



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES  
METEOROLÓGICAS SIMULADAS PELO MODELO  
BRAMS EM DIAS COM ALTAS CONCENTRAÇÕES  
DE MATERIAL PARTICULADO REGISTRADAS NA  
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Tailine Corrêa dos Santos**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2013**

**VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES  
METEOROLÓGICAS SIMULADAS PELO MODELO  
BRAMS EM DIAS COM ALTAS CONCENTRAÇÕES  
DE MATERIAL PARTICULADO REGISTRADAS NA  
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

---

por

**Tailine Corrêa dos Santos**

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientador: Prof(a). Dra. Vanessa Silveira Barreto  
Carvalho**

**Itajubá, MG, Brasil  
2013**

**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Monografia

**VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS SIMULADAS  
PELO MODELO BRAMS EM DIAS COM ALTAS CONCENTRAÇÕES  
DE MATERIAL PARTICULADO REGISTRADAS NA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

elaborada por

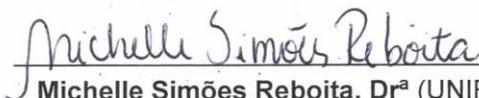
**Tailine Corrêa dos Santos**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

**Comissão Examinadora:**



**Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr<sup>a</sup> (UNIFEI)**  
(Presidente/Orientador)



**Michelle Simões Reboita, Dr<sup>a</sup> (UNIFEI)**



**Sâmia Regina Garcia Calheiros, Dr<sup>a</sup>. (UNIFEI)**

Itajubá, 14 de novembro de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que me capacitou sempre. À minha família que foi essencial para esta conquista, em especial a minha mãe que me apoiou em todas as minhas decisões e me motivou durante todo o curso. Ao meu namorado que foi muito importante principalmente nesse etapa final me apoiando e incentivando. À todos os professores que tive durante o curso de Ciências Atmosféricas, em especial aos professores específicos do curso, os quais tive mais contato e que com dedicação, competência e sempre muito acessíveis me passaram grande parte do meu conhecimento em ciências atmosféricas. Agradeço em particular também a minha orientadora Prof(a). Dra. Vanessa Silveira, a qual me ensinou muito, me orientando desde o primeiro ano, a quem tenho muito a agradecer pela paciência e pelo que me passou. Tendo também grande importância os meus colegas de classe, os quais fizeram do ambiente de sala de aula muito agradável e de grandes amizades, acredito que aprendemos a crescer juntos e fazer amizades que ficarão, por isso enfatizo minha amiga e companheira que me incentivou muito, a qual passamos muitas coisas juntas, boas e ruins, que nessa fase nova longe de casa pude contar com uma amiga que virou irmã, Camila Galli. Todos estes devo meus agradecimentos, porque de uma maneira diferente fizeram dessa experiência a melhor e tiveram uma grande importância nessa etapa da minha formação profissional.

Dedico a Deus que me proporcionou essa oportunidade e que me capacitou, também a minha família que foi essencial para esta conquista, especialmente a minha mãe, e a todos que conheci durante o curso que de certa forma tiveram uma contribuição na minha formação.

## **RESUMO**

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS SIMULADAS PELO MODELO BRAMS EM DIAS COM ALTAS CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO REGISTRADAS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

AUTOR(A): Tailine Corrêa dos Santos  
ORIENTADOR: Prof(a). Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 30 de novembro de 2013.

Durante o final da década de 60, quando se iniciou o monitoramento da qualidade do ar, foi possível observar que os principais problemas referentes à poluição atmosférica na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), devem-se a altas concentrações de material particulado, principalmente, material particulado inalável ( $PM_{10}$ ). Diversos estudos epidemiológicos comprovaram que as altas concentrações de  $PM_{10}$  provocam efeitos prejudiciais na saúde humana. É importante salientar que as condições atmosféricas influenciam diretamente na dispersão e transporte de poluentes. Neste contexto, o presente estudo visou relacionar a influência das condições meteorológicas em dias quando altas concentrações de  $PM_{10}$  são registradas. Assim foi possível verificar que as variáveis meteorológicas como temperatura, pressão, precipitação, umidade, intensidade e direção vento e altura da Camada Limite Planetária (CLP), estão diretamente relacionadas com dias quando altas concentrações de  $PM_{10}$  são registradas na RMRJ, resultados que confirmam a forte relação entre episódios de concentração e as condições atmosféricas na região. Também foram considerados e validados, por meio de análises estatísticas, os resultados obtidos através de cinco episódios de violação no Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) simuladas com o modelo de mesoescala BRAMS em dias pré-selecionados, que mostrou boa eficiência do modelo em simular condições atmosféricas relacionadas ao episódio. No geral, foi possível verificar que o modelo BRAMS prevê condições meteorológicas coerentes com as observações de forma que estas podem ser utilizadas futuramente para elaboração de previsões da qualidade do ar.

Palavras-chave: Material Particulado. Qualidade do Ar. BRAMS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição espacial das estações de monitoramento consideradas na RMRJ.....	11
Figura 2 - Domínio das grades simuladas: a) grade 1 com resolução de 16 km; e b) grade 2 com resolução espacial de 4 km.....	13
Figura 3 - Evolução da média Anual de Concentração de PM <sub>10</sub> na RMRJ.....	17
Figura 4 - Influência do ASAS sobre a região: (a) 27 de agosto de 1999, (b) 20 de setembro de 1999, (c) 05 de julho de 2001, (d) 11 de julho de 2001 e (e) 27 de julho de 2006. ....	19
Figura 5 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 21 de julho de 2006 às a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	22
Figura 6 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 21/07/2006 às 18Z..	23
Figura 7 - Altura da Camada Limite Planetária no dia 21/07/2006 .....	23
Figura 8 - Temperatura observada e modelada nos dias 20 e 21 de julho de 2006 ...	25
Figura 9 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 27 de julho de 2007 às: a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	26
Figura 10 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no 27 de julho de 2007 às 18Z.....	27
Figura 11 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, do dia 27 de julho de 2007 .....	27
Figura 12 - Temperatura observada e modelada nos dias 26 e 27 de julho de 2006 .	29
Figura 13 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006 às: a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	30
Figura 14 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006 às 18Z.....	31
Figura 15 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006).....	32
Figura 16 - Temperatura observada e modelada nos dias 08 e 09 de julho de 2006 .	34
Figura 17 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 21 de junho de 2006 às a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	35
Figura 18 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 21 de junho 2006 às 18Z.....	36

Figura 19 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 21 de junho de 2006.....	36
Figura 20 - Temperatura observada e modelada nos dias 20 e 21 de junho de 2006.....	38
Figura 21 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 17 de maio de 2007 às: a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	39
Figura 22 - Campos de temperatura e umidade, na RMRJ, no 17 de maio de 2007 às 18Z.....	40
Figura 23 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no 17 de maio de 2007.....	40
Figura 24 - Temperatura observada e modelada nos dias 16 e 17 de maio de 2007.....	42
Figura 25 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008 às: a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z.....	43
Figura 26 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008 às 18Z.....	44
Figura 27 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008.....	44
Figura 28 - Temperatura observada e modelada nos dias 16 e 17 de fevereiro de 2008.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90.....	4
Tabela 2: Qualidade do Ar e Prevenção de Riscos à Saúde .....	5
Tabela 3: Localização das estações dos Aeroportos da cidade do Rio de Janeiro...	12
Tabela 4: Alguns casos exemplificando as análises .....	19
Tabela 5: Dias selecionados para exemplificar as análises realizadas .....	20
Tabela 6: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (20-21 de julho de 2006) .....	24
Tabela 7: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (26-27 de julho de 2006) .....	28
Tabela 8: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (08-09 de julho de 2006) .....	33
Tabela 9: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (20-21 de junho de 2006) .....	37
Tabela 10: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (16-17 de maio de 2007) .....	41
Tabela 11: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (16-17 de fevereiro de 2008) .....	45
Tabela 12: Condições meteorológicas dos casos simulados no modelo Brams .....	48

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>X</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
3.1 POLUIÇÃO DO AR E EFEITOS NA SAÚDE.....	3
3.2 A METEOROLOGIA DA POLUIÇÃO.....	6
3.3 MODELAGEM.....	8
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
4.1 DADOS UTILIZADOS .....	11
4.2 SIMULAÇÕES .....	13
4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	14
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>16</b>
5.1 SELEÇÃO DOS EPISÓDIOS DE POLUIÇÃO DO AR .....	16
5.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS .....	21
5.2.1. CASO 1: 20 E 21 DE JULHO DE 2006 .....	21
5.2.2. CASO 2: 26 E 27 DE JULHO DE 2006 .....	25
5.2.3. CASO 3: 08 E 09 DE JULHO DE 2006 .....	29
5.2.4. CASO 4: 20 E 21 DE JUNHO DE 2006.....	34
5.2.5. CASO 5: 16 E 17 DE MAIO DE 2007 .....	38
5.2.6. CASO 6: 16 E 17 DE FEVEREIRO DE 2008.....	42
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é motivo de preocupação em muitos países, atualmente, principalmente em grandes centros urbanos onde os altos níveis de poluição são frequentemente observados.

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), altos índices de concentrações de material particulado inalável ( $PM_{10}$ ), com violações dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90, são registrados rotineiramente (WALDHEIM et al., 2004; CORREA et al., 2011). Em relação ao monitoramento da qualidade do ar por meio de estações de monitoramento contínuo, é importante ressaltar que o alto custo na implantação e operações destas atua como um fator complicador na expansão da rede já existente, gerando dificuldades em um diagnóstico preciso das reais condições da qualidade do ar em uma região (MOREIRA et al., 2008).

É importante destacar que as condições atmosféricas influenciam diretamente na dispersão e transporte de poluentes. Estudos recentes desenvolvidos por Waldheim et al. (2006) e Correa et al. (2012) revelaram que algumas variáveis meteorológicas como temperatura, pressão, precipitação, entre outras estão diretamente relacionadas com dias com altas concentrações de  $PM_{10}$  na RMRJ.

Nesse contexto, o presente trabalho estuda a relação e influencia das condições meteorológicas em dias quando altas concentrações de  $PM_{10}$  são registradas. Para isso, serão considerados dados observados, meteorológicos e de qualidade do ar além dos resultados obtidos por meio do modelo numérico de mesoescala. O enfoque principal do trabalho é a verificação das condições meteorológicas simuladas pelo modelo BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) na RMRJ em dias pré-selecionados, objetivando a utilização futura deste modelo na elaboração de previsões da qualidade do ar.

Com a realização deste trabalho espera-se avaliar a eficiência do modelo BRAMS no que se refere a simulações das condições meteorológicas que influenciam a dispersão de poluentes na RMRJ. Essa análise pode servir como subsídio para o desenvolvimento e a implantação do modelo de forma mais confiável na utilização de sistemas de alerta e previsão da qualidade do ar na região.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar se o modelo de mesoescala BRAMS é capaz de representar as condições meteorológicas predominantes em dias quando altas concentrações de  $PM_{10}$  são registradas na RMRJ.

São objetivos específicos deste trabalho:

- (a) Selecionar episódios quando foram registradas violações ao Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) de 24 horas em vigência no Brasil;
- (b) Avaliar condições meteorológicas de grande escala registradas nos episódios de interesse;
- (c) Realizar simulações com o modelo BRAMS e avaliar os resultados comparando com observações locais;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Poluição do Ar e efeitos na saúde

A atmosfera é composta por diversos gases e partículas. Contudo, uma variação considerável na concentração de alguma destas ou a presença de substâncias não encontradas naturalmente nesta caracteriza um problema de poluição do ar. As fontes dessas substâncias podem ser tanto naturais como antropogênicas e podem afetar a saúde provocando doenças. Também vale ressaltar que as condições atmosféricas exercem forte influência sobre a sociedade e sobre as condições de saúde, sendo as doenças do ser humano uma das manifestações dessa interação (SOARES et al., 2012).

Estudos revelam que gases e partículas ultrafinas provenientes da queima parcial de combustíveis fósseis em veículos automotivos, principalmente o diesel, são os fatores responsáveis pela maior prevalência de asma brônquica e outras doenças alérgicas em populações residentes em áreas mais poluídas (PANDYA et al., 2002).

A disseminação do uso do computador, particularmente a partir da década de 80, permitindo a aplicação de técnicas estatísticas mais sofisticadas, e contribuiu para a realização de estudos da relação entre poluição do ar e saúde em diversos centros urbanos do mundo. Esses estudos vêm mostrando que mesmo em baixas concentrações os poluentes atmosféricos estão associados com efeitos na saúde (SCHWARTZ et al., 1992; SCHWARTZ et al., 2004).

A relação entre danos à saúde e poluição atmosférica foi estabelecida a partir de episódios agudos de contaminação do ar. No início do século XX ocorreram três episódios de elevações abruptas da concentração de poluentes do ar ocasionando aumentos da mortalidade. São bastante conhecidos na literatura o excesso de mortes ocorridos em Londres nos anos de 1948 e 1952 (LOGAN et al., 1949; LOGAN et al., 1953) onde foram descritos incrementos de aproximadamente 300 e 4.000 mortes, respectivamente. Outros desastres decorrentes da poluição do ar ocorreram anteriormente no Vale de Meuse, Bélgica (FIRKET et al., 1931) e Donora nos Estados Unidos (BASCON et al., 1996). Esses episódios estimularam a

realização de diversos estudos epidemiológicos e experimentais, que identificaram os principais poluentes e suas repercussões sobre a saúde, tendo como objetivo a redução significativa dos níveis de contaminantes atmosféricos. Baseados nos achados decorrentes, vários países estabeleceram padrões de qualidade, ou seja, os limites máximos tolerados, a partir dos quais, a população exposta sofreria danos à saúde (CANÇADO et al., 2006).

A maioria dos estudos sobre os efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde foi conduzida nos países mais desenvolvidos, localizados no hemisfério norte. Em geral, esses países apresentam características meteorológicas, composição físico-química dos poluentes e perfis socioeconômicos bastante distintos das demais regiões do planeta, impedindo, assim, a extrapolação dos resultados para outros locais (MOURA et al., 2008).

Em termos legais, a fim de garantir a saúde e o bem estar da população, há uma concentração limite máxima para cada poluente, que não deve ser superada. Essa concentração é estipulada pelos padrões da qualidade do ar. Este é definido pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 2000) como “o nível de um poluente atmosférico, como a concentração ou índice de deposição, que é adotado pelas autoridades regulatórias como leis”. Os padrões de qualidade do ar no Brasil foram estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90 (Tabela 1).

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário	Padrão Secundário
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 Horas <sup>1</sup>	240 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>
	MGA <sup>2</sup>	80 µg/m <sup>3</sup>	60 µg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	24 Horas <sup>1</sup>	365 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>
	MAA <sup>3</sup>	80 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono (CO)	1 Hora <sup>1</sup>	35 ppm	35 ppm
	8 Horas <sup>1</sup>	9 ppm	9 ppm
Ozônio (O <sub>3</sub> )	1 Hora <sup>1</sup>	160 µg/m <sup>3</sup>	160 µg/m <sup>3</sup>
Fumaça	MAA <sup>3</sup>	60 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>
Partículas Inaláveis (PM10)	24 Horas <sup>1</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>
	MAA <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	1 Hora <sup>1</sup>	320 µg/m <sup>3</sup>	190 µg/m <sup>3</sup>
	MAA <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>

Fonte: Cavalcanti (2003).

Observações: <sup>1</sup>Esse padrões não devem ser violados mais de uma vez por ano.

<sup>2</sup>MGA – Média Geométrica Anual

### <sup>3</sup>MAA – Média Aritmética Anual

Com o aumento das emissões atmosféricas, principalmente a partir da queima de combustíveis fósseis, agravado pelo processo de urbanização, passou-se a associar qualidade de vida à qualidade do ar (WALDHEIM et al., 2006). Na Tabela 2 estão dispostos os índices para cinco poluentes, explicando os cuidados e as mudanças que devem ser feitas para cada nível de exposição a estes poluentes, visando uma melhor qualidade de vida.

Tabela 2: Qualidade do Ar e Prevenção de Riscos à Saúde

Qualidade	Índice	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
<b>Boa</b>	0-50	0-50	0-80	0-4,5	0-100	0-80
<b>Regular</b>	51-100	>50-150	>80-160	>4,5-9	>100-320	>80-365
<b>Inadequada</b>	101-150	>150 e ≤200 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>160 e ≤180 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>9 e ≤12 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem reduzir esforço físico pesado ao ar livre e evitar vias de tráfego intenso	>320 e ≤720 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>365 e ≤576 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças
	151-199	>200 e <250 Evitar esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>180 e <200 Evitar esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>12 e <15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar esforço físico e vias de tráfego intenso	>720 e <1130 Evitar esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	>576 e <800 Evitar esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças
<b>Má</b>	200-250	≥250 e ≤350 Evitar qualquer esforço físico ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	≥200 e ≤400 Evitar qualquer esforço físico ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	≥15 e ≤22 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre e vias de tráfego intenso	≥1130 e ≤1690 Evitar qualquer esforço físico ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças	≥800 e ≤1200 Evitar qualquer esforço físico ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças
	251-299	>350 e <420 Evitar sair ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou respiratórias, idosos e crianças	>400 e <800 Evitar sair ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou respiratórias, idosos e crianças	>22 e <30 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre e vias de tráfego intenso	>1690 e <2260 Evitar sair ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou respiratórias, idosos e crianças	>1200 e <1600 Evitar sair ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou respiratórias, idosos e crianças
<b>Péssima</b>	≥300	≥420 Todas as pessoas devem evitar qualquer atividade ao ar livre	≥800 Todas as pessoas devem evitar qualquer atividade ao ar livre	≥30 Todas as pessoas devem evitar qualquer atividade ao ar livre	≥2260 Todas as pessoas devem evitar qualquer atividade ao ar livre	≥1600 Todas as pessoas devem evitar qualquer atividade ao ar livre

Fonte: CETESB (2007).

Durante um longo período de monitoramento da qualidade do ar, foi possível observar que os principais problemas referentes à qualidade do ar estão relacionados com altas concentrações de material particulado. Este é formado por partículas líquidas e sólidas encontradas em suspensão na atmosfera. Estas partículas também podem ser classificadas de acordo com seu tamanho aerodinâmico como partículas grandes (com diâmetro superior a 15 µm), partículas

inaláveis (com diâmetro menor que 10  $\mu\text{m}$ ) e partículas finas (com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ ). Segundo Seinfeld et al. (1986), o material particulado pode formar partículas cada vez maiores através de colisões com outras partículas, pode reagir quimicamente e ainda servir como núcleo de condensação. O crescimento das partículas facilita a sedimentação destas.

De acordo com Braga et al. (2002) o material particulado inalável apresenta uma característica importante que é a de transportar gases adsorvidos em sua superfície até as porções mais distais das vias aéreas, onde ocorrem as trocas de gases no pulmão. Convém ressaltar que diversos estudos epidemiológicos comprovaram que as altas concentrações de material particulado provocam efeitos prejudiciais na saúde humana no Brasil (PENNA & DUCHIADE et al., 1991; SALDIVA et al., 1994; BRAGA et al., 2002; GOUVEIA et al., 2003). Estudos epidemiológicos concluem que, mesmo em concentrações abaixo do padrão de qualidade do ar, os poluentes atmosféricos acarretam afecções no tracto respiratório como asma e bronquite, principalmente, no que se refere às populações mais vulneráveis como crianças e idosos (BRAGA et al., 2002).

O Rio de Janeiro é a segunda cidade brasileira com maior número de habitantes. Pouco se sabe sobre a influência dos poluentes do ar nos problemas respiratórios da população (MOURA et al., 2008). O monitoramento da qualidade do ar teve início no final dos anos 60 através da Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA). Em quase quatro décadas de monitoramento, observou-se que a ocorrência de altas concentrações de material particulado está entre os principais problemas referentes à qualidade do ar na região (WALDHEIM et al., 2006).

### **3.2 A meteorologia da poluição**

As condições atmosféricas atuam como fatores dominantes para a determinação da qualidade do ar. Essas são responsáveis pelo transporte, transformação e dispersão dos poluentes emitidos, assim como também pelos possíveis ocorrências de situações críticas de poluição do ar. A meteorologia e topografia atuam simultaneamente na dispersão de poluentes atmosféricos em determinada região, aumentando ou reduzindo seus níveis, já que o poluente emitido na atmosfera sofre influência de variáveis atmosféricas, como a velocidade e

direção dos ventos, taxa de precipitação, temperatura, instabilidade do ar, entre outras (LYRA et al., 2006; GUERRA et al., 2011).

As características locais, como topografia, existência ou não de edifícios, o tipo de solo e espécie de vegetação, possuem capacidade de mudar o micro-clima de determinada região tornando esta mais ou menos favorável a dispersão dos poluentes (GUERRA et al., 2011).

Alguns anos após, um episódio semelhante ao que ocorreu durante os últimos cinco dias do mês de outubro de 1948 na cidade de Donora, Pensilvânia. Os produtos da combustão das indústrias locais permaneceram sobre a cidade devido à ocorrência de inversões térmicas que impediram a dispersão destes poluentes. Inversão térmica é um fenômeno meteorológico onde ocorre a presença de uma camada de ar quente alguns metros acima da superfície que impede a dispersão e a movimentação de massas de ar mais frio localizadas próximas do solo. Essa camada mais fria age como se fosse a tampa de uma panela concentrando vapor no seu interior. Durante este período foram observadas 20 mortes ao invés das duas mortes esperadas normalmente em uma comunidade de 14.000 pessoas (BRAGA et al., 2002).

Na literatura há diversos estudos que relacionam a meteorologia com os níveis de concentrações de poluentes presentes na atmosfera, dos quais se pode citar alguns exemplos, como Toyoshima et al. (2005), que encontrou um padrão sazonal para as internações por asma e pneumonia, sendo maior nos meses relacionados ao outono ou inverno. Também correlacionando as variáveis meteorológicas, Carvalho et al. (2004) verificou que maiores concentrações de ozônio são observadas, geralmente, em dias com temperaturas altas e com baixa umidade relativa do ar. Lyra et al. (2006) destacou que a variação das características físicas da atmosfera influenciou significativamente entre os pontos de interesse na Região Metropolitana de Salvador, confirmou que a elevação da temperatura, o aumento da velocidade do vento, a diminuição da classe de estabilidade e a elevação da altura da camada de mistura influenciaram diminuição da concentração dos poluentes tanto de SO<sub>2</sub> como CO.

Guerra et al. (2011) analisando o PM<sub>2,5</sub> concluiu que as variáveis meteorológicas que tem relacionamento direto com a concentração dos poluentes de forma geral são a velocidade do vento e a precipitação. Ele também determinou que outros fatores climatológicos que devem ser estudados para aprofundar o estudo da

relação poluente-climatologia são: a temperatura e a temperatura do ponto de orvalho, a pressão, a umidade relativa, entre outros.

Na RMRJ, a topografia acidentada, a ocupação do solo, a presença de corpos hídricos e a capacidade de dispersão atmosférica atuam como complicadores no que se refere aos problemas associados à qualidade do ar. Também é importante destacar que, principalmente, no período entre os meses de maio e setembro, em função da atuação de sistemas de alta pressão, verificam-se freqüentes condições de estagnação atmosférica e são registrados elevados índices de poluição (CARVALHO et al., 2004).

Correa et al. (2012) em estudos para avaliar a influência das condições meteorológicas na RMRJ no que tange a ocorrência de altas concentrações de material particulado, bem como identificar a associação da capacidade de dispersão com diversas condições meteorológicas que podem estar associadas a este tipo de episódio, constatou relações diretas das condições meteorológicas com dias com altas concentrações de  $PM_{10}$ .

No inverno há maior ocorrência de violações no padrão de qualidade do ar e conseqüentemente os maiores índices de doenças respiratórias. Nesse período estão presentes as condições mais desfavoráveis à dispersão de poluentes, como umidade e temperatura baixas, que desfavorecem a remoção de poluentes por via úmida, também como a presença de inversão térmica e atuação da Alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS), fenômeno caracterizado por ventos fracos e subsidência de ar, condições totalmente desfavoráveis à dispersão dos poluentes (CORREA et al., 2012).

Também de acordo com Waldheim et al. (2006), em estudos para relacionar os dias nos quais as máximas concentrações de  $PM_{10}$  foram registradas com as condições meteorológicas dominantes na RMRJ, foi possível observar que a maior parte destes episódios foi influenciada por fatores meteorológicos. O conhecimento desses fatores que mais influenciam pode auxiliar no estabelecimento de medidas de controle da poluição do ar.

### **3.3 Modelagem**

O controle da poluição atmosférica em escala local ou regional é realizado, usualmente, através de rede de monitoramento da qualidade do ar. Esta rede

constitui um instrumento útil para a segurança da saúde humana e do ambiente, e permite analisar o benefício de ações de saneamento e predispor intervenções específicas no caso de acontecer superação dos níveis do limiar estabelecido pela legislação (MOREIRA & TIRABASSI et al., 2004).

De acordo com Moreira et al. (2008), o número de pontos de medida de uma rede é limitado e, acima de tudo, a disposição espacial delas pode não ter sido estudada cuidadosamente, podendo estar posicionada em um local pouco representativo. Por este motivo, os modelos matemáticos constituem uma ferramenta importante para auxiliar as medidas.

Segundo Moreira et al. (2008) os modelos meteorológicos podem ser utilizados sozinhos, para validar as condições meteorológicas passadas ou futuras, ou como pré-processadores de modelos de dispersão.

De acordo Degrazia et al. (2007), o Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem implantando um sistema operacional de previsão da qualidade do ar para o Vale do Paraíba. O sistema é um conjunto de plataformas de softwares integradas, baseado num modelo meteorológico de meso-escala BRAMS associado a um modelo de dispersão de poluente.

O modelo atmosférico BRAMS é a versão brasileira do Regional Atmospheric Modeling System (RAMS, COTTON et al., 2003), desenvolvido inicialmente pela Universidade do Estado do Colorado – EUA e pela MRC/\*ASTER (PIELKE et al. 2002, WALKON; TREMBACK, 2005) foi construído com base em equações dinâmicas e complementados com parametrização para simular circulações atmosféricas que envolvem da micro a mesoescala, sendo a modelagem dos fenômenos de mesoescala sua mais frequente aplicação. Tais simulações têm como finalidade fornecer informações para a previsão de tempo operacional, podendo ser utilizadas para o controle da poluição do ar e como suporte à pesquisa. Uma das vantagens de utilização do modelo é a possibilidade de modificação do código de acordo com a necessidade do usuário, por exemplo, incluindo novas fontes de emissão de poluentes ou de propriedades da estrutura urbana das regiões de interesse deste projeto (FREITAS et al., 2011; CARVALHO et al., 2012).

O modelo em questão consiste em um conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido que incluem parametrizações dos diversos

processos físicos presentes nestas equações como, por exemplo, para os processos turbulentos, radiativos e convectivos (SOUZA et al., 1999).

Representar fisicamente os processos radiativos, transportes convectivos associados às nuvens e à turbulência seca, adequando-se também para a avaliação dos efeitos de fatores locais, tais como a topografia, a presença de corpos d'água de grandes dimensões e áreas urbanas (FREITAS et al., 2008).

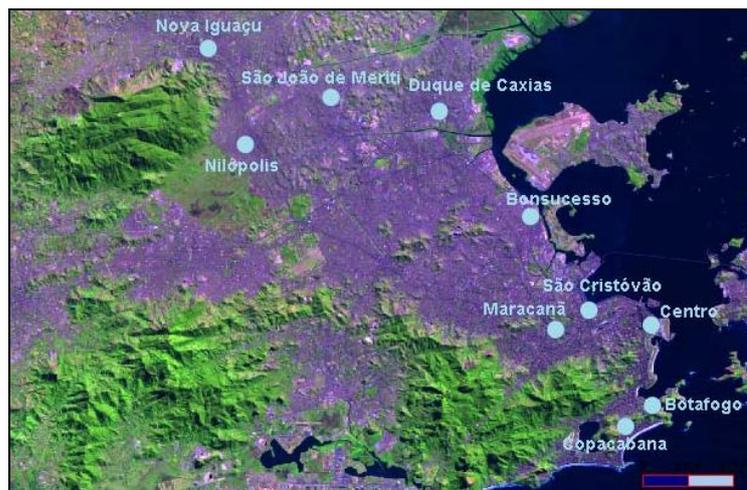
Não há na literatura ainda estudos que fizeram a verificação das condições meteorológicas simuladas pelo modelo Brams relacionadas a dias com altas concentrações de  $PM_{10}$ .

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia aplicada para o desenvolvimento deste estudo foi estruturada em 3 etapas. Na primeira etapa foram analisadas as concentrações de  $PM_{10}$  registradas na RMRJ. A segunda etapa, consistiu na realização das simulações com o modelo BRAMS para dias pré selecionados durante a primeira etapa. E, por fim, para análise da eficiência do modelo em simular as condições meteorológicas locais foram feitas comparações com dados observados.

### 4.1 Dados Utilizados

Em relação aos dados de concentração de material particulado na RMRJ, foram considerados dados de 14 estações de qualidade do ar localizadas nos seguintes pontos (Figura 1): Nilópolis, Sumaré, Bonsucesso, Botafogo, Centro, Copacabana, Duque de Caxias, Jacarepaguá, Maracanã, Niterói, Nova Iguaçu, São Cristóvão, São Gonçalo e São João de Meriti. Estas estações realizam o monitoramento das concentrações de  $PM_{10}$  registradas a cada seis dias na RMRJ desde 1998, quando a rede manual entrou em operação, até 2008.



Fonte: Waldheim et al. (2006).

Figura 1 - Distribuição espacial das estações de monitoramento consideradas na RMRJ.

A seleção dos dias a serem analisados foi feita a partir da comparação dos dados de concentração de  $PM_{10}$  com os PNQA de 24 horas, que tem como limite o valor de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90.

Para os dias quando violações ao PNQA foram registradas, foi feito um levantamento de informações meteorológicas como dados de sondagem, dados obtidos com o projeto reanálise e dados de precipitação. Dados meteorológicos provenientes de estações automáticas alocadas na região também foram utilizados para a avaliação da influência de condições meteorológicas locais na dispersão de poluentes na região. Estes dados também foram utilizados para a verificação dos resultados gerados pelo modelo. Somente temperatura foi escolhido, para uma análise estatística, comparando dados simulados com os observados, devido à escassez, para o período de estudo, de dados observados de outras variáveis. Estes estavam disponíveis no site da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica - REDEMET, sendo de estações dos Aeroportos da cidade do Rio de Janeiro, listadas na tabela 3.

Tabela 3: Localização das estações dos Aeroportos da cidade do Rio de Janeiro

Aeroportos:	Localização:
Santos Dumont	22.54°S e 43.90°N
Antônio Carlos Jobim – Galeão	22.49°S e 43.14 °N
Bartolomeu de Gusmão – Santa Cruz	22.55°S e 43.43 °N
Campos dos Afonsos	22.52°S e 43.23 °N

Também foram utilizados dados de cinco estações pluviométricas locais para o estudo de precipitação: Copacabana, Ilha do Governador, Jacarepaguá/Tanque, São Cristovão e Tijuca.

As informações referentes à ocorrência de inversões térmicas nos primeiros 1000 metros da atmosfera foram obtidas por meio das radiossondagens realizadas no Aeroporto Internacional Tom Jobim. Inversão térmica são altamente desfavoráveis à dispersão dos poluentes atmosféricos uma vez que estes poluentes tendem a ficar aprisionados abaixo desta camada. Dessa forma, foram estabelecidas relações entre altas concentrações de  $PM_{10}$  e a meteorologia local. Os dados da rede manual foram avaliados previamente e seus resultados são descritos em Correa et al. (2012).

O software GRADS foi utilizado para a visualização dos dados obtidos com o projeto reanálise, assim como para a avaliação dos resultados obtidos com o modelo.

## 4.2 Simulações

Neste estudo foram realizadas simulações com o modelo BRAMS para dias pré-selecionados durante a análise dos dados de concentração de  $PM_{10}$ , selecionado por apresentar violações nos níveis de  $PM_{10}$  e condições atmosféricas mais favoráveis a altas concentrações deste poluente na atmosfera. Tais simulações tiveram como propósito verificar como as condições meteorológicas atuam no processo de dispersão e quais as situações são desfavoráveis à dispersão destes poluentes.

Os dados utilizados para a inicialização das simulações foram obtidos através National Climatic Data Center do National Oceanic and Atmospheric Administration (NCDC/NOAA) sendo estes Dados de Global Forecast System (GFS). Foram consideradas duas grades com resolução de 16 km e 4 km, respectivamente, centradas em 22.5°S e 40°W na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. O domínio considerado em cada uma das grades pode ser observado na Figura 2.

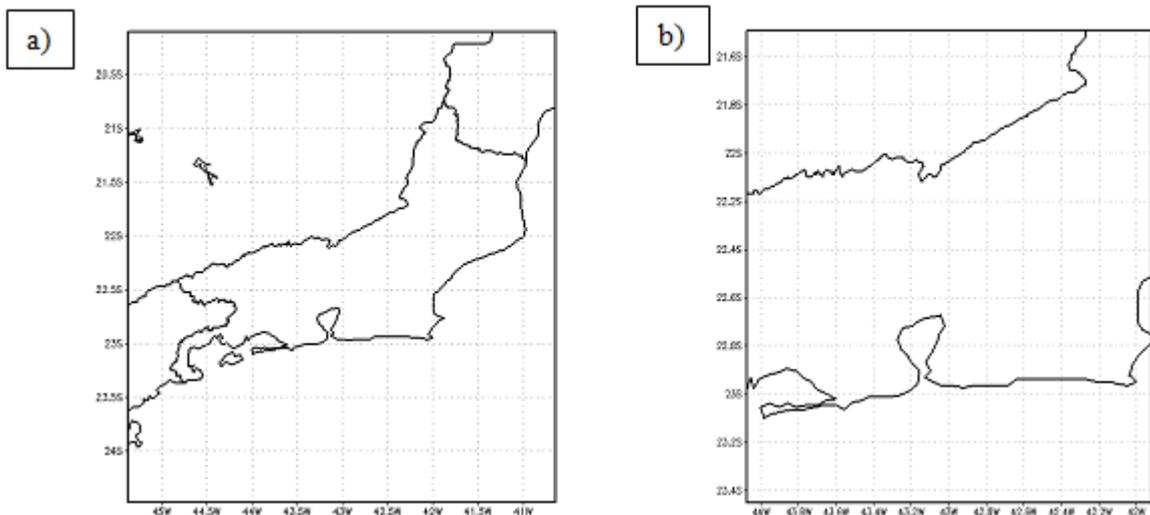


Figura 2 - Domínio das grades simuladas: a) grade 1 com resolução de 16 km; e b) grade 2 com resolução espacial de 4 km.

### 4.3 Validação dos resultados

A validação dos resultados obtidos através do modelo BRAMS foi efetuada por meio de comparações entre estes e os dados observados das condições atmosféricas de estações meteorológicas na região.

Para a validação do modelo, métodos estatísticos descritos por Mazzoli et al. (2008) foram utilizados. Assim os seguintes métodos estatísticos foram aplicados: desvio padrão (s), erro médio (ME), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE), o  $RMSE_{UB}$ , a correlação de Pearson (R) e o índice de concordância (d).

$$(1) \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

$$(2) \quad ME = \frac{1}{n} \sum (x - o)$$

$$(3) \quad MSE = \frac{1}{n} \sum (x - o)^2$$

$$(4) \quad RMSE = \sqrt{MSE}$$

$$(5) \quad RMSE_{UB} = \frac{1}{n} \sum \{[x - \bar{x}] - [o - \bar{o}]\}^2^{1/2}$$

$$(6) \quad R = \frac{\sum [(x - \bar{x})(o - \bar{o})]}{\{\sum [(x - \bar{x})]^2\}^{1/2} \{\sum [(o - \bar{o})]^2\}^{1/2}}$$

$$(7) \quad d = 1 - \frac{\sum (x - o)^2}{\sum (|x - \bar{o}| + |o - \bar{o}|)^2}$$

O desvio Padrão (s) define-se como raiz quadrada da variância, e analisa a variabilidade dos valores. O erro médio (ME) representa o desvio da simulação, pois é a diferença entre a média das simulações e a média das observações. Se a simulação for em média maior que a observação o valor do ME é maior que zero, caso contrário o ME é inferior à zero. O erro médio quadrático (MSE) é a soma das diferenças entre o valor estimado e o valor real dos dados, ponderados pelo número de termos. Já raiz do erro médio quadrático (RMSE) tem o objetivo de mostrar a dimensão do erro de uma determinada estimativa. E  $RMSE_{ub}$  representa a raiz do

erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio. O índice de correlação linear de Pearson (R) (WILKS et al., 1995) é dada pela razão entre a covariância existente entre duas variáveis e o produto de seus desvios padrão. Altas correlações indicam que as series variam simultaneamente. O índice de concordância (d) que indica uma melhor concordância à medida que seus valores estão mais próximos de 1.

Também foi utilizada uma nova metodologia que segundo Pielke et al. (2002) é recomendável para a definir a qualidade de uma simulação de acordo com os critérios a seguir:

$$\begin{aligned} s(x) &\approx s(o); \\ \text{RMSE} &< s(o); \\ \text{RMSE}_{\text{UB}} &< s(o); \end{aligned}$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Seleção dos Episódios de Poluição do Ar

Em uma primeira análise dos dados, foram selecionados onze dias quando valores superiores ao PNQA de 24 horas, de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  foram verificados em 5 ou mais estações de monitoramento simultaneamente na RMRJ. A maior parte destes dias, oito no total, ocorreu durante os anos de 1998 e 1999. Esse comportamento condiz com o verificado através das médias anuais de concentração de  $\text{PM}_{10}$  que revela uma tendência de diminuição das concentrações ao longo dos anos conforme pode ser observado na Figura 3. Essa diminuição provavelmente é resultado de ações do Programa de Controle de Emissões Veiculares, o PROCONVE.

Vale destacar também que todos os dias selecionados ocorreram sempre entre os meses maio e setembro quando o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se mais próximo do continente influenciando a região SE do Brasil. Em geral, o sistema é caracterizado por ventos fracos, subsidência do ar e céu claro, condições desfavoráveis a dispersão de poluentes. Analisando os dados obtidos através do NCEP/NCAR a influência desse sistema sobre a região foi verificada em todos os dias considerados. Também foram constatados durante estes dias, valores baixos de temperaturas e a ausência de precipitação. Na maioria dos casos também não foi registrada ocorrência de precipitação em quatro ou mais dias antes do dia em questão o que desfavorecia a remoção dos poluentes por via úmida. Os dados obtidos por meio de radiossondagens revelaram, para a maior parte dos dias, a ocorrência de inversão térmica abaixo de 500 m, o que desfavorece ainda mais a dispersão dos poluentes. Esses resultados confirmam a forte relação entre episódios de concentração e as condições atmosféricas na região.

Posterior a essa análise, foi realizado uma análise final dos dados, nesta foram verificados 146 dias em que, no mínimo, uma estação de monitoramento na RMRJ apresentou valores superiores ao PNQA de 24 horas, de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como verificado também na análise inicial, a maior parte destes dias, cerca de 78, está concentrada nos primeiros anos analisados, 1998 a 2000, decaindo ao longo dos anos.

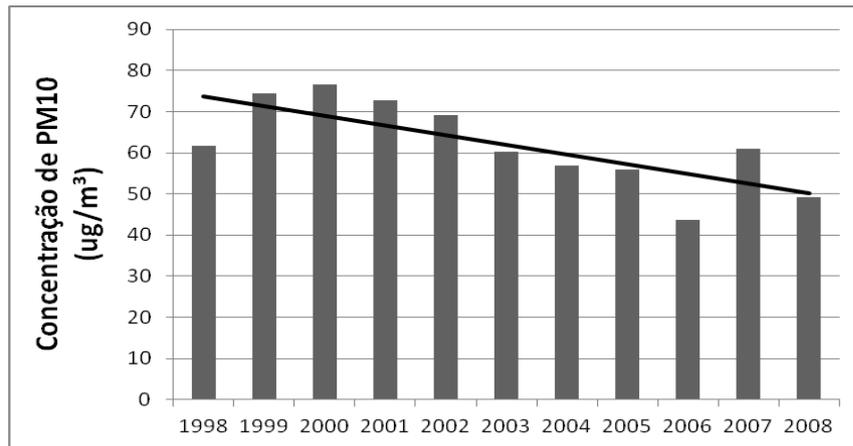


Figura 3 – Evolução da média Anual de Concentração de PM<sub>10</sub> na RMRJ.

Foram realizadas as mesmas análises da etapa anterior, agora abrangendo um maior número de casos. Analisando os dias selecionados, foi possível verificar em 87% dos 146 dias a influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre a região. Vale ressaltar que a maior parte destes dias ocorreu entre os meses maio e setembro, um percentual de aproximado de 60%, quando o ASAS encontra-se mais próximo do continente influenciando a região SE do Brasil. Como relatado anteriormente, o sistema apresenta condições desfavoráveis a dispersão de poluentes, caracterizado por ventos fracos, subsidência do ar e condições de céu claro. Mesmo em dias não correspondentes ao período de maior influência do ASAS, a partir dos dados do NCEP/NCAR, foi possível observar a influência de um sistema de alta pressão, mesmo que com menor intensidade. Nos 18 dias em que não houve a influência do ASAS, 13 foram registrados fora do período entre maio e setembro, que correspondem a maior influência do ASAS, ou seja, dos dias em que não apresentaram a influência da ASAS, 72% ocorreram fora do período, apenas 28%, ou seja, cinco casos, em que não tiveram a influência do ASAS ocorreram dentro do período. De acordo com o boletim da climanálise (CPTEC) dos 18 dias sem influência do ASAS, 14 são dias pré frontais e 3 são pós frontais, ou seja, dia anterior a entrada de frente e posterior, respectivamente.

Também foi constatada em aproximadamente 95% dos dias analisados a ausência de precipitação. Em 67% dos casos não foi registrada ocorrência de precipitação em três ou mais dias antes do dia em questão o que desfavoreceu a remoção de poluentes por via úmida. E em apenas 7 dias, ou seja 5%, apresentaram chuva no dia em questão.

Os dados obtidos por meio de radiossondagens revelaram que apenas 18 dias não apresentaram inversão térmica abaixo de 1000 m, sendo importante destacar que em aproximadamente 62% dos dias analisados, foi registrada a ocorrência de inversão térmica abaixo de 300 m, o que desfavorece ainda mais a dispersão dos poluentes.

Como exemplo dos casos estudados vale destacar dias como 27 de agosto e 08 de setembro do ano de 1999 (Tabela 4), com 9 dados 5 apresentando violações e em 10, 8 foram de violações, respectivamente. Nesses dois casos, registrados em meses seguintes, houve um registro de um período de 10 e 24 dias anteriores, respectivamente, sem ocorrência de precipitação. No primeiro dia, dia 27 de agosto, em que o período de seca é menor, 10 dias sem ocorrência de precipitação, a temperatura registrada foi menor, 22° C, e a noite teve máximo de 10° C de temperatura em comparação com o segundo dia, dia 08 de setembro do mesmo ano, em que as temperaturas foram mais elevadas, registrando 30° C. A inversão térmica no primeiro dia também foi maior, com um aumento de 6°, do que no segundo dia, com um aumento de 4° na baixa troposfera, abaixo de 300 metros. Também é possível observar nas Figuras 4a e 4b, a partir dos dados de pressão, em milibar, extraídos da Reanálise, que a influência da ASAS é maior no primeiro caso.

Também vale destacar dias como 05 e 11 de julho de 2001 (Tabela 4), no mesmo mês, com 12 dados disponíveis nos dois e nesses com registros de violações de 6 e 4, respectivamente. Esses casos apresentaram características bem semelhantes, inversões térmicas, por exemplo, com aumento de aproximadamente 6°, na troposfera, nos dois casos, temperaturas abaixo de 24° Celsius no dia 05, com períodos de ausência de precipitação de quase o dobro do primeiro para o segundo dia, 7 e 13 dias anteriores sem chuva, respectivamente, e como pode ser visto na figura 4.c e 4.d os dois dias sob influência da ASAS, porém com uma maior intensidade no segundo dia em questão, dia 11 de julho de 2001.

Por, fim vale ressaltar um dia mais atual, dia 27 de julho de 2006 (Tabela 4), onde 5 entre 7 estações apresentaram violações. Neste foi possível constatar uma grande inversão térmica, com um aumento de 4° a 7° graus na baixa troposfera, abaixo de 300 metros, e também sob influência do ASAS (Figura 4e), foi registrado uma grande variação da influência de um dia para o outro, sem registro de precipitação em até 24 dias antes do dia em questão e temperaturas abaixo de 26° C.

Tabela 4: Alguns casos exemplificando as análises

Dias	Dados Disponíveis	Estações com Violações	Inversão abaixo de 300m	Temperatura	Condição sinótica	Período anterior de estiagem
27/08/1999	9	5	X	dia < 22° C /noite < 10° C	Influência da ASAS	10
08/09/1999	10	8	X	< 30° C	Influência da ASAS	24
05/07/2001	12	6	X	< 24° C	Influência da ASAS	7
11/07/2001	12	4	X		influência da ASAS	13
27/07/2006	7	5	X	< 26° C	ASAS	24

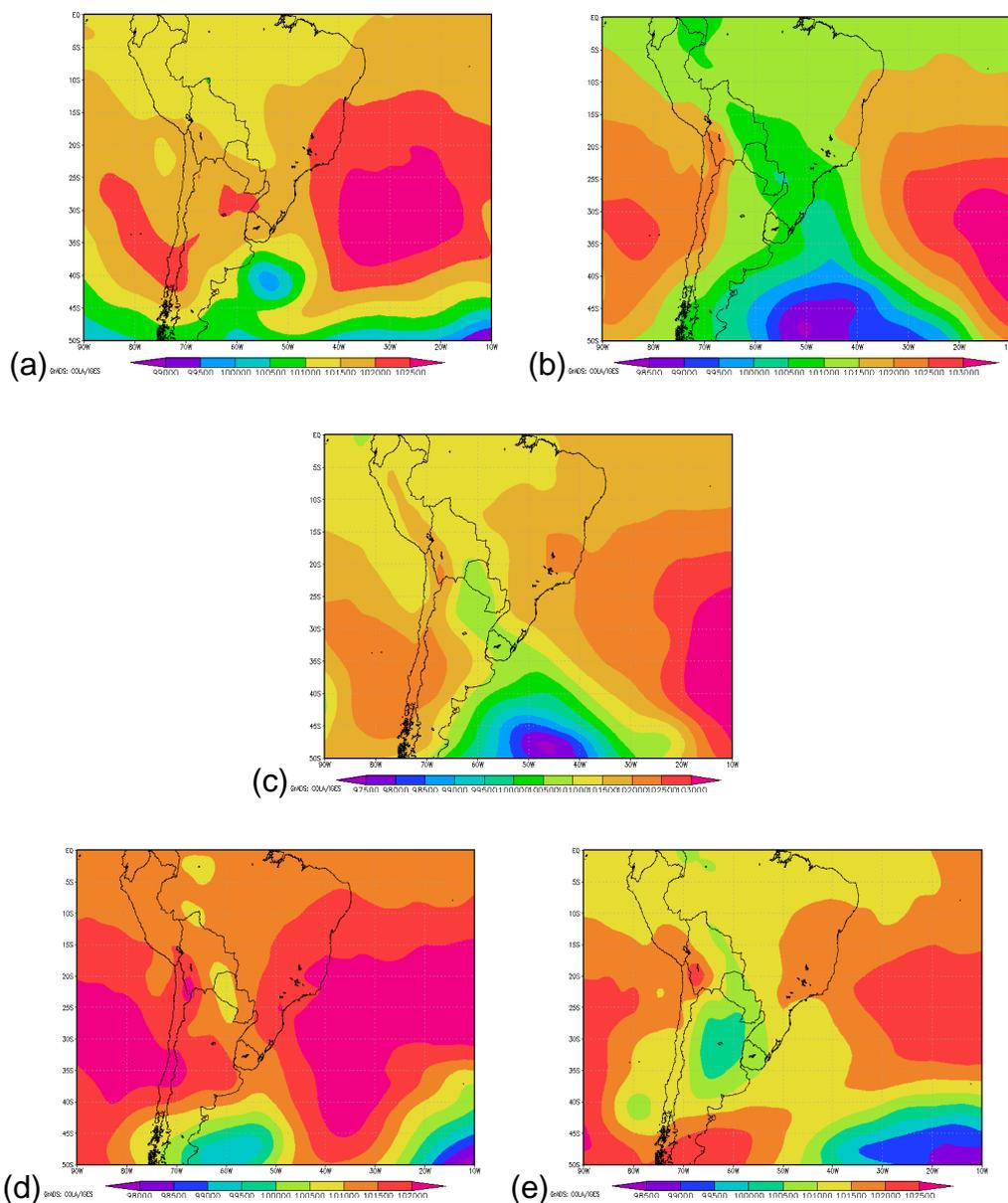


Figura 4 - Campos de pressão para os dias: (a) 27 de agosto de 1999, (b) 20 de setembro de 1999, (c) 05 de julho de 2001, (d) 11 de julho de 2001 e (e) 27 de julho de 2006.

Esses resultados reforçam os encontrados na primeira análise que confirma a forte relação entre episódios de concentração e as condições atmosféricas na região.

Os dias para as simulação foram escolhidos por serem os mais recentes e apresentarem dados necessários para as simulações. Apresentam também condições desfavoráveis a dispersões de poluentes, condições estas citadas acima e com um breve resumo na Tabela 5.

Tabela 5: Dias selecionados para exemplificar as análises realizadas

<b>DATA</b>	<b>CONDIÇÃO SINÓTICA</b>	<b>INVERSÃO</b>	<b>PERÍODO DE ESTIAGEM</b>
<b>21/07/2006</b>	ASAS	Abaixo de 300m	18 dias
<b>27/07/2006</b>	ASAS	Abaixo de 300m	24 dias
<b>09/07/2006</b>	ASAS	Abaixo de 300m	6 dias
<b>21/06/2006</b>	ASAS	Abaixo de 300m	5 dias
<b>17/05/2007</b>	ASAS	Abaixo de 300m	2 dias
<b>17/02/2008</b>	-	Abaixo de 300m	3 dias

Em geral, os dias selecionados para simulação estão sob influência do fenômeno ASAS, exceto o dia 17 de fevereiro de 2008, em que predominou um fenômeno de menor escala, inversão térmica, em todo o dia, a Camada Limite Planetária (CLP) ficou baixa, chegando no máximo a 450 metros. Em todos os dias, ocorre inversão abaixo de 300 metros, o que dificulta a dispersão de poluentes. E o período de estiagem anterior ao dia, em geral são relativamente altos, com casos de mais de 10 dias, com um clima seco devido a um período grande sem chuva não a deposição de poluentes por via úmida, influenciando nas violações de poluentes presentes na atmosfera, o que afeta diretamente no agravamento de doenças respiratórias.

## 5.2 Simulações realizadas

### 5.2.1. Caso 1: 20 e 21 de julho de 2006

Na Figura 5, estão disposto os campos de umidade e ventos, no dia 21 de julho de 2006, obtidos com a simulação do Brams. Nestes, nota-se que para o dia em questão a umidade do ar, em geral, na região variou de 70% a 40%. Predominou um faixa de 60% a 40% de umidade, sobre a região, nos horários de 00Z e 06Z. Já pela manhã, no horário das 12Z, a faixa de 70% a 60% abrange uma área maior, ou seja, a umidade aumenta em alguns localidades da região, mas isso não prevalece. As 18Z observa-se um percentual baixo de umidade presente na atmosfera, abaixo de 40%, com uma grande região com umidade abaixo de 30%. Estes baixos valores de umidade, apresentam riscos a saúde, pois o tempo seco impede a deposição do poluente por via úmida, permanecendo este na atmosfera e causando problemas respiratórios.

A baixa umidade observada nos campos dos dados simulados pelo modelo, coincidem com dados observado, pois como relatado anteriormente, na Tabela 5, o dia em questão apresentou um período anterior de estiagem de 18 dias, ou seja, antes do episódio de violação houve um período grande sem precipitação na região, sendo isso um dos motivos do episódio em que houve concentrações de  $PM_{10}$  acima do PNQA .

Observando o campo de vento na Figura 5, é possível notar que as 06Z e 12Z são os horários onde os ventos são mais fracos. Durante a tarde, a intensidade do vento aumenta, embora não significativamente, ou seja, durante todo o dia são observados ventos fracos que também atuam no sentido de dificultar a dispersão de poluentes.

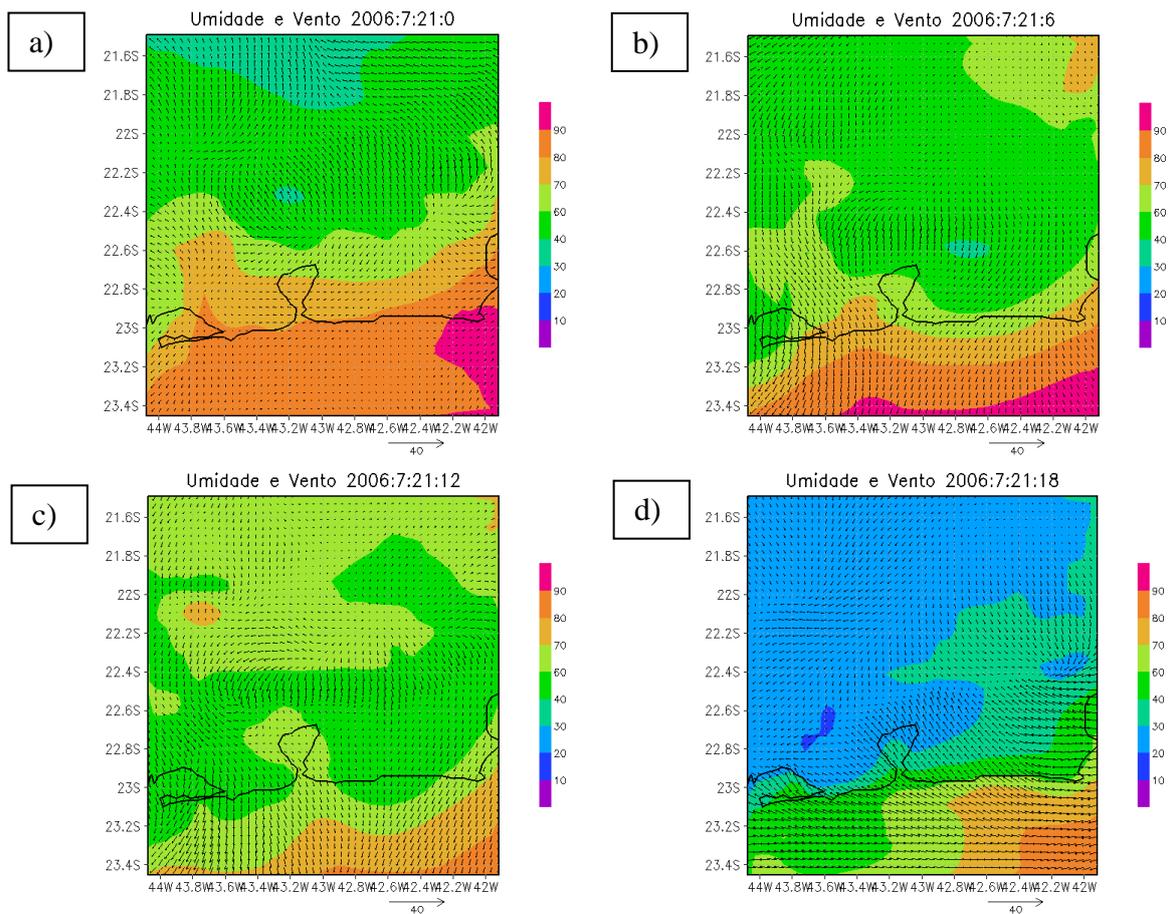


Figura 5 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 21 de julho de 2006 às a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z

Na Figura 6, estão disposto os campos de temperatura e umidade, as cores indicam a escala de temperatura e a umidade esta indicada pelas linhas de contorno. A partir desta figura, é possível observar, na RMRJ, e no período da tarde, 18Z que corresponde as 15 horas, onde é mais comum as temperaturas máximas do dia, observam-se temperaturas abaixo de  $35^{\circ}\text{C}$ , com uma grande parte da região com temperaturas em torno de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ . É possível notar alguns pontos, menores, de temperaturas abaixo de  $25^{\circ}\text{C}$ , e esse valor também na costa oceânica. Também observa-se uma área com temperatura acima de  $35^{\circ}\text{C}$ . Nessa, há indicação de umidade em torno de 20%. Em quase toda a região, a umidade fica abaixo de 30% durante a tarde.

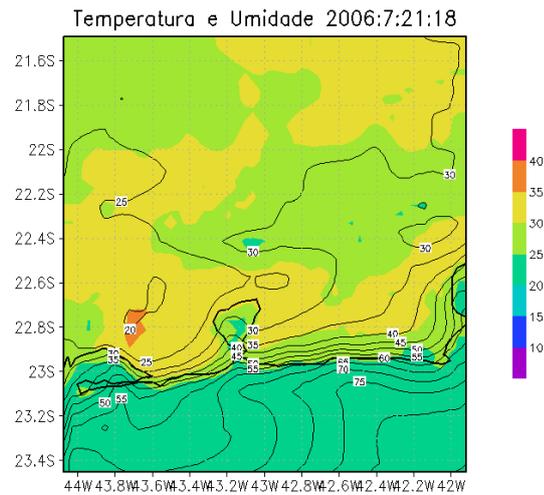


Figura 6 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 21/07/2006 às 18Z

A altura da Camada Limite Planetária (CLP) foi plotada com dados simulados para o decorrer do dia em questão. Na Figura 7, a seguir, é possível notar um período, até às 12Z, em que a camada limite permaneceu baixa, com altura de 100 metros, após às 12Z a altura segue a aumentar chegando a 1200 metros às 18Z. A camada limite baixa coincidiu com o observado, Tabela 5, onde foram registrados inversões abaixo de 300 metros no dia em questão. Essas inversões impedem o poluente de se dispersar, aprisionando-o em baixos níveis, isso é um dos motivos de grandes concentração de poluentes presente na atmosfera.

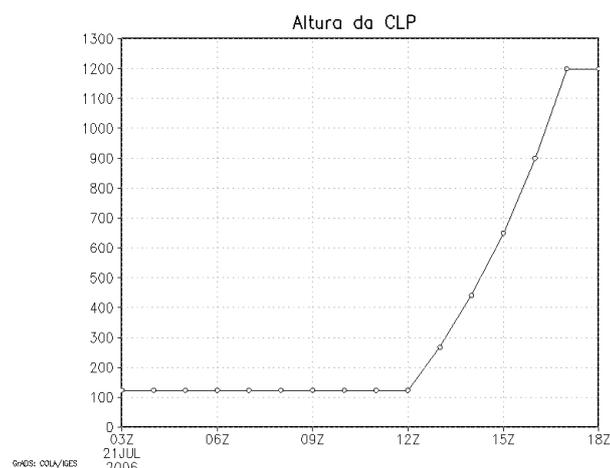


Figura 7 - Altura da Camada Limite Planetária no dia 21/07/2006

Pelos resultados estatísticos, da variável atmosférica temperatura, dispostos na tabela 6 para o período de 20 e 21 de julho de 2006, observamos que há uma correlação linear de Pearson (R) positiva para a variável em todas as estações, com todos os valores acima de 0,85, indica que as series variam simultaneamente. No índice de concordância (d), ocorre o mesmo comportamento índices altos.

A partir do erro médio é possível observar que a temperatura foi subestimadas pelo modelo em todas as estações, pois o ME foi negativo em todas.

De acordo com o MSE observa-se que as maiores diferenças entre o observada e o estimado foram apresentadas em Galeão e Afonsos, pois apresentam a maior soma das diferenças entre o valor estimado e o observado. Já pela RMSE isso se confirma com os maiores erros nessas duas estações, sendo o maior em Afonsos. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observa-se que o maior erro continua em Afonsos não tendo muita mudança, o que também ocorre em Santa cruz, já nas demais há uma mudança mais significativa com a retirada do desvio médio.

Tabela 6: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (20-21 de julho de 2006)

	<b>S. Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonsos</b>
<b>S(o)</b>	2,039	4,229	4,879	5,832
<b>S(x)</b>	3,593	2,352	2,908	2,798
<b>ME</b>	-2,039	-2,652	-0,959	-1,099
<b>MSE</b>	7,423	12,685	6,323	14,269
<b>RMSE</b>	2,724	3,562	2,515	3,777
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	1,807	2,377	2,324	3,614
<b>R</b>	0,942	0,892	0,946	0,882
<b>D</b>	0,791	0,751	0,895	0,805

Pela metodologia de PIELKE (2002) os critérios são satisfeitos. Portanto assim, como o caso anterior, a uma boa qualidade na simulação para temperatura.

Nos gráficos a seguir (figura 8), onde estão as temperaturas observadas e modeladas para o dois dias simulados, dia em que foi registrado a violação e o anterior, observa-se a relação entre o observado e o modelado para todas as estações, que estão na Tabela 3, foram usadas na parte da validação. É notório a

relação entre os dados modelados e simulados, pois em ambas as estações seguem o comportamento parecido. Em geral, observa-se uma subestimativa pelo modelo nos dados, como é observado a partir da análise estatística anterior. Na estação de Santos Dumont a subestimativa ocorre nas menores temperaturas, em Galeão e Santa Cruz esse subestimativa é maior nas maiores, já em Campos dos Afonsos há uma subestimativa do modelo nas maiores temperaturas em pequenas superestimativas nas menores temperatura.

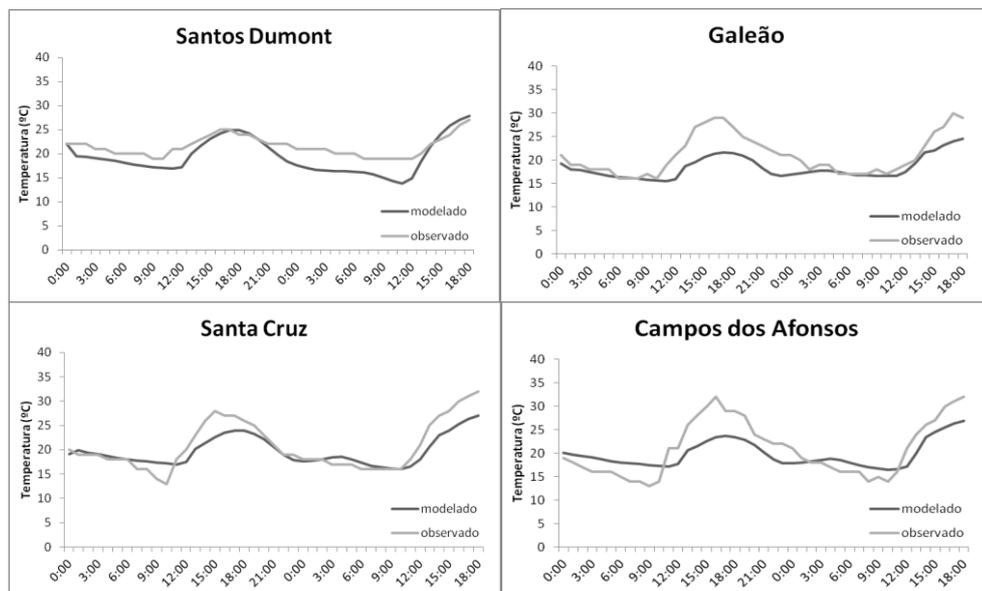


Figura 8 - Temperatura observada e modelada nos dias 20 e 21 de julho de 2006

### 5.2.2. Caso 2: 26 e 27 de julho de 2006

Na Figura 9, os campos de umidade e vento para o caso em questão, foram plotados os resultados obtidos com o BRAMS para os horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z para o dia 27 de julho de 2006. Em geral, a umidade permanece abaixo de 60%. Às 00Z uma grande área da região apresenta umidade abaixo de 40%, chegando em algumas localidades a 20%, apenas consta e uma pequena área mais ao centro apresenta valores acima de 40%, chegando no máximo a 60%. Nos horários 06Z e 12Z, a umidade tende a aumentar nas localidades onde apresentava valores baixos, e essa mancha de umidade mais baixa parece se deslocar para a costa, formando uma faixa menor em relação ao horário anterior. Assim como no caso anterior, às 18Z a umidade apresenta valores bem baixos, variando em torno de 30% a 10%, isso se deve as maiores temperaturas nesse horário.

Os valores percentuais baixos de umidade registrados para o dia 27 de julho de 2006 se deve ao fato de, assim como no caso anterior, este também apresentar um período grande sem chuva antes do dia em questão, 24 dias de acordo com a Tabela 5, sendo este maior ainda que do anterior.

Já observando o vento neste caso os quatro horários apresentam ventos mais intensos se em comparação com o caso anterior, mesmo ainda fracos. O horário das 12Z é o que apresenta os ventos mais fracos. No que tange a direção são relativamente mais uniformes.

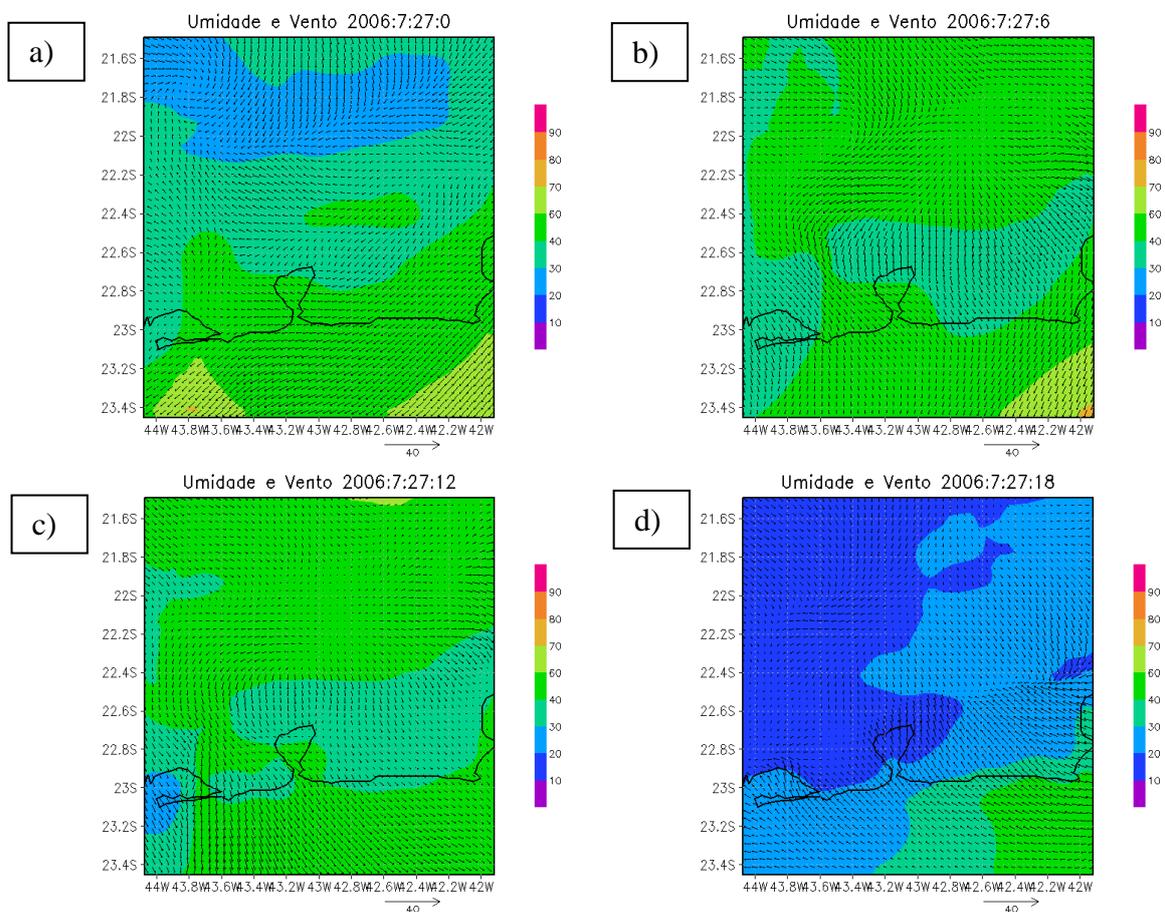


Figura 9 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 27 de julho de 2007 às:  
a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z

No campo de temperatura e umidade disposto a seguir (Figura 10) às 18Z observa-se o mesmo padrão descrito acima do campo de umidade as 18Z por se tratar da mesma umidade registrada, ou seja, percentuais de umidades muito baixos. A temperatura em geral é abaixo de 35°C, variando em torno de 35°C a 25°C de uma localidade para outra. Apenas uma porção na costa oeste registra

temperaturas de 35°C a 40°C, nesta localidade também está o registro da menor umidade 15%.

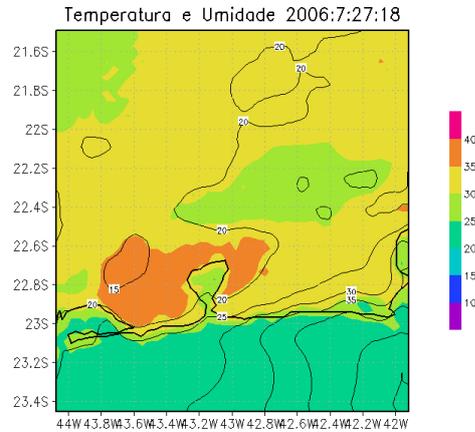


Figura 10 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no 27 de julho de 2007 às 18Z

Para este caso a altura da CLP (Figura 11) segue o mesmo comportamento do caso anterior, a altura segue-se constante até as 12Z, abaixo de 200 metros, após este horário tende a aumentar e próximo 1600m permanece por um curto intervalo constante novamente, posteriormente subindo novamente, atingindo aproximadamente 2000 metros as 18Z. Esse comportamento coincide com o observado, pois de acordo com a Tabela 5, no dia em questão foram registrados inversões térmicas abaixo de 300 metros.

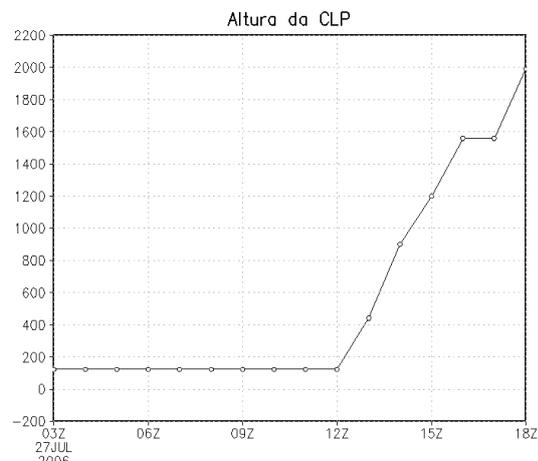


Figura 11 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, do dia 27 de julho de 2007

Os valores estatísticos, na tabela 7, para a variável temperatura que objetivam a relação entre a variável observada e simulada, são para o período de 26 e 27 de julho de 2006.

Nesse período observa-se uma correlação linear de Pearson (R) positiva para todas as estações, chegando a 0,88, não distanciando muitos deste valor. Assim, para temperatura as series variam simultaneamente. No índice de concordância (d), temperatura apresenta valores altos.

O erro médio para S. Dumont e Galeão são negativos, e para Santa Cruz e Afonsos, positivos. Portanto, é possível observar uma subestimação pelo modelo para a variável em S. Dumont e Galeão e um superestimativa e Santa Cruz e Afonsos.

De acordo com o MSE observa-se que para a variável as maiores diferenças entre o observado e o estimado foram apresentadas em Santa Cruz e Afonsos. Já pela RMSE isso se confirma com os maiores erros nessas estações. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observamos que o maior erro para temperatura continua em Afonsos e Santa Cruz, não havendo muita mudança em todas as estações, com a retirada do desvio médio.

Tabela 7: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (26-27 de julho de 2006)

	<b>S. Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonsos</b>
<b>S(o)</b>	2,492	5,367	5,872	7,262
<b>S(x)</b>	4,895	2,848	3,586	3,205
<b>ME</b>	-1,151	-1,151	1,469	0,644
<b>MSE</b>	10,388	11,863	19,178	22,256
<b>RMSE</b>	3,223	3,444	4,379	4,718
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	3,010	3,246	4,125	4,673
<b>R</b>	0,865	0,863	0,720	0,884
<b>D</b>	0,804	0,818	0,777	0,794

Pela metodologia de PIELKE (2002) para temperatura, os critérios são satisfeitos na maioria das estações, exceto para S. Dumont. Portanto, há uma boa qualidade da simulação para temperatura.

Na Figura 12 nota-se a relação entre a temperatura observada e a modelada em cada uma das quatro estações utilizadas para os dados na validação. O

comportamento geral segue se bem parecido em ambos os dados e estações. Para o Galeão e o Campos Afonsos, o modelo subestimou as temperaturas máximas e superestimou as menores, sendo esse comportamento mais bem definido em Afonsos. No aeroporto Santos Dumont, ocorre o contrário, o modelo superestimada as máximas e subestima as mínimas. Em Santa Cruz há um retardamento dos picos dos dados modelado, os picos de máxima e mínima ocorre depois do observado.

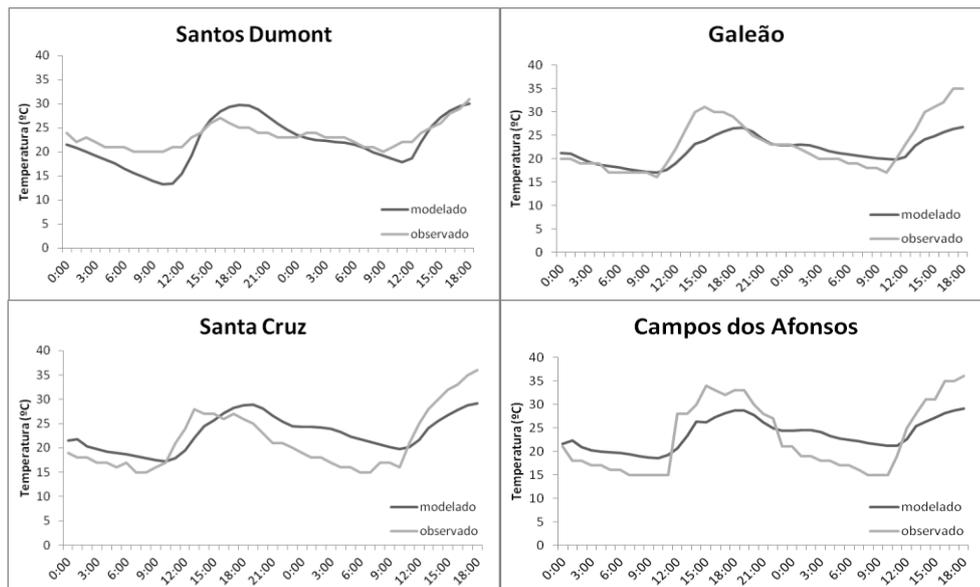


Figura 12 - Temperatura observada e modelada nos dias 26 e 27 de julho de 2006

### 5.2.3. Caso 3: 08 e 09 de julho de 2006

Nos campos a seguir de umidade e vento (Figura 13) para o caso em questão, foram plotados os horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z para o dia 09 de julho de 2006. As 00Z, os valores de umidade diminuem do oceano para o continente e adentro dele, há uma faixa fina em toda a costa de valores em torno de 60% a 70%, e adentrando o continente com uma faixa maior, valores de umidade de 50% a 60% e no interior uma última faixa com valores menores ainda, de 50% a 40%. As 06Z, a faixa de valores em torno de 50% a 60% se estende cobrindo a maior parte da região. No horário das 12Z, a umidade aumenta chegando até a 80% mais ao interior do continente. Já no último horário, as 18Z, assim como nos casos anteriores a umidade diminui, fica abaixo de 40% no continente.

Os valores percentuais de umidade registrados para o dia 27 de julho de 2006 são maiores com relação aos casos anteriores, isto coincide com o período de

estiagem antes do dia em questão, já que este também é menor, é de 6 de acordo com a tabela 5. Porém, apesar desses valores serem mais altos, durante a tarde continuam caracterizando uma atmosfera seca.

O vento neste caso nós três primeiros horários selecionados apresenta pontos de convergência tendo um escoamento mais uniforme somente no período da tarde, as 18Z. Na intensidade não há grandes diferenças de um horário para o outro, as 06Z e 12Z nos pontos de convergência a ventos mais fortes mas isso é contrabalanceado pelas regiões de divergência em que temos ventos mais fracos, já as 18Z estes se tornam mais. Mas em geral tem-se também ventos fracos o que atua como um fator complicador também na dispersão de poluentes neste caso e é um dos fatores que influencia na violação do padrão de qualidade.

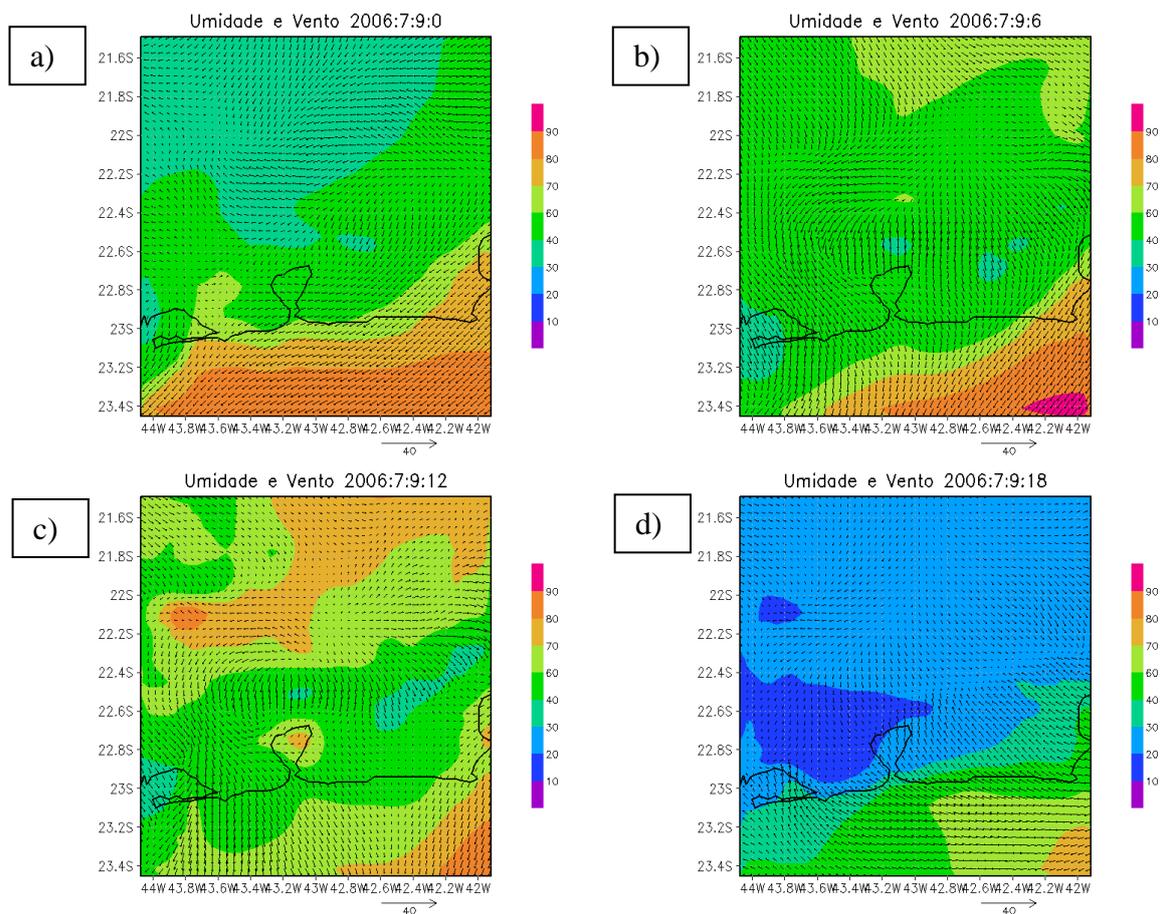


Figura 13 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006 às:  
a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z

No campo de temperatura e umidade disposto a seguir (Figura 14) às 18Z o mesmo padrão é o descrito acima do campo de umidade as 18Z, percentuais de

umidades abaixo de 40% no continente. Assim como o caso anterior a temperatura em geral é abaixo de 35°C, variando em torno de 35°C a 25°C de uma localidade para outra. Com uma área na costa oeste, com temperaturas de 35°C a 40°C, nesta localidade está o registro com umidade 20%.

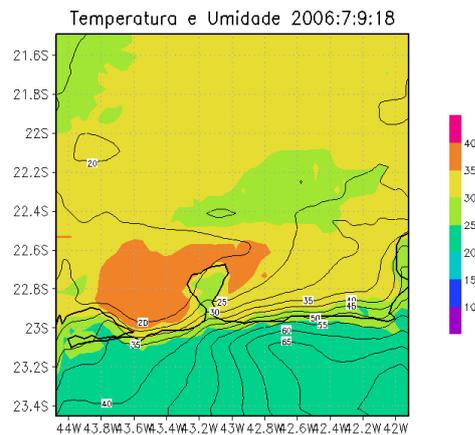


Figura 14 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006 às 18Z

Para este caso a altura da CLP (Figura 15) segue o mesmo comportamento dos casos anteriores até as 12Z, ou seja, permanece constante um pouquinho acima de 100 metros. A partir das 12Z aumenta até aproximadamente 450 metros permanecendo por um curto intervalo constante novamente, posteriormente subindo novamente, atingindo aproximadamente 1200 metros as 18Z. Esse comportamento coincide com o observado, pois de acordo com a Tabela 5, no dia em questão foram registrados inversões térmicas abaixo de 300 metros.

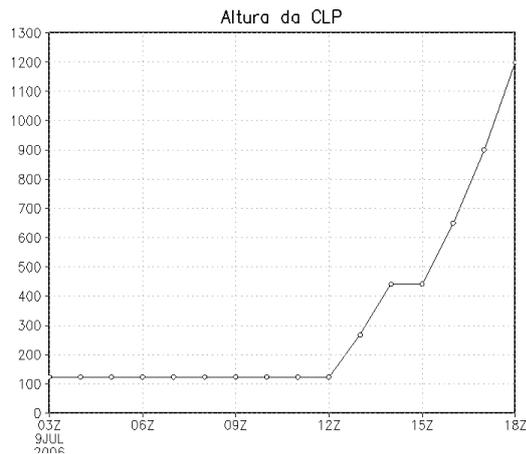


Figura 15 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 09 de julho de 2006)

Na tabela 8, estão os resultados estatísticos da variável simulada e observada para temperatura, para o período de 08 e 09 de julho de 2006.

A partir da análise estatística observa-se correlação linear de Pearson (R) positiva em todas as estações, sendo os valores altos. Assim, os valores observados e simulados, para temperatura, variam simultaneamente. O mesmo ocorre no índice de concordância (d), temperatura apresenta valores relativamente altos.

No erro médio, assim como no caso anterior, é possível observar que, os valores são subestimados pelo modelo em S. Dumont e no Galeão e em Santa Cruz e Afonsos, com valores positivos, há uma superestimativa pelo modelo.

De acordo com o MSE observa-se que as diferenças entre o observado e o estimado para a variável temperatura contém valores entre as estações muito próximos, com exceção de Galeão, que apresenta a menor diferença, e com pouca diferença em relação as outras, Afonsos com a maior diferença, assim como nos casos anteriores. Já pela RMSE isso se confirma com o menor erro para temperatura no Galeão, e sendo ainda com pouca diferença das outras para temperatura a de maior erro Afonsos. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observamos que o maior erro continua em Afonsos para temperatura e o menos no Galeão não tendo muita mudança, o que também ocorre em Santa cruz, já nas demais há uma mudança mais significativa com a retirada do desvio médio.

Tabela 8: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (08-09 de julho de 2006)

	<b>S. Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonso</b>
<b>S(o)</b>	2,45081	5,28199	4,81143	6,90811
<b>S(x)</b>	5,39783	3,08357	4,06219	3,75441
<b>ME</b>	-1,37372	-0,23465	0,27930	0,87791
<b>MSE</b>	13,33598	7,48657	13,03378	14,71762
<b>RMSE</b>	3,65185	2,73616	3,61023	3,83635
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	3,38362	2,72608	3,59941	3,73455
<b>R</b>	0,89554	0,92023	0,68292	0,92287
<b>D</b>	0,78148	0,89008	0,82541	0,87013

Pela metodologia de PIELKE (2002) a maioria dos critérios é satisfeita. Assim, é possível notar que há uma boa qualidade da simulação é para temperatura.

Nos gráficos que estão dispostos os dados de temperaturas observadas e modeladas em cada uma das quatro estações utilizadas para os dados na validação (Figura 16) nota-se a relação entre ela, seguindo o mesmo comportamento. Assim como no caso anterior para os aeroportos do Galeão e do Campos Afonso o modelo subestimou as temperaturas máximas e superestimou as mínimas. No aeroporto Santos Dumont ocorre o contrário, o modelo superestimada as máximas e subestima as mínimas. Em Santa Cruz também como no caso anterior, os picos de temperatura modelada são após os de observado.

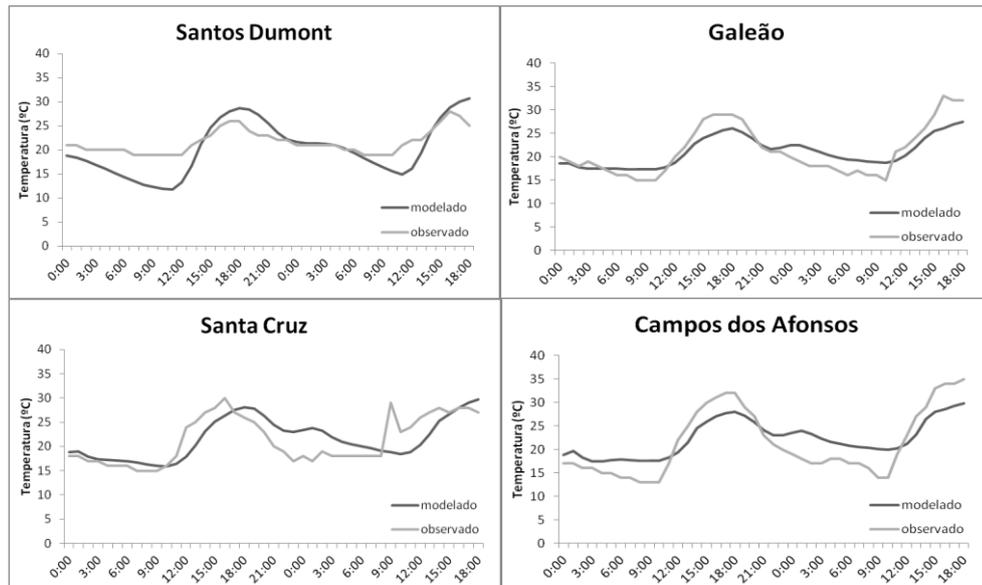


Figura 16 - Temperatura observada e modelada nos dias 08 e 09 de julho de 2006

#### 5.2.4. Caso 4: 20 e 21 de junho de 2006

Os campos de umidade e vento gerados pelo BRAMS para o dia 21 de junho de 2006 nos horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z estão expostos na Figura 17. É possível observar que para este caso os percentuais de umidade são maiores, chegando acima de 90%. As 00Z os valores de umidade variam de 90% a 40% de uma localidade para outra com um predomínio de valores de umidade abaixo de 70% sobre o continente. As 06Z e 12Z a umidade aumenta, com valores em torno de 70% a 100% de umidade, sendo às 12Z a maior parte da região com acima de 90%. No horário que segue, às 18Z a umidade diminui, com máximo de 60% e mínimo de 30%, tendo no continente uma grande faixa de valores abaixo de 40%.

Os valores percentuais de umidade registrados para o dia 21 de junho de 2006 são maiores com relação aos casos anteriores, e assim como no caso anterior este fato coincide com o período de estiagem antes do dia em questão, já que este também é menor, é de 5 de acordo com a tabela 5.

Assim como no caso anterior o vento nos três primeiros horários apresenta pontos de convergência tendo um escoamento mais uniforme somente no período da tarde, às 18Z. A intensidade é menor às 12Z, ou seja, no período da manhã, e mais intensa de tarde, às 18Z.

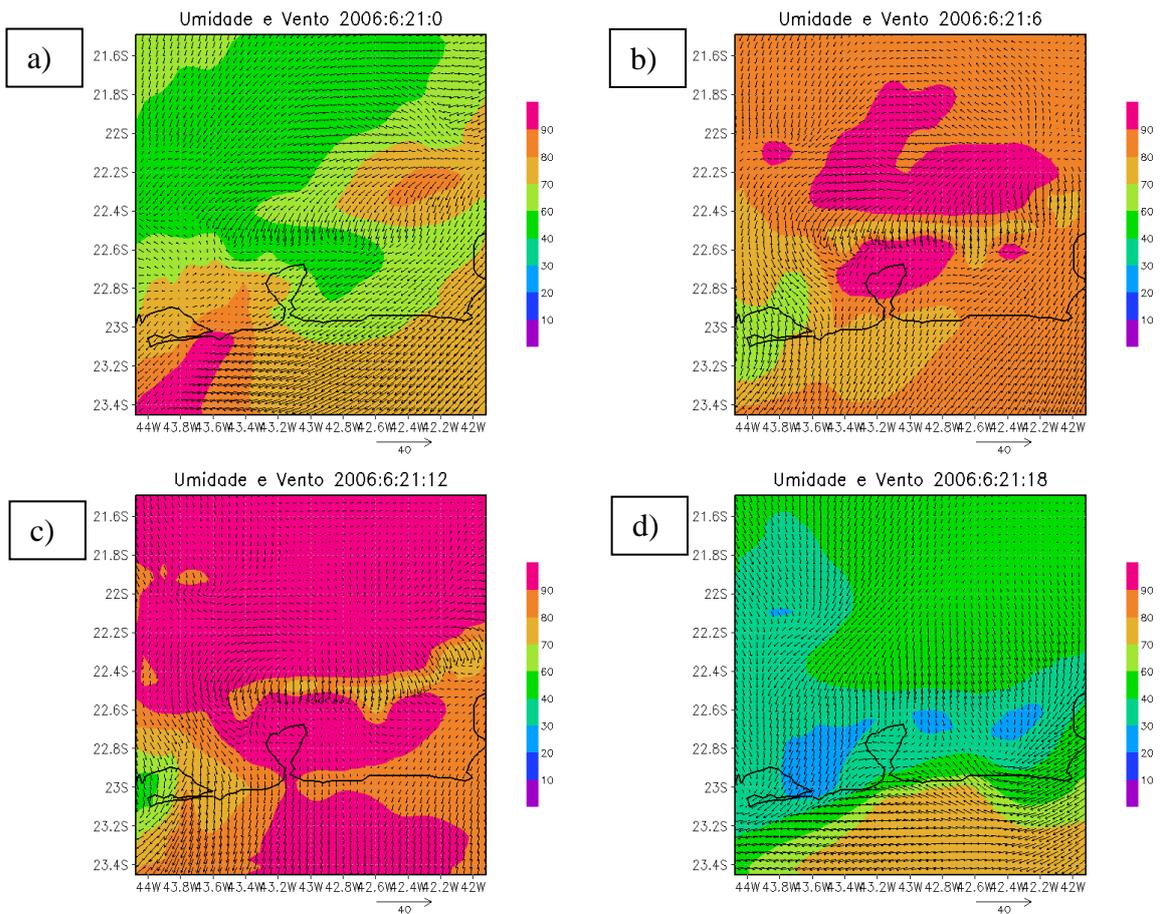


Figura 17 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 21 de junho de 2006 às a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z e d) 18Z

De acordo com o campo de temperatura e umidade (Figura 18) às 18Z, a umidade segue o mesmo padrão que é o descrito acima no campo de umidade e vento às 18Z, percentuais de umidades em geral entre 40% e 30% no continente. As temperaturas no interior do continente variam de 30°C a 20°C, e na costa em torno de 35°C a 25°C.

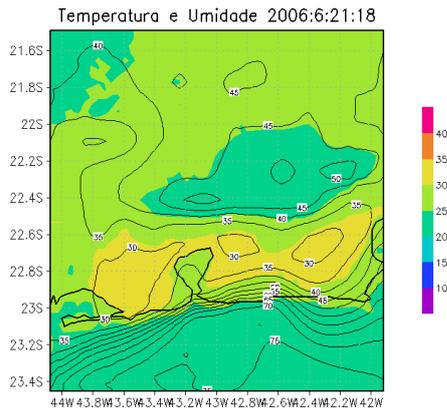


Figura 18 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 21 de junho 2006 às 18Z

A altura da CLP (Figura 19) para o dia 21 de junho de 2006 segue o mesmo comportamento dos casos anteriores até as 12Z, ou seja, permanece constante em aproximadamente 125 metros. A partir das 12Z aumenta até aproximadamente 270 metros permanecendo por um curto intervalo constante novamente. As 15Z volta a aumentar atingindo a altura de aproximadamente 445 metros em pouco tempo, e volta a se tornar constante até as 18Z. Esse comportamento coincide com o observado, pois de acordo com a Tabela 5, no dia em questão foram registrados inversões térmicas abaixo de 300 metros.

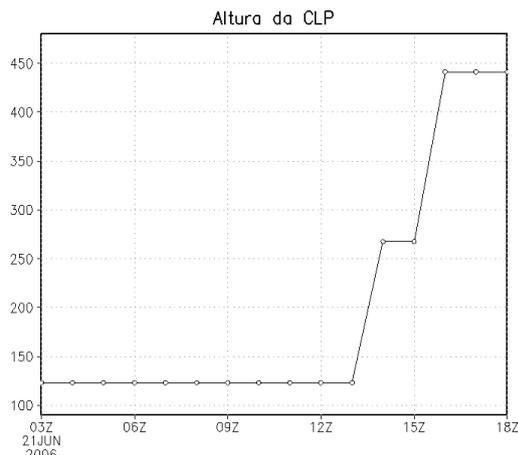


Figura 19 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 21 de junho de 2006

A partir das análises estatísticas na tabela 9, de temperatura para o período de 20 e 21 de junho de 2006, observa-se correlação linear de Pearson (R) positiva em todas as estações, com os altos valores. O que indica que as series para temperatura, variam simultaneamente. O mesmo ocorre no índice de concordância (d), temperatura apresenta valores variando em torno de 0,55 e 0,7.

No erro médio, observar-se que todos os valores são subestimados pelo modelo, a partir dos valores negativos dispostos na tabela.

De acordo com o MSE observa-se que para a variável temperatura as maiores diferenças entre o observado e o estimado foram apresentadas, neste caso, no S. Dumont. Já pela RMSE isso se confirma com os maiores erros nessas estações para a variável. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observamos que o maior erro para temperatura passa a ser no Galeão, com a retirada do desvio médio.

Tabela 9: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (20-21 de junho de 2006)

	<b>S.Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonso</b>
<b>S(o)</b>	2,66966	4,54352	4,04638	5,09361
<b>S(x)</b>	4,73574	2,52511	3,40968	3,99698
<b>ME</b>	-5,59744	-4,81837	-4,04907	-5,16582
<b>MSE</b>	39,27828	32,93194	22,93401	33,29124
<b>RMSE</b>	6,26724	5,73864	4,78895	5,76986
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,81903	3,11693	2,55715	2,57014
<b>R</b>	0,85453	0,75415	0,77772	0,86731
<b>D</b>	0,55192	0,60931	0,68358	0,70897

Pela metodologia de PIELKE (2002), nesse caso, para temperatura dois critérios são parcialmente satisfeitos apenas. Assim, para este período em questão, comparado com os casos anteriores, a qualidade da simulação é menor.

Na Figura 20 onde são plotadas as temperaturas observadas e as modeladas em cada uma das quatro estações utilizadas para os dados na validação nota-se a relação entre elas, seguindo o mesmo comportamento. Mas diferente dos casos

anteriores em todas as estações o modelo tende a subestimar o observado assim como revelam as análises estatísticas.

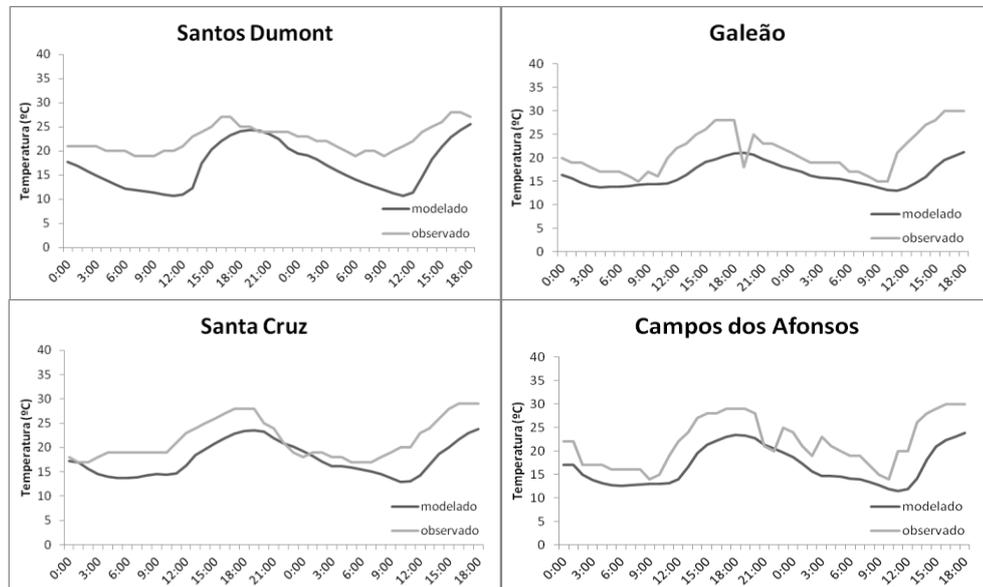


Figura 20 - Temperatura observada e modelada nos dias 20 e 21 de junho de 2006

### 5.2.5. Caso 5: 16 e 17 de maio de 2007

Os campos de umidade e vento (Figura 21) para o dia 17 de maio de 2006 foram plotados os horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z. As 00Z os valores de umidade na maior parte da região variam em torno de 70% a 40% de uma localidade para outra, com valores acima de 70% apenas próximo a costa e sobre o oceano. As 06Z e 12Z a umidade aumenta, com valores máximos de umidade de até 90%. Nesses horários estende-se uma faixa próximo da costa, com valores 70% a 40%, e nas demais áreas da região, ou seja, no interior do continente e no oceano, tem-se umidade acima de 70%. No último horário, como nos casos anteriores, às 18Z a umidade diminui, com máximo de 70% sobre toda a região e sobre o continente máximo de 40%, com uma grande área com valores em torno de 20% a 30%.

Os valores percentuais de umidade registrados para o dia em questão, assim como nos dois últimos casos, são maiores com relação aos outros, e assim como no caso anterior este fato coincide com o período de estiagem antes do dia em questão, já que este também é menor, é de 2 de acordo com a tabela 5. Mesmo assim no período da tarde, com umidade baixa, o tempo é caracterizado como seco.

Já para o vento neste caso a intensidade diminui no decorrer do dia chegando aos menores às 18Z. Assim como no casos anteriores o ultimo horário é o que apresenta um escoamento mais uniforme, neste também é possível observar que os ventos do continentes são bem fracos se comparado aos do oceano.

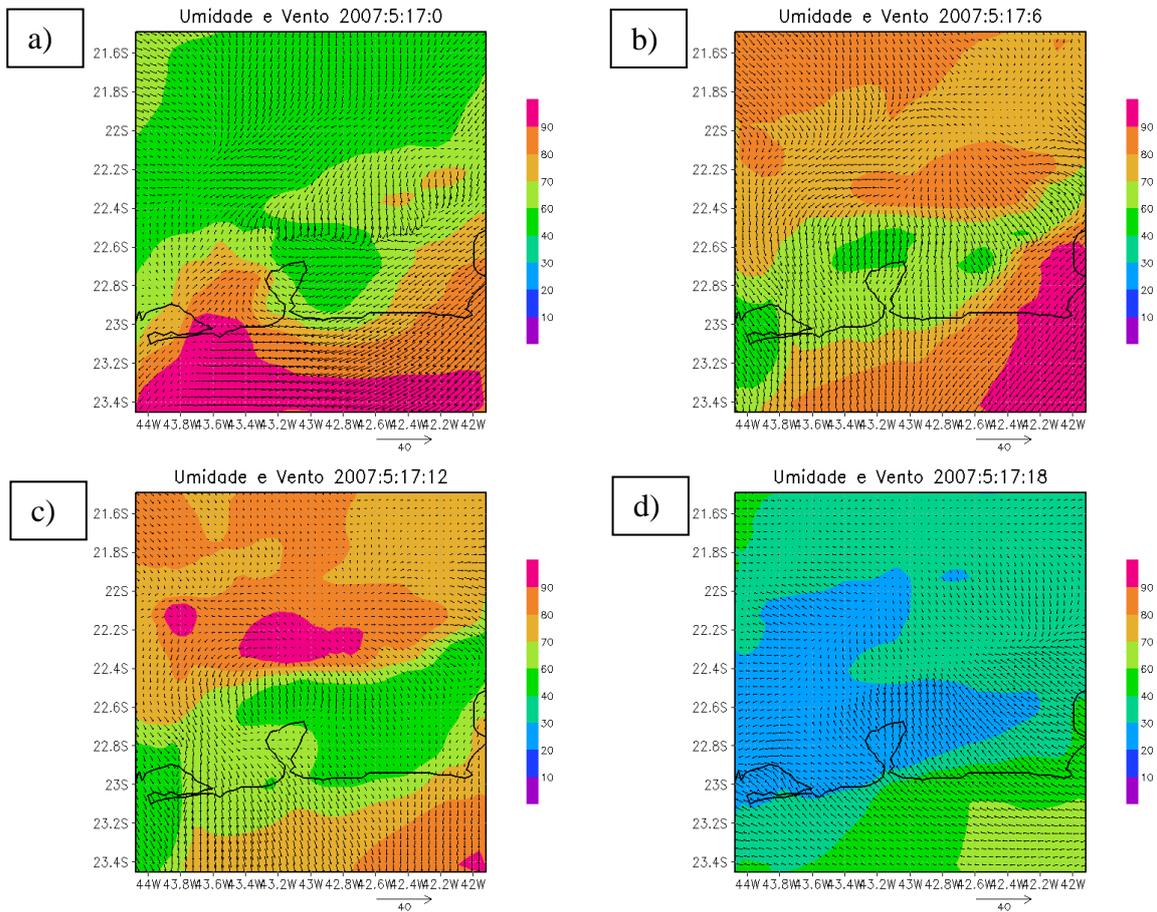


Figura 21 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 17 de maio de 2007 às:  
a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z

De acordo com o campo de temperatura e umidade (Figura 22) às 18Z os percentuais de umidades em geral entre 35% e 25% no continente. As temperaturas chegam no máximo a aproximadamente 40°C e no mínimo 25°C. As maiores temperaturas se estendem por quase toda a costa, principalmente na região oeste onde a umidade relativa é de 25%. Também há áreas isoladas de temperaturas altas em outras localidades sobre o continente, o mesmo ocorre com as temperaturas em mais baixas, dentro do intervalo citado acima, estão em pontos isolados sobre o continente. Na maior parte da região sobre o continente, a temperatura varia em torno de 35°C e 30°C.

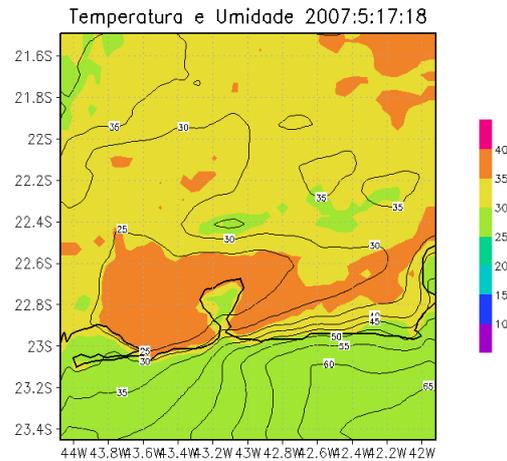


Figura 22 - Campos de temperatura e umidade, na RMRJ, no 17 de maio de 2007 às 18Z

Para o dia 17 de maio de 2007 a altura da CLP (Figura 23) segue o mesmo comportamento dos casos anteriores até as 12Z, ou seja, permanece constante, abaixo de 300 metros, em aproximadamente 150 metros. A partir das 12Z começa a aumentar lentamente até atingir um pouco acima de 2400 metros em 18Z. Esse comportamento coincide com o observado, pois de acordo com a Tabela 5, no dia em questão foram registrados inversões térmicas abaixo de 300 metros.



Figura 23 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no 17 de maio de 2007

Nas análises estatísticas dispostas na tabela 10, de temperatura para o período de 16 e 17 de maio de 2007, observa-se correlação linear de Pearson (R) positiva para a variável em todas as estações, apresentando altos valores, chegando

a 0,89 em Santa Cruz. Assim, para a variável estudada as séries, simulada e observada, variam simultaneamente. Já no índice de concordância (d) tem-se valores relativamente altos.

No erro médio, observar-se que todos os valores são subestimados pelo modelo, com valores de ME negativos.

De acordo com o MSE observa-se que as diferenças entre o observado e o estimado para a variável temperatura contém os maiores valores Afonsos e Galeão, sendo o de Afonsos a maior. Já pela RMSE isso se confirma com o menor erro para temperatura no Galeão, e sendo ainda com pouca diferença das outras com o maior erro Afonsos. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observamos que o maior erro continua no Campos dos Afonsos para temperatura.

Tabela 10: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (16-17 de maio de 2007)

	<b>S.Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonsos</b>
<b>S(o)</b>	3,20964	4,23830	3,89727	5,07563
<b>S(x)</b>	4,86304	3,62225	4,30353	4,56691
<b>ME</b>	-1,67953	-3,52930	-2,85116	-2,79860
<b>MSE</b>	11,35938	19,44945	11,95570	22,10495
<b>RMSE</b>	3,37037	4,41015	3,45770	4,70159
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,92208	2,64452	1,95616	3,77793
<b>R</b>	0,81405	0,78459	0,89084	0,69771
<b>D</b>	0,82299	0,72694	0,83872	0,75545

Pela metodologia de PIELKE (2002), nesse caso, para temperatura os critérios, em geral, são satisfeitos. Assim, há uma boa qualidade da simulação para a variável temperatura, como nos casos anteriores.

Nos gráficos a seguir (Figura 24), estão dispostos os dados de temperaturas observadas e modeladas em cada uma das quatro estações utilizadas para os dados na validação. A partir destes, é possível observar que seguem o mesmo comportamento dados observados e simulados para temperatura. Pode-se notar nos gráficos que assim como já obtido a partir da estatística, através do EM, os dados modelados tendem a subestimar o observado.

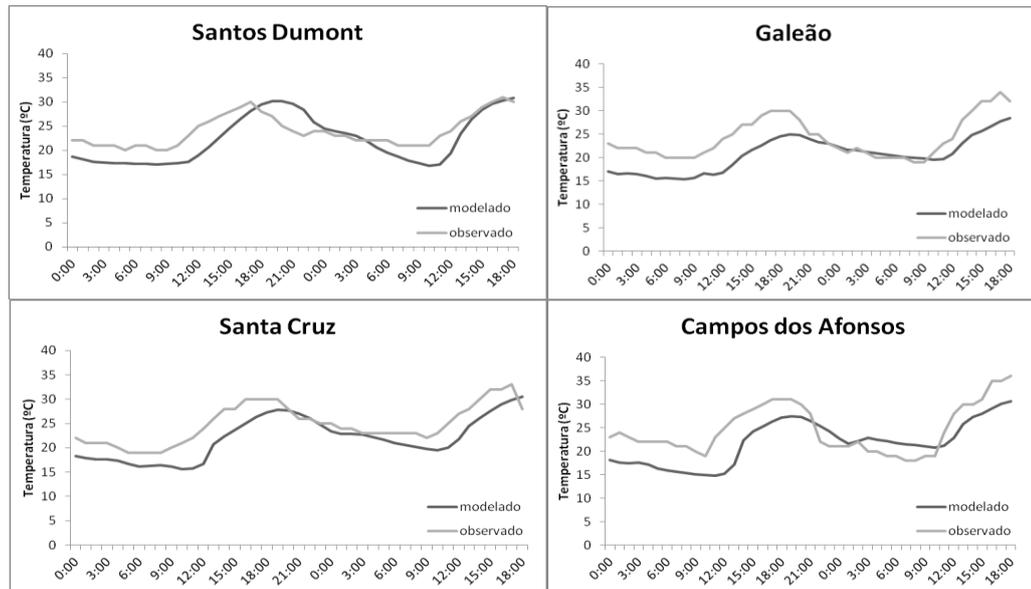


Figura 24 - Temperatura observada e modelada nos dias 16 e 17 de maio de 2007

#### 5.2.6. Caso 6: 16 e 17 de fevereiro de 2008

Nos campos de umidade e vento (Figura 25) para o dia 17 fevereiro de 2008 foram plotados os horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z. É possível notar que os resultados revelam valores de umidade relativa mais altas com relação a maioria dos casos anteriores. As 00Z observa-se um gradiente de umidade do oceano para continente, variando de 100% podendo chegar até 40% bem no interior do continente. Nos horários posteriores, 06Z e 12Z, os valores de umidade abaixo de 70%. E ao contrario de todos outros casos, as 18Z a umidade ao invés de diminuir segue o mesmo comportamento do horário anterior, com os valores maiores abrangem uma área da região ainda maior que as 12Z. Com isso percebe-se que neste caso em geral houve um aumento de um horário para o outro, seguindo esse comportamento até o final.

Os valores percentuais de umidade registrados para o dia em questão, assim como nos três últimos casos, são maiores com relação aos outros, e assim como no caso anterior este fato coincide com o período de estiagem antes do dia em questão, já que este também é menor, é de 3 de acordo com a tabela 5.

O vento nós três primeiros horário apresenta áreas de convergência tendo um escoamento mais uniforme somente no período da tarde, as 18Z. A intensidade, assim como no caso anterior, diminui no decorrer do dia, sendo menor as 18Z.

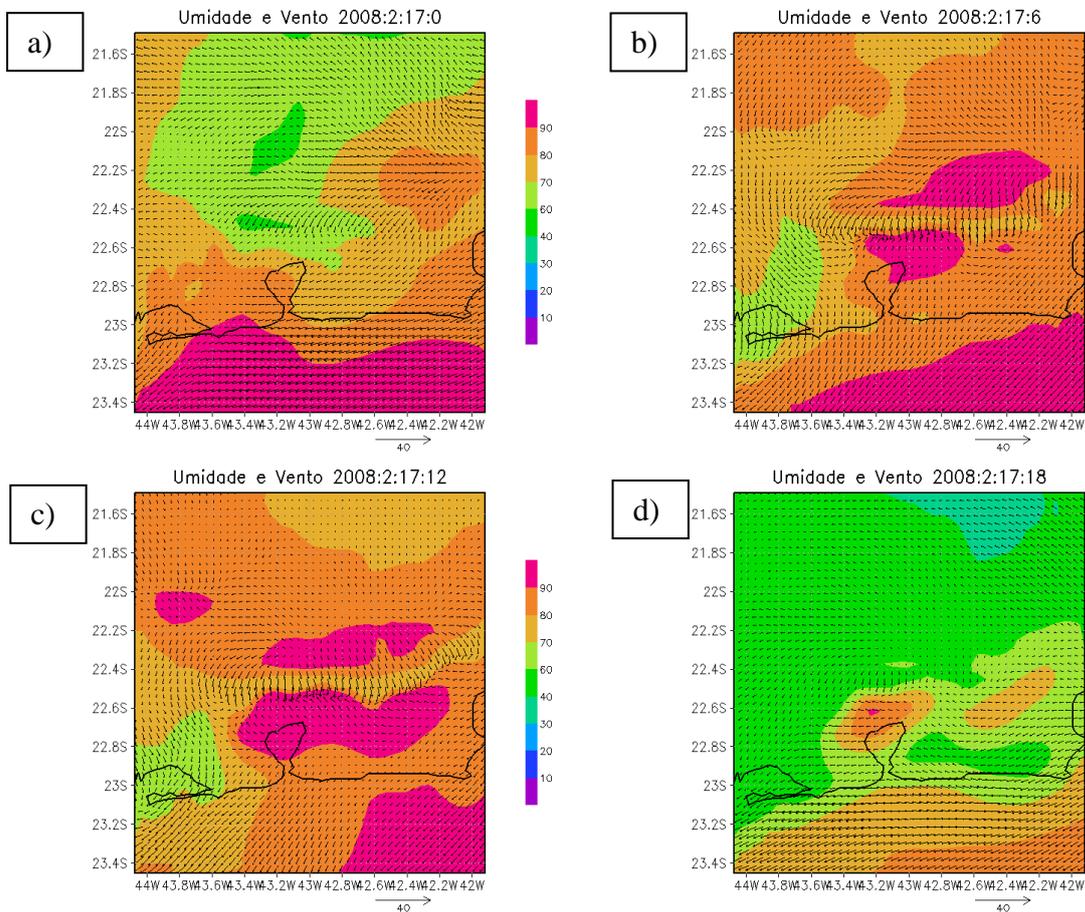


Figura 25 - Campos de umidade e vento, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008 às: a)00Z, b)06Z, c)12Z e d)18Z

De acordo com o campo de temperatura e umidade (Figura 26) às 18Z, a umidade segue o mesmo padrão que é o descrito acima no campo de umidade e vento as 18Z, percentuais de umidades altos. As temperaturas em uma grande área da região esta em torno de 35°C a 25°C, chegando em alguns pontos menores a 20°C e ao norte apresenta um gradiente chegando até 40°C.

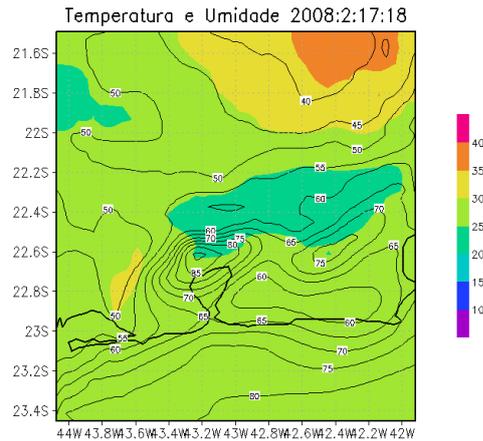


Figura 26 - Campo de temperatura e umidade, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008 às 18Z

No dia 17 de fevereiro de 2008 a altura da CLP (Figura 27) segue o mesmo comportamento dos casos anteriores até as 12Z, mas com algumas alterações. Para esse caso em questão a altura permanece constante em aproximadamente 125 metros até as 14Z. A partir das 14Z começa a aumentar atingindo um pico, as 16Z, em aproximadamente 440 metros e volta a diminuir chegando as 17Z novamente a 125 metros, e permanece constante até as 18Z. Esse comportamento coincide com o observado, pois de acordo com a Tabela 5, no dia em questão foram registrados inversões térmicas abaixo de 300 metros.

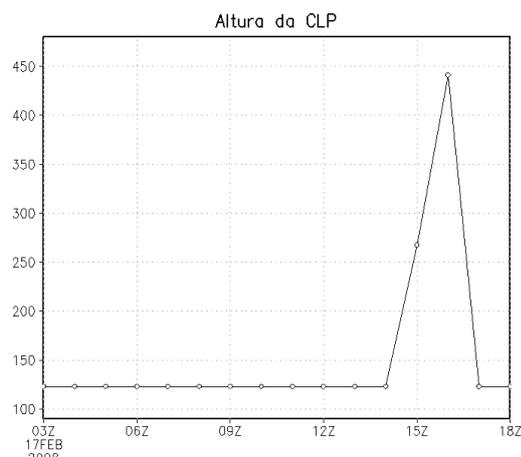


Figura 27 - Altura da Camada Limite Planetária, na RMRJ, no dia 17 de fevereiro de 2008

Na tabela 11, com as análises estatísticas de temperatura, para o período de 16 e 17 de fevereiro de 2008, a correlação linear de Pearson (R) é positiva para todas as estações, apresentando valores maiores que 0,5. Assim, para a variável estudada as séries, simuladas e observadas, variam simultaneamente mas não com correlação linear tão boa como os outros casos. No índice de concordância (d), para ambas as estações os valores são relativamente baixos.

No erro médio, assim como nos demais casos estudados, observar-se valores subestimados pelo modelo, com valores de ME negativos.

De acordo com o MSE observa-se que as diferenças entre o observado e o estimado para a variável temperatura, assim como no caso anterior, contém os maiores valores nos aeroportos Campos dos Afonsos e Galeão, sendo o de Afonsos a maior. Já pela RMSE isso se confirma com o menor erro para temperatura no Galeão, e sendo ainda com pouca diferença das outras para temperatura a de maior erro no Campos dos Afonsos. E após a remoção do desvio médio da RMSE, em  $RMSE_{ub}$  observamos que as estações passam a ter valores parecidos, em torno de 2.

Tabela 11: Análise Estatística da temperatura simulada com a observada para o período (16-17 de fevereiro de 2008)

	<b>S.Dumont</b>	<b>Galeão</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>Afonsos</b>
<b>S(o)</b>	2,78138	3,45832	4,11437	3,71802
<b>S(x)</b>	1,79261	1,41006	1,76505	1,96652
<b>ME</b>	-4,22116	-7,36116	-5,05558	-8,08604
<b>MSE</b>	23,04332	61,46197	34,49652	73,08489
<b>RMSE</b>	4,80035	7,83977	5,87337	8,54897
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,28585	2,69727	2,98958	2,77502
<b>R</b>	0,57406	0,68421	0,76465	0,68317
<b>D</b>	0,53491	0,44624	0,57110	0,46060

Pela metodologia de PIELKE (2002), satisfazem os critérios primeiro e ultimo para esse período, sendo o segundo não satisfeito. Ainda assim qualidade da simulação é boa.

Na Figura 28, estão dispostos os dados de temperatura observadas e simuladas em cada uma das quatro estações consideradas. Observa-se que não se diferem muito no comportamento entre si e para ambas as estações. Pode-se notar também, que como no caso anterior, mas para esse ainda mais evidente nos gráficos, que assim como já obtido a partir da estatística, através do EM, os dados modelados tendem a subestimar o observado.

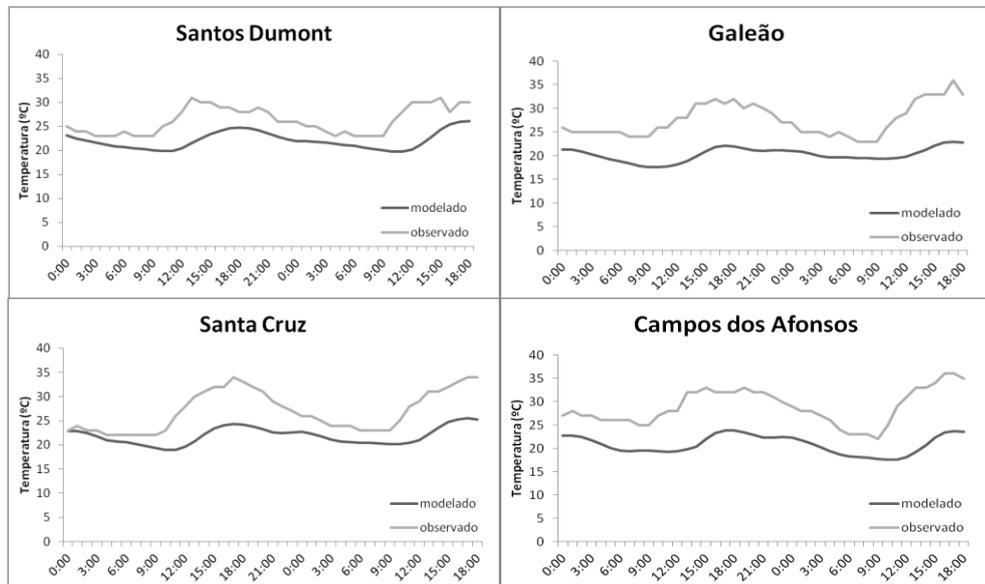


Figura 28 - Temperatura observada e modelada nos dias 16 e 17 de fevereiro de 2008

## 6. CONCLUSÕES

A avaliação dos dados de concentração de  $PM_{10}$  registrados entre 1998 e 2008 revelou um significativo comprometimento da qualidade do ar na RMRJ. Analisando as condições meteorológicas dominantes durante dias quando diversas estações de monitoramento registraram valores de concentração superiores ao PNQA, foi possível verificar a atuação do ASAS, a ausência de precipitação e a ocorrência de inversões térmicas na baixa troposfera. Esses resultados confirmam a forte relação entre episódios de concentração e as condições atmosféricas na região.

A utilização do modelo BRAMS na simulação de variáveis diretamente ligadas a altas concentrações de  $PM_{10}$  na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), revelou uma boa eficiência deste em simular condições atmosféricas relacionadas ao episódio.

Na maioria dos casos simulados foi possível observar condições atmosféricas semelhantes, um resumo destas está disposto na Tabela 12. Estas condições também estão de acordo com as condições observadas nos episódios em questão. Em geral, as condições foram: umidade relativa baixa às 18Z, nesse horário foram registrados os menores percentuais de umidade; temperaturas em torno de  $35^{\circ}C$  e  $25^{\circ}C$ , ventos fracos e inversão térmica abaixo de 300 metros. No último caso em que a umidade foi maior, a altura da CLP foi a menor, chegando no máximo a 450 metros.

Nas análises estatísticas foram encontradas, em geral, casos com altas correlações, para temperatura, e em geral, positiva, nas estações, indicando que as séries simuladas e observadas variam linearmente. Também altos valores de concordância foram encontrados na maioria dos casos. É possível notar também que os valores nos casos estudados, em geral, foram subestimados pelo modelo.

Tabela 12: Condições meteorológicas dos casos simulados no modelo Brams

<b>Simulações</b>	<b>Umidade Relativa (%) às 18Z</b>	<b>Temperatura (°C) às 18Z</b>	<b>Intensidade do vento</b>	<b>Altura da Camada Limite Planetária (CLP)</b>
<b>1º Caso</b>	Abaixo de 40%	Entre 35°C e 25°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros
<b>2º Caso</b>	Entre 30% a 10%	Entre 35°C e 25°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros
<b>3º Caso</b>	Abaixo de 40%	Entre 35°C e 25°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros
<b>4º Caso</b>	Entre 60% a 40%	Entre 35°C e 25°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros
<b>5º Caso</b>	Abaixo de 60%	Entre 35°C e 30°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros
<b>6º Caso</b>	Abaixo de 70%	Entre 35°C e 25°C	Ventos fracos	Inversão térmica abaixo de 300 metros

## 7. REFERÊNCIAS

BRAGA, A., PEREIRA, L.A. A., SALDIVA, P. H. N. **Poluição Atmosférica e seus Efeitos na Saúde Humana**. In: Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os próximos 20 anos, Campinas. 2002.

CANÇADO, J., E., D., BRAGA, PEREIRA, L., A., A., ARBEX, M., A., SALDIVA, P., H., N., SANTOS, U., P. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. 2006

CARVALHO, V. S. B., ROCHA, C. R. M., ANDRADE, M. F., FREITAS, E. D. **Avaliação dos resultados produzidos pelo modelo SPM-BRAMS para um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio registrado sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasil**.

CAVALCANTI, P. M. P. S. **Avaliação dos impactos causados na qualidade do ar pela geração termelétrica**. 148 f.. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Coordenação de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR**. Resolução n. 03, de 28 de junho de 1990.

CORRÊA, T. S.; CARVALHO, V. S. B. **Análise de condições meteorológicas durante episódios de poluição por material particulado na RMRJ**. XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Gramado – RS, 2012

CORRÊA, T. S.; FERREIRA, G. W. S.; CARVALHO, V. S. B. **A influência das condições meteorológicas na ocorrência de altas concentrações de PM10 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. VII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. Santa Maria – RS. 2011

DEGRAZIA, F. C., CAMPOS VELHO, H. F., CINTRA, R. R., BARBOSA, J. P. S., MORAIS, M. R. **Sistema de Previsão da Qualidade do Ar para o Vale do Paraíba**. 2007.

GOUVEIA, N., MENDONÇA, G. A. S., LEÓN, A. P., CORREIA, J. E. M., JUNGER, W. L., FREITAS, C. U., DAUMAS, R. P., MARTINS, L. C., GIUSSEPE, L., CONCEIÇÃO, G. M. S., MANERICH, A., CUNHA-CRUZ, J. **Air pollution and health effects in two brazilian metropolis**. Epidemiologia e Serviços de Saúde 12 (1), 29-40, 2003.

GUERRA, F. P., MIRANDA, R. M. **Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM<sub>2,5</sub> na RMRJ e na RMSP**. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT GMBH (FEEMA/GTZ). **Qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro. 76 p, 1995.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA), 2008. **Relatório de qualidade do ar no Estado do Rio de Janeiro – 2007**. Rio de Janeiro, 2008. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Update and revision of WHO air quality guidelines for Europe. 2000.

LYRA, D. G. P., TOMAZ, E. **A influência da meteorologia na dispersão dos poluentes atmosféricos da Região Metropolitana De Salvador**. 2006.

MAZZOLI, C. R. R., CARVALHO, V. S. B., FREITAS, E. D., ANDRADE, M. F., MARTINS, L. D.. **Utilização de métodos estatísticos para avaliação da acurácia dos resultados de simulações numéricas da concentração de ozônio gerados pelos modelos CIT, SPM-BRAMS E WRF/CHEM**.

MOREIRA, D. M., TIRABASSI, T., MORAES, M. R. **Meteorologia e poluição atmosférica**. 2008.

PIELKE SR., R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling. International Geophysics Series.** 2ª. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 78, 676 p, 2002.

R. San José, A. Baklanov, R.S. Sokhi, K. Karatza and J.L. Pérez. **W17: AIR QUALITY MODELLING: STATE-OF-THE-ART.** 2006.

SCHWARTZ, J., J., DOCKERY, D.W. **Increased mortality in Philadelphia associated with daily air pollution concentrations.** Am Rev Respir Dis 1992;145:600-4.

SCHWARTZ, J. **Air pollution and children's health.** Pediatr 2004;113(Suppl 4):1037-43.

WALDHEIM, P. V. ; ARAUJO, R. M. M. ; CARVALHO, V. S. B. . **Relação entre altas concentrações de partículas inaláveis e o condicionamento meteorológicos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro entre 2000 e 2005.** In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. A meteorologia e a Sociedade, 2006.