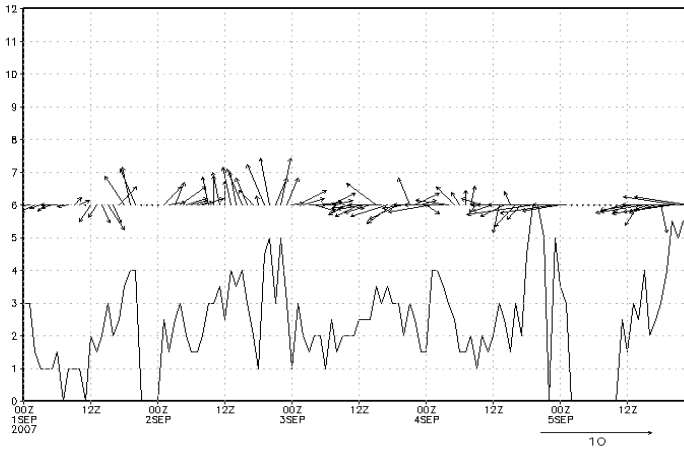
As Figuras 45-16 apresentam, na parte inferior, os meteogramas das simulações realizadas pelo MM5 para o aeroporto de Campos dos Afonsos (SBAF) e, na parte superior, os meteogramas dos ventos observados para o mesmo aeroporto. Verificou-se que os dados simulados pelo MM5 subestimaram as intensidades de vento observadas, para este aeroporto.

Os dados observados apresentaram um padrão de aumento e redução da intensidade do vento que também foi representado nos dados simulados.

As direções de vento observadas sofreram mudanças repentinas da direção do vento, enquanto que as direções de vento simuladas sofreram mudanças de direção mais suaves. Há apenas um pequeno número de horas simuladas que apresenta mudança repentina na direção dos ventos.

Houve alguma dificuldade de se verificar quão bem as direções simuladas correspondiam as observadas para esse aeroporto, devido ao tamanho das flexas, que representam os ventos simulados, ser muito pequeno. Isso ocorreu devido os ventos simulados serem pouco intensos para essa localidade. Não foi possível aumentar o tamanho das flexas simuladas, pois também seria necessário aumentar as flexas observadas, a fim de que a escala permanecesse a mesma em todas as imagens. Como as flexas observadas já possuem um tamanho considerável, o aumento de tamanho das mesmas prejudicaria a visualização dos resultados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0100Z-0500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0100Z-0500Z

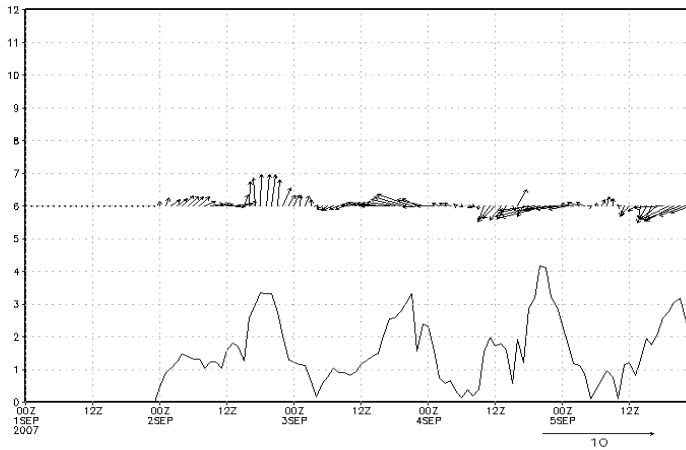
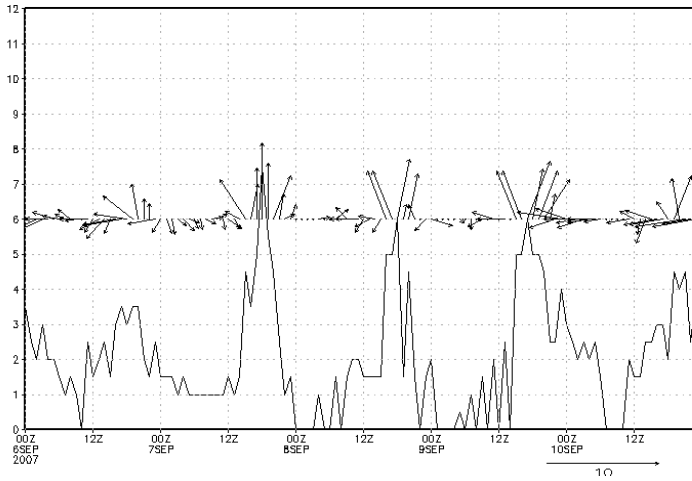


Figura 45: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0600Z-1000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0600Z-1000Z

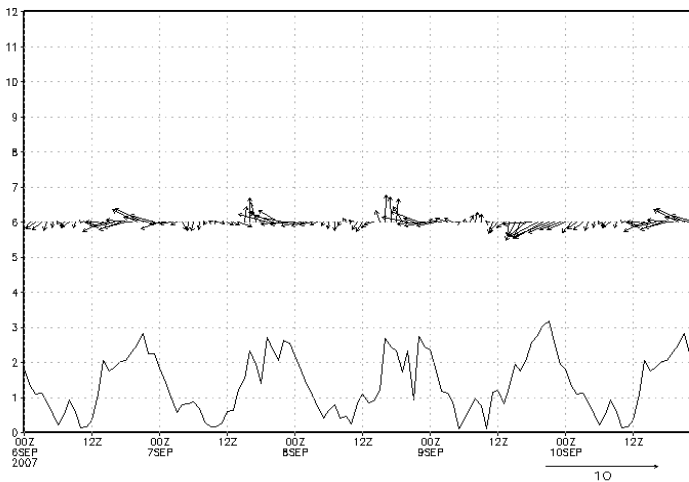
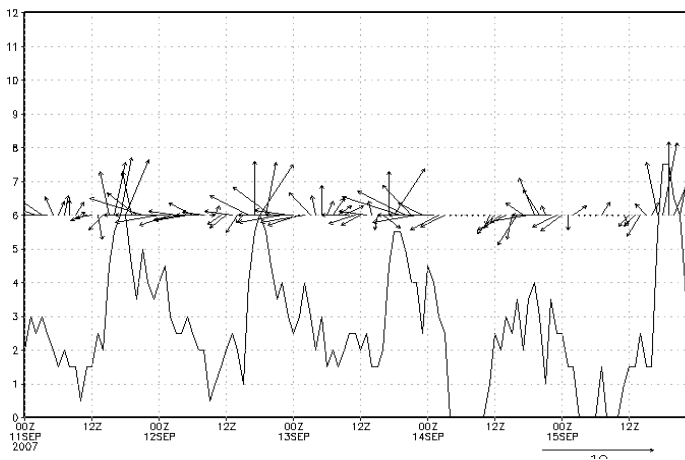


Figura 46: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1100Z-1500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1100Z-1500Z

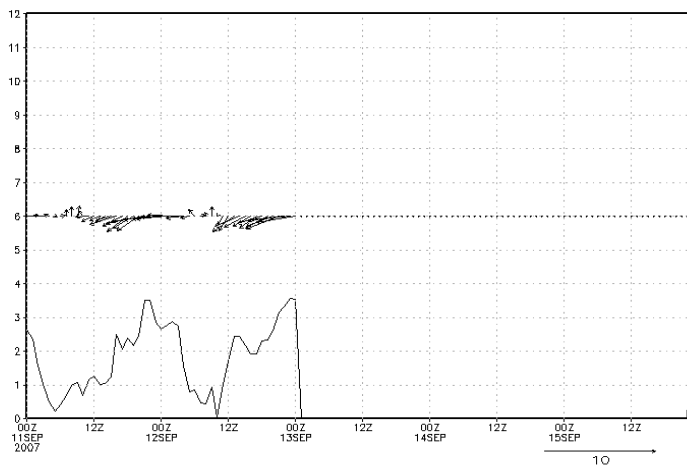
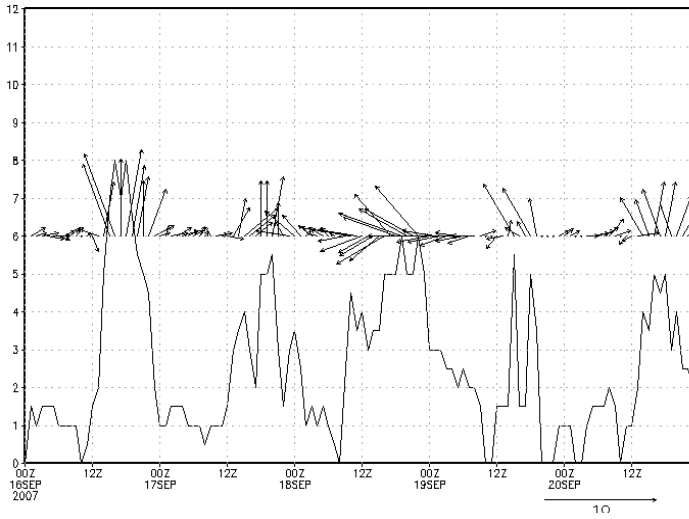


Figura 47: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1600Z-2000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1600Z-2000Z

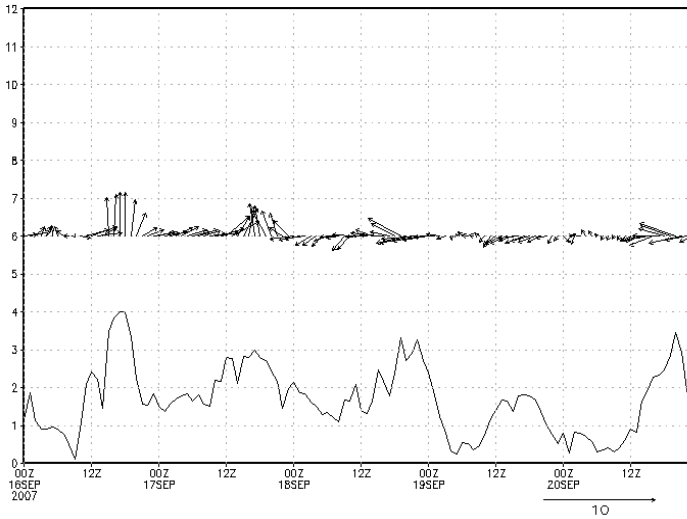
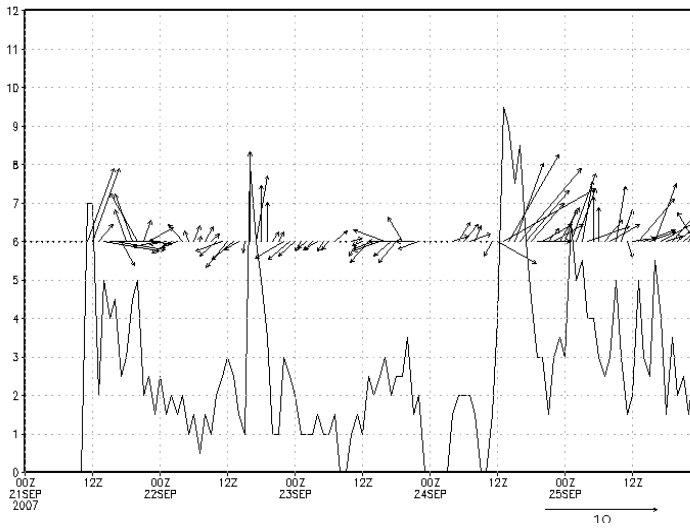


Figura 48: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 2100Z-2500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 2100Z-2500Z

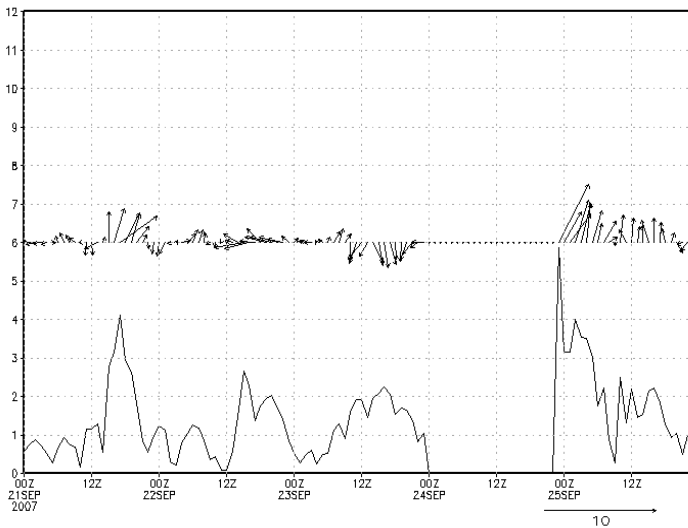
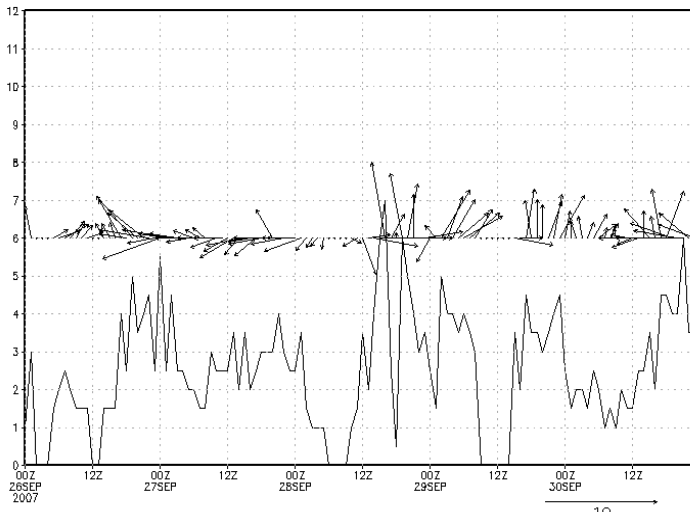


Figura 49: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 2600Z-3000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 2600Z-3000Z

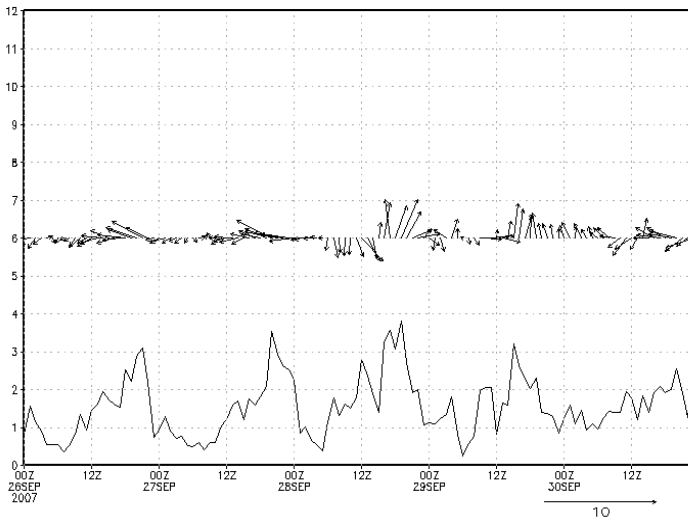


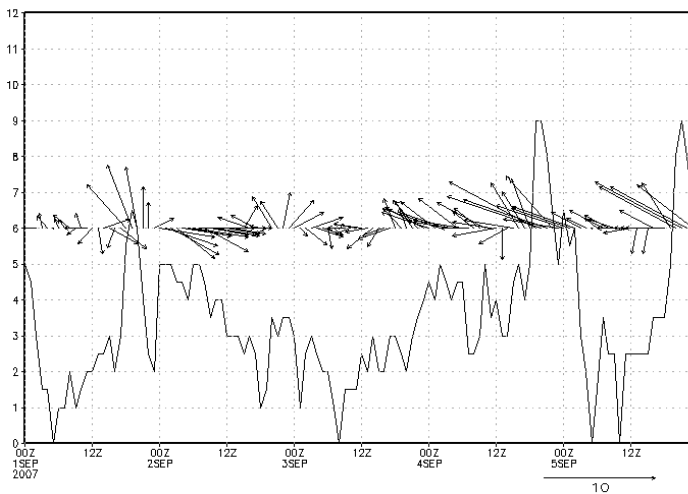
Figura 50: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figura 51-22 apresentam, na parte inferior, os meteogramas das simulações realizadas pelo MM5 para o aeroporto do Galeão (SBGL) e, na parte superior, os meteogramas dos ventos observados para o mesmo aeroporto.

Percebeu-se que as intensidades simuladas subestimaram as intensidades observadas.

As direções de vento observadas sofreram mudanças repentinas da direção do vento, enquanto que as direções de vento simuladas sofreram mudanças de direção mais suaves.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0100Z-0500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0100Z-0500Z

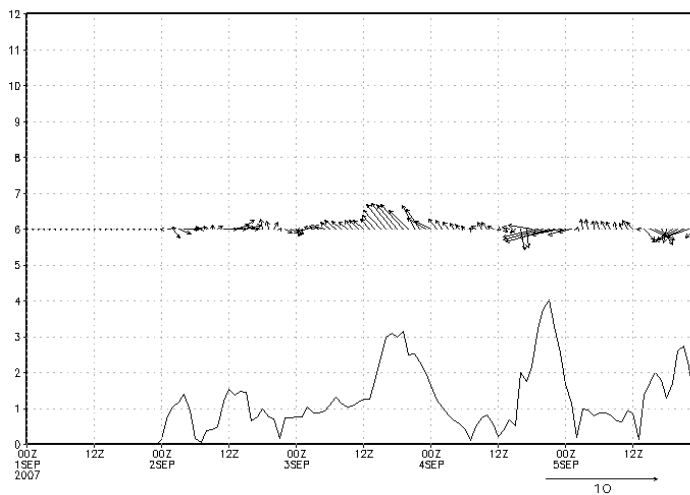
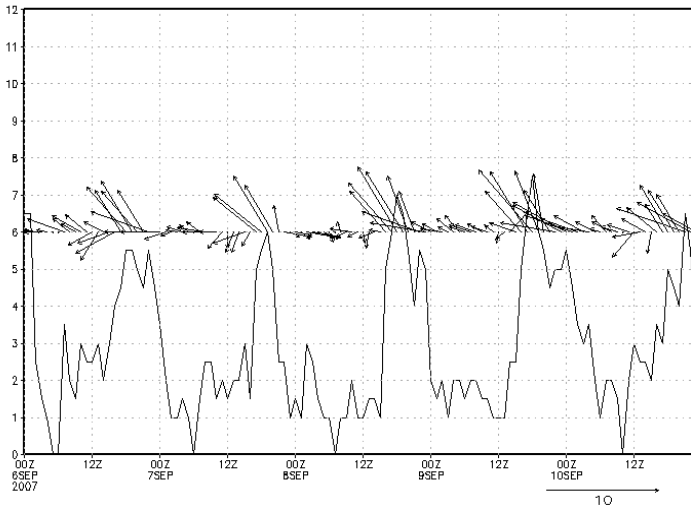


Figura 51: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0600Z-1000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0600Z-1000Z

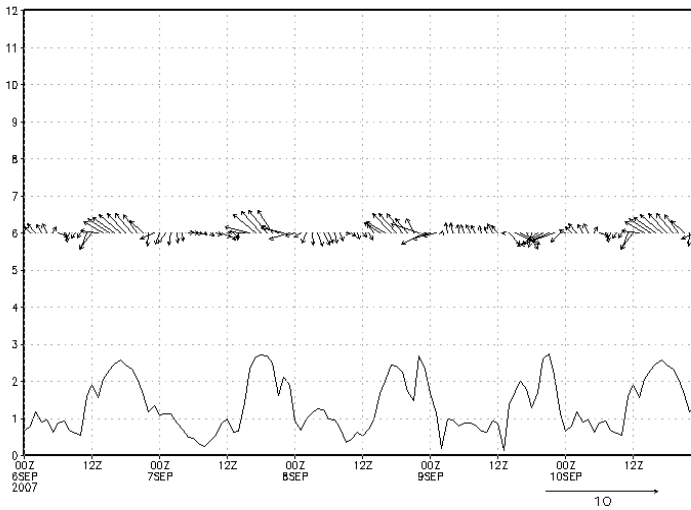
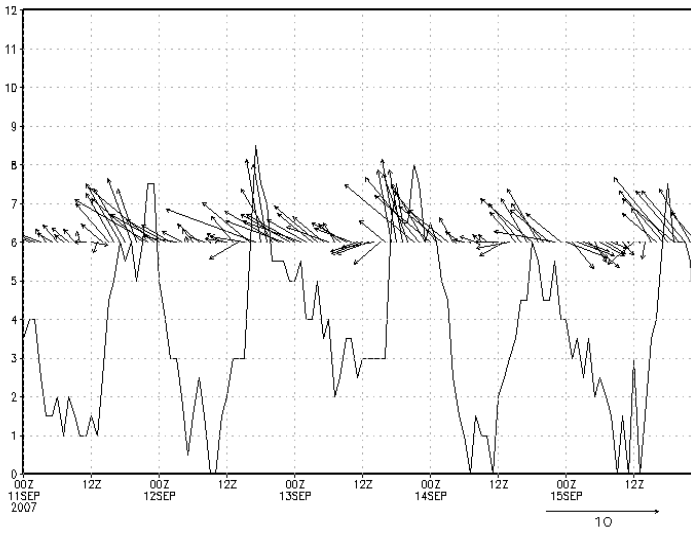


Figura 52: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1100Z-1500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1100Z-1500Z

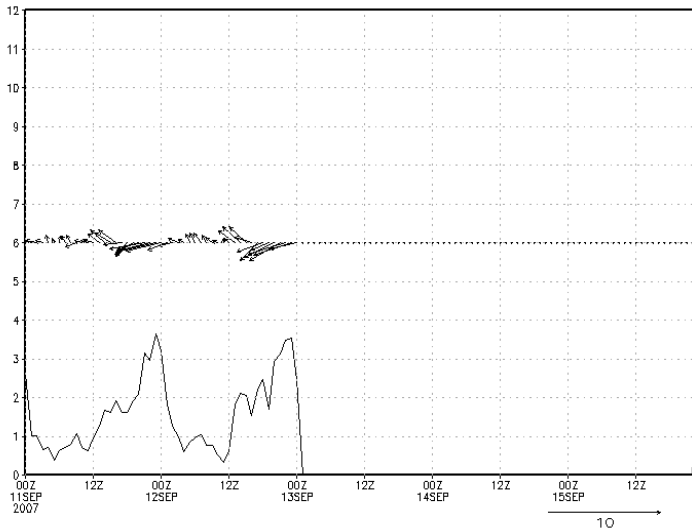
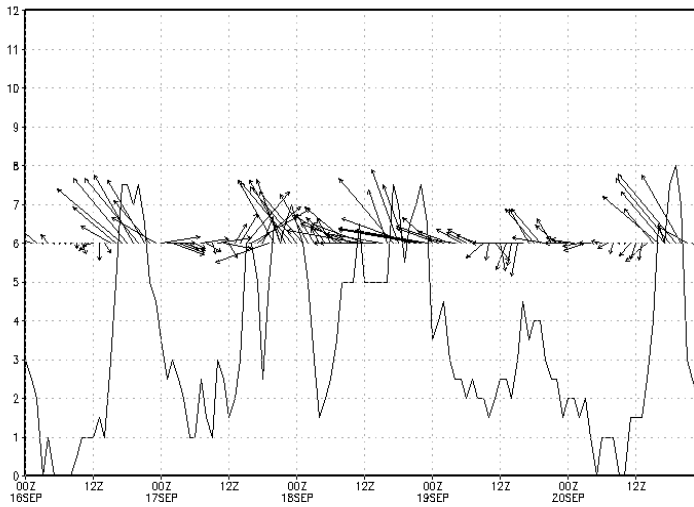


Figura 53: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1600Z-2000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1600Z-2000Z

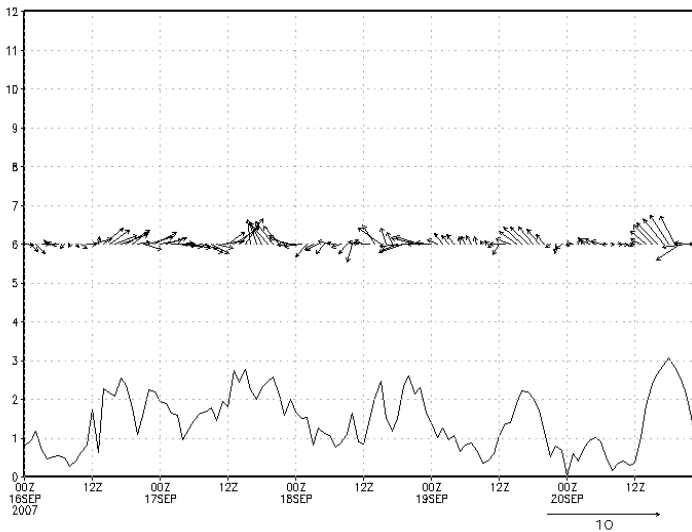
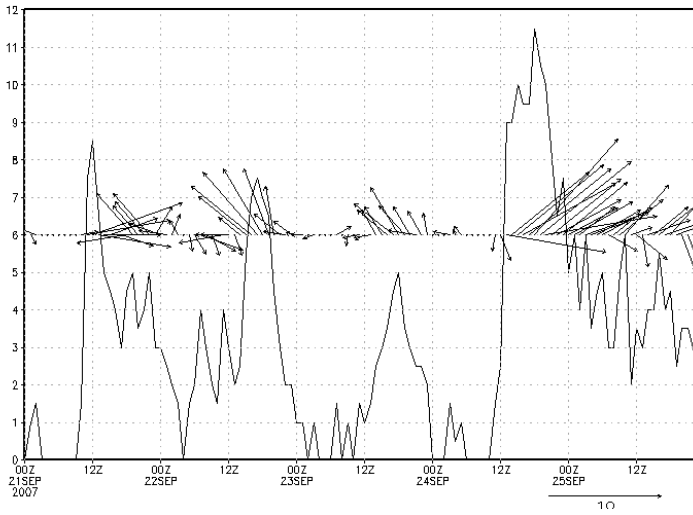


Figura 54: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 2100Z-2500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 2100Z-2500Z

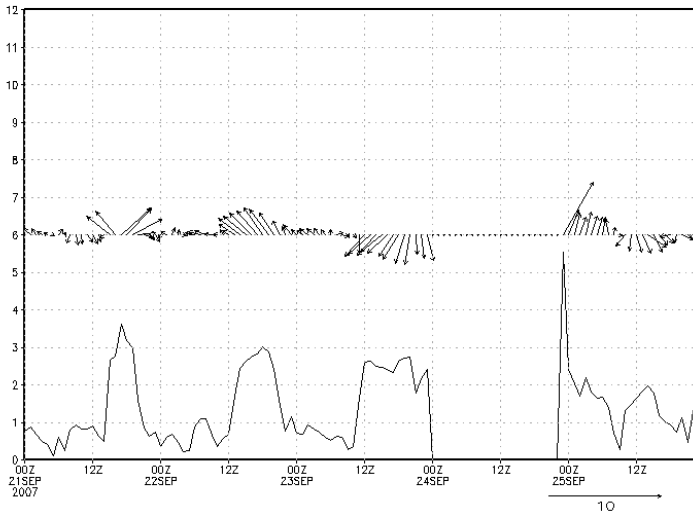
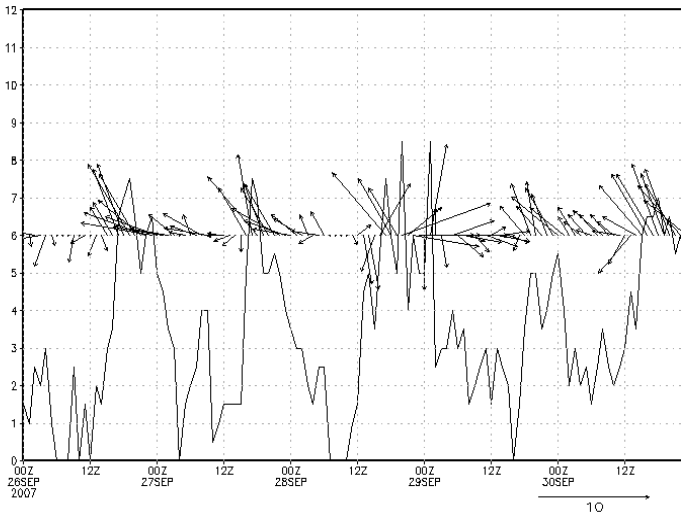


Figura 55: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 2600Z-3000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 2600Z-3000Z

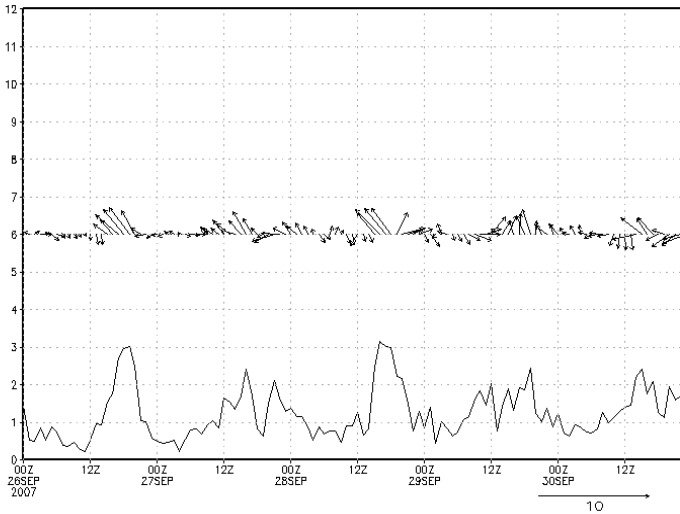
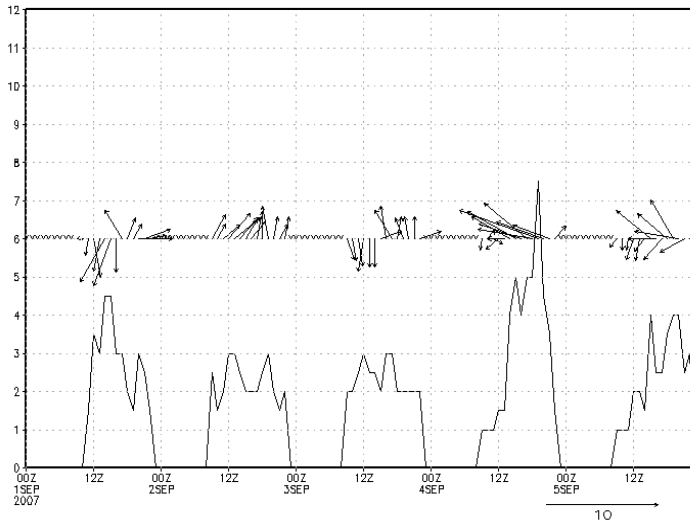


Figura 56: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figura 57-28 apresentam, na parte inferior, os meteogramas das simulações realizadas pelo MM5 para o aeroporto de Jacarepaguá (SBJR) e, na parte superior, os meteogramas dos ventos observados para o mesmo aeroporto.

O aeroporto de Jacarepaguá, por não ser muito utilizado apresentou uma série de interrupções nos seus períodos de observações. Apesar disso, verificou-se que o modelo MM5 foi capaz de reproduzir o ciclo diário de aumento e diminuição da intensidade do vento como já vinha acontecendo para os aeroportos de Campos dos Afonsos e do Galeão. Diferentemente dos resultados obtidos para os aeroportos de Campos dos Afonsos e do Galeão, onde os ventos observados foram subestimados, os ventos simulados apresentaram intensidades iguais ou superiores aos observados, superestimando em alguns casos os dados observados. Além disso, a simulação de algumas direções de vento não captou algumas direções de dados observados. Os ventos de norte que ocorreram no terceiro dia foram simulados como ventos de sudeste. No entanto, na maior parte do tempo as direções simuladas representaram as direções de vento observadas.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0100Z-0500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0100Z-0500Z

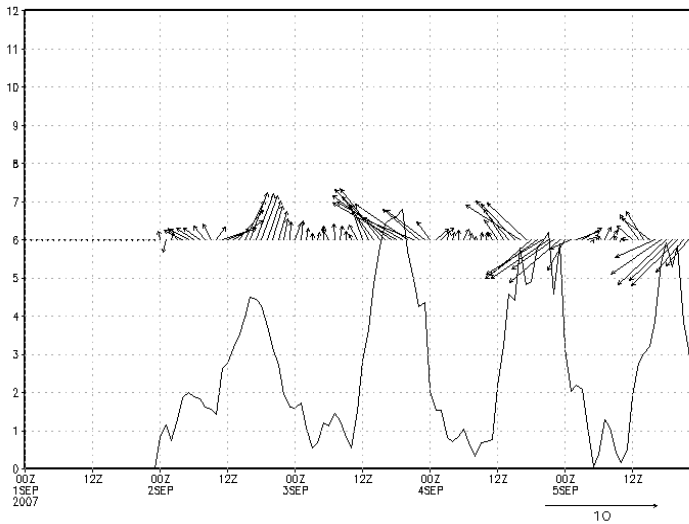
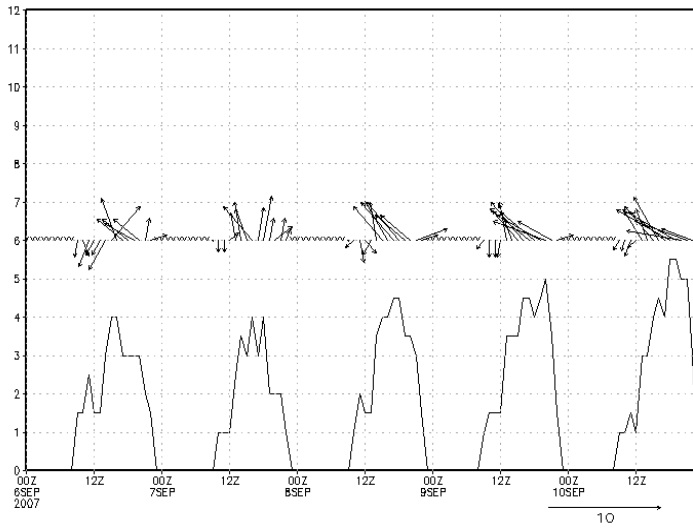


Figura 57: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0600Z-1000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0600Z-1000Z

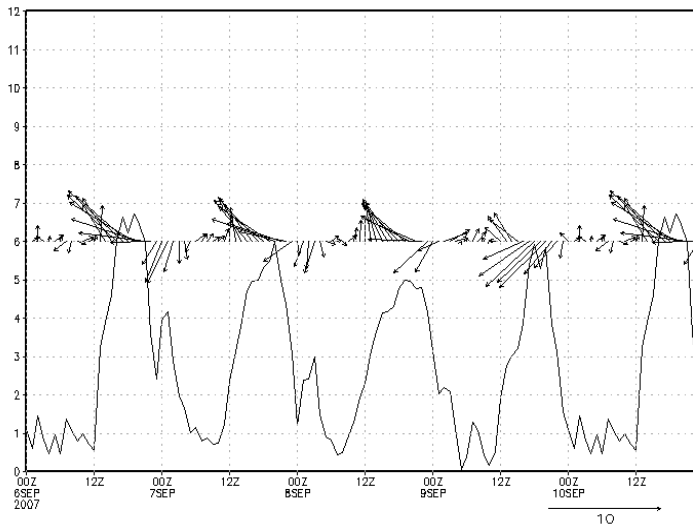
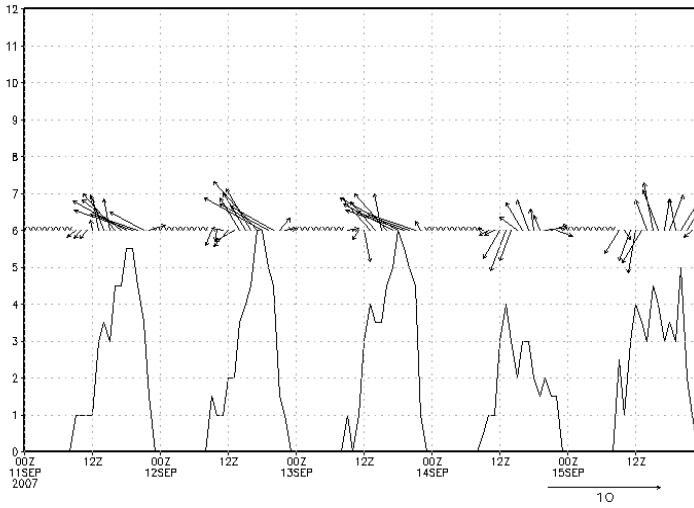


Figura 58: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1100Z-1500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1100Z-1500Z

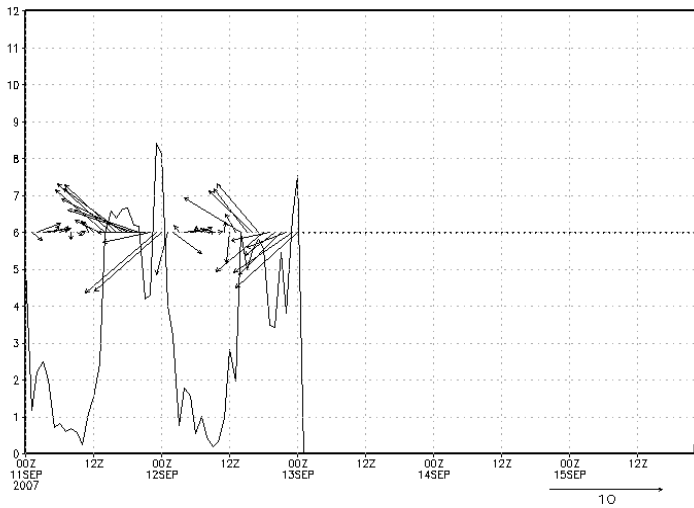
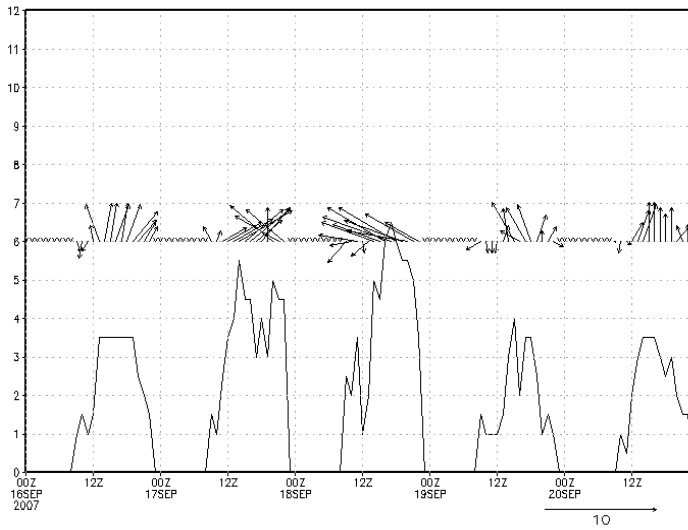


Figura 59: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1600Z-2000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1600Z-2000Z

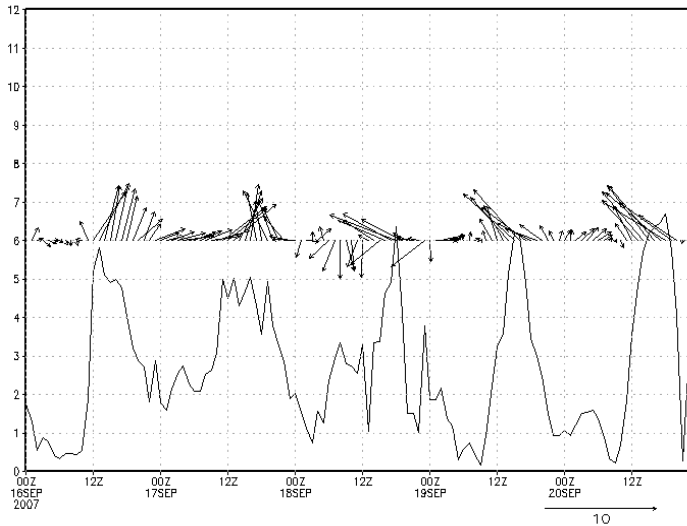
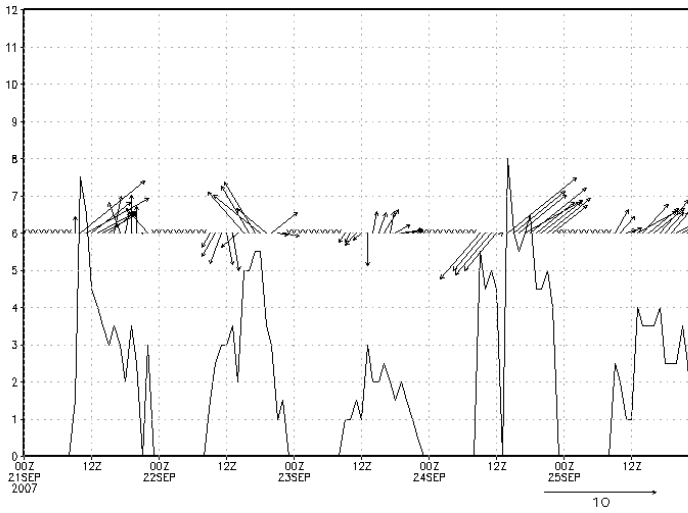


Figura 60: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 2100Z-2500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 2100Z-2500Z

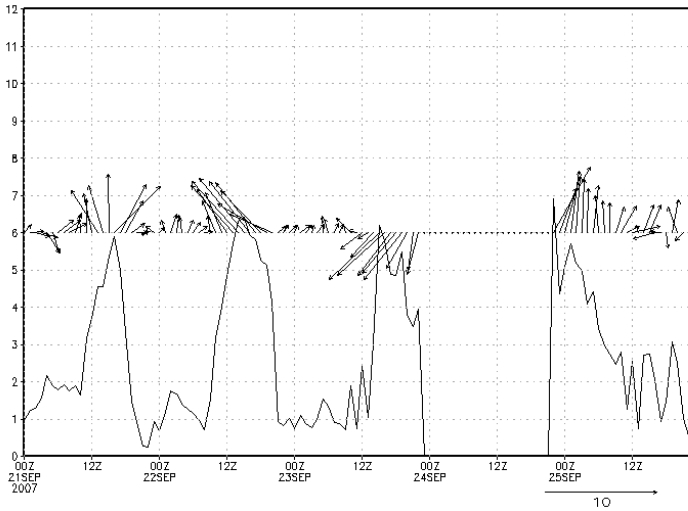
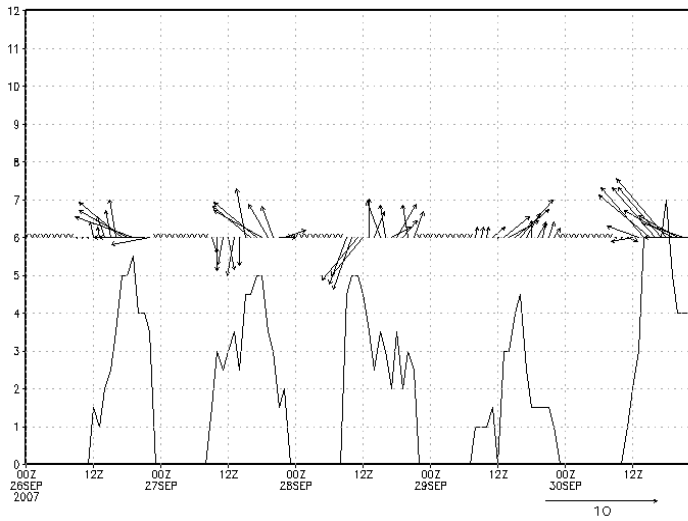


Figura 61: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 2600Z-3000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 2600Z-3000Z

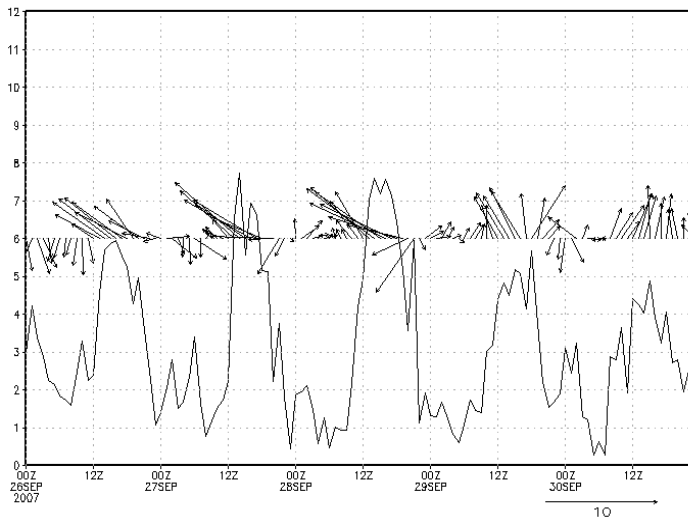
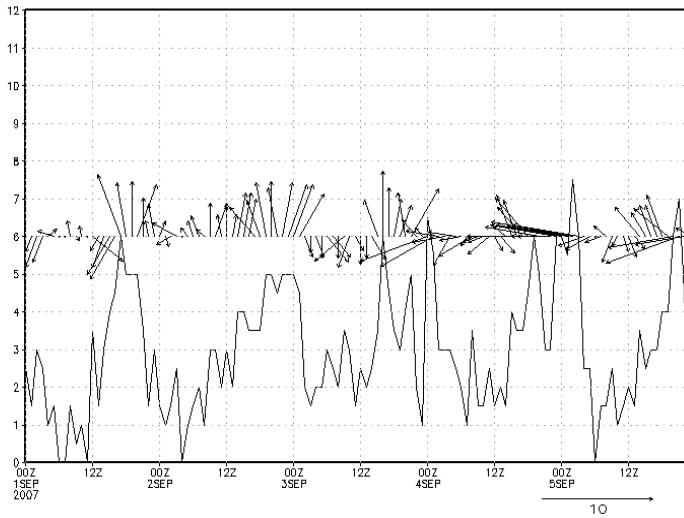


Figura 62: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figura 63-34 apresentam, na parte inferior, os meteogramas das simulações realizadas pelo MM5 para o aeroporto Santos Dumont (SBRJ) e, na parte superior, os meteogramas dos ventos observados para o mesmo aeroporto.

Os dados referentes ao aeroporto Santos Dumont (SBRJ) reproduziram, em seus resultados simulados, a variação diária da intensidade do vento ao longo do período comparado. Assim, como nos aeroportos de Campos dos Afonsos e do Galeão, a tendência foi de subestimar as intensidades observadas. De um modo geral, as direções dos ventos observadas foram reproduzidas nos resultados simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0100Z-0500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0100Z-0500Z

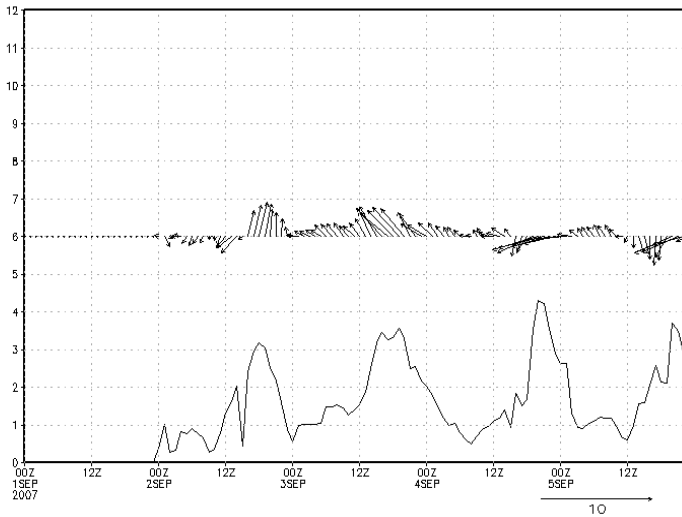
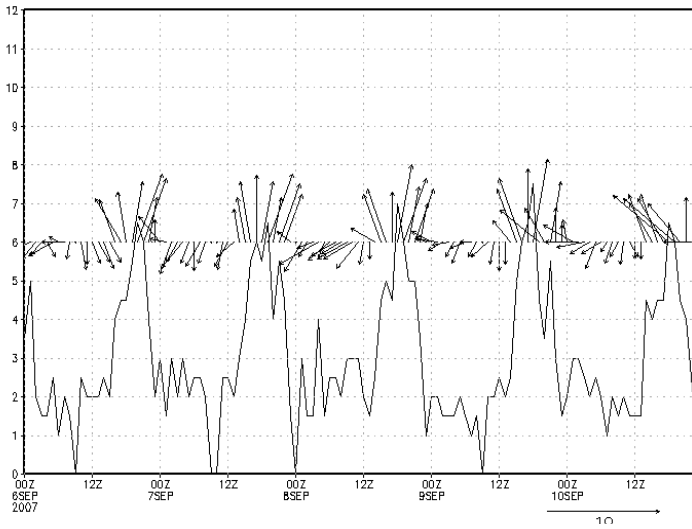


Figura 63: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0600Z-1000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0600Z-1000Z

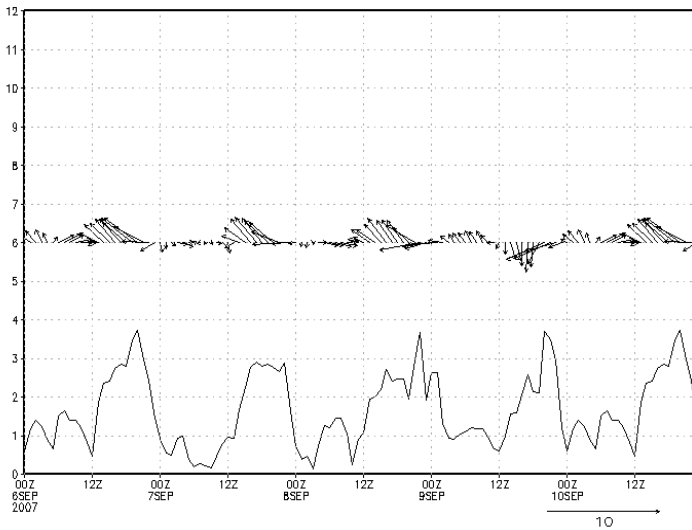
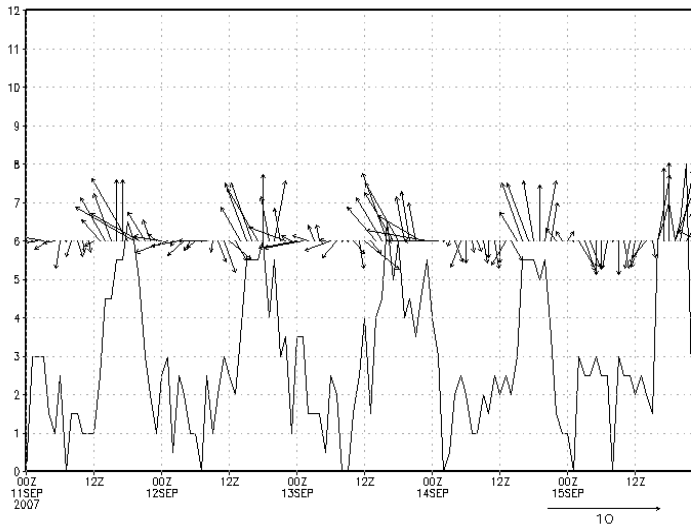


Figura 64: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1100Z-1500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1100Z-1500Z

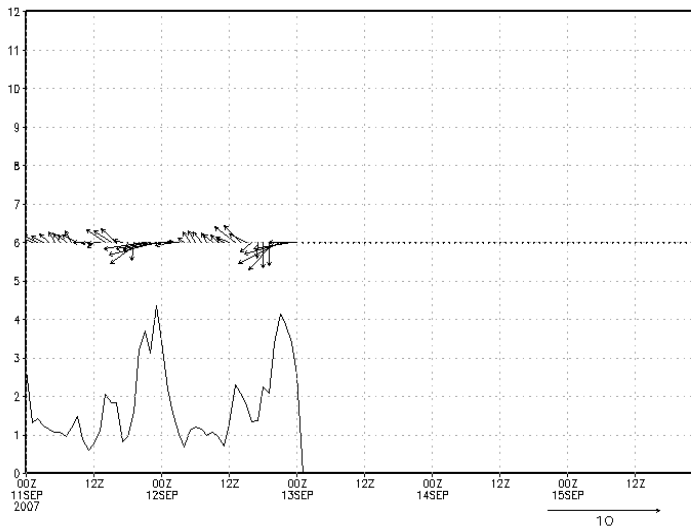
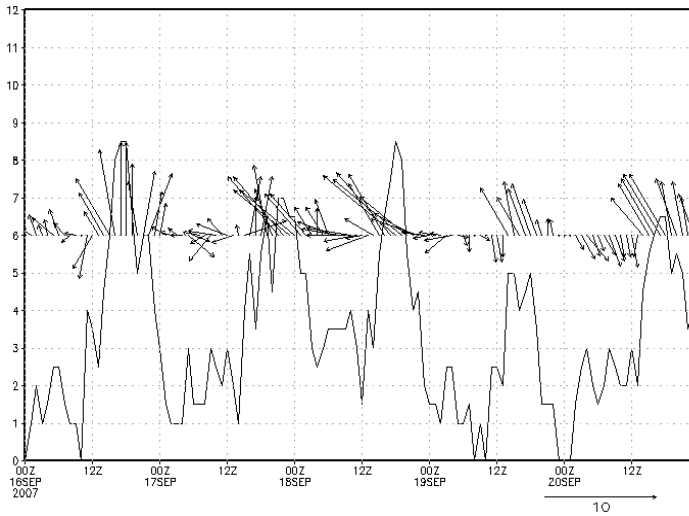


Figura 65: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1600Z-2000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1600Z-2000Z

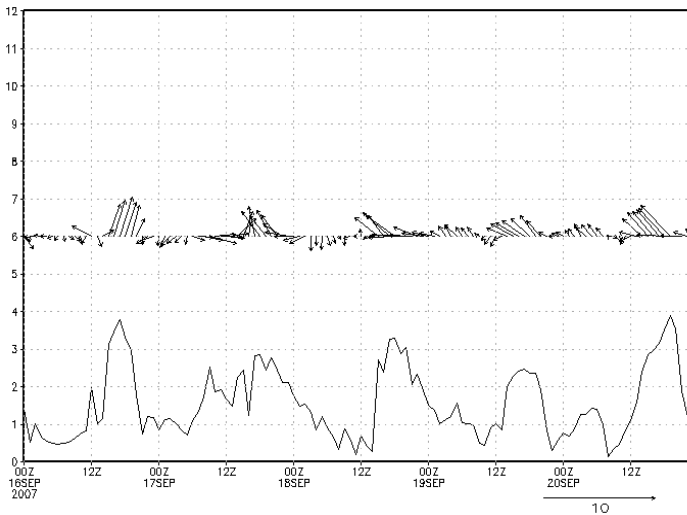
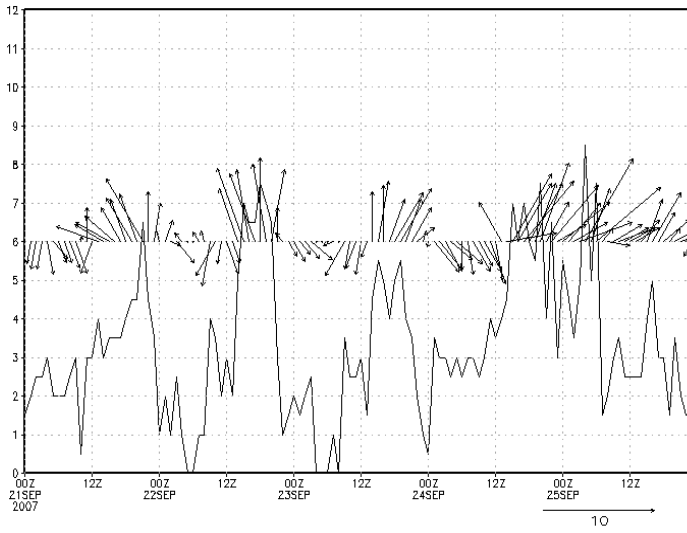


Figura 66: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 2100Z-2500Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 2100Z-2500Z

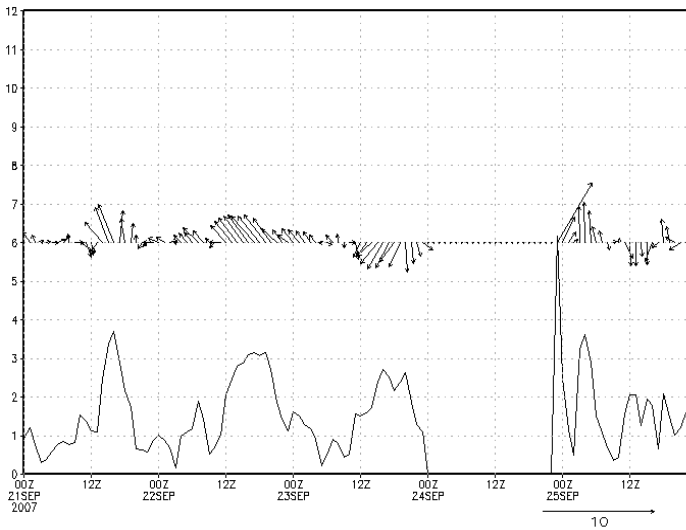
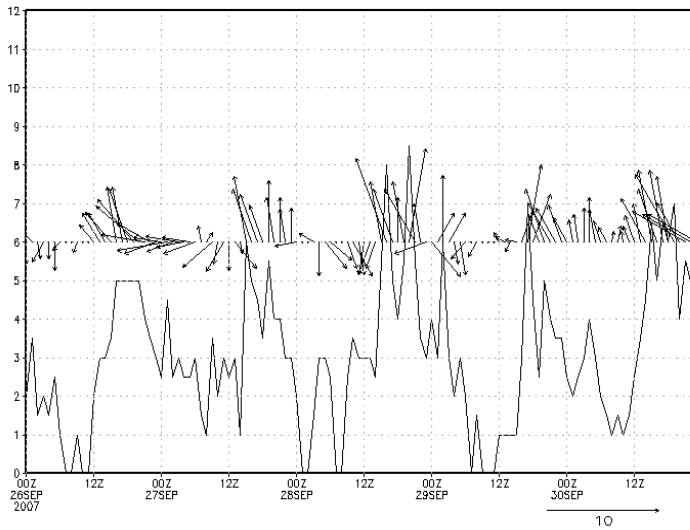


Figura 67: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 2600Z-3000Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 2600Z-3000Z

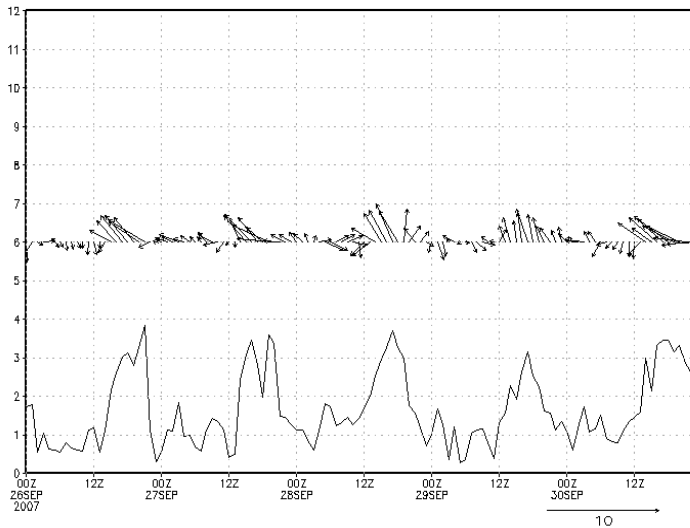


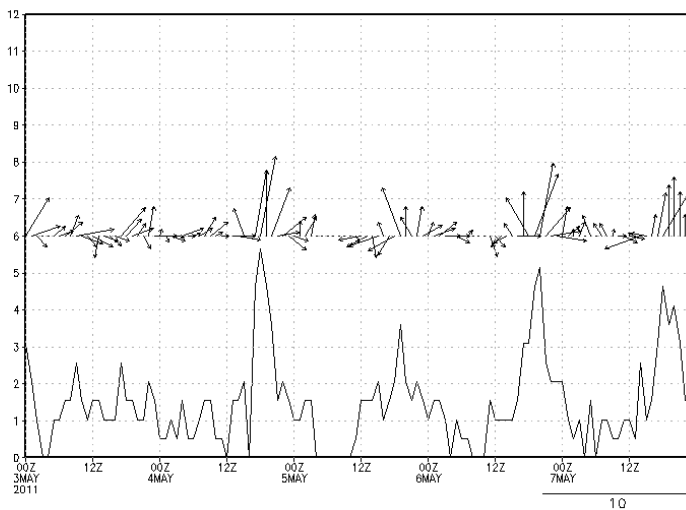
Figura 68: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

8.2 Meteogramas de maio 2011

As Figura 69-42 apresentam na parte superior, os ventos observados e na parte inferior, os ventos simulados pelo MM5 para a localidade do aeroporto de Campos dos Afonsos.

Os dados simulados para o aeroporto de Campos dos Afonsos (SBAF) subestimaram as intensidades de vento dos dados observados. As variações de direção dos ventos simulados foram mais suaves que as observadas. O modelo MM5 foi capaz de reproduzir as variações de intensidade observadas diariamente.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0300Z-0700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0300Z-0700Z

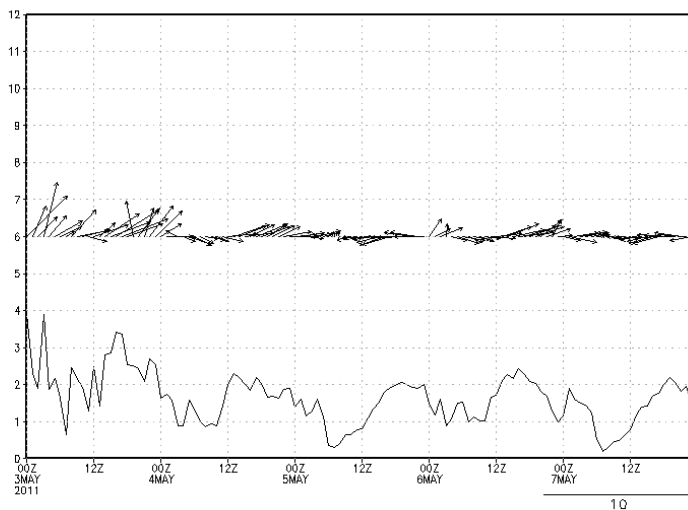
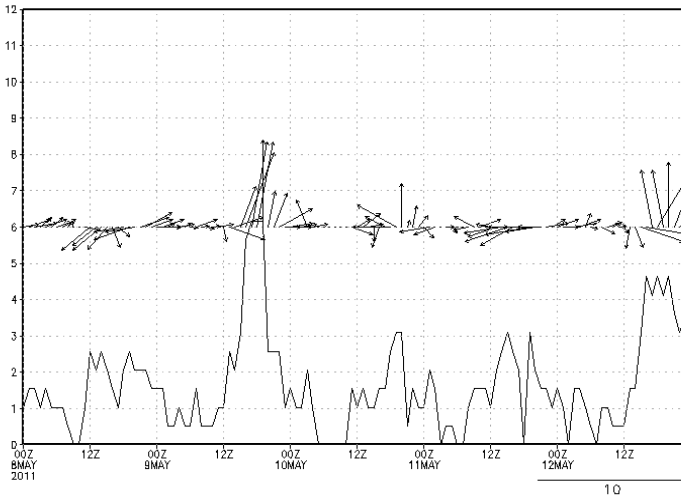


Figura 69: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0800Z-1200Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 0800Z-1200Z

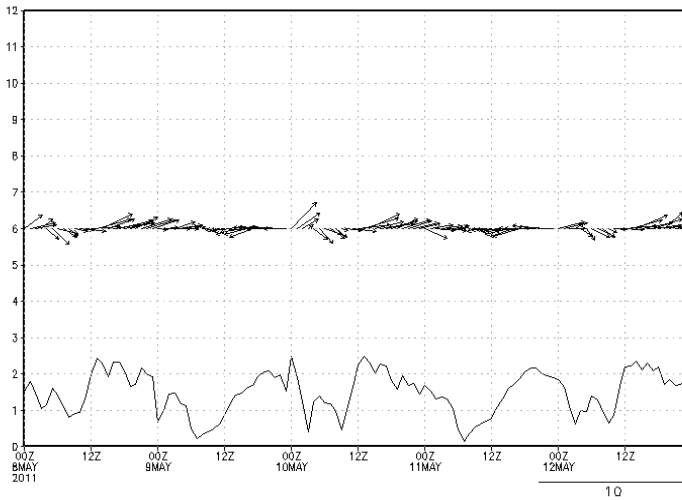
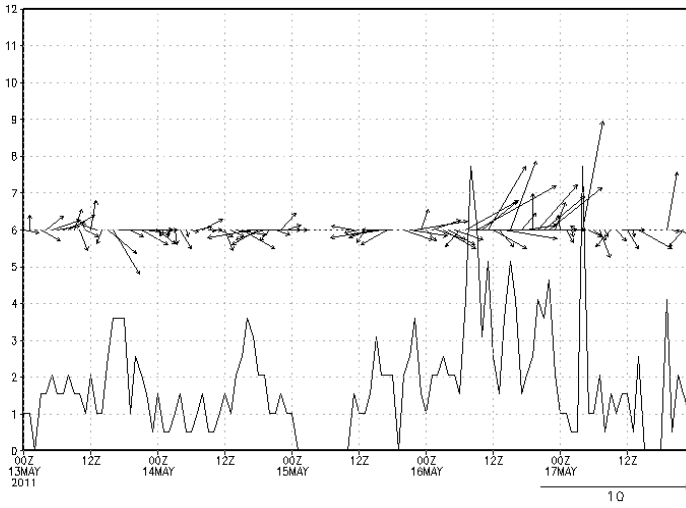


Figura 70: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1300Z-1700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1300Z-1700Z

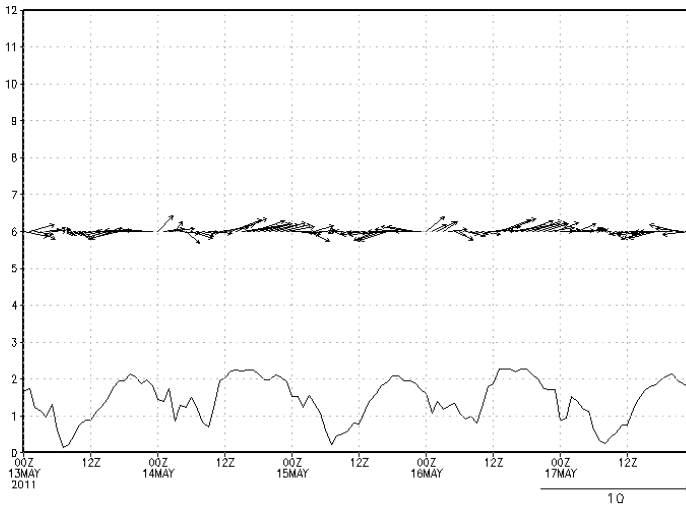
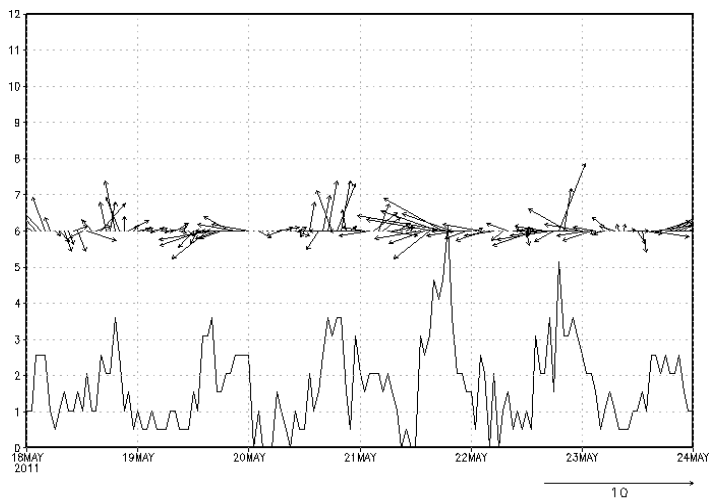


Figura 71: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1800Z-2400Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBAF 1800Z-2400Z

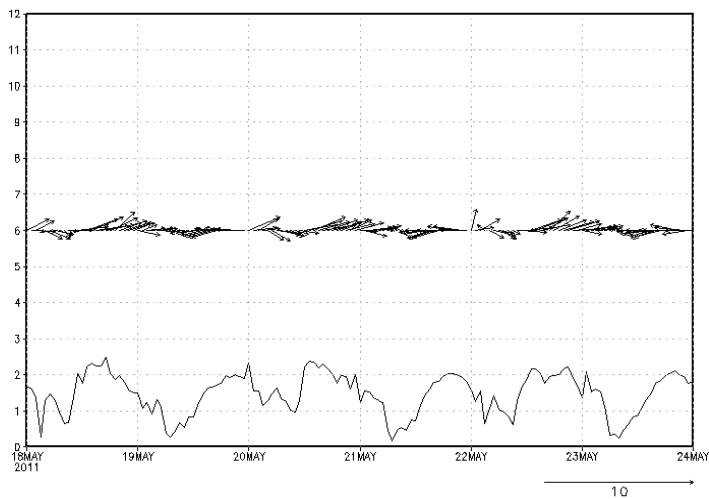


Figura 72: SBAF (Campos dos Afonsos). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figura 73-46 apresentam na parte superior os ventos observados e na parte inferior os ventos simulados pelo MM5 para a localidade do aeroporto do Galeão

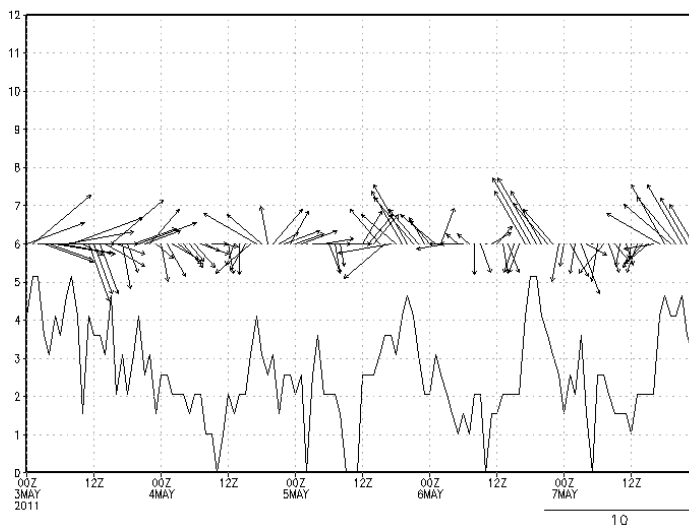
Os dados simulados para o aeroporto do Galeão são os que tem menor número de dados faltantes, havendo uma única hora (18 h do dia 11/05/2011) ao longo dos 21 dias de comparação em que não há dados observados.

Assim como para o aeroporto de Campos dos Afonsos, as intensidades dos ventos tendem a ser subestimadas.

Os dados observados para o aeroporto de Jacarepaguá (SBJR) assim como os dados observados para o período de setembro de 2007 apresentaram grande número de dados faltantes. Apesar disso foi possível verificar que o dado simulado foi capaz de representar bem a variação diária das intensidades de vento observadas.

A tendência das intensidades de vento simulados foi de superestimar as intensidades simuladas e algumas direções de vento observadas não foram representadas nas simulações.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0300Z-0700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0300Z-0700Z

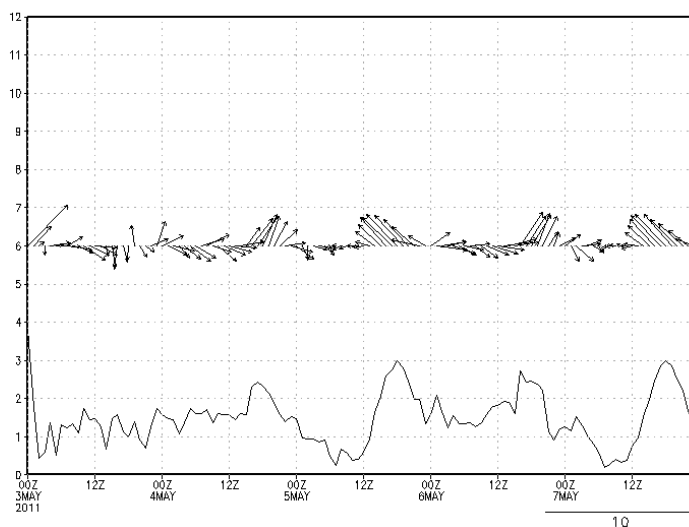
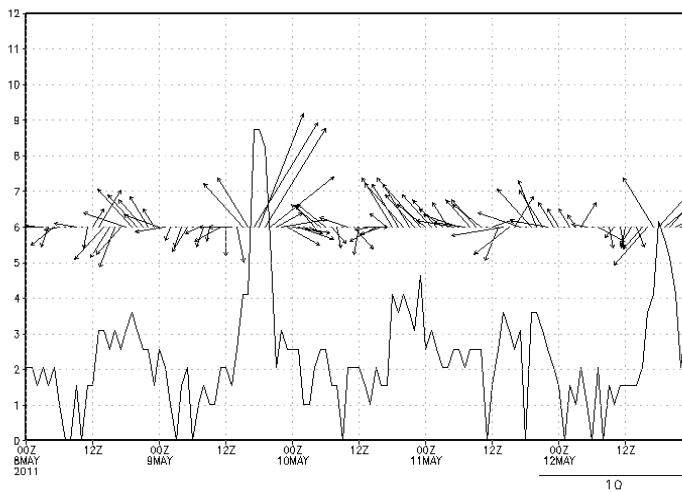


Figura 73: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0800Z-1200Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 0800Z-1200Z

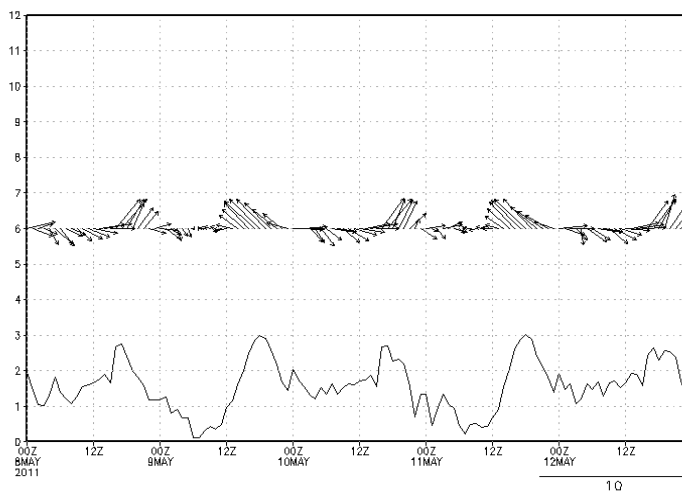
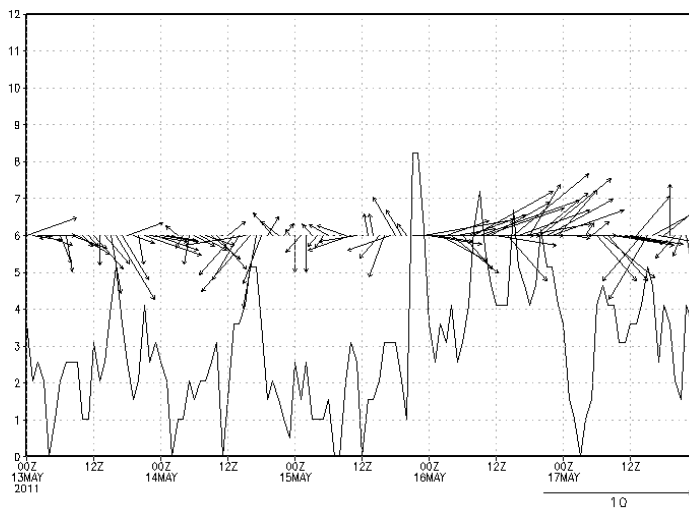


Figura 74: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1300Z-1700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1300Z-1700Z

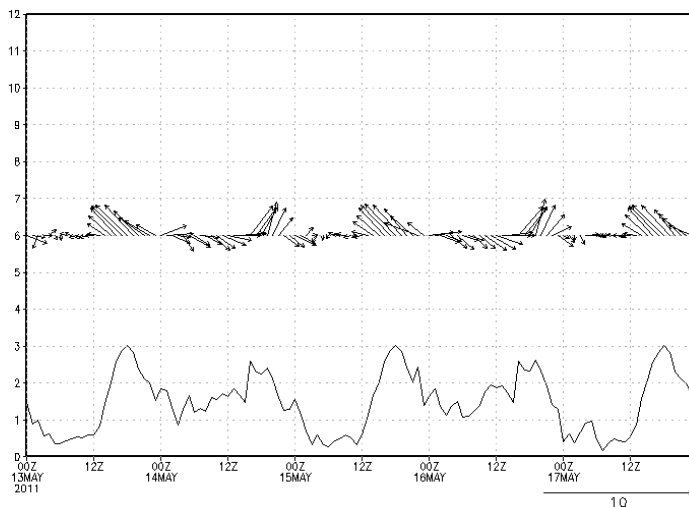
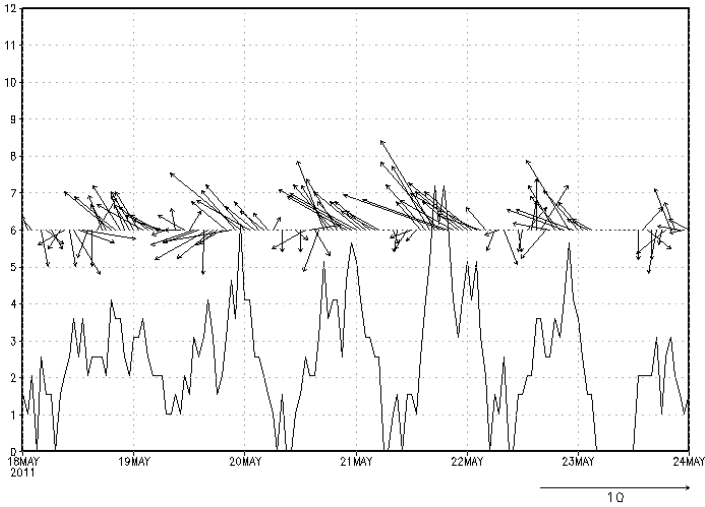


Figura 75: SBGL (Galeão). Acima, vênos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1800Z-2400Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBGL 1800Z-2400Z

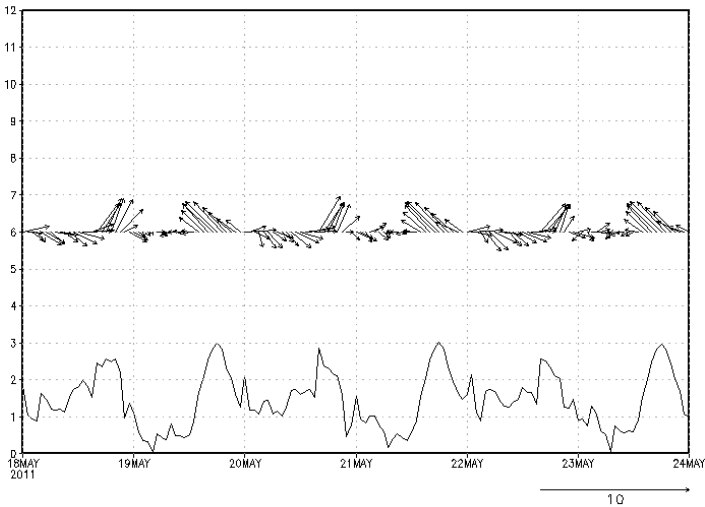


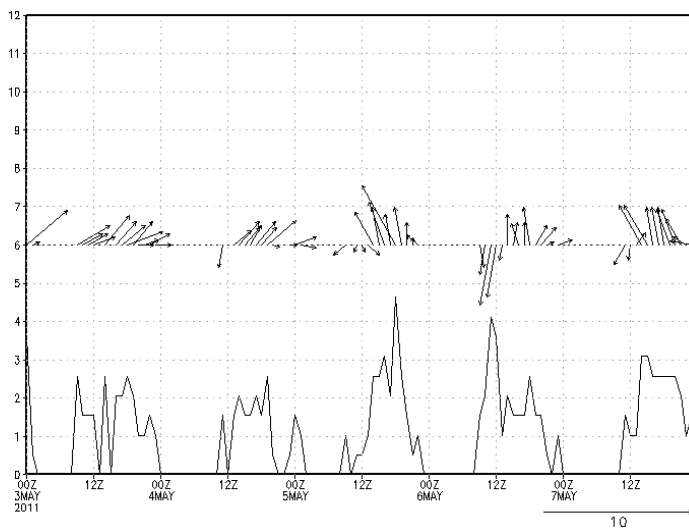
Figura 76: SBGL (Galeão). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figura 77-50 apresentam na parte superior os ventos observado e na parte inferior os ventos simulados pelo MM5 para a localidade do aeroporto de Jacarepaguá.

Os dados observados para o aeroporto de Jacarepaguá apresentaram uma grande sequencia de dados faltantes. Apesar disso, foi possível verificar que os dados observados tiveram sua variação de intensidades reproduzida nos dados simulados.

Diferentemente dos aeroportos de Campos dos Afonsos e do Galeão, os dados referentes ao aeroporto de Jacarepaguá apresentam intensidade iguais ou superiores as intensidades observadas.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0300Z-0700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0300Z-0700Z

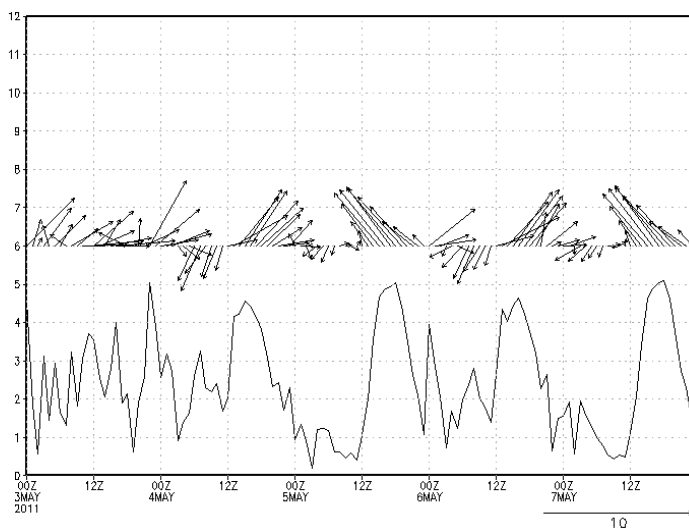
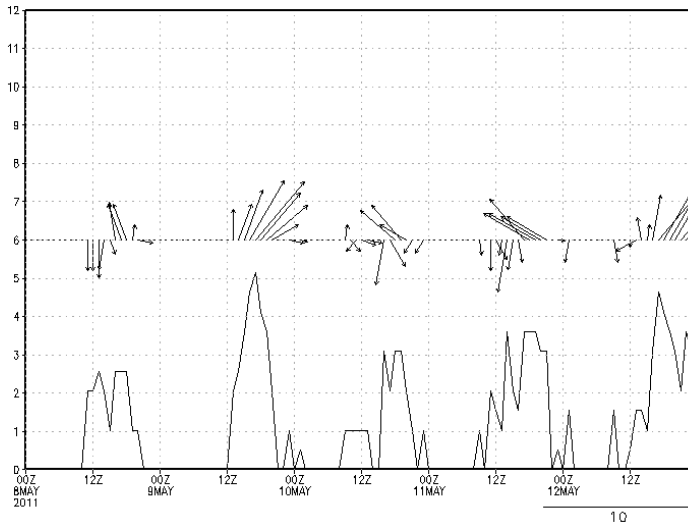


Figura 77: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0800Z-1200Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 0800Z-1200Z

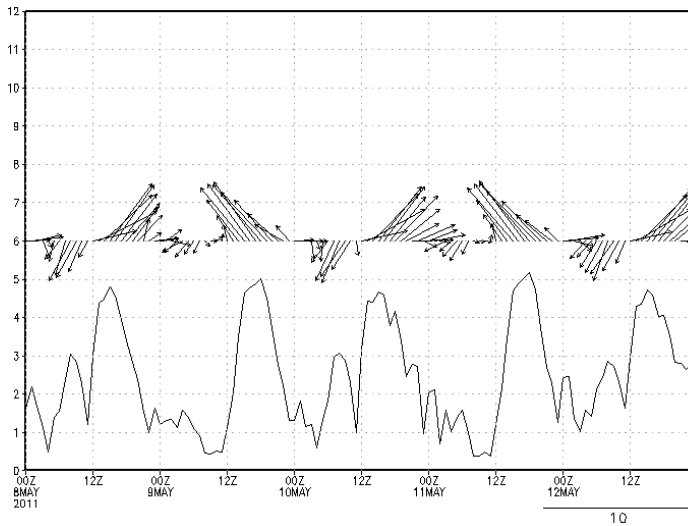
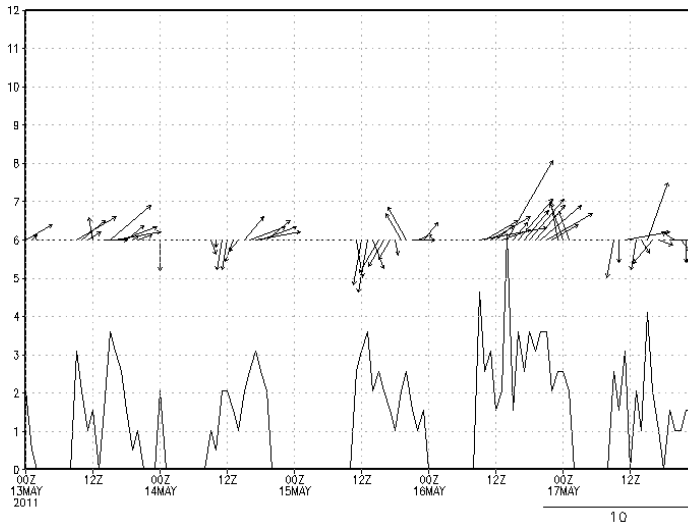


Figura 78: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1300Z-1700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1300Z-1700Z

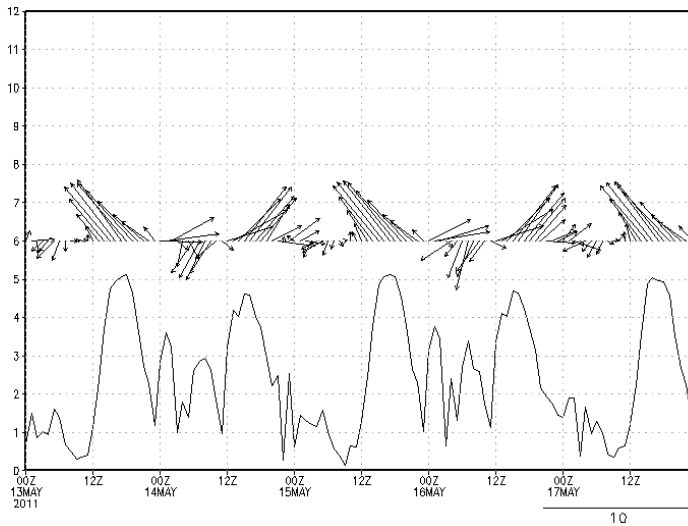
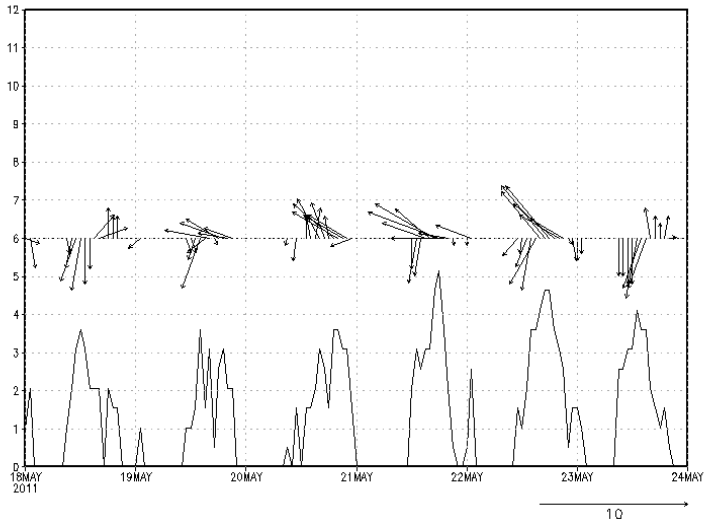


Figura 79: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1800Z-2400Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBJR 1800Z-2400Z

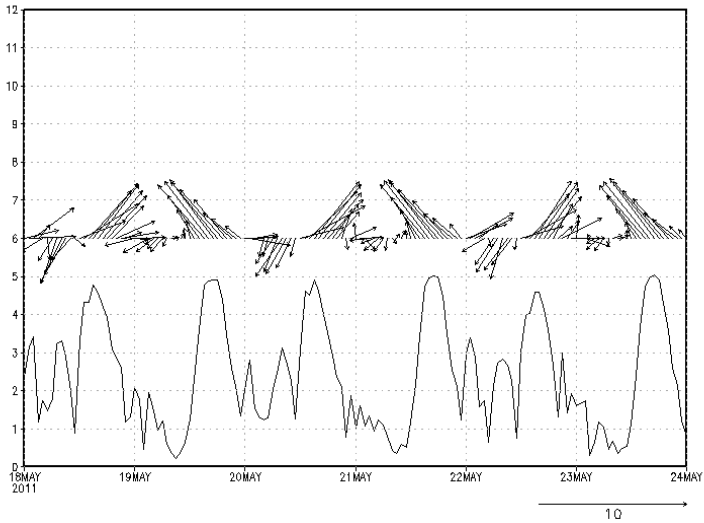


Figura 80: SBJR (Jacarepaguá). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

As Figuras 81-54 apresentam, na parte superior, os ventos observados e na parte inferior os ventos simulados pelo MM5, para a localidade do aeroporto Santos Dumont.

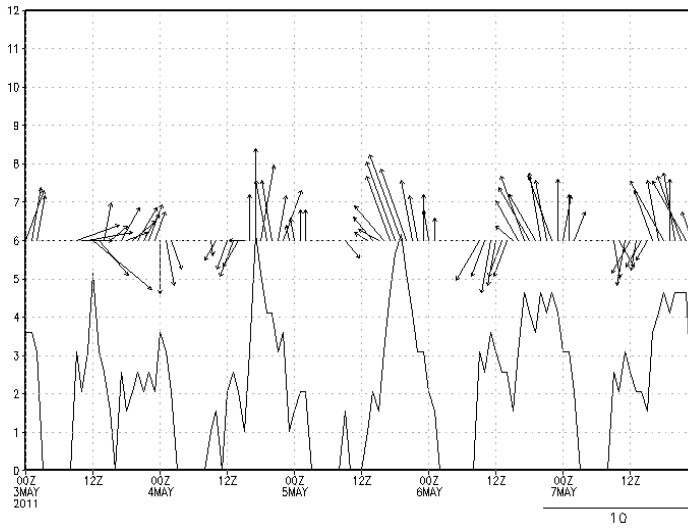
Os dados observados do aeroporto Santos Dumont assim como os do aeroporto de Jacarepaguá apresentaram grande número de ausência de dados observados para o mês de maio de 2011.

Apesar de ser um aeroporto de grande porte, praticamente todas as horas que estavam no intervalo de 3-8 horas da manhã de cada dia do período de 3 a 23 de maio de 2011 não dispunham de dados observados. Apesar disso, foi possível constatar que a variação de intensidades dos dados observados foi representada pela variação de intensidades de dados simulados. Verificou-se ainda que os dados simulados subestimam as intensidades de ventos observadas.

Assim como em praticamente todos os meteorogramas simulados, as variações da direção do vento foram suaves, enquanto que as variações das direções observadas foram repentinas.

Ao longo do período estudado algumas direções observadas são reproduzidas na simulação. Há também um certo desvio na reprodução de algumas direções de vento simuladas em relação às direções observadas.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0300Z-0700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0300Z-0700Z

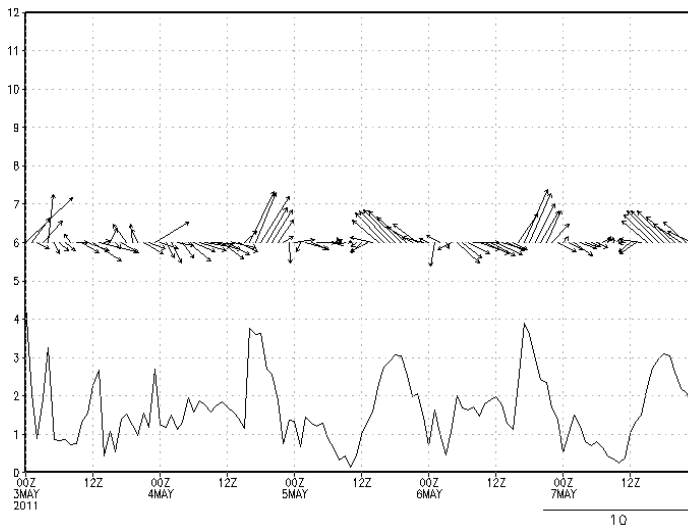
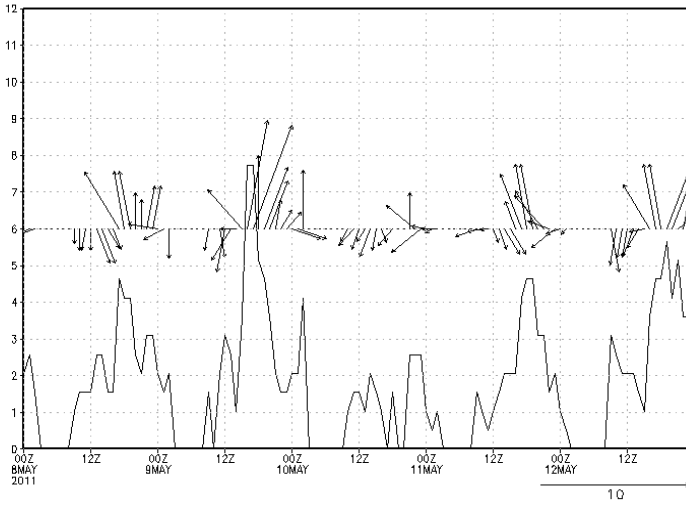


Figura 81: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0800Z-1200Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 0800Z-1200Z

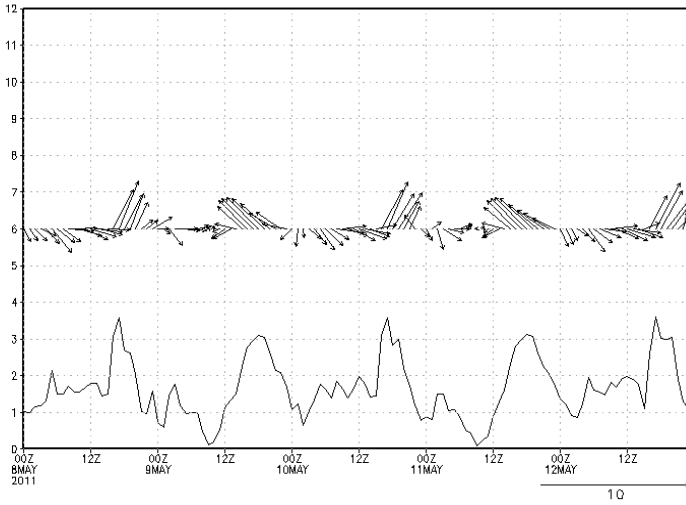
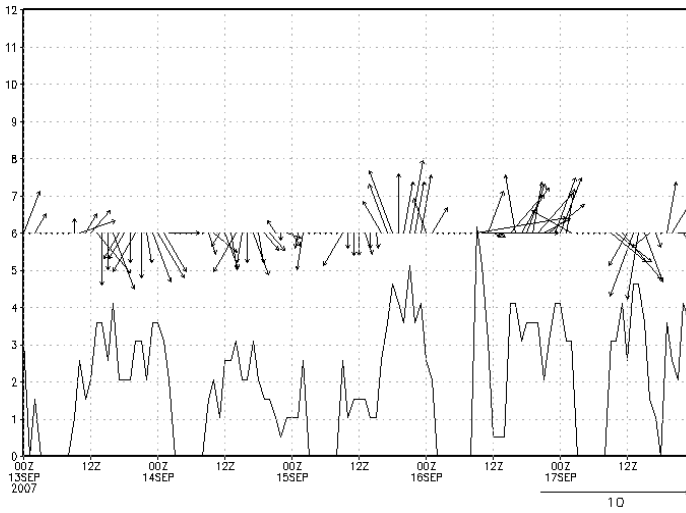


Figura 82: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1300Z-1700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1300Z-1700Z

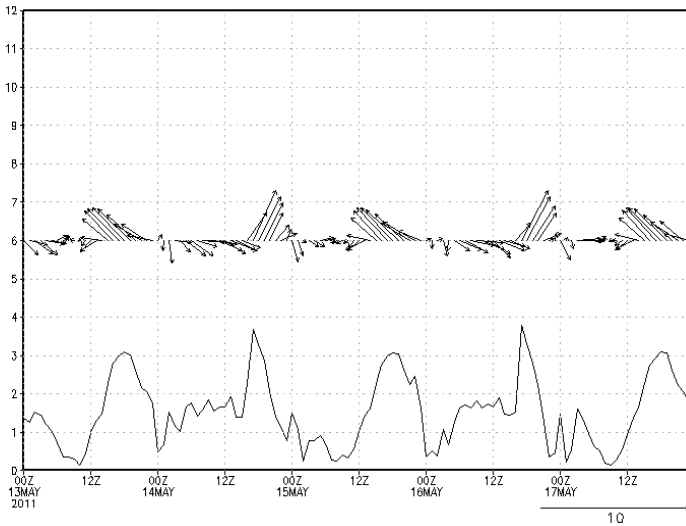
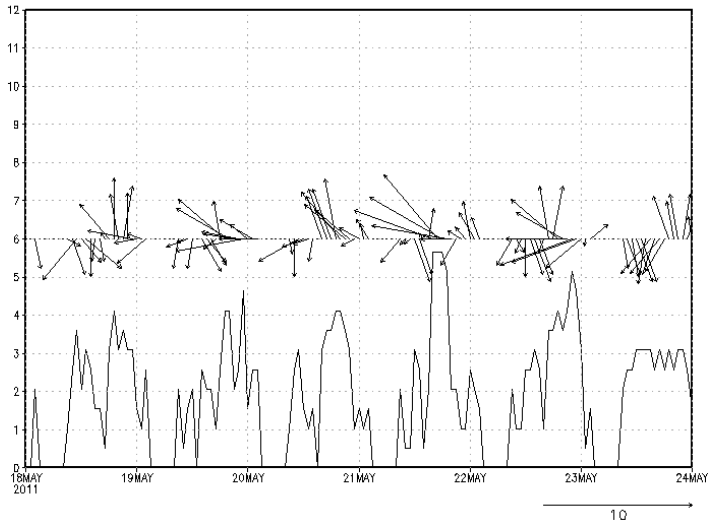


Figura 83: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1800Z-240Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
SBRJ 1800Z-2400Z

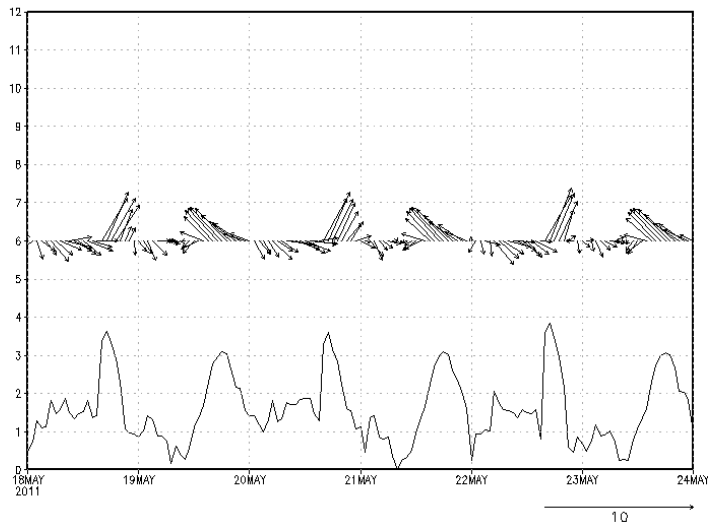
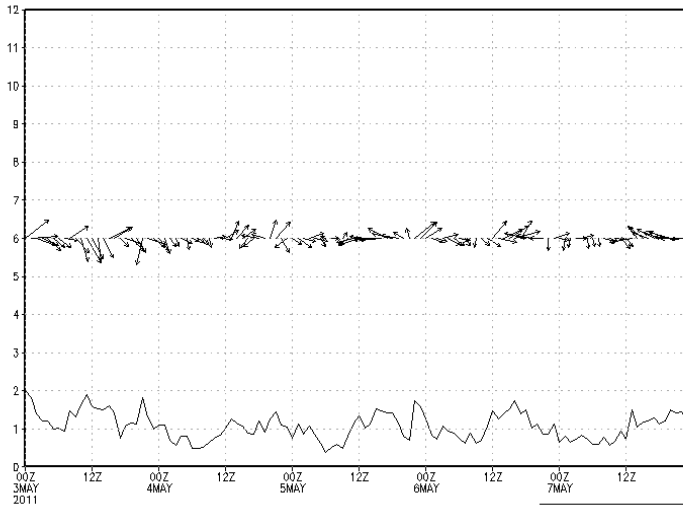


Figura 84: SBRJ (Santos Dumont). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Por fim, são apresentadas as Figura 85 a 58, que apresentam, na parte superior, os ventos observados e na parte inferior, os ventos simulados pelo MM5 para a localidade da estação de qualidade do ar de Jardim Primavera (PRF).

Os ventos simulados para esse ponto de grade assemelharam-se aos ventos simulados para o aeroporto do Galeão (SBGL), sendo pouco freqüentes as contribuições de direção de vento provenientes de nordeste. Ou seja, o MM5 não conseguiu reproduzir as direções de vento decorrentes das possíveis influências da topografia da região de Jardim Primavera.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 0300Z-0700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 0300Z-0700Z

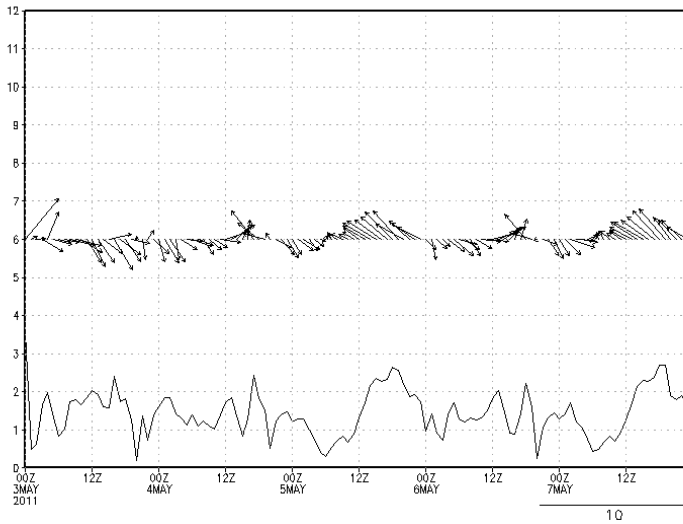
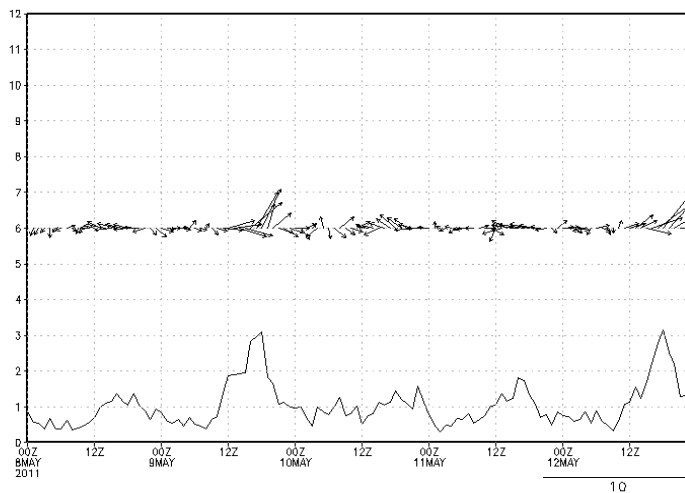


Figura 85: PRF (Jardim Primavera). Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 0800Z-1200Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 0800Z-1200Z

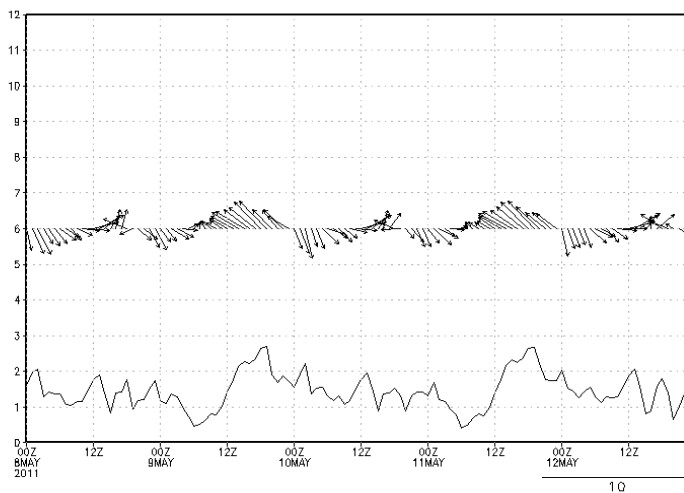
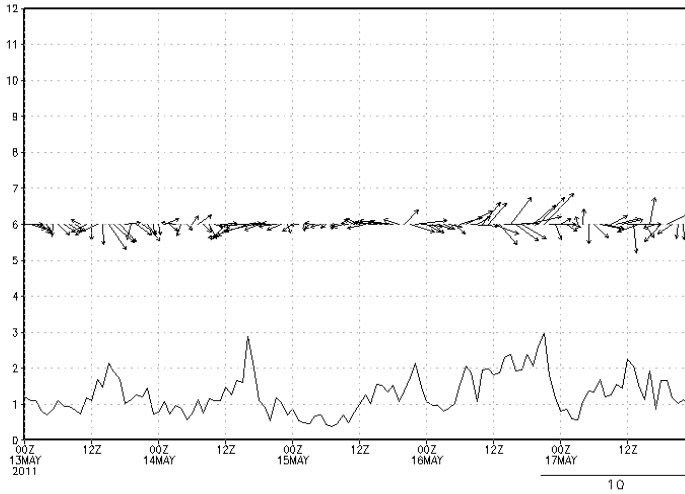


Figura 86: PRF (Jardim Primavera).Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 1300Z-1700Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 1300Z-1700Z

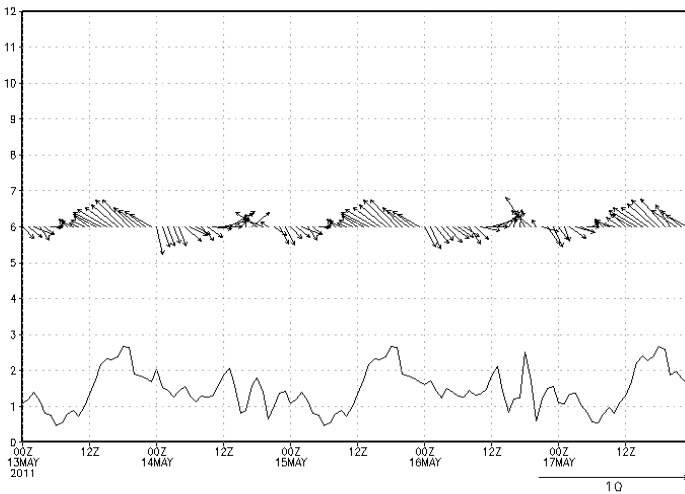
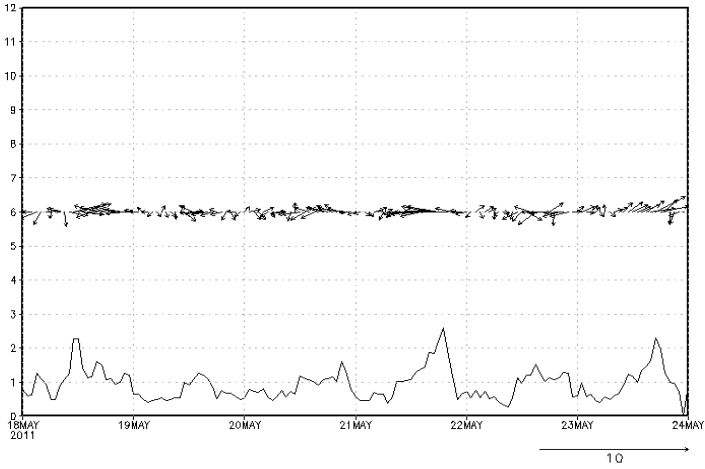


Figura 87: PRF (Jardim Primavera).Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.

Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 1800Z-2400Z



Direcao e Velocidade do Vento (m/s)
PRF 1800Z-2400Z

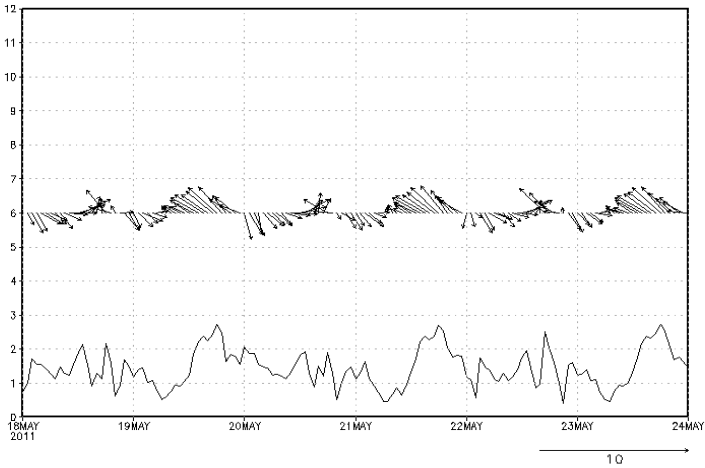


Figura 88: PRF (Jardim Primavera).Acima, ventos observados. Abaixo, ventos simulados.