

**Universidade Federal de Itajubá**  
**Instituto de Recursos Naturais**  
**Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**

**Impacto da estabilidade atmosférica na concentração de poluentes na  
Região Metropolitana do Rio de Janeiro**

**Wilson Willian da Silveira**

**Itajubá**  
**2019**

**Universidade Federal de Itajubá**  
**Instituto de Recursos Naturais**  
**Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**

**Impacto da estabilidade atmosférica na concentração de poluentes na  
Região Metropolitana do Rio de Janeiro**

**Wilson Willian da Silveira**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Orientadora:** Vanessa Silveira Barreto  
Carvalho

**Itajubá**  
**2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela fé e força durante o caminho trilhado.

Aos meus pais Wilson e Antônia, meus irmãos Thaís e Wesley pelo apoio e confiança durante o mestrado.

A professora orientadora Vanessa S. B. Carvalho, pela confiança depositada, paciência ao longo dos seis anos, graduação e mestrado, e pelos ensinamentos passados.

Aos professores do mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelos ensinamentos compartilhados.

Aos amigos da graduação, mestrado e da minha cidade, pela amizade e companheirismo ao longo do curso.

À Secretaria de Meio Ambiente do Município do Rio de Janeiro, ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos e a Rede de Meteorologia da Aeronáutica pelos dados cedidos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo auxílio financeiro e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte acadêmico.

Aos meus pais Wilson e  
Antônia.

## RESUMO

Frequentemente, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), as estações de monitoramento registram valores de concentração de material particulado (PM<sub>10</sub>) e ozônio (O<sub>3</sub>) acima dos valores referências proposto pela Organização Mundial da Saúde, como seguros para a saúde da população. A RMRJ atualmente possui, uma população de 12,5 milhões de habitantes, mais de 4,9 milhões de veículos e uma alta concentração de indústrias com alto potencial poluidor para a atmosfera. Muitas vezes, as condições meteorológicas aliadas as altas taxas de emissões de poluentes atmosféricos e a complexa topografia da região favorecem a ocorrência de altas concentrações de PM<sub>10</sub> e a formação de O<sub>3</sub>, por diversos dias consecutivos. Nesse contexto, esse estudo verificou a influência de condições meteorológicas, em particular com a avaliação da estabilidade atmosférica, em 4 períodos quando foi observada a ocorrência de altas concentrações de O<sub>3</sub> ou PM<sub>10</sub> em dias consecutivos. O estudo utilizou o modelo numérico de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF) para simulação das condições e variáveis meteorológicas favoráveis para manutenção de alta concentração de O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub>, juntamente com os dados observados para a RMRJ, cartas sinóticas e imagens de satélite. Durante os 4 períodos, foi possível identificar a influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) associado a condições de céu-claro, leve subsidência do ar e ventos fracos. A partir da aplicação de análises estatísticas, verificou-se que o modelo simulou, com coerência, a temperatura do ar e a umidade do ar, durante os períodos e para a maioria das estações. O modelo e os dados de vento observados também indicaram a atuação da brisa marítima durante a tarde, verificando ventos fracos durante um período, sendo assim favoráveis a manutenção de poluentes. Durante os outros 3 períodos, foi verificado a influência da brisa marítima na dispersão de poluentes, dentro da RMRJ. Foi possível verificar que o modelo representou, em geral, de forma coerente a altura da CLP e estabilidade atmosférica. A verificação do impacto da estabilidade atmosférica nas concentrações de poluentes, resultados que predominância de condições estáveis para ambos os poluentes.

**Palavras-Chave:** RMRJ, Ozônio, Material Particulado, Condições Meteorológicas, ASAS, Estabilidade Atmosférica.

## **ABSTRACT**

Frequently in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ), monitoring stations record concentrations of particulate matter (PM<sub>10</sub>) and ozone (O<sub>3</sub>) above the reference values proposed by the World Health Organization, established safe for the health of the population. The MARJ has a population of 12,5 million inhabitants, over 4,9 million vehicles and a high concentration of industries with high polluting potential into the atmosphere. Often weather conditions combined with high atmospheric pollutant emissions and the complex topography of the region favor the occurrence of high concentrations of PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub> formation for several consecutive days. In this context, this study verified the influence of meteorological conditions, in particular with the evaluation of the atmospheric stability, in 4 periods when high concentrations of O<sub>3</sub> or PM<sub>10</sub> were observed on consecutive days. The study utilized the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale numerical model for simulation of conditions and favorable meteorological variables for maintenance of high concentration of O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub>, together with the observed data for MARJ, synoptic charts and satellite images. During the four periods, it was possible to identify the influence of the South Atlantic Subtropical Anticyclone (SASA) associated with clear sky conditions, slight air subsidence and weak winds. From the application of statistical methods it was verified that the model simulated with coherence, the air temperature and the humidity of the air during the periods and for the majority of the stations. The model and observed wind data also indicated the performance of the sea breeze during the afternoon, checking weak winds during a period, thus favoring the maintenance of pollutants, and in the other 3 periods, the influence on the dispersion of pollutants within the MARJ. It was possible to verify that the model represented, in general, consistently the height of the PBL and atmospheric stability. The verification of the impact of atmospheric stability on concentrations of pollutants, results that predominance of stable conditions for both pollutants.

**Keywords:** MARJ, Ozone, Particulate Material, Weather Conditions, SASA, Atmospheric Stability.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Evolução diurna da altura da CLP (Fonte: STULL, 1988). .....	9
<b>Figura 2:</b> Perfil de temperatura de uma atmosfera estável e taxa adiabática úmida (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006). .....	11
<b>Figura 3:</b> Perfil de temperatura de uma atmosfera instável e taxa adiabática seca (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006). .....	12
<b>Figura 4:</b> (a) inversão de radiação noturna e (b) inversão de subsidência (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006). .....	13
<b>Figura 5:</b> Distribuição espacial das estações de monitoramento consideradas na RMRJ. (1) Copacabana, (2) São Cristóvão, (3) Centro, (4) Tijuca, (5) Irajá, (6) Bangu, (7) Campo Grande e (8) Pedra Guaratiba (Fonte: Google Earth). .....	19
<b>Figura 6:</b> Localização da estação do (1) Aeroporto Internacional Tom Jobim (Fonte: Google Earth). .....	20
<b>Figura 7:</b> Modelo esquemático dos perfis verticais de temperatura potencial e umidade específica durante os períodos diurno e noturno (Fonte: SÁNCHEZ, 2017). .....	24
<b>Figura 8:</b> Domínio WRF, d01: grade 27Km, d02: grade 9Km e d03: grade 3Km. ....	26
<b>Figura 9:</b> Recorte das Cartas Sinótica de (a) 06/08/2013 às 00Z e (c) de 10/02/2014 às 12Z, referente ao deslocamento da ASAS e Pressão ao nível médio do mar e vento, através da grade de 27 Km, WRF (b) 06/08/2013 às 00Z e (d) de 10/02/2014 às 12Z. ....	30
<b>Figura 10:</b> Recorte imagens de satélite (GOES, colorida) das (a) 15Z de 03 de agosto de 2013 e (b) 12Z de 10 de fevereiro de 2014; nebulosidade e precipitação, através da grade de 3 Km, WRF, (c) 15Z de 03 de agosto de 2013 e (d) 12Z de 10 de fevereiro de 2014. ....	31
<b>Figura 11:</b> Frequência de ocorrência das classes de cobertura de nuvens utilizadas em mensagens METAR para cada dia (a) no período entre 01/08/2013 a 07/08/2013 e (b) no período entre 10/02/2014 a 14/02/2014 no aeroporto SBGL. CAVOK- Ceiling and Visibility Okay; SKC- Sky clear (clear below 12,000 for ASOS/AWOS); NSC- No significant clouds; FEW- Few (1/8 to 2/8 sky cover); SCT- Scattered (3/8 to 4/8 sky cover); BKN- Broken (5/8 to 7/8 sky cover); OVC- Overcast (8/8 sky cover). .....	32
<b>Figura 12:</b> Rosa dos Ventos entre as 13 e 18 horas, estação Pedra de Guaratiba do período entre (a) 01/08/2013 a 07/08/2013, (b) 10/02/2014 a 14/02/2014. ....	33
<b>Figura 13:</b> Vento e Razão de Mistura de 02 de agosto de 2013 (a) 15Z, (b) 18Z, (c) 21Z e Vento e Razão de Mistura de 12 de fevereiro de 2014 (d) 17Z, (e) 19Z e (f) 21Z, através da grade de 3 Km, WRF. ....	34

<b>Figura 14:</b> Comportamento da concentração de PM <sub>10</sub> ao longo do dia 03 de agosto de 2013, nas estações da Tijuca e Irajá. ....	35
<b>Figura 15:</b> Altura da CLP simulada e observada de 01/08/2013 a 07/08/2013 do aeroporto SBGL. ....	41
<b>Figura 16:</b> Altura da CLP simulada e observada de 10/02/2014 a 14/02/2014 do aeroporto SBGL. ....	42
<b>Figura 17:</b> Perfil vertical simulado e observado (a) temperatura do ponto de orvalho de 06/08/2013 às 12Z (b) de temperatura potencial de 06/08/2013 às 12Z (c) temperatura do ponto de orvalho de 14/02/2014 às 12Z (d) temperatura potencial de 14/02/2014 às 12Z. Onde Td1: Td observada (em azul), Td2: Td simulada (em vermelho), TP1: $\theta$ observada (em preto) e TP2: $\theta$ simulada (em verde). ....	43
<b>Figura 18:</b> Estabilidade e concentração de PM <sub>10</sub> durante período de 01/08/2013 a 07/08/2013 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	44
<b>Figura 19:</b> Estabilidade e Altura da CLP durante período de 01/08/2013 à 07/08/2013 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	45
<b>Figura 20:</b> Estabilidade e concentração de PM <sub>10</sub> durante período de 10/02/2014 a 14/02/2014 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	46
<b>Figura 21:</b> Estabilidade e Altura da CLP durante período de 10/02/2014 a 14/02/2014 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	46
<b>Figura 22:</b> Recorte Cartas Sinótica de (a) 21/01/2014 às 12Z e (c) de 21/09/2015 às 00Z, referente ao deslocamento da ASAS e Pressão ao nível médio do mar e vento, através da grade de 27 Km, WRF, (b) 21/01/2014 às 12Z e (c) de 21/09/2015 às 00Z. ....	48
<b>Figura 23:</b> Recorte imagens de satélite (GOES, colorida) das (a) 14Z de 26 de janeiro de 2014 e (b) 14Z de 19 de setembro de 2015; nebulosidade e precipitação, através da grade de 3 Km, WRF, (c) 14Z de 26 de janeiro de 2014 e (d) 14Z de 19 de setembro de 2015. ....	49
<b>Figura 24:</b> Frequência de ocorrência das classes de cobertura de nuvens utilizadas em mensagens METAR para os horários entre 06 e 18 Hora Local para cada dia no (a) período entre 21/01/2014 a 26/01/2014, no aeroporto SBGL e (b) no período entre 18/09/2015 a 23/09/2015, no aeroporto SBGL. CAVOK- Ceiling and Visibility Okay; SKC- Sky clear (clear below 12,000 for ASOS/AWOS); NSC- No significant clouds; FEW- Few (1/8 to 2/8 sky cover); SCT- Scattered (3/8 to 4/8 sky cover); BKN- Broken (5/8 to 7/8 sky cover); OVC- Overcast (8/8 sky cover). ....	50
<b>Figura 25:</b> Rosa dos Ventos entre as 13 e 18 horas, estação Pedra de Guaratiba do período entre (a) 21/01/2014 a 26/01/2014, (b) 18/09/2015 a 23/09/2015. ....	51

<b>Figura 26:</b> Vento e Razão de Mistura de 23 de janeiro de 2014 (a) 15Z, (b) 19Z, (c) 21Z e Vento e Razão de Mistura de 21 de setembro (d) 16Z, (e) 19Z e (f) 21Z, através da grade de 3 Km, WRF. ....	52
<b>Figura 27:</b> Comportamento da concentração de O <sub>3</sub> ao longo do dia 21 de setembro de 2015, nas estações da Tijuca e Irajá. ....	53
<b>Figura 28:</b> Altura da CLP simulada e observada de 21/01/2014 a 26/01/2014 do aeroporto SBGL. ....	58
<b>Figura 29:</b> Altura da CLP simulada e observada de 18/09/2015 a 23/09/2015 do aeroporto SBGL. ....	59
<b>Figura 30:</b> Perfil vertical simulado e observado (a) de temperatura do ponto de orvalho de 22/01/2014 às 00Z (b) de temperatura potencial de 25/02/2014 às 00Z (c) de temperatura do ponto de orvalho de 18/09/2015 às 12Z (d) de temperatura potencial de 19/09/2015 às 00Z. Onde: Td1 : Td observada (em azul), Td2: Td simulada (em vermelho), TP1 : $\theta$ observada (em preto) e TP2: $\theta$ simulada (em verde). ....	60
<b>Figura 31:</b> Estabilidade e concentração de O <sub>3</sub> durante período de 21/01/2014 a 26/01/2014 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	61
<b>Figura 32:</b> Estabilidade e concentração de O <sub>3</sub> durante período de 18/09/2015 a 23/09/2015 na estação de Pedra de Guaratiba. ....	62

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Valores propostos pela OMS como referência para os padrões de qualidade do ar.	6
<b>Tabela 2:</b> Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA N°491 de 19/11/2018).	7
<b>Tabela 3:</b> Classificação da Estabilidade atmosférica método Pasquill-Gifford (P-G) (ZANNETTI, 1990).	14
<b>Tabela 4:</b> Classificação da estabilidade atmosférica método Turner (ZANNETTI, 1990).	14
<b>Tabela 5:</b> Classificação da Estabilidade atmosférica a partir do número de Richardson (CLIFTON et al., 2013, SIQUEIRA, 2017).	16
<b>Tabela 6:</b> Classificação da Estabilidade atmosférica pelo comprimento de Monin-Obukhov (L) (ARGYLE; WATSON, 2014; SIQUEIRA, 2017).	16
<b>Tabela 7:</b> Concentrações médias de 24 horas de PM <sub>10</sub> , em $\mu\text{gm}^{-3}$ , registradas na RMRJ durante o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.	22
<b>Tabela 8:</b> Concentrações médias de 24 horas de PM <sub>10</sub> , em $\mu\text{gm}^{-3}$ , registradas na RMRJ durante o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.	22
<b>Tabela 9:</b> Máximas concentrações de O <sub>3</sub> , em $\mu\text{gm}^{-3}$ , registradas na RMRJ durante o período de 21/01/2014 a 26/01/2014.	23
<b>Tabela 10:</b> Máximas concentrações de O <sub>3</sub> , em $\mu\text{gm}^{-3}$ , registradas na RMRJ durante o período de 18/09/2015 a 23/09/2015.	23
<b>Tabela 11:</b> Configuração do modelo e parametrizações físicas.	26
<b>Tabela 12:</b> Média de temperatura máxima e média de temperatura, em °C, média de umidade relativa mínima e média de umidade relativa, em %, registradas na RMRJ durante o período de 01/08/2013 a 07/08/2013 e o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.	36
<b>Tabela 13:</b> Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.	37
<b>Tabela 14:</b> Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.	38
<b>Tabela 15:</b> Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.	38
<b>Tabela 16:</b> Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.	39
<b>Tabela 17:</b> Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 01/08/2013 a 07/08/2013 do aeroporto SBGL.	40

<b>Tabela 18:</b> Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 10/02/2014 a 14/02/2014 do aeroporto SBGL. ....	41
<b>Tabela 19:</b> Média de temperatura máxima e média de temperatura, em °C, média de umidade relativa mínima e média de umidade relativa, em %, registradas na RMRJ durante o período de 21/01/2014 a 26/01/2014 e o período de 18/09/2015 a 23/09/2015. ....	54
<b>Tabela 20:</b> Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 21/01/2014 a 26/01/2014. ....	55
<b>Tabela 21:</b> Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 18/09/2015 a 23/09/2015. ....	55
<b>Tabela 22:</b> Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 21/01/2014 a 26/01/2014. ....	56
<b>Tabela 23:</b> Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 18/09/2015 a 23/09/2015. ....	57
<b>Tabela 24:</b> Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 21/01/2014 a 26/01/2014 do aeroporto SBGL. ....	57
<b>Tabela 25:</b> Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 18/09/2015 a 23/09/2015 do aeroporto SBGL. ....	58

## **Lista de Siglas e Abreviaturas**

ASAS- Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

AT- Atmosfera Livre

CE- Camada de Entranhamento

CLA- Camada Limite Atmosférica

CLE- Camada Limite Estável

CLN- Camada Limite Noturna

CLP- Camada Limite Planetária

CLS- Camada Limite Superficial

CM- Camada de Mistura

CMR- Camada de Mistura Residual

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

COV- Compostos Orgânicos Voláteis

CPTEC/INPE- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

d- Índice de Concordância

GFS- Global Forecast System

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INEA- Instituto Estadual Do Ambiente

L- Comprimento de Monin-Obukhov

ME- Erro Médio

NCDC/NOAA- National Climatic Data Center do National Oceanic and Atmospheric Administration

NO- Óxido Nítrico

NO<sub>2</sub>- Dióxido de Nitrogênio

NO<sub>x</sub> - Óxidos de nitrogênio

O<sub>3</sub>- Ozônio

OMS- Organização Mundial da Saúde

P-G- Pasquill-Gifford

PM<sub>10</sub>- Material Particulado com diâmetro inferior a 10 µm

PM<sub>2,5</sub>- Material Particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm

PNQA- Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

PROCONVE- Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores

PRONACOP- Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial  
PRONAR- Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar  
r- Coeficiente de correlação de Pearson  
REDEMETS- Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica  
Ri- Número de Richardson Gradiente  
RMRJ- Região Metropolitana do Rio de Janeiro  
RMSE<sub>dm</sub>- Raiz do erro médio quadrático com remoção do desvio médio  
RSME- Raiz do erro médio quadrático  
SMAC- Secretaria de Meio Ambiente do Município do Rio de Janeiro  
SO<sub>2</sub>- Dióxido de Enxofre  
Td- Temperatura do ponto de orvalho  
WRF- Weather Research and Forecasting Model  
Γ<sub>a</sub>- Taxa de Variação Vertical de Temperatura Ambiente  
Γ<sub>d</sub>- Taxa Adiabática Seca  
Γ<sub>z</sub>- Taxa Adiabática Úmida  
Θ- temperatura potencial  
Θ<sub>v</sub>- temperatura potencial virtual  
σ - Desvio padrão

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Objetivo Geral:</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos:</b> .....	<b>4</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1 Qualidade do Ar</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2 A meteorologia da poluição do ar</b> .....	<b>8</b>
3.2.1. Camada Limite Planetária .....	8
3.2.2 Estabilidade Atmosférica .....	10
3.2.3 Relação com as condições atmosféricas .....	17
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 Fonte de dados e seleção dos episódios de poluição</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2 Seleção dos períodos com dias consecutivos de poluição do ar</b> .....	<b>21</b>
<b>4.3 Análise das condições de estabilidade</b> .....	<b>23</b>
<b>4.4 Simulações com o WRF</b> .....	<b>25</b>
<b>4.5 Comparações com as observações</b> .....	<b>27</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>29</b>
<b>5.1 Análise para o PM<sub>10</sub></b> .....	<b>29</b>
5.1.1 Verificação dos resultados do modelo WRF: análise de grande escala e comparação com dados observados .....	29
5.1.2 Verificação da representação do perfil vertical e da estabilidade da atmosfera .....	39
5.1.3 Avaliação do impacto da estabilidade atmosférica nas concentrações de PM <sub>10</sub> .....	43
<b>5.2 Análise para o O<sub>3</sub></b> .....	<b>47</b>

5.2.1 Verificação dos resultados do modelo WRF: análise de grande escala e comparação com dados observados.....	47
5.1.2 Verificação da representação do perfil vertical e da estabilidade da atmosfera .....	57
5.2.3 Avaliação do impacto da estabilidade atmosférica nas concentrações de O <sub>3</sub> .....	60
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. Introdução

O processo de industrialização e o constante crescimento de regiões urbanas deram origem às megacidades, regiões de aglomerados populacionais com mais de 10 milhões de habitantes, que representam grandes fontes de poluentes para a atmosfera (LAWRENCE et al., 2007). A América do Sul, por exemplo, possui 7 megacidades, duas localizadas no Brasil: as regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro (GALLARDO, 2012).

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), foco deste estudo, abrange 19 municípios, com uma população de 12,5 milhões de habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017). A RMRJ possui a segunda maior frota veicular do país, com 4,9 milhões de veículos, e alta concentração de indústrias com alto potencial poluidor para a atmosfera. Na região, estima-se que as fontes veiculares são responsáveis por 77% do total de emissões de poluentes atmosféricos e as fontes fixas, industriais, responsáveis por 23% (INEA, 2016).

O monitoramento da qualidade do ar na RMRJ teve início no final da década de 60 (CAVALCANTI, 2003) e foi expandida significativamente ao longo dos últimos anos, porém, o número de estações de monitoramento da qualidade do ar ainda são insuficientes quando analisada a extensão territorial da região, não homogênea. Além da variabilidade de tipologia e da intensidade de exposição a fontes emissoras, essas estações podem estar expostas a fatores que podem impactar significativamente nos valores de concentração de poluentes registrados. Fatores como a topografia complexa da região, presença de corpos d'água, presença de prédios e construções significativas influenciam diretamente no processo de dispersão podendo diminuir a escala de representatividade das estações de monitoramento.

Frequentemente, a RMRJ apresentava valores superiores aos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PNQA) estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90, principalmente, no que se refere a altas concentrações de material particulado com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) e de ozônio ( $\text{O}_3$ ) (INEA, 2015; INEA, 2016), porém a mesma revogada recentemente em 19 de novembro de 2018, com a entrada em vigor da Resolução CONAMA 491/18. Portanto até o momento não há relatório de qualidade do ar do Instituto Estadual Do Ambiente (INEA), com a nova resolução em vigor. O impacto das condições de estabilidade atmosférica nas concentrações de  $\text{PM}_{10}$  e o  $\text{O}_3$  serão o objeto de estudo desta dissertação.

O  $\text{O}_3$  é formado através de processos químicos na atmosfera. Na estratosfera, o  $\text{O}_3$  funciona como um filtro de raios UV-C, que são altamente maléficos quando em contato com

a pele do ser humano; contudo, na troposfera o  $O_3$  é considerado um poluente, e por ser prejudicial à saúde humana, ocasionando dores de cabeça, irritação na garganta e vias respiratórias, além de contribuir para o envelhecimento precoce (MIRANDA et al., 2012; MIROWSKY; GORDON, 2015). O  $O_3$  é produzido na troposfera, através de uma série de reações fotoquímicas na presença da radiação solar. Sua formação torna-se favorável em condições de altas temperaturas, ventos fracos, na presença de seus precursores e consequentemente em quando há alta incidência de radiação solar, óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e compostos orgânicos voláteis (COV) (SEINFELD; PANDIS, 2006; MARTINS, 2006; CARVALHO, 2010). Os  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ) são emitidos através de fontes antropogênicas, como atividades industriais e principalmente pela frota veicular, já os COVs podem ser emitidos por fontes antropogênicas e por fontes biogênicas.

O  $PM_{10}$  consiste em partículas sólidas e líquidas com diâmetros que variam de nanômetros (nm) a dezenas de micrômetros ( $\mu m$ ) em suspensão na atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2006). Sua composição química, tamanho e concentração estão diretamente associadas as fontes de emissão e são as principais características que determinam os efeitos que o poluente poderá causar à saúde humana e ao meio ambiente (YNOUE, 2004). Esse poluente é comumente relacionado à taxa de mortalidade decorrente de doenças cardiovasculares; asma e bronquite também são frequentemente associadas à exposição a esse poluente (BRAGA et al., 2001) uma vez que a composição química do material particulado pode acarretar ou intensificar doenças respiratórias. O  $PM_{10}$  é proveniente de atividades agrícolas, industriais, veiculares, construções, cinzas vulcânicas, poeira de ruas e estradas, pólenes, sal marinho, fungos, podendo atingir até traqueias, brônquios e bronquíolos (ARBEX, 2012). A exposição crônica a este poluente pode ainda causar remodelamento brônquico, doença pulmonar obstrutiva crônica e o desenvolvimento de câncer (ARBEX, 2012; WU et al., 2017).

Estudos como o de Carvalho et al. (2012), Santos et al. (2016), Monti et al. (2016), entre outros, destacam a influência das condições, meteorológicas como vento, precipitação, temperatura, umidade, entre outras, na concentração de poluentes em regiões metropolitanas brasileiras. Foi verificado que, em condições de ventos intensos e alta precipitação, poluentes como  $PM_{10}$  e  $O_3$  registram menores concentrações (CARVALHO et al., 2012; SANTOS et al., 2016); altas temperaturas, ausência de precipitação (e, consequentemente, pouca nebulosidade) e ventos fracos foram associadas ao aumento das concentrações de  $O_3$  (CARVALHO et al., 2012; JANJAI et al., 2016). No sudeste do Brasil, a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) quando deslocado à oeste da sua posição,

apresenta predominantemente ventos fracos, baixa nebulosidade e, conseqüentemente, ausência de precipitação, contribuindo para o aumento de concentração de poluentes conforme identificado por Sánchez-Ccoyllo et al. (2006), Carvalho (2010), Silva Júnior, et al. (2013) e Santos et al. (2016).

A estabilidade atmosférica possui grande relevância para a qualidade do ar e influencia diretamente a concentração de poluentes na atmosfera. Em condições de atmosfera estável, os movimentos de convecção e turbulência são inibidos, o que contribui para a manutenção de altas concentrações de poluentes como, por exemplo, o PM<sub>10</sub> e os precursores para formação do O<sub>3</sub> na baixa troposfera; enquanto que, em condições de atmosfera instável, os movimentos convectivos e a turbulência do ar são favorecidos, promovendo a dispersão de poluentes na atmosfera (ZHANG et al., 2012; CRAWFORD, et al., 2015; WANG, et al., 2016).

Ao longo das últimas décadas, diversos estudos avaliaram os resultados obtidos com modelos meteorológicos na representação de condições e variáveis meteorológicas. Por exemplo, a comparação dos resultados do WRF com dados observados revelou para a região do Mediterrâneo a subestimativa dos valores de temperatura e a superestimativa dos valores de pressão e de velocidade do vento (Mylonas et al., 2018, para Skala, Grécia, e Tymvios et al., 2018, para o Chipre). Ambos os estudos apresentaram resultados satisfatórios quando simulada a altura da CLP. Shin e Hong (2011), verificaram através do modelo WRF, cinco parametrizações para CLP, chegando à conclusão que a CLP exerce grande influência nas variáveis próximas a superfície e que as mesmas são melhores simuladas quando estão sob condições de atmosfera neutra ou instável, do que em condições de atmosfera estável. (Qual o motivo?????) Já quando verificado o perfil vertical de temperatura potencial pelo mesmo as configurações de PBL não diferem entre si, e o modelo simula de forma satisfatória independentemente das condições de estabilidade.

Com base no explicitado, a utilização de modelos numéricos meteorológicos pode complementar as informações obtidas a partir do monitoramento e auxiliar na previsão da qualidade do ar, permitindo inclusive a análise de regiões onde não existem registros da concentração dos poluentes ou de variáveis meteorológicas.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral:**

Avaliar o impacto das condições de estabilidade atmosférica na qualidade do ar, através do uso de modelagem numérica (modelo WRF), durante dias quando episódios de altas concentrações de O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub> foram registradas na RMRJ.

### **2.2 Objetivos Específicos:**

- ▶ Definir os episódios de poluição através dos dados de concentração de O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub> observados;
- ▶ Verificar a representação das condições meteorológicas de grande escala e de escala local pelo modelo WRF;
- ▶ Examinar a relação entre os dados de concentração de poluentes observados com as condições meteorológicas.

### **3. Referencial Teórico**

#### **3.1 Qualidade do Ar**

Com o aumento constante da poluição do ar, vários estudos enfatizaram o efeito prejudicial que a poluição causa ao meio ambiente e à saúde humana, o que levou os governos de diversos países a estabelecerem metas para o monitoramento e políticas para o controle e a recuperação da qualidade do ar (SALDIVA et al., 1995; BRAGA et al., 1999).

No Brasil, o monitoramento da qualidade do ar teve início no início dos anos 60 no estado de São Paulo e, em 1967, no estado do Rio de Janeiro (INEA, 2016; CETESB, 2017). Contudo, apenas em 1976, a portaria MINTER n° 231/1976 estabeleceu padrões de qualidade do ar e diretrizes sobre o controle da poluição do ar no Brasil.

Com o rápido e desenfreado desenvolvimento das áreas urbanas no Brasil, e consequente aumento industrial e da frota veicular, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) instituiu o Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores (PROCONVE) através da Resolução n° 05 de 6 de maio de 1986 e o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) através da Resolução n° 05 de 15 de junho de 1989 (CONAMA, 1986; CONAMA, 1989). É válido destacar que o PRONAR tem como principal finalidade “permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica, com vistas à melhora da qualidade do ar, ao atendimento dos padrões estabelecidos e o não comprometimento da qualidade do ar nas áreas consideradas não degradadas” (CONAMA, 1989). Foram incorporados ao PRONAR instrumentos para a melhoria e controle da qualidade do ar como os programas: Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial (PRONACOP); Programa Nacional de Avaliação da Qualidade do Ar; Programa Nacional de Inventário de Fontes Poluidoras do Ar e Programas Estaduais de Controle da Poluição do Ar. Vale destacar que, após a criação do PRONAR, o PROCONVE foi incorporado ao mesmo (CONAMA, 1989).

Em 28 de junho de 1990, o PRONAR instituiu a Resolução CONAMA 03/90. A referida Resolução, que permaneceu vigente até 2018, visava o controle da qualidade do ar através do estabelecimento dos PNQA.

Em 2006, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006) propôs valores de referência para a concentração de alguns poluentes (Tabela 1) utilizando como base vários estudos epidemiológicos que apontam a ocorrência de doenças respiratórias e cardiovasculares em concentrações muito abaixo dos limites considerados seguros em diversos países do mundo,

como é o caso do Brasil. Destaca-se que os valores de referência indicavam limites bem mais restritivos do que os adotados pela Resolução CONAMA 03/90 principalmente no que se refere ao PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>; para o O<sub>3</sub>, os novos limites apresentavam uma alteração do período de 1 hora para 8 horas, o que tende a suavizar os números de violação referentes ao PNQA (CARVALHO, 2010).

**Tabela 1:** Valores propostos pela OMS como referência para os padrões de qualidade do ar.

<b>Poluentes</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Padrões µg/m<sup>3</sup></b>
<b>Partículas inaláveis (PM<sub>10</sub>)</b>	24 horas	50
	MAA <sup>1</sup>	20
<b>Partículas Finas (PM<sub>2,5</sub>)</b>	24 horas	25
	MAA <sup>1</sup>	10
<b>Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>)</b>	1 hora	200
	MMA <sup>1</sup>	40
<b>Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	10 minutos	500
	MMA <sup>1</sup>	20
<b>Ozônio (O<sub>3</sub>)</b>	8 horas	100

(Fonte: OMS, 2006)

1-Média aritmética anual.

Em 19 de novembro de 2018, considerando como os padrões proposto pela OMS (2006), o CONAMA instituiu novos padrões para qualidade do ar (Tabela 2), através da Resolução N° 491/18, considerando 4 fases, onde a fase final (PF) equivalente aos valores sugeridos pela OMS (2006) como seguros para a saúde da população. As fases sucessivas serão implementadas de acordo com os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente. A primeira etapa (PI-1) entrou em vigor, logo após publicação da resolução, com a revogação da resolução CONAMA 03/90.

**Tabela 2:** Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA N°491 de 19/11/2018).

Poluentes	Tempo de Amostragem	PI-1 µg/m <sup>3</sup>	PI-2 µg/m <sup>3</sup>	PI-3 µg/m <sup>3</sup>	PF µg/m <sup>3</sup>
Partículas inaláveis (PM <sub>10</sub> )	24 horas	120	100	75	50
	MAA <sup>1</sup>	40	35	30	20
Partículas Finas (PM <sub>2,5</sub> )	24 horas	60	50	37	25
	MAA <sup>1</sup>	20	17	15	10
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	1 hora	260	240	220	200
	MMA <sup>1</sup>	60	50	45	40
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	125	50	30	20
	MMA <sup>1</sup>	40	30	20	-
Ozônio (O <sub>3</sub> )	8 horas	140	130	120	100

(Fonte: RESOLUÇÃO CONAMA n° 491/18, 2018)

1-Média aritmética anual.

Vale salientar que diversos estudos apontam que as altas concentrações de poluentes constituem uma ameaça à saúde humana, principalmente em grandes centros urbanos, devido à grande circulação de veículos e alta concentração industrial (principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos), estando diretamente relacionada ao agravamento de doenças cardiovasculares, respiratórias e neurológicas, principalmente em crianças e idosos (PEREIRA et al., 2011; OLMO et al., 2011; MIRANDA et al., 2012). Outros estudos ainda indicam que a exposição frequente a poluentes estão relacionadas a incidência de alguns tipos de câncer (OMS, 2006; GOUVEIA et al., 2006, BRUNEKREFF et al., 2012). Os poluentes também afetam de forma direta o meio ambiente. A exposição de plantas à altas concentrações de alguns poluentes, principalmente gasosos, são altamente prejudiciais à algumas cultivares podendo afetar drasticamente suas estruturas, retardando o seu crescimento, proporcionando o crescimento de folhas com deformidade, promovendo a aparição de necroses e muitas vezes levando ao aumento da mortalidade em uma cultura (PINA et al., 2017).

## **3.2 A meteorologia da poluição do ar**

### **3.2.1. Camada Limite Planetária**

A atmosfera terrestre pode ser subdividida em quatro camadas, cuja classificação é definida a partir do perfil vertical de temperatura: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. No que se refere a qualidade do ar, a troposfera, camada mais próxima à superfície, é a mais importante. Por conta dos padrões observados dentro da troposfera, usualmente, faz-se necessário uma subclassificação dentro desta camada definindo-se a CLP e a Atmosfera Livre (AT) (STULL, 1988).

A CLP ou Camada Limite Atmosférica (CLA) é uma camada adjacente à superfície terrestre sendo diretamente influenciada pelos fenômenos que ocorrem próximos a esta (trocas de momentum, calor: difusão molecular, convecção e radiação). A altura da CLP varia principalmente de acordo com a turbulência térmica e mecânica, interação atmosfera superfície e turbulência induzida pelo terreno (HOLTON, 1992). A rugosidade gera atrito que influi no escoamento do vento horizontal. O vento submetido a terrenos irregulares produz os vórtices turbulentos; logo, quanto mais irregular o terreno, maior a dificuldade do vento em escoar horizontalmente. Em áreas urbanas, com construções de diferentes alturas, os movimentos turbulentos tendem a ser mais intensos e frequentes; do que a geração de turbulência em campos com terreno plano, onde a força de arraste é menor, a turbulência por rugosidade normalmente é menos intensa (STULL, 1988).

Em áreas que registram predominantemente baixas velocidades de vento, a influência da rugosidade do terreno deixa de ser o fator principal que rege à turbulência (HOLTON, 1992).

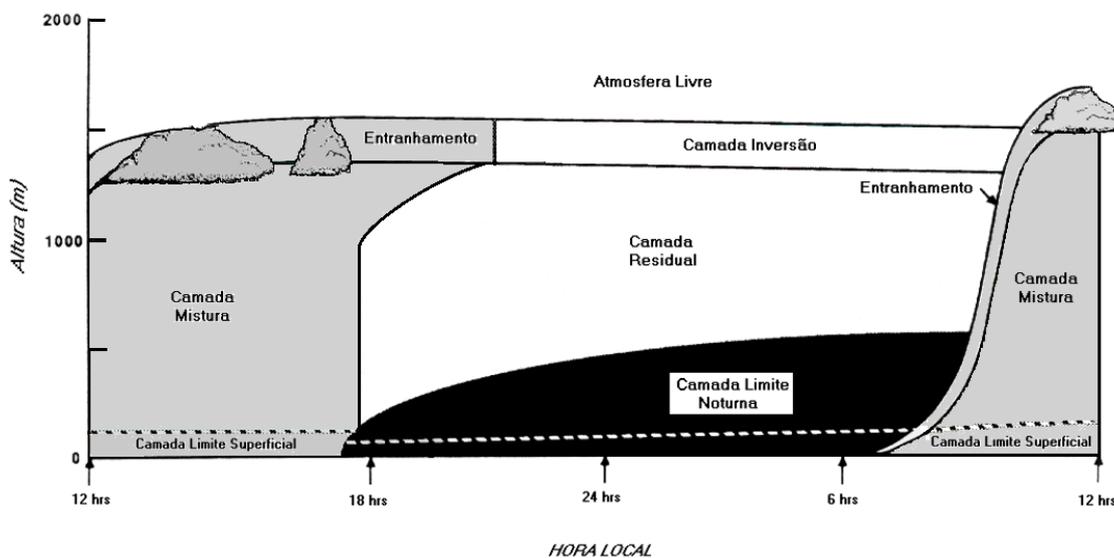
A incidência de radiação solar na superfície também promove o movimento turbulento na CLP influencia a altura desta camada. O solo absorve em média 50% da radiação de onda curta emitida pelo sol que chega sobre o mesmo, e emite radiação de onda longa, aquecendo o ar adjacente a superfície que adquire uma temperatura maior que o ar acima. Como o ar quente possui menor densidade em relação ao ar frio, o ar quente próximo a superfície tende a subir e o ar frio tende a descer, gerando movimentos verticais turbulentos (HARTMAN, 1994).

Como destacado anteriormente, a CLP não possui uma altura fixa, podendo variar de metros a quilômetros. Em geral, em latitudes médias, esta varia entre 30 m e 3 km, de acordo com a hora do dia e com a estação do ano (HOLTON, 1992). Sua altura depende principalmente da rugosidade, da transferência de calor (entre o solo e o ar adjacente) e da

intensidade do vento, que comandam a troca de calor (sensível e latente) e mistura na atmosfera (ARYA, 2000).

Durante o dia, a CLP apresenta uma extensão vertical maior do que no período noturno, quando podem ser identificadas 3 camadas distintas: Camada Limite Superficial (CLS), Camada de Mistura (CM) e Camada de Entranhamento (CE) (Figura 1). A CLS é a camada adjacente à superfície, corresponde a 10% da CLP e apresenta gradientes verticais intensos de umidade, temperatura e velocidade do vento. A CM representa a maior parte da CLP, devido à convecção térmica e ao cisalhamento do vento. A CE é a camada de transição entre a CLP e a AT e apresenta uma inversão no perfil de temperatura (STULL, 1988).

Durante o período noturno, a turbulência na CLP é menor, associando a extensão (profundidade) da camada à Camada Limite Estável (CLE), ou Camada Limite Noturna (CLN) (Figura 1). A extensão da CLE ocorre devido a inversão do perfil de temperatura durante o decorrer do período. Acima da CLE é comum observar a Camada de Mistura Residual (CMR), é uma camada que apresenta características convectivas remanescentes da CM. Essa camada não faz parte da CLE, uma vez que não se caracteriza como uma região turbulenta, e é normalmente usada para verificar a extensão da CLP durante o período diurno (STULL, 1988).



**Figura 1:** Evolução diurna da altura da CLP (Fonte: STULL, 1988).

Vale ressaltar que a dispersão dos poluentes na atmosfera depende das condições meteorológicas, principalmente, dentro da CLP (SEINFELD; PANDIS, 2006).

### 3.2.2 Estabilidade Atmosférica

A estabilidade atmosférica pode ser descrita como a resistência de inibir ou intensificar os movimentos verticais. Ela é rotineiramente estudada para uma melhor compreensão da dispersão de poluentes na atmosfera, por estar diretamente relacionada à intensidade dos vórtices turbulentos na CLP. A determinação das condições de estabilidade atmosférica requer a definição de alguns conceitos (HOLTON, 1992; ARYA, 2001):

- **Processo Adiabático:** ocorre quando uma parcela de ar comprime e aquece ao descender ou expande e resfria ao ascender na atmosfera, sem troca de calor com o ar do ambiente a sua volta.
- **Taxa Adiabática Seca ( $\Gamma_d$ ):** é a taxa de aquecimento ou resfriamento, de uma parcela de ar não saturada, ou seja, uma parcela com umidade relativa menor que 100%, em movimento ascendente ou descendente na atmosfera. Essa taxa de aquecimento ou resfriamento é de aproximadamente 9,8°C a cada 1 km.

$$\Gamma_d = \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_{p,air}} \quad (1)$$

Onde:  $dT$  é variação de temperatura,  $dz$  é a variação de altura,  $g$  é a aceleração da gravidade (9,80 m s<sup>-2</sup>) e  $C_p$  é o calor específico do ar seco à pressão constante (1004 JK<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>).

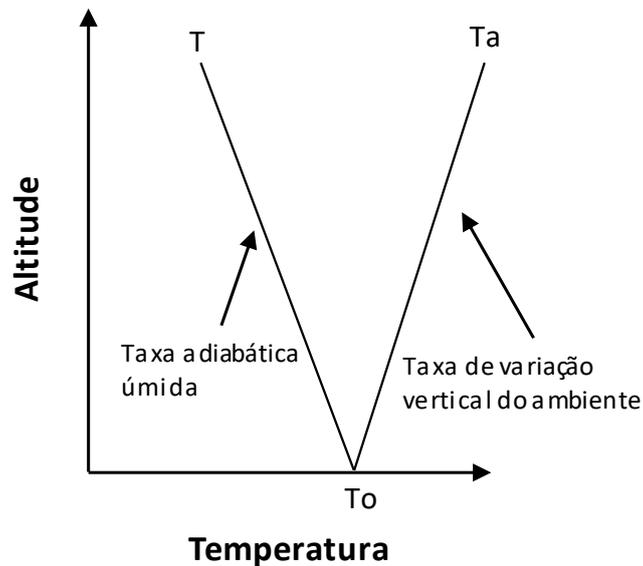
- **Taxa Adiabática Úmida ( $\Gamma_s$ ):** é a taxa de aquecimento ou resfriamento, de uma parcela de ar saturada, ou seja, uma parcela com umidade relativa igual 100%, em movimento ascendente ou descendente na atmosfera. Essa taxa de aquecimento ou resfriamento é de aproximadamente 6°C a cada 1 km.

$$\Gamma_s = \frac{dT}{dz} = -\left[ \frac{g}{c_{p,air}} + \frac{\Delta H_v}{c_{p,air}} \frac{dw_v}{dz} \right] \quad (2)$$

Onde:  $dT$  é variação de temperatura,  $dz$  é a variação de altura,  $g$  é a aceleração da gravidade (9,80 m s<sup>-2</sup>),  $C_p$  é o calor específico do ar seco à pressão constante (1004 JK<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>),  $\Delta H_v$  é o calor latente de evaporação por grama (é 2,5 kJ g<sup>-1</sup> à 0 °C e 2,25 kJ g<sup>-1</sup> à 100 °C) e  $dw_v$  é variação da razão de mistura.

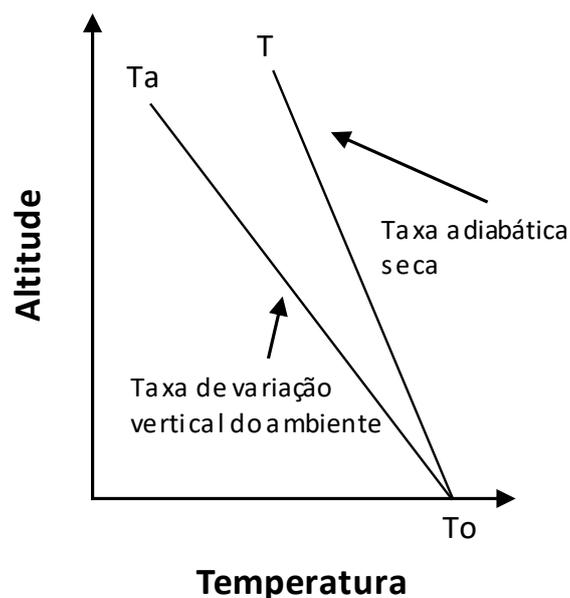
- **Taxa de Variação Vertical de Temperatura Ambiente ( $\Gamma_a$ ):** é a taxa em que a temperatura do ar varia de acordo com a altura.

Uma atmosfera é caracterizada como estável quando a taxa de variação vertical da temperatura do ambiente é menor que a taxa adiabática úmida (Figura 2 - STULL, 1988; SEINFELD; PANDIS, 2006). Em uma atmosfera estável, quando uma parcela é empurrada por uma força externa, ela tende a voltar a sua posição inicial (SEINFELD; PANDIS, 2006), o que desfavorece a dispersão de poluentes.



**Figura 2:** Perfil de temperatura de uma atmosfera estável e taxa adiabática úmida (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006).

Uma atmosfera é caracterizada como instável quando a taxa de variação vertical da temperatura do ambiente é maior que a taxa adiabática seca (Figura 3 - STULL, 1988; SEINFELD; PANDIS, 2006). Em uma atmosfera instável, quando uma parcela é empurrada por uma força externa, ela tende a continuar subindo ou descendo (SEINFELD; PANDIS, 2006), o que favorece a dispersão de poluentes.



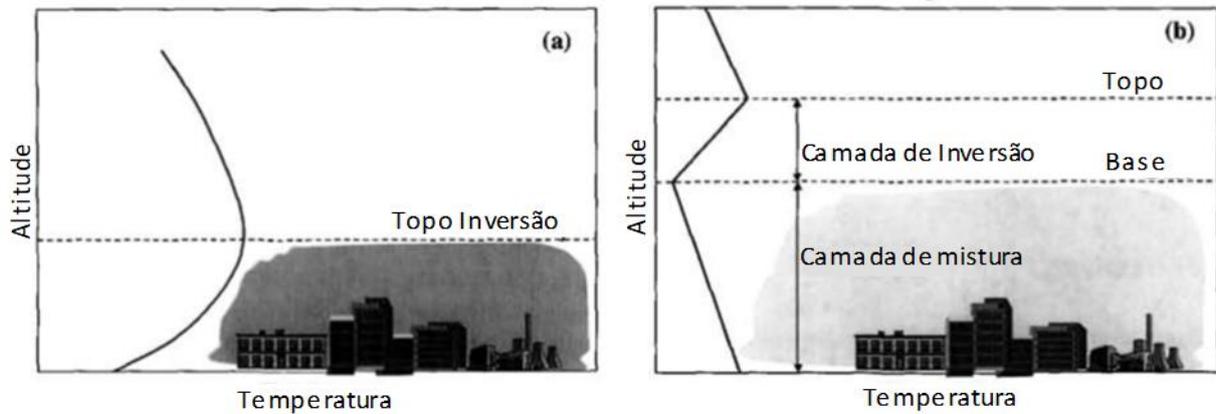
**Figura 3:** Perfil de temperatura de uma atmosfera instável e taxa adiabática seca (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006).

Uma atmosfera também pode ser caracterizada como neutra, quando a taxa de variação vertical de temperatura ambiente é maior que a taxa adiabática úmida e menor que a taxa adiabática seca. Em uma atmosfera neutra, quando uma parcela de ar é empurrada, ela tende a permanecer na posição em que a força externa parou de exercer domínio sobre ela (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Uma possível configuração da atmosfera dentro da CLP é a caracterização de camada de inversão térmica. Na camada de inversão térmica, o ar tende a ser mais quente de acordo com a altura, ou seja, o topo da camada é mais quente do que o ar em baixos níveis (STULL, 1988; SEINFELD; PANDIS, 2006).

A inversão radiativa (Figura 4 a) ocorre principalmente durante à noite, devido ao a perda de calor do solo através da troca de energia com as massas de ar próximas entre si. Com o resfriamento do solo e o aquecimento das camadas nos primeiros metros da atmosfera, a camada próxima a superfície tem como característica a ausência de movimentos turbulentos, característica propicia a não dispersão de poluentes, sendo associada a episódios de altas concentrações de poluentes conforme corroborado por resultados de Santos et al. (2016). A inversão de subsidência ocorre por compressão (Figura 4 b), quando uma camada superior da atmosfera sofre subsidência e se torna mais densa do que a parte inferior, essa vai comprimindo verticalmente a atmosfera, tornando a parte superior mais quente. Nesse caso, a camada atua de forma similar a uma tampa, limitando a mistura de ar entre as camadas

inferiores a ela, podendo proporcionar intensos episódios de poluição. (STULL, 1988; ARYA, 2001; SEINFELD; PANDIS, 2006).



**Figura 4:** (a) inversão de radiação noturna e (b) inversão de subsidência (Fonte: SEINFELD; PANDIS, 2006).

Diversos métodos podem ser utilizados para caracterizar as condições de estabilidade na atmosfera entre os quais destacam-se: Pasquill-Gifford (P-G), Tuner, Número de Richardson Gradiente (Ri) e o comprimento de Monin-Obukhov (L) (ZANNETTI, 1990).

O método de P-G é empírico, e utiliza as variáveis meteorológicas velocidade do vento e cobertura de nuvem para definição da estabilidade atmosférica (Tabela 3 - ZANNETTI, 1990). O método de Turner também é empírico, utilizando a velocidade do vento, índice de radiação através da cobertura de nuvens e a altitude solar para definição da estabilidade atmosférica (Tabela 4). O método de Tuner difere do P-G, pois acrescenta uma classificação a mais para estabilidade, e surgiu com intuito a aprimorar o método proposto por Pasquill-Gifford (ZANNETTI, 1990).

**Tabela 3:** Classificação da Estabilidade atmosférica método Pasquill-Gifford (P-G) (ZANNETTI, 1990).

Insolação/ Cobertura de Nuvem		Velocidade do Vento (m s <sup>-1</sup> )				
		<2	2,0 a <3	3 a <5	5 a <6	≥6
<b>Dia</b>	Insolação Forte	A	A-B	B	C	C
	Insolação Moderada	A-B	B	B-C	C-D	D
	Insolação Leve	B	C	C	D	D
<b>Dia ou Noite</b>	Nublado	D	D	D	D	D
	Pouco Nublado					
<b>Noite</b>	≥0,5 cobertura de nuvem	-	E	D	D	D
	≤0,4 cobertura de nuvem	-	F	E	D	D

Onde: A é muito instável; B é instável; C é pouco instável; D é neutro; E é pouco estável; F estável.

**Tabela 4:** Classificação da estabilidade atmosférica método Turner (ZANNETTI, 1990).

Velocidade do vento (nós)	Índice de Radiação						
	4	3	2	1	0	-1	-2
<b>0 a 1</b>	1	1	2	3	4	6	7
<b>2 a 3</b>	1	2	2	3	4	6	7
<b>4 a 5</b>	1	2	3	4	4	5	5
<b>6</b>	2	2	3	4	4	5	6
<b>7</b>	2	2	3	4	4	4	5
<b>8 a 9</b>	2	3	3	4	4	4	5
<b>10</b>	3	3	4	4	4	4	5
<b>11</b>	3	3	4	4	4	4	4
<b>≥12</b>	3	4	4	4	4	4	4

Altitude Solar ( $\alpha$ )	Insolação	Classificação em Numeros
$60^\circ < \alpha$	Forte	4
$35^\circ < \alpha < 60^\circ$	Moderada	3
$15^\circ < \alpha < 35^\circ$	Fraca	2
$\alpha \leq 15^\circ$	Muito Fraca	1

Onde:

- 1 é muito instável; 2 é instável; 3 é pouco instável; 4 é neutro; 5 é pouco estável; 6 é estável; 7 é muito estável.

- o índice de radiação é dado por (ZANNETTI, 1990):

1- Se a cobertura total de nuvens for de 10/10 e o teto for menor que 7000 pés, o índice de radiação líquido é igual a 0 (seja dia ou noite).

2- Para a noite (entre o pôr do sol e o nascer do sol):

(a) Se a cobertura total de nuvens for 4/10. O índice de radiação líquido é igual a - 2.

(b) Se a cobertura total de nuvens for > 4/10. O índice de radiação líquido é igual a -1.

3- Para o dia:

(a) Se a cobertura total de nuvens for  $\leq 5/10$  define o índice de radiação líquido acima igual ao número da classe de insolação.

(b) Se a cobertura de nuvens  $> 5/10$ , modifica o número da classe de insolação seguindo 5 etapas.

(1)  $< 7000$  pés, subtrai 2.

(2)  $\geq 7000$  pés e  $< 16000$ , subtrai 1.

(3) céu nublado, subtrai 1.

(4) Se o número da classe de insolação não tiver sido modificado pelas etapas (1), (2) ou (3) acima, considere o número da classe modificada igual ao número da classe de insolação.

(5) Se o número a classe de insolação modificada for menor que 1, deixe-a igual.

Outro indicador utilizado para a classificação das condições de estabilidade é o número de Richardson (MARQUES FILHO, 2000; SIQUEIRA, 2017). A classificação da condição de estabilidade atmosférica através do cálculo do número de Richardson é exemplificada na Tabela 5. O cálculo do número de Richardson é realizado de acordo com (STULL, 1991):

$$Ri = \frac{g (\Delta\theta_v/\Delta z)}{\theta_v (\Delta u/\Delta z)^2} \quad (1)$$

onde:

$g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ ),  $\Delta z$  (m) é variação da altura,  $\Delta u$  (m/s) é a variação da velocidade do vento,  $\theta_v$  (k) é a média da temperatura potencial virtual entre os dois níveis e o termo  $\Delta\theta_v \Delta z^{-1}$  é a diferença da temperatura potencial virtual ao longo da vertical.

**Tabela 5:** Classificação da Estabilidade atmosférica a partir do número de Richardson (CLIFTON et al., 2013, SIQUEIRA, 2017).

Condição Atmosférica	Ri
<b>Instável</b>	$Ri < -0,01$
<b>Neutra</b>	$-0,01 < Ri < 0,01$
<b>Pouco Estável</b>	$0,01 < Ri < 0,05$
<b>Estável</b>	$0,05 < Ri < 0,25$
<b>Muito Estável</b>	$0,25 < Ri$

Para a classificação da estabilidade atmosférica através do comprimento de Monin-Obukhov (L) (Tabela 6), o cálculo pode ser realizado por diversos métodos, como o método sônico, por exemplo (LORENZZETTI et al., 2015; SIQUEIRA, 2017):

$$L = \frac{-\rho u_*^3 \theta_v}{Kg \left( \frac{H}{c_a} + 0,61 \frac{(T+273,16)E}{\theta_v} \right)} \quad (2)$$

Onde:  $c_a$  é o calor específico do ar ( $1005 \text{ J.k}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $k$  é a constante de Von Karman (0,4),  $u_*$  é a velocidade de cisalhamento do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura do ar,  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ),  $\rho$  é a densidade do ar,  $\theta_v$  é a temperatura virtual do ar,  $H$  é o fluxo de calor sensível e  $E$  é o fluxo de calor latente.

**Tabela 6:** Classificação da Estabilidade atmosférica pelo comprimento de Monin-Obukhov (L) (ARGYLE; WATSON, 2014; SIQUEIRA, 2017).

Condição Atmosférica	L
<b>Muito Instável</b>	$-200 < L < 0$
<b>Instável</b>	$-1000 < L < -200$
<b>Neutra</b>	$ L  > 1000$
<b>Estável</b>	$200 < L < 1000$
<b>Muito Estável</b>	$0 < L < 200$

Crawford et al. (2016) destaca que a maioria dos estudos de dispersão de poluentes emprega a definição de estabilidade atmosférica, pelo Pasquill-Gifford (PG) ou Tuner, para facilitar as estimativas dos parâmetros de dispersão lateral e vertical. Porém os mesmos não são tão precisos, quanto os métodos de classificação de estabilidade baseados em observações de turbulência atmosférica como: número de Richardson e comprimento de Monin-Obukhov (L).

### **3.2.3 Relação com as condições atmosféricas**

As condições meteorológicas atuam diretamente no transporte e dispersão de poluentes atmosféricos. A interação entre os poluentes e as condições meteorológicas deve-se a variações na temperatura do ar, velocidade dos ventos, radiação, nebulosidade, umidade relativa do ar, pressão, entre outras (GUERRA et al., 2011; CORREA, 2013).

O ASAS, por exemplo, é um sistema meteorológico de grande influência, tanto na formação de O<sub>3</sub> quanto na manutenção de altas concentrações de PM<sub>10</sub>, principalmente, quando deslocado à esquerda da sua posição normal. Quando o sudeste do Brasil se encontra sob a influência do ASAS registram-se condições com pouca nebulosidade e velocidade dos ventos com menor intensidade estando associadas a altas concentrações de O<sub>3</sub> e de PM<sub>10</sub> (CARVALHO et al., 2012; SANTOS et al., 2016). Condições de altas temperaturas e baixa nebulosidade estão diretamente relacionadas a alta incidência de radiação, variável fundamental para formação do O<sub>3</sub>, (CARVALHO, 2010; SILVA JÚNIOR et al., 2013; CARVALHO et al., 2012). Menores valores de intensidade do vento, associados à atuação do ASAS, fornecem condições desfavoráveis a dispersão de poluentes como o PM<sub>10</sub> e os precursores do O<sub>3</sub>, tendo como consequência direta o aumento da concentração desses poluentes (CARVALHO, 2010; CARVALHO et al., 2012; CORREA, 2013; SANTOS et al., 2016).

Outro fator importante no que se refere a dispersão de poluentes, a estabilidade atmosférica foi analisada em diversos estudos. Em geral, condições de atmosfera estável, a altura da CLP é menor, favorecendo a alta concentração de poluentes próximo a superfície. Já em uma atmosfera instável a altura da CLP tende a ser maior o que aumenta a mistura e, conseqüentemente, favorece a dispersão de poluentes (CARVALHO, et al., 2012; CRAWFORD, et al., 2016; WANG, et al., 2016).

Regiões metropolitanas localizadas próximas ao litoral, como a RMRJ, também são influenciadas pela atuação de circulações locais de mesoescala como, por exemplo, as brisas

marítima e terrestre (CARVALHO, 2010). A influência da brisa marítima em regiões litorâneas influencia de forma direta na dispersão de poluentes, uma vez que sua atuação pode favorecer a dispersão de poluentes. É importante destacar que, durante o período da tarde, na RMRJ, muitas vezes, verifica-se a mudança na direção do vento para o sentido litoral-continente, aumento da razão de mistura e aumento da velocidade do vento, o que favorece a dispersão de poluentes (CARVALHO, 2010; PIMENTEL et al., 2014; SANTOS et al., 2016). Vale enfatizar novamente que a dispersão de poluentes está diretamente relacionada a velocidade do vento (GUERRA et al., 2011). A brisa terrestre, na maioria das vezes menos intensa do que a brisa marítima, em geral, é verificada durante a madrugada e início da manhã com inversão da direção dos ventos para o sentido continente-litoral (WALLACE; HOBBS, 2006; DEREZYNSKI et al., 2009), o que dificulta a dispersão de poluentes como  $PM_{10}$  e os precursores de  $O_3$ .

Em relação a remoção de poluentes, destaca-se que a deposição úmida promove a remoção de  $PM_{10}$ , de  $O_3$  e de seus precursores da atmosfera através da precipitação (*washout* e *rainout*). Pelo efeito *rainout*, a remoção acontece dentro da nuvem uma vez que as partículas e gases comportam-se como núcleo de condensação para formação de nuvens; no *washout*, a remoção ocorre abaixo das nuvens, quando as partículas e gases são depositados quando atingidos pelas gotas de chuva (AIKAWA et al., 2014; KAJINO; AIKAWA, 2015). Logo, em geral, períodos com altos índices de precipitação tendem a registrar menores concentrações de poluentes. Ressalta-se que o material particulado também pode ser removido da atmosfera via deposição seca, principalmente, quando a partícula é mais densa que o ar (HE et al., 2017; HAN et al., 2018).

A influência da meteorologia na qualidade do ar também foi identificada por Silveira et al. (2016) para a Região Metropolitana de São Paulo através da aplicação da técnica de análise de variância. Os autores verificaram que altas concentrações de ozônio ocorrem principalmente durante a primavera e verão. As maiores concentrações de  $O_3$ , em geral, também podem ser verificadas durante a tarde nos horários quando há maior incidência de radiação solar (SEINFELD, 1986; CARVALHO et al., 2015).

Correa et al. (2016) verificaram que as maiores concentrações de  $PM_{10}$  na RMRJ são registradas durante o inverno, corroborando os resultados encontrados por Guerra et al. (2011). Albuquerque (2010) observou que durante os períodos com altos índices de precipitação a Região Metropolitana de São Paulo apresentava baixas concentrações de poluentes similarmente ao encontrado para períodos com altas velocidades de ventos.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Fonte de dados e seleção dos episódios de poluição

Foram utilizados dados de concentração de  $PM_{10}$  e  $O_3$ , de 8 estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas no Município do Rio de Janeiro, nos bairros de: (1) Copacabana, (2) São Cristóvão, (3) Centro, (4) Tijuca, (5) Irajá, (6) Bangu, (7) Campo Grande e (8) Pedra Guaratiba (Figura 5). Também foram utilizados os dados meteorológicos, temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos obtidos nestas estações. Todos os dados foram monitorados e disponibilizados pela Secretaria de Meio Ambiente do Município do Rio de Janeiro (SMAC) (<http://www.data.rio/>).



**Figura 5:** Distribuição espacial das estações de monitoramento consideradas na RMRJ. (1) Copacabana, (2) São Cristóvão, (3) Centro, (4) Tijuca, (5) Irajá, (6) Bangu, (7) Campo Grande e (8) Pedra Guaratiba (Fonte: Google Earth).

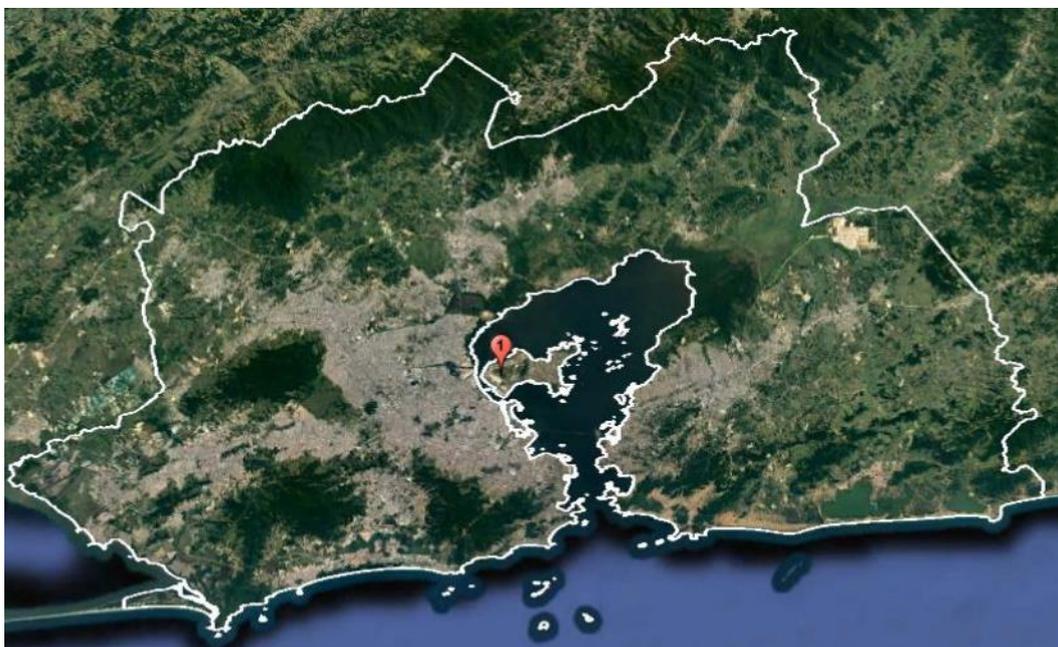
Dados de concentrações de poluentes, com frequência amostral de 10 em 10 minutos foram utilizados para o período de 2012 a 2015. A partir destes, foram selecionados 4 períodos com valores de concentração de  $PM_{10}$  e  $O_3$  acima dos sugeridos como referência pela OMS (2006), meta final da Resolução CONAMA 491/18. Dessa forma, para comparação com os valores de referência, foram calculadas as médias móveis de 8 horas para

o  $O_3$  ( $100 \mu\text{gm}^{-3}$ ) e as médias diárias para o  $PM_{10}$  ( $50 \mu\text{gm}^{-3}$ ). No caso do  $O_3$ , foi extraído o maior valor de médias móveis de 8 horas por dia.

O critério para a determinação dos 4 períodos de estudo foi o de que ao menos 4 das 8 estações de monitoramento, no mínimo em 3 dias de cada período de estudo, apresentasse médias máximas superiores aos valores de referência. Foram selecionados 4 períodos, dois para cada poluente, sendo um registrado no verão e um no inverno.

A verificação das condições de grande escala (escala regional / sinótica) foi realizada através da análise de cartas sinóticas fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) (<http://tempo.cptec.inpe.br/>).

Foram utilizados para análise dos períodos e comparação como os dados simulados os dados de cobertura de nuvens obtidos por meio do METAR da estação instalada no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Figura 6), disponíveis no site da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMET ([www.redemet.aer.mil.br](http://www.redemet.aer.mil.br)). Dados de ar superior, obtidos a partir de radiosondagens lançadas no Aeroporto Internacional Tom Jobim também foram considerados para a determinação das condições de estabilidade atmosférica, da altura da CLP e do perfil vertical da atmosfera. Estes dados são disponibilizados no site da Universidade de Wyoming ([weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).



**Figura 6:** Localização da estação do (1) Aeroporto Internacional Tom Jobim (Fonte: Google Earth).

Complementando, dados de precipitação obtidos em 8 estações meteorológicas, localizadas nos mesmos bairros onde estão instaladas as estações de monitoramento, foram obtidos através do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro disponível no site (*alertario.rio.rj.gov.br*).

Para os dados de vento, o software WRPLOT View foi utilizado para gerar figuras da rosa dos ventos da estação de Pedra Guaratiba, para verificação da brisa marítima.

#### **4.2 Seleção dos períodos com dias consecutivos de poluição do ar**

A partir da análise dos dados de concentração de PM<sub>10</sub> entre os anos de 2012 e 2015 foram selecionados 2 períodos, de 1 a 7 de agosto de 2013 e de 10 a 14 de fevereiro de 2014, onde a concentração média diária de PM<sub>10</sub> ultrapassou o limiar de 50 µgm<sup>-3</sup>. A avaliação dos dados de concentração de O<sub>3</sub> entre os anos de 2012 e 2015 permitiu a seleção dos períodos, de 21 a 26 de janeiro de 2014 e de 18 a 23 de setembro de 2015, onde a concentração máxima diária da média móvel de 8h de O<sub>3</sub> ultrapassou 100 µgm<sup>-3</sup>.

O primeiro período, de 1 a 7 de agosto de 2013, durante o inverno de 2013, apresentou concentrações médias diárias de PM<sub>10</sub> acima de 50 µgm<sup>-3</sup> (Tabela 7), em pelo menos três das estações em análise durante o decorrer dos dias de estudo, destaca-se que em quatro dos sete dias do período todas as estações registraram concentrações do poluente acima do sugerido pela OMS. O segundo período, de 10 a 14 de fevereiro de 2014, durante o verão de 2014, apresentou concentrações médias diárias de PM<sub>10</sub> acima de 50 µg.m<sup>-3</sup> (Tabela 8), em pelo menos cinco das estações em análise durante o decorrer dos dias de estudo. Vale ressaltar que os valores encontrados nos dois períodos selecionados em todas as estações consideradas foram encontrados valores superiores aos recomendados pela OMS (2006) como seguros para a população, mostrando o comprometimento da região no que se refere as concentrações de PM<sub>10</sub>. Em quatro das oito estações consideradas os valores, foram, em algumas ocasiões, verificados valores de concentrações duas ou até mesmo três vezes (no dia 02 de agosto de 2013, na estação Irajá) superiores ao valor de 50 µgm<sup>-3</sup>.

**Tabela 7:** Concentrações médias de 24 horas de PM<sub>10</sub>, em µgm<sup>-3</sup>, registradas na RMRJ durante o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.

<b>Estação de Monitoramento</b>	<b>Data</b>	<b>1/8</b>	<b>2/8</b>	<b>3/8</b>	<b>4/8</b>	<b>5/8</b>	<b>6/8</b>	<b>7/8</b>
Bangu		<b>64,13</b>	<b>56,78</b>	<b>80,07</b>	<b>60,35</b>	35,79	38,74	<b>60,88</b>
Centro		<b>75,96</b>	<b>100,79</b>	<b>96,33</b>	<b>65,58</b>	40,35	<b>50,83</b>	<b>71,13</b>
Campo Grande		<b>88,21</b>	<b>93,29</b>	<b>90,21</b>	<b>79,74</b>	47,04	<b>58,71</b>	<b>79,75</b>
Copacabana		<b>74,97</b>	<b>101,83</b>	<b>97,62</b>	<b>95,02</b>	<b>64,33</b>	<b>67,49</b>	<b>69,57</b>
Irajá		<b>108,00</b>	<b>169,26</b>	<b>131,96</b>	<b>89,13</b>	<b>50,57</b>	<b>70,25</b>	<b>75,91</b>
Pedra Guaratiba		<b>75,96</b>	<b>100,79</b>	<b>96,33</b>	<b>65,58</b>	40,35	<b>50,83</b>	<b>71,13</b>
São Cristóvão		<b>76,33</b>	<b>107,08</b>	<b>107,79</b>	<b>80,08</b>	<b>50,92</b>	<b>61,92</b>	<b>61,54</b>
Tijuca		<b>67,26</b>	<b>84,42</b>	<b>82,99</b>	47,22	42,00	<b>56,46</b>	<b>57,16</b>

\* Foram destacados em negrito os registros acima dos valores de referência considerados.

**Tabela 8:** Concentrações médias de 24 horas de PM<sub>10</sub>, em µgm<sup>-3</sup>, registradas na RMRJ durante o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.

<b>Estação de Monitoramento</b>	<b>Data</b>	<b>10/2</b>	<b>11/2</b>	<b>12/2</b>	<b>13/2</b>	<b>14/2</b>
Centro		<b>75,96</b>	<b>52,43</b>	<b>58,76</b>	<b>59,29</b>	<b>65,38</b>
Campo Grande		<b>88,21</b>	<b>62,09</b>	<b>67,25</b>	<b>71,75</b>	<b>61,21</b>
Copacabana		<b>74,97</b>	<b>97,00</b>	<b>98,03</b>	<b>78,80</b>	<b>90,51</b>
Irajá		<b>108,00</b>	<b>52,54</b>	44,71	49,00	48,58
Pedra Guaratiba		<b>75,96</b>	<b>52,43</b>	<b>58,76</b>	<b>59,29</b>	<b>65,38</b>
São Cristóvão		<b>76,33</b>	<b>63,13</b>	<b>54,94</b>	<b>55,83</b>	<b>60,83</b>
Tijuca		<b>67,26</b>	49,16	47,27	47,67	39,81

\* Foram destacados em negrito os registros acima dos valores de referência considerados.

Em relação ao O<sub>3</sub>, o terceiro período, de 21 a 26 de janeiro de 2014, durante o verão de 2014, apresentou concentrações máximas das médias móvel de 8h acima de 100 µgm<sup>-3</sup> (Tabela 9), em pelo menos quatro das estações em análise durante o decorrer dos dias de estudo. O quarto período selecionado, de 18 a 23 de setembro de 2015, durante o inverno de 2015, também apresentou concentrações máximas das médias móvel de 8h de O<sub>3</sub> acima de 100 µgm<sup>-3</sup> (Tabela 10), em pelo menos uma das estações em análise durante o decorrer dos dias de estudo. Destaca-se que, durante três dos seis dias de estudo, ao menos quatro das oito estações de monitoramento da qualidade do ar apresentou concentrações acima do limiar considerado. Também é válido ressaltar que os valores encontrados nos dois períodos selecionados em todas as estações consideradas apresentaram valores superiores aos

recomendados pela OMS (2006), revelando, assim como para o PM<sub>10</sub>, o comprometimento da região no que se refere a ocorrência de altas concentrações de O<sub>3</sub>. No dia 19 de setembro de 2015, por exemplo, a estação de Bangu apresentou uma média móvel de 8h duas vezes superior ao recomendado pela OMS (2006).

**Tabela 9:** Máximas concentrações de O<sub>3</sub>, em µgm<sup>-3</sup>, registradas na RMRJ durante o período de 21/01/2014 a 26/01/2014.

<b>Estação de Monitoramento</b>	<b>Data</b>	<b>21/1</b>	<b>22/1</b>	<b>23/1</b>	<b>24/1</b>	<b>25/1</b>	<b>26/1</b>
Bangu		<b>147,85</b>	<b>121,49</b>	<b>168,83</b>	<b>155,14</b>	<b>154,29</b>	<b>118,94</b>
Centro		<b>123,58</b>	<b>124,80</b>	<b>152,75</b>	<b>132,80</b>	<b>144,69</b>	<b>115,78</b>
Campo Grande		84,82	77,21	70,40	87,98	<b>100,99</b>	89,76
Copacabana		38,44	43,58	50,02	38,32	56,99	38,94
Irajá		<b>105,10</b>	<b>105,82</b>	<b>142,24</b>	<b>112,57</b>	<b>165,91</b>	<b>144,14</b>
Pedra Guaratiba		<b>123,58</b>	<b>124,80</b>	<b>152,75</b>	<b>132,80</b>	<b>144,69</b>	<b>115,78</b>
São Cristóvão		62,74	65,79	73,60	57,07	82,07	69,81
Tijuca		-	-	<b>129,86</b>	83,96	<b>136,97</b>	<b>128,55</b>

\* Foram destacados em negrito os registros acima dos valores de referência considerados.

**Tabela 10:** Máximas concentrações de O<sub>3</sub>, em µgm<sup>-3</sup>, registradas na RMRJ durante o período de 18/09/2015 a 23/09/2015.

<b>Estação de Monitoramento</b>	<b>Data</b>	<b>18/9</b>	<b>19/9</b>	<b>20/9</b>	<b>21/9</b>	<b>22/9</b>	<b>23/9</b>
Bangu		<b>123,67</b>	<b>202,14</b>	<b>113,26</b>	<b>128,85</b>	<b>119,84</b>	<b>157,15</b>
Centro		<b>129,94</b>	<b>100,91</b>	80,36	75,94	79,75	<b>114,09</b>
Campo Grande		75,17	<b>123,97</b>	80,41	<b>100,60</b>	82,73	<b>132,25</b>
Copacabana		26,67	55,35	46,74	43,88	54,85	61,78
Irajá		<b>125,79</b>	<b>184,53</b>	<b>100,49</b>	88,03	93,34	<b>128,89</b>
Pedra Guaratiba		<b>129,94</b>	<b>100,91</b>	80,36	75,94	79,75	<b>114,09</b>
São Cristóvão		47,58	<b>114,27</b>	68,22	55,19	49,85	77,63
Tijuca		73,63	<b>133,35</b>	84,78	52,59	53,09	65,64

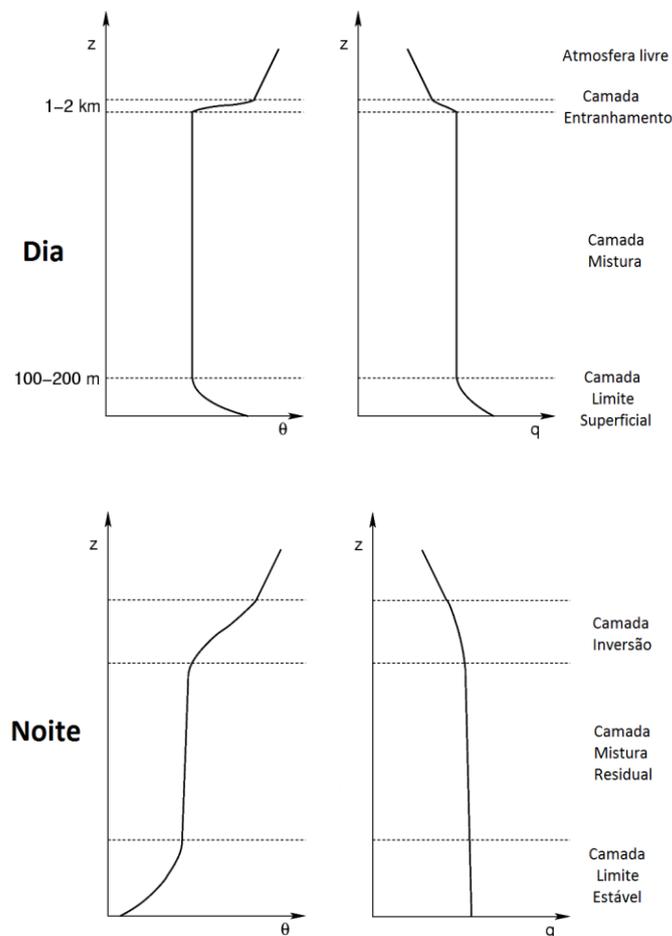
\* Foram destacados em negrito os registros acima dos valores de referência considerados.

#### 4.3 Análise das condições de estabilidade

A classificação da estabilidade atmosférica foi realizada através do cálculo do número de Richardson, proposto por Stull (1991). Devido ao número de Ri apresentar um bom desempenho, quando comparado aos demais métodos de classificação (MOHAN; SIDDIQUI,

1998). Os cálculos dos parâmetros necessários para a determinação da estabilidade foram realizados, para a CLP, a partir dos dados obtidos com as radiosondagens. A classificação proposta por Clifton et al. (2013) foi utilizada levando-se em consideração a seguinte classificação: (a) instável, quando  $Ri < -0,01$ ; (b) neutra, quando  $-0,01 < Ri < 0,01$ ; e (c) estável, quando  $Ri > 0,01$ .

A altura da CLP foi determinada através do método visual que consiste em estimar a altura da CLP através da análise do perfil vertical de temperatura potencial e da umidade específica conforme ilustrado na Figura 7 (WANG; WANG, 2016). Muitas vezes, a turbulência intensa, é propícia a configuração homogênea das variáveis, na atmosfera vertical. Onde a extensão vertical da CLP, pode ser, caracterizada por uma camada, onde a temperatura potencial e a umidade específica são constantes. Nesses casos, a extensão vertical da CLP pode ser identificada como a altura onde a temperatura potencial e a umidade específica apresentam respectivamente, um aumento e uma diminuição abrupta (SÁNCHEZ, 2017).



**Figura 7:** Modelo esquemático dos perfis verticais de temperatura potencial e umidade específica durante os períodos diurno e noturno (Fonte: SÁNCHEZ, 2017).

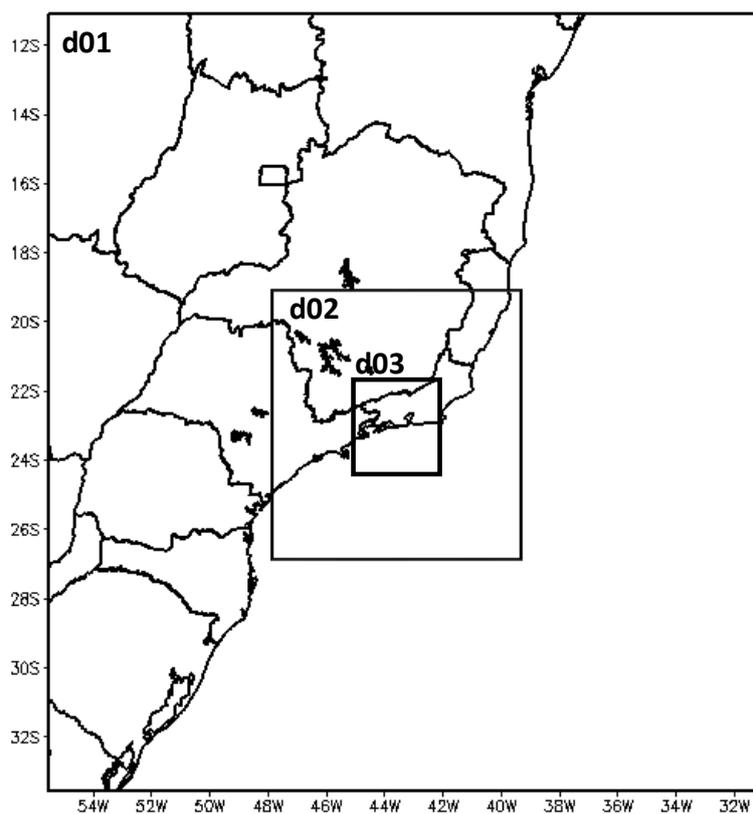
Para a radiosondagem das 12Z, foram utilizados principalmente, os dados dos perfis verticais de temperatura potencial para determinar a extensão da CLP. Para o período noturno (radiosondagem das 00Z), os dados de umidade específica também foram utilizados para determinar a extensão da CLP. A consideração da umidade específica, conforme proposto por Sánchez (2017), durante o período noturno, para a determinação da altura da CLP se deu uma vez que o perfil vertical de temperatura potencial apresentou-se quase constante em toda troposfera.

#### **4.4 Simulações com o WRF**

Foram realizadas simulações com o modelo meteorológico de mesoescala WRF para os 4 períodos selecionados. As rodadas tiveram como objetivos: (a) verificar o desempenho do modelo em simular as condições de estabilidade atmosférica e as variáveis meteorológicas e (b) analisar a relação destes, principalmente, no que se refere a influência da estabilidade atmosférica, com as concentrações dos poluentes registradas na região.

É válido destacar que o WRF é um dos principais modelos utilizados para pesquisas em meteorologia nos dias atuais (SKAMAROCK et al., 2008). O WRF é um sistema de modelagem atmosférica, que contempla equações físicas, dinâmicas e computacionais e pode ser aplicado para previsão do tempo, estudos de assimilação de dados e modelos geofísicos acoplado.

Os dados para a inicialização e geração das condições de fronteira, provenientes do *Global Forecast System* (GFS), com 0,5° de resolução espacial, foram obtidos através do *National Climatic Data Center do National Oceanic and Atmospheric Administration* (NCDC/NOAA - [nomads.ncdc.noaa.gov](http://nomads.ncdc.noaa.gov)). Foram consideradas três grades aninhadas com resolução de 27 km, 9 km e 3 km, respectivamente, e 32 níveis verticais (Figura 8). As grades estavam centradas em 22,8° S e 43,25° W. As configurações do modelo WRF e os parâmetros físicos utilizados para as simulações estão apresentados na Tabela 8. Todas as simulações foram disparadas com 24 horas de antecedência ao período de interesse para a eliminação do efeito de *spin-up* do modelo.



**Figura 8:** Domínio WRF, d01: grade 27Km, d02: grade 9Km e d03: grade 3Km.

**Tabela 11:** Configuração do modelo e parametrizações físicas.

Parametrização	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Pontos na direção X	95	97	94
Pontos na direção Y	95	97	94
Níveis Verticais	33	33	33
Resolução Horizontal	27 Km	9 Km	3 km
Latitude Central		-22.80°	
Longitude Central		-43.25	
Microfísica		Lin	
Cúmulos		Kain-Fritsch	
Camada Limite Planetária		YSU	
Camadas do Solo		Monin-Obukhov	
Radiação de Onda Curta		Dudhia	
Radiação de Onda Longa		RRTM	

O software GRADS foi utilizado para a visualização dos resultados simulados pelo modelo WRF. Foram geradas figuras para os campos de pressão e vento, considerando os resultados da grade de 27 Km, para análise sinótica; de nebulosidade e precipitação, através grade de 3 Km, para verificação do comportamento das variáveis, e de direção e intensidade do vento e razão de mistura, através grade de 3 Km, para análise do vento e identificação de circulações de mesoescala.

A estabilidade através dos dados do modelo, também foi classificada através da metodologia proposta por Clifton et al. (2013), de forma análoga a classificação realizada a partir das observações.

#### 4.5 Comparações com as observações

Para comparação entre os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar observados e simulados, foram utilizados os seguintes métodos estatísticos (WILKS, 1995):

(1) Desvio padrão ( $\sigma$ ): mostra a variação existente em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados estão próximos da média, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados estão distantes da média.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

(2) Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ): é dado pela razão entre a covariância existente entre duas variáveis e o produto dos seus desvios padrão. O parâmetro  $r$  varia entre -1 e 1.

$$r = \frac{cov(y,o)}{\sigma_y \sigma_o} = \frac{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})]}{\{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2\}^{1/2} \{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2\}^{1/2}} \quad (2)$$

(3) Erro médio (ME): considera os desvios (bias) que podem estar presentes na previsão.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - o_i) = \bar{y} - \bar{o} \quad (3)$$

(4) Raiz do erro médio quadrático (RMSE): é a raiz quadrada da diferença entre as médias dos dados observados e dos simulados. Um RMSE alto indica grande discrepância entre os dados simulados e observados.

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

(5) Raiz do erro médio quadrático com remoção do desvio médio Pielke (2002): avalia a habilidade (*skill*) da simulação.

$$RMSE_{rdm} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y}) - (o_i - \bar{o})]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

Segundo Pielke (2002), para o *skill* da simulação são demonstradas as seguintes condições:

- A.  $\sigma_{sim} \approx \sigma_{obs}$
- B.  $RMSE < \sigma_{obs}$
- C.  $RMSE_{rdm} < \sigma_{obs}$

(6) Índice de Concordância (Elbir, 2003): este índice varia entre 0 e 1, sendo que as variáveis estão em concordância se  $d = 1$ .

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y}) + (o_i - \bar{o})]^2} \quad (6)$$

O perfil vertical de temperatura potencial e a altura da CLP simulados pelo modelo foram comparados aos dados obtidos através das radiosondagem. A estabilidade atmosférica também foi estimada a partir dos dados observados e simulados para verificação da representatividade do modelo. Também foram avaliados a partir destes resultados a variação durante o dia desses parâmetros e a influência dessa na concentração dos poluentes.

## **5. Resultados e Discussões**

Os resultados estão divididos em duas seções: a primeira contempla os resultados para os dois períodos em que foram registradas altas concentrações de PM<sub>10</sub> e a segunda seção engloba os resultados para os dois períodos com altas concentrações de O<sub>3</sub>.

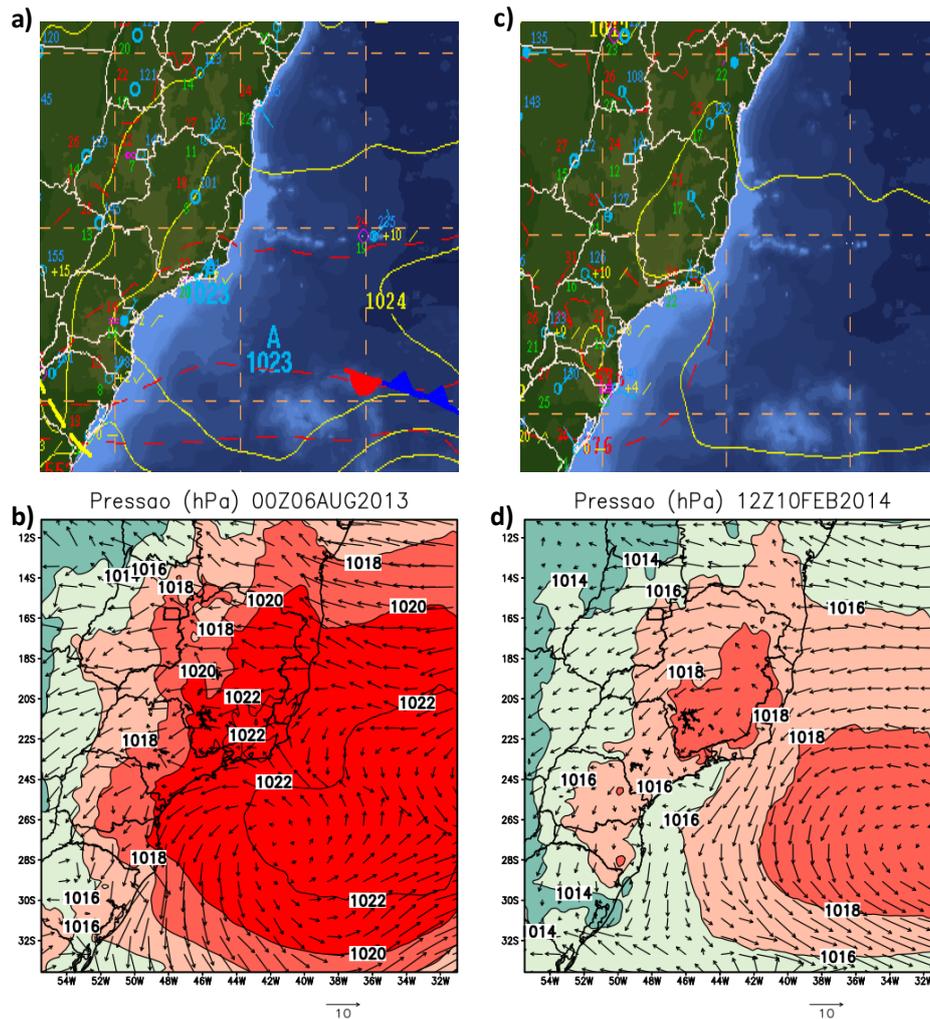
### **5.1 Análise para o PM<sub>10</sub>**

#### **5.1.1 Verificação dos resultados do modelo WRF: análise de grande escala e comparação com dados observados**

A partir das cartas sinóticas foi possível observar que os períodos selecionados durante o verão e o inverno apresentaram predomínio da atuação do ASAS quando considerada a análise da grande escala. O predomínio do ASAS durante episódios com altas concentrações de poluentes registradas no sudeste do Brasil corrobora os resultados encontrados por Carvalho et al. (2012), Silva Junior et al. (2013) e Santos et al. (2016).

A comparação visual entre as cartas sinóticas e o campo de pressão e vento simulados pelo modelo WRF, através da grade de 27 Km, permitiu verificar que modelo simulou bem a configuração do ASAS durante os dois períodos.

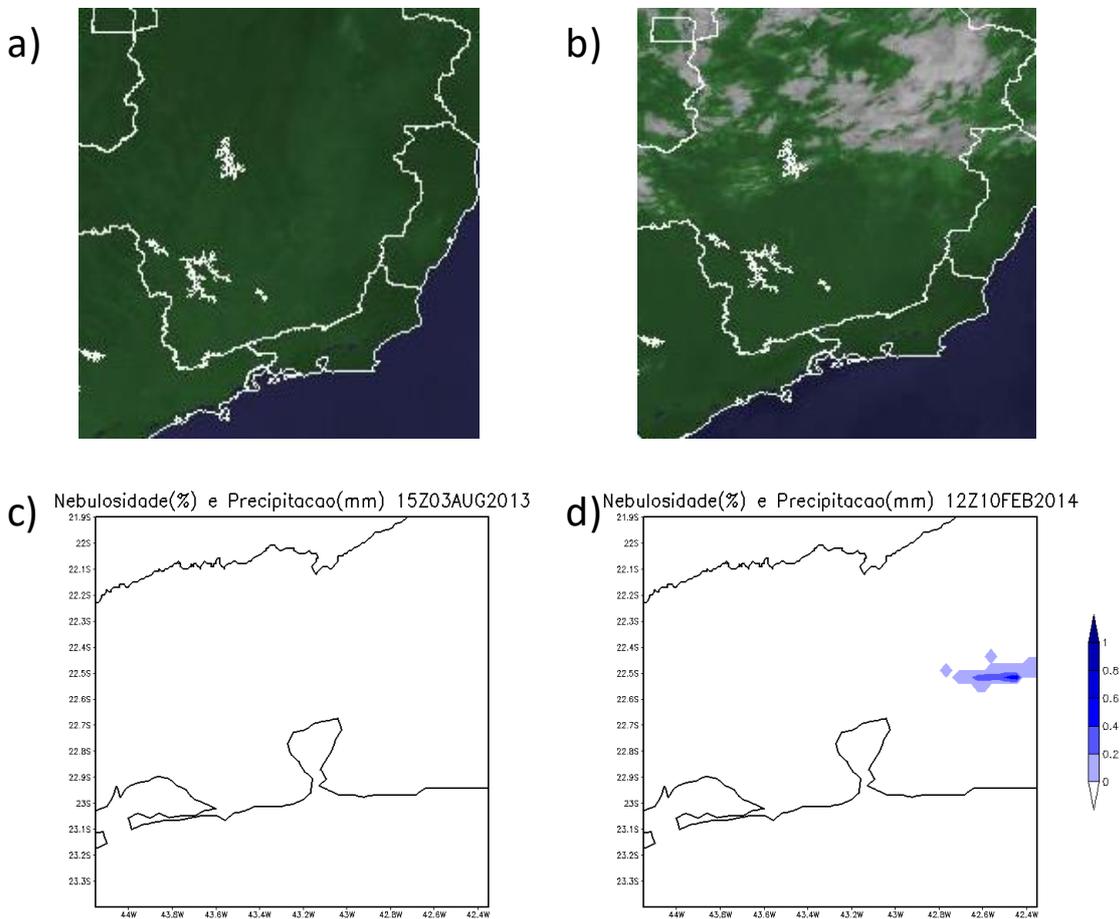
Reboita et al. (2010) verificaram também que a atuação do ASAS normalmente ocorre de maneira mais frequente durante os meses de inverno sob a região sudeste, entretanto, pode ocorrer também nos demais meses do ano com menor frequência. De fato, foi possível verificar que o ASAS se encontra mais bem configurado durante o período de inverno, fato verificado tanto nas cartas sinóticas quanto na análise dos resultados do modelo. Como exemplo, na Figura 9 (a), é possível verificar através da carta sinótica das 00Z do dia 6 de agosto de 2013 que a RMRJ estava sob a influência do ASAS, tal fato também é observado a partir do campo de pressão e vento gerados a partir dos resultados do modelo WRF (Figura 9 b). A Figura 9 (c) também exemplifica de forma análoga a atuação do ASAS durante o segundo período (12Z do dia 10 de fevereiro de 2014) e a respectiva representação pelo WRF (Figura 9 d).



**Figura 9:** Recorte das Cartas Sinótica de (a) 06/08/2013 às 00Z e (c) de 10/02/2014 às 12Z, referente ao deslocamento da ASAS e Pressão ao nível médio do mar e vento, através da grade de 27 Km, WRF (b) 06/08/2013 às 00Z e (d) de 10/02/2014 às 12Z.

Associada a atuação do ASAS também é possível verificar por meio de imagens de satélite a predominância de condições de céu-claro. Através dos campos de nebulosidade gerados pelo modelo WRF, na grade de 3 Km, também foi possível verificar que o modelo consegue representar de forma satisfatória a cobertura de nuvens indicando predominância de céu-claro em ambos os períodos. Em geral, houve concordância entre as simulações e as observações, porém em alguns horários verificou-se que o modelo apresentou núcleos de nebulosidade, enquanto as imagens de satélite apresentaram apenas condições de céu-claro. Como exemplo, a Figura 10 (a) mostra através da imagem de satélite das 15Z do dia 03 de agosto de 2013 a predominância de céu-claro sob a RMRJ, o mesmo é verificado na Figura 10 (c), através do campo de nebulosidade simulado pelo modelo, durante o primeiro período. De

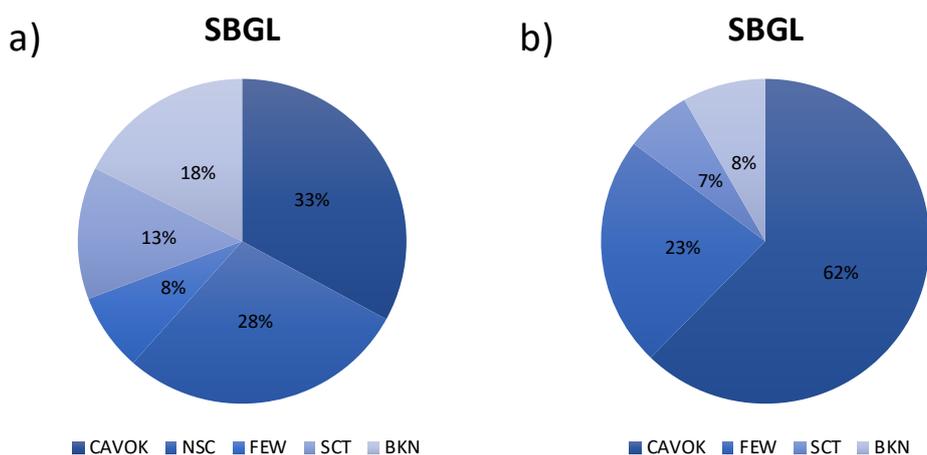
forma análoga a imagem de satélite das 12Z de 10 de fevereiro de 2014 (Figura 10 b), durante o segundo período, exemplifica a condição de céu-claro e a sua respectiva representação através do WRF (Figura 10 d).



**Figura 10:** Recorte imagens de satélite (GOES, colorida) das (a) 15Z de 03 de agosto de 2013 e (b) 12Z de 10 de fevereiro de 2014; nebulosidade e precipitação, através da grade de 3 Km, WRF, (c) 15Z de 03 de agosto de 2013 e (d) 12Z de 10 de fevereiro de 2014.

A verificação da nebulosidade através dos dados METAR do Aeroporto Internacional Tom Jobim, revelou que a porcentagem do número de horas em que a cobertura de nuvens registrou valor de até 2/8 foi superior a 69% no primeiro período e superior a 85% no segundo período (Figura 11). Durante ambos os períodos, não foi registrada ocorrência de precipitação nas 8 estações meteorológicas instaladas em conjunto com as estações de qualidade do analisadas. O modelo apresentou resultados em concordância com os valores observados, exceto, durante o primeiro período, quando o modelo apresentou precipitação acumulada de até 2 mm no dia 05/08, sobre toda a RMRJ.

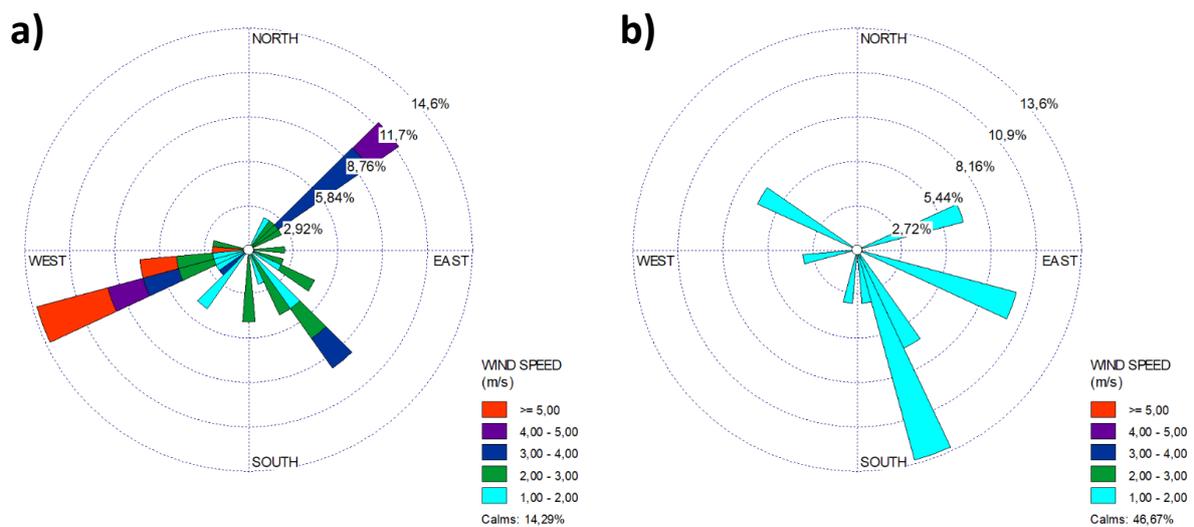
É importante destacar que a ausência de precipitação durante a maioria dos dias no primeiro período e em todos os dias do segundo período contribuiu para a ocorrência de altas concentrações de  $PM_{10}$  em dias sucessivos, uma a ausência de precipitação dificulta a remoção do poluente da atmosfera, favorecendo seu acúmulo.



**Figura 11:** Frequência de ocorrência das classes de cobertura de nuvens utilizadas em mensagens METAR para cada dia (a) no período entre 01/08/2013 a 07/08/2013 e (b) no período entre 10/02/2014 a 14/02/2014 no aeroporto SBGL. CAVOK- Ceiling and Visibility Okay; SKC- Sky clear (clear below 12,000 for ASOS/AWOS); NSC- No significant clouds; FEW- Few (1/8 to 2/8 sky cover); SCT- Scattered (3/8 to 4/8 sky cover); BKN- Broken (5/8 to 7/8 sky cover); OVC- Overcast (8/8 sky cover).

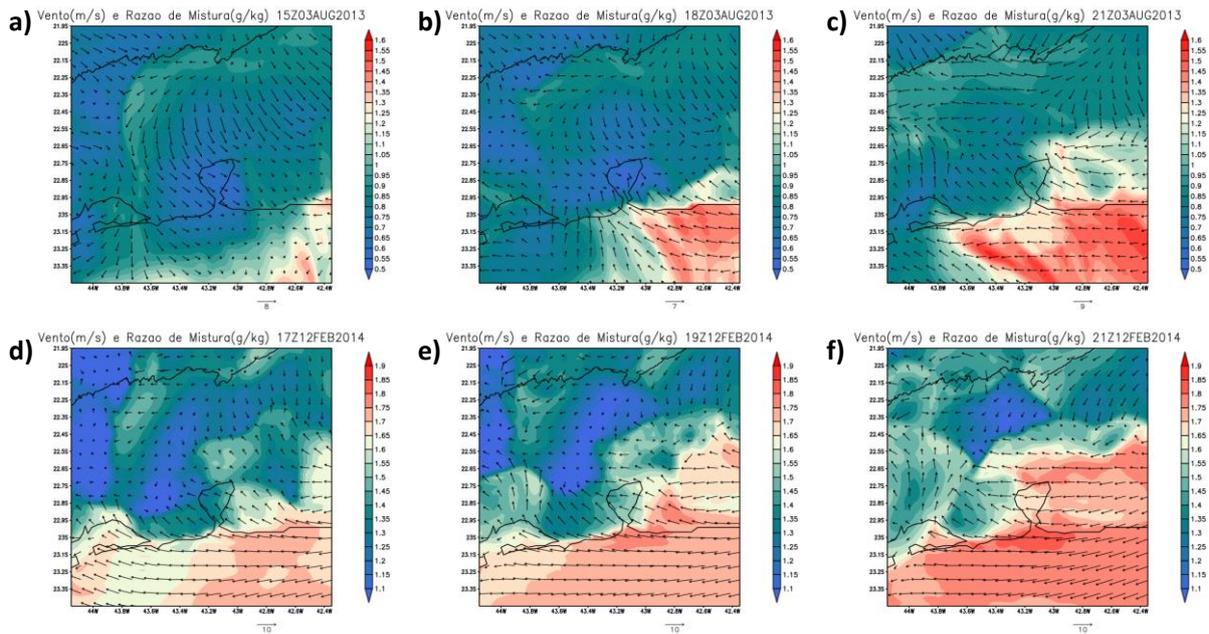
A brisa marítima é fundamental no processo de dispersão de poluentes na RMRJ (CARVALHO, 2010; PIMENTEL et al., 2014). Vale ressaltar que as circulações de mesoescala são favorecidas quando o fluxo sinótico é fraco, o que acontece quando há atuação do ASAS. A Figura 12 exemplifica a atuação da brisa marítima no litoral da região durante o período da tarde, quando é mais intensa. Utilizando os dados de vento registrados na estação de Pedra de Guaratiba, estação mais próxima do oceano, pode-se verificar o comportamento da mesma durante os 2 períodos de estudo. Durante primeiro período (Figura 12 a), foram verificados ventos mais intensos vindos de sudoeste, direção tipicamente associada a brisa marítima na RMRJ, como destacado por Dereczynski et al. (2009). Durante o segundo período (Figura 12 b), maiores intensidade de ventos oriundos da direção sudeste foram identificados. Porém, é válido destacar que devido à localização da estação

meteorológica é possível a mesma sofrer influência da brisa marítima nas duas direções. Diferenças no posicionamento do ASAS e na temperatura da superfície do mar também podem influenciar no resultado final. Contudo, vale destacar que, principalmente, no segundo período, a intensidade dos ventos, mesmo em períodos quando a brisa marítima é mais intensa, foi muito baixa, o que desfavorece dispersão dos poluentes. Isso tende a concentrar mais os poluentes em uma mesma região, o que reflete no aumento da concentração de poluentes.



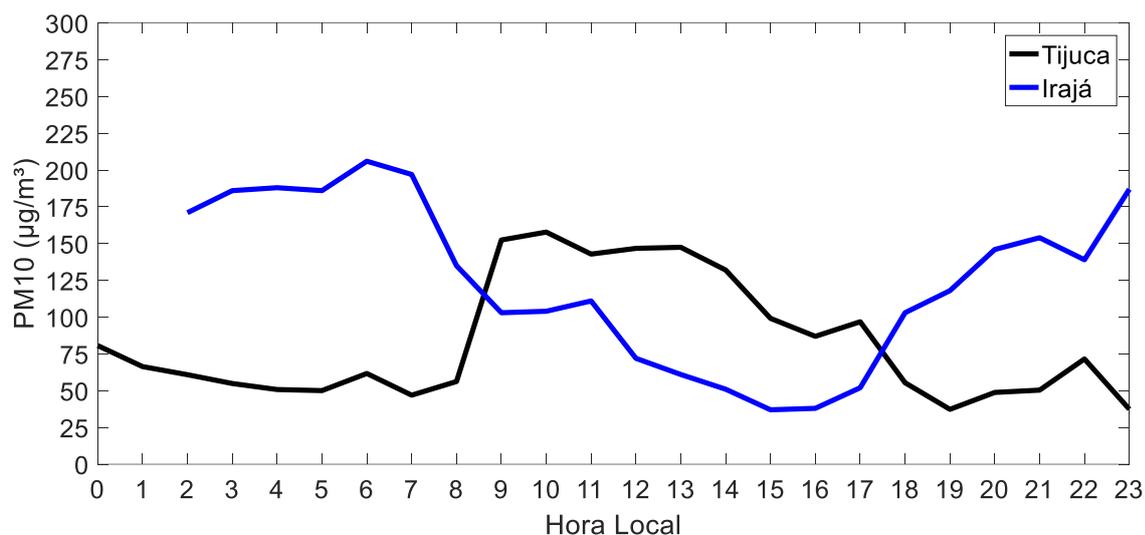
**Figura 12:** Rosa dos Ventos entre as 13 e 18 horas, estação Pedra de Guaratiba do período entre (a) 01/08/2013 a 07/08/2013, (b) 10/02/2014 a 14/02/2014.

A ocorrência de brisa marítima foi identificada nos resultados do modelo WRF a partir da análise da direção e magnitude do vento e da razão de mistura. Os resultados do modelo indicam a ocorrência de brisa marítima no litoral na maior parte do período. As simulações representaram, durante ambos os períodos de estudo, um comportamento semelhante com configuração de brisa marítima durante o período da tarde (Figura 12). Nota-se também que os horários de atuação da brisa marítima sobre a região, também são horários onde identifica-se os maiores valores de razão de mistura. Na Figura 13 observa-se o início da entrada de brisa marítima às 15 Z no dia 03 de agosto, do primeiro período, sua intensidade aumenta às 18 Z, e é possível verificar sua atuação na região costeira. Às 21 Z, é possível verificar a atuação da brisa em praticamente toda RMRJ. No dia 12 de fevereiro, do segundo período, uma configuração semelhante durante os horários da 17, 19 e 21 Z também foi verificada.



**Figura 13:** Vento e Razão de Mistura de 02 de agosto de 2013 (a) 15Z, (b) 18Z, (c) 21Z e Vento e Razão de Mistura de 12 de fevereiro de 2014 (d) 17Z, (e) 19Z e (f) 21Z, através da grade de 3 Km, WRF.

Foi possível verificar através da Figura 14 a influência da brisa marítima, sobre as concentrações de  $PM_{10}$ , na estação da Tijuca, localizada na região central, e na estação do Irajá, a noroeste desta. Como destacado por Pimentel et al. (2014), a brisa marítima sobre a região central, é principalmente de sudeste, o que pode influenciar no transporte de poluente para noroeste da região. Tal fato pode ser verificado durante o dia 03 de agosto de 2013, através da Figura 14, onde as maiores concentrações de  $PM_{10}$  na Tijuca são registradas entre 9 e 12 h (horário local); o decaimento da concentração na estação começa depois das 13 h (15 Z), horário quando é possível verificar a entrada da brisa sobre a RMRJ (Figura 13 a). Às 16 Z, verifica-se um aumento a concentração de  $PM_{10}$  do Irajá, quando a brisa atinge a região. Logo, pode-se inferir que a brisa marítima influencia no transporte de poluente de uma região para a outra, dentro da RMRJ, levando à uma subsequente diminuição nas concentrações de poluente em regiões litorâneas e a um aumento em regiões mais afastadas, principalmente, às localizadas a noroeste da região. O transporte de poluentes no sentido noroeste também foi identificado por Carvalho (2010) a partir do uso de um modelo de qualidade do ar.



**Figura 14:** Comportamento da concentração de PM<sub>10</sub> ao longo do dia 03 de agosto de 2013, nas estações da Tijuca e Irajá.

Na Tabela 12 é possível observar que a média de temperatura máxima durante o primeiro período ficou acima de 28 °C na maior parte do período, exceto no dia 05 de agosto, quando o valor foi de 24 °C. Já a temperatura média em todos os dias esteve abaixo de 26 °C durante os 7 dias. Esse padrão está associado a ciclo diurnos bem definidos, reflexo da predominância de condições de céu claro. A umidade relativa média esteve acima de 55% em todos os dias com valores de umidade relativa mínima variando predominantemente entre 30 e 60%, caracterizando dias secos. Durante o segundo período, a média de temperatura máxima ficou acima de 36 °C e a temperatura média acima de 30°C, comportamento típico para o verão na RMRJ. A umidade relativa média esteve abaixo de 57%, e a umidade relativa mínima entre 30 e 32%, o que caracteriza o período como seco. É importante destacar que a concentração de PM<sub>10</sub>, em geral, é inversamente proporcional a umidade relativa, como apresentado por Santos (2016), uma vez que quanto maior a umidade relativa, maior a deposição úmida do poluente. Isso é verificado durante a análise do dia 5 de agosto, quando foi verificado o menor número de violações ao limiar considerado e que apresentou maiores valores de umidade relativa.

**Tabela 12:** Média de temperatura máxima e média de temperatura, em °C, média de umidade relativa mínima e média de umidade relativa, em %, registradas na RMRJ durante o período de 01/08/2013 a 07/08/2013 e o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.

Ano	2013							2014				
Dia/mês	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8	10/2	11/2	12/2	13/2	14/2
Temp. máx.	30,9	33,2	34,3	34,6	24,0	31,7	28,3	39,5	37,5	38,7	40,9	36,9
Temp. Méd.	21,9	24,2	25,7	25,7	22,5	23,2	23,0	31,9	31,0	31,5	32,5	30,3
Umíd. Mín.	41,8	34,7	30,3	29,9	70,8	47,2	59,3	25,9	27,9	24,3	18,8	35,1
Umíd. Méd.	70,4	66,4	56,4	62,5	79,9	76,1	77,7	47,5	49,0	44,9	43,7	56,6

Os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos estatísticos para verificação de como o modelo simulou a temperatura são apresentadas na Tabela 13, para o primeiro período de estudo. A correlação linear de Pearson (R) apresentou valores relativamente altos, acima de 0,81, em 7 estações de monitoramento para temperatura do ar. Vale destacar que para a estação de Bangu foi verificado o maior índice correlação, igual a 0,95. A análise do erro médio revela que o modelo subestimou os valores de temperatura do ar nas estações de Bangu, Campo Grande, Irajá e São Cristóvão e superestimou os valores nas estações Centro, Pedra de Guaratiba e Tijuca. Os valores do índice de concordância foram elevados em 7 estações de monitoramento (acima de 0,87). Os menores valores do índice de concordância e da correlação foram verificados para a estação de Copacabana. É importante destacar que a estação encontra-se localizada em um canyon urbano, cercada por prédios, à apenas 150 metros da linha costeira. Esse pode ser um dos fatores que dificulta a previsão do modelo, principalmente, considerando uma resolução espacial de 3 km.

O primeiro critério ( $\sigma_{sim} \approx \sigma_{obs}$ ) para obter o *skill* da simulação foi atendido, utilizando uma diferença percentual de até 20% para avaliação, em todas as estações, assim como o segundo ( $RMSE < \sigma_{obs}$ ) e terceiro ( $RMSE_{Edm} < \sigma_{obs}$ ). Logo obtendo, o *skill*, para todas estações meteorológicas.

**Tabela 13:** Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.

<b>Estação</b>	<b>R</b>	<b>RMSE</b>	<b>ME</b>	<b>Índice d</b>	<b>RMSE<sub>rmd</sub></b>	<b><math>\sigma_{obs}</math></b>	<b><math>\sigma_{sim}</math></b>
Bangu	0,95	2,53	-0,46	0,91	2,49	4,62	3,59
Campo Grande	0,85	2,48	-0,71	0,90	2,37	4,54	3,61
Centro	0,87	2,33	1,12	0,88	2,04	3,97	2,82
Copacabana	0,50	2,01	0,00	0,60	2,01	2,30	1,31
Irajá	0,92	1,92	-0,22	0,94	1,90	4,54	3,50
Pedra de Guaratiba	0,81	2,42	0,63	0,87	2,34	4,02	3,10
São Cristóvão	0,94	2,83	-1,94	0,88	2,06	4,77	3,24
Tijuca	0,93	2,86	0,38	0,88	2,83	5,45	3,10

Para o segundo período, a aplicação dos métodos estatísticos para temperatura do ar, é apresentado na Tabela 14. Verifica-se que o modelo teve dificuldades em representar as condições locais. O índice de correlação de Pearson apresentou valores maiores que 0,78, em 5 estações de monitoramento. A estação que apresentou o maior índice R foi Bangu, de 0,88. Os menores valores de índices de R foi verificado na estação de Copacabana, de -0,16. Pela análise do ME, verificou que o modelo subestimou os valores em todas as estações. O índice de concordância foi maior que 0,63 em 7 estações. O pior desempenho foi obtido novamente para Copacabana que apresentou valor de correlação igual à -0,16. A análise dos dados observados e simulados (figura não apresentada) revela que o modelo teve dificuldades para representar as oscilações do ciclo diurno.

O primeiro e terceiro critério para obter o *skill* da simulação foi verificado em 7 estações, exceto para Copacabana. O segundo critério foi verificado nas estações Centro, Pedra de Guaratiba, São Cristóvão e Tijuca. Obtendo assim, o *skill* da simulação apenas nessas 4 estações.

**Tabela 14:** Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,88	4,92	-4,48	0,63	2,03	4,05	2,84
Campo Grande	0,81	4,82	-4,17	0,65	2,43	4,15	3,17
Centro	0,68	3,08	-1,31	0,71	2,79	3,76	2,25
Copacabana	-0,16	5,05	-3,42	-0,08	3,72	3,48	0,86
Irajá	0,85	4,67	-3,87	0,67	2,61	4,57	2,86
Pedra de Guaratiba	0,68	3,94	-2,59	0,63	2,96	4,00	2,39
São Cristóvão	0,85	3,18	-2,50	0,76	1,97	3,61	2,55
Tijuca	0,78	4,12	-2,26	0,68	3,45	4,95	2,34

Para a umidade relativa do ar, durante o primeiro período, os resultados da aplicação dos métodos estatísticos é apresentada na Tabela 15. Em 6 estações foram verificados índice de correlação acima de 0,63. A estação da Tijuca apresentou o maior índice R (0,73). Já o menor valor de índice correlação foi registrado na estação de Copacabana novamente (0,50). A análise do ME indica que o modelo superestimou os valores de umidade relativa na estação de Copacabana e subestimou nas outras 7 estações de monitoramento. Já para os valores de umidade do o ar índice d foi maior que 0,62 em 6 estações e menor que 0,47 em 2.

O primeiro critério para obter o *skill* da simulação foi atendido, em todas as estações, utilizando uma diferença percentual de até 20% para avaliação. O segundo e terceiro foram atendidos em 2 e 6 estações respectivamente. Obtendo o *skill* da simulação em Bangu e Irajá.

**Tabela 15:** Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 01/08/2013 a 07/08/2013.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,70	20,81	-12,85	0,74	16,38	22,77	18,75
Campo Grande	0,70	22,10	-16,01	0,68	15,24	20,66	18,02
Centro	0,52	18,59	-7,85	0,64	16,85	16,23	17,98
Copacabana	0,27	14,08	0,11	0,42	14,08	10,90	12,34
Irajá	0,70	19,59	-12,77	0,72	14,87	19,81	18,25
Pedra de Guaratiba	0,63	21,71	-15,49	0,62	15,21	18,60	16,49
São Cristóvão	0,65	30,00	-26,03	0,47	14,93	16,34	18,87
Tijuca	0,73	22,47	-17,87	0,67	13,63	18,56	18,72

A aplicação dos métodos estatístico para a umidade relativa do ar, durante o segundo período, pode ser observada na Tabela 16. O índice de correlação de Pearson apresentou valores maiores que 0,49, em 7 estações de monitoramento. A estação que apresentou os maiores índices R foi Bangu, de 0,70. O menor valor de índice de R foi verificado na estação de Copacabana novamente com valor negativo. Pela análise do ME, o modelo superestimou os valores de umidade relativa do ar em todas as estações. O índice de concordância foi maior que 0,41 em 7 estações, exceto para Copacabana que foi igual à -0,08.

O primeiro e segundo critérios para obter o *skill* da simulação foi verificado em 7 das estações, exceto Copacabana. Já o terceiro critério não foi verificado em nenhuma estação para os valores de umidade relativa, durante o segundo período.

Vale ressaltar novamente que a dificuldade do modelo, em simular as duas variáveis, em ambos os períodos, para Copacabana, está diretamente ligada a localização da mesma. Esses resultados podem também indicar uma baixa representatividade da estação de qualidade do ar nessa localidade. Estudos específicos são necessários para avaliar de forma mais aprofundada essa questão.

**Tabela 16:** Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 10/02/2014 a 14/02/2014.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,70	17,77	14,01	0,63	10,93	14,88	12,81
Campo Grande	0,65	17,22	11,35	0,67	12,95	16,73	13,70
Centro	0,49	18,02	14,31	0,41	10,95	11,44	10,20
Copacabana	-0,27	30,82	27,58	-0,08	13,74	10,52	6,42
Irajá	0,69	16,69	12,38	0,67	11,19	14,55	13,83
Pedra de Guaratiba	0,49	17,36	8,46	0,56	15,16	16,91	11,56
São Cristóvão	0,68	14,72	10,57	0,67	10,25	12,86	12,57
Tijuca	0,62	21,92	18,74	0,46	11,37	13,87	11,93

### 5.1.2 Verificação da representação do perfil vertical e da estabilidade da atmosfera

Utilizando o número de Richardson e a classificação da estabilidade atmosférica proposta por Clifton et al. (2013), foi possível analisar a estabilidade atmosférica nos 2 períodos de estudo, considerando, para o Aeroporto Internacional Tom Jobim, os dados simulados pelo modelo WRF, na grade de 3 Km, e os dados obtidos a partir do lançamento de

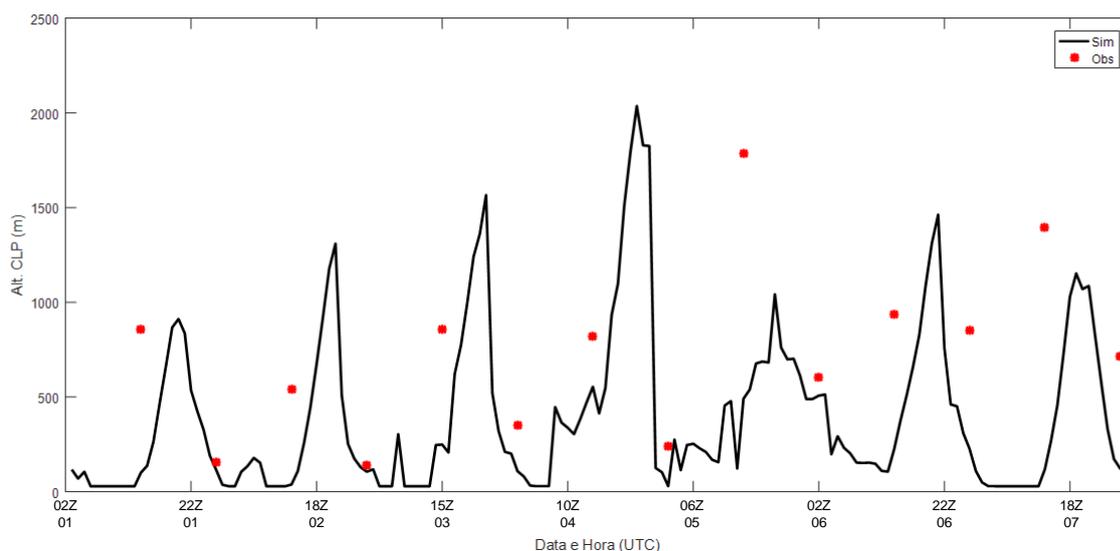
radiossondagens. A altura da CLP, também comparada, foi definida para os dados observados.

Para o primeiro período, a comparação entre os dados observados e os resultados do modelo revelou a mesma classificação da condição de estabilidade atmosférica em 5 dias, em ambos os horários em que são lançadas as radiossondagens no aeroporto (Tabela 17). É possível observar que apesar de representar de forma satisfatória na maioria dos horários, o modelo teve dificuldade em representar a condição de atmosfera neutra.

**Tabela 17:** Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 01/08/2013 a 07/08/2013 do aeroporto SBGL.

Estabilidade					
		09h (12Z)		21h (00Z)	
Data	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
1/8	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
2/8	Instável	Estável	Estável	Estável	Estável
3/8	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
4/8	Neutra	Instável	Estável	Estável	Estável
5/8	Instável	Instável	Neutra	Instável	Instável
6/8	Instável	Instável	Neutra	Estável	Estável
7/8	Instável	Instável	Estável	Estável	Estável

Quando analisada a altura da CLP, verifica-se que o modelo apresentou valores próximos aos calculados através das observações com apenas pequenas diferenças. É possível verificar que esses valores, em geral, foram levemente inferiores aos obtidos através das observações (Figura 15), exceto para o dia 05 de agosto de 2013 que apresentou diferenças mais significativas. Vale ressaltar que o modelo indicou ocorrência de precipitação para o dia 05, contrariando as observações. Isso indica uma atmosfera mais instável. Avaliando o ciclo diurno neste dia observa que o modelo consegue indicar um aumento da altura da CLP. Contudo, ainda abaixo dos valores obtidos através das observações.



**Figura 15:** Altura da CLP simulada e observada de 01/08/2013 a 07/08/2013 do aeroporto SBGL.

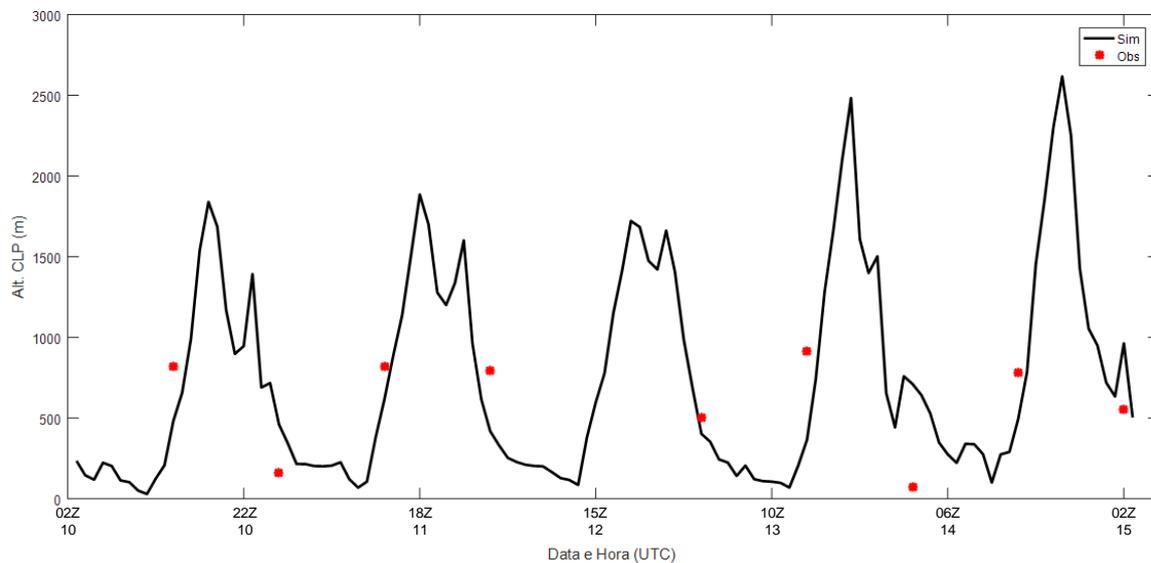
Durante o segundo período, a comparação entre os dados observados e os resultados do modelo representou de forma acurada a estabilidade atmosférica em todos os dias, no horário das 12 Z (10 h). À noite, no horário das 00 Z (22 h), o modelo teve dificuldade em representar a evolução da estabilidade na CLP, que oscilou entre instável, durante o dia, e estável durante a noite, exceto para o dia 14 (Tabela 18).

**Tabela 18:** Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 10/02/2014 a 14/02/2014 do aeroporto SBGL.

Data	Estabilidade			
	10h (12Z)		22h (00Z)	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
10/2	Instável	Instável	Estável	Instável
11/2	Instável	Instável	Estável	Instável
12/2	-	-	Estável	Instável
13/2	Instável	Instável	Estável	Instável
14/2	Instável	Instável	Instável	Instável

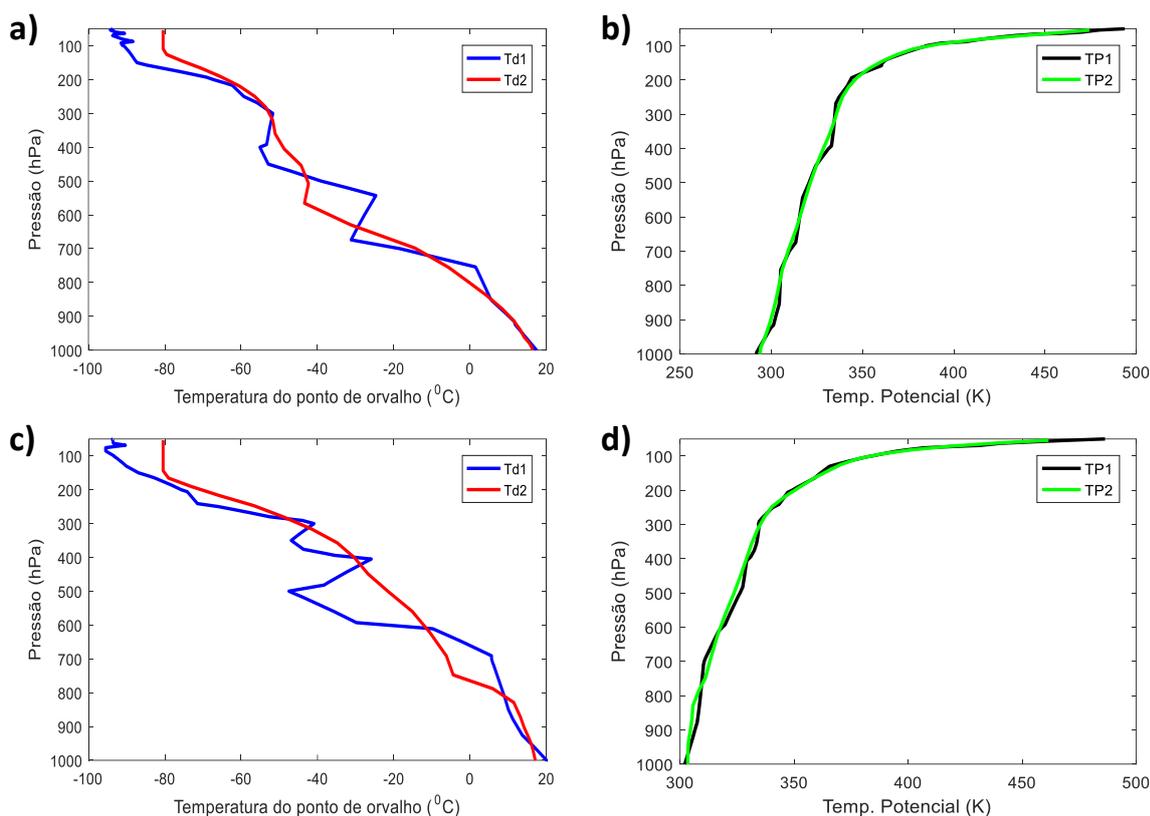
Analisado a Figura 16, foi possível verificar que o modelo, em geral, apresentou valores da CLP próximos aos calculados a partir das observações, revelando que o modelo tem habilidade em prever a variável. A evolução da CLP calculada pelo modelo apresenta perfil de acordo com o esperado, acompanhando o ciclo diurno. Vale destacar que as maiores

diferenças (ainda pequenas) foram identificadas quando a altura da CLP esteve abaixo dos 100 m.



**Figura 16:** Altura da CLP simulada e observada de 10/02/2014 a 14/02/2014 do aeroporto SBGL.

A Figura 17 apresenta o perfil vertical da temperatura potencial e da temperatura do ponto de orvalho simulados e observados para os 2 períodos de estudo, para horários específicos. A partir desta, verifica-se que o perfil vertical de temperatura potencial é bem representado, com diferenças ligeiramente superiores na camada abaixo de 800 hPa. A difícil representação dos modelos na camada mais próxima à superfície também foi verificada por Hu et al. (2013), que indica como justificativa a difícil representação da mistura na camada vertical, principalmente, devido a complexa representação do terreno e uso do solo. Em relação a representação de Td, os resultados do modelo indicam diferenças mais nítidas em relação às observações. A dificuldade na simulação de Td pode estar associada a fatores como a utilização da temperatura da superfície do mar climatológica, má representação do uso do solo e do terreno. Vale ressaltar que a região de estudo é altamente urbanizada, com terreno complexo, presença de grandes corpos d'água e grandes áreas vegetadas. A análise do comportamento de temperatura e Td, indicou que para os dois períodos o modelo representou bem camadas úmidas e secas.



**Figura 17:** Perfil vertical simulado e observado (a) temperatura do ponto de orvalho de 06/08/2013 às 12Z (b) de temperatura potencial de 06/08/2013 às 12Z (c) temperatura do ponto de orvalho de 14/02/2014 às 12Z (d) temperatura potencial de 14/02/2014 às 12Z. Onde Td1: Td observada (em azul), Td2: Td simulada (em vermelho), TP1:  $\theta$  observada (em preto) e TP2:  $\theta$  simulada (em verde).

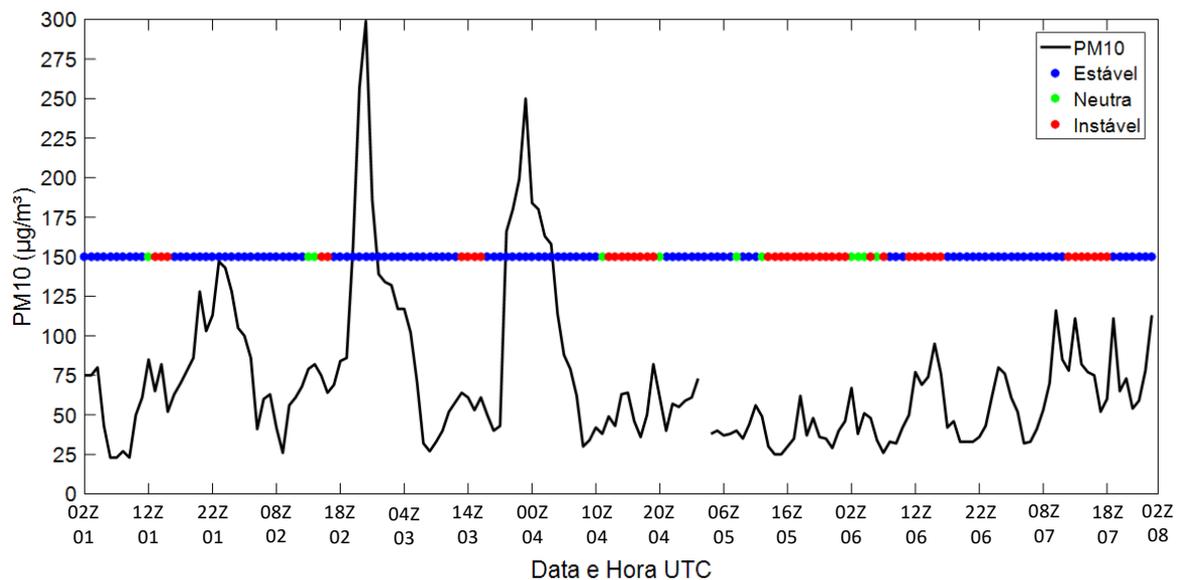
### 5.1.3 Avaliação do impacto da estabilidade atmosférica nas concentrações de $PM_{10}$

Para a avaliação do impacto da estabilidade atmosférica na concentração do  $PM_{10}$  apenas os resultados da estação meteorológica de Pedra de Guaratiba serão apresentados. O motivo da discussão dos resultados de apenas uma estação deu-se uma vez que os resultados entre as estações não apresentaram significativas diferenças.

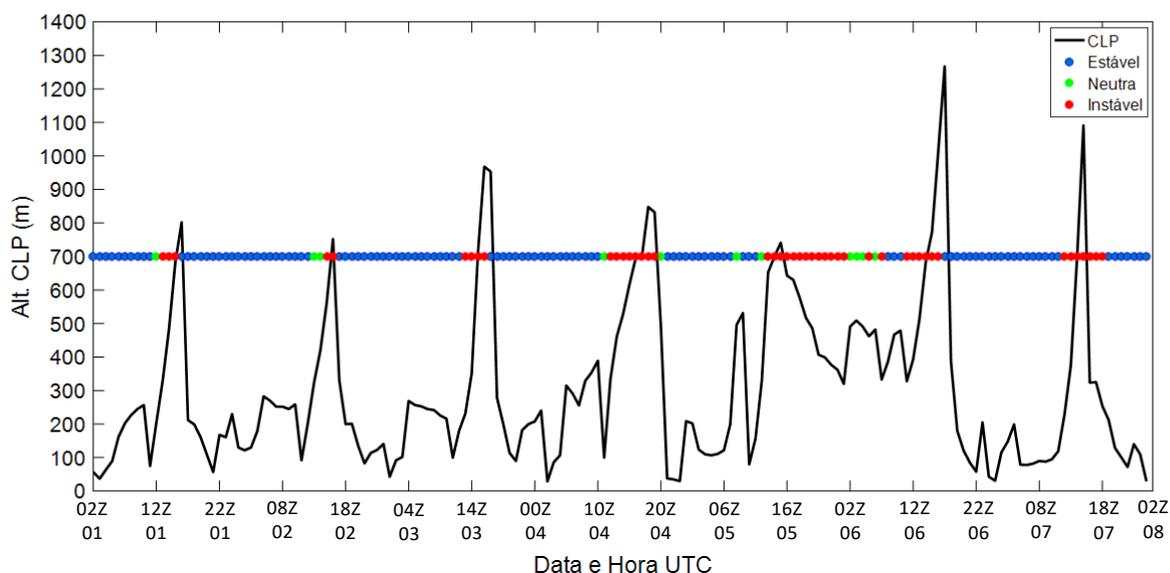
A Figura 18 apresenta a evolução das concentrações de  $PM_{10}$  registradas na estação de Pedra de Guaratiba e a classificação da estabilidade estimada a partir dos resultados do modelo, durante o primeiro período. Os resultados revelam em 67% dos casos uma atmosfera estável, 26% instável e 6% neutra. Isso concorda com o tipicamente observado durante o

inverno na região, quando devido uma menor incidência de radiação solar e atuação do ASAS torna a atmosfera mais propícia à condições de estabilidade.

As maiores concentrações de  $PM_{10}$  ocorrem nos primeiros 4 dias onde verificou em grande parte dos horários uma atmosfera estável, concordando com a literatura que indica que condições estáveis desfavorecem a dispersão de poluentes (SEINFELD; PANDIS, 2006). As menores concentrações foram verificadas nos dias 5 e 6, quando o período apresentou condições instáveis durante horários subsequentes. Os horários de diminuição de concentração em todos dias revelam também concordância com o horário quando a brisa marítima atinge a região. As menores concentrações estão também associadas as maiores alturas da CLP, e as altas concentrações associadas aos menores valores de altura da CLP, como pode ser verificado na Figura 19.



**Figura 18:** Estabilidade e concentração de  $PM_{10}$  durante período de 01/08/2013 a 07/08/2013 na estação de Pedra de Guaratiba.

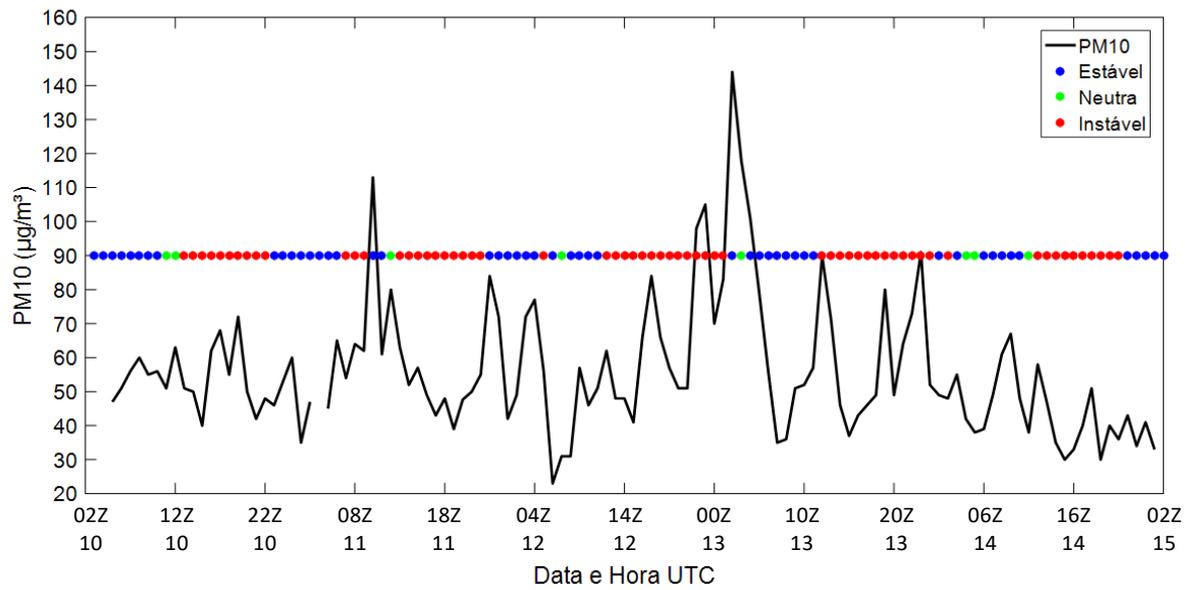


**Figura 19:** Estabilidade e Altura da CLP durante período de 01/08/2013 à 07/08/2013 na estação de Pedra de Guaratiba.

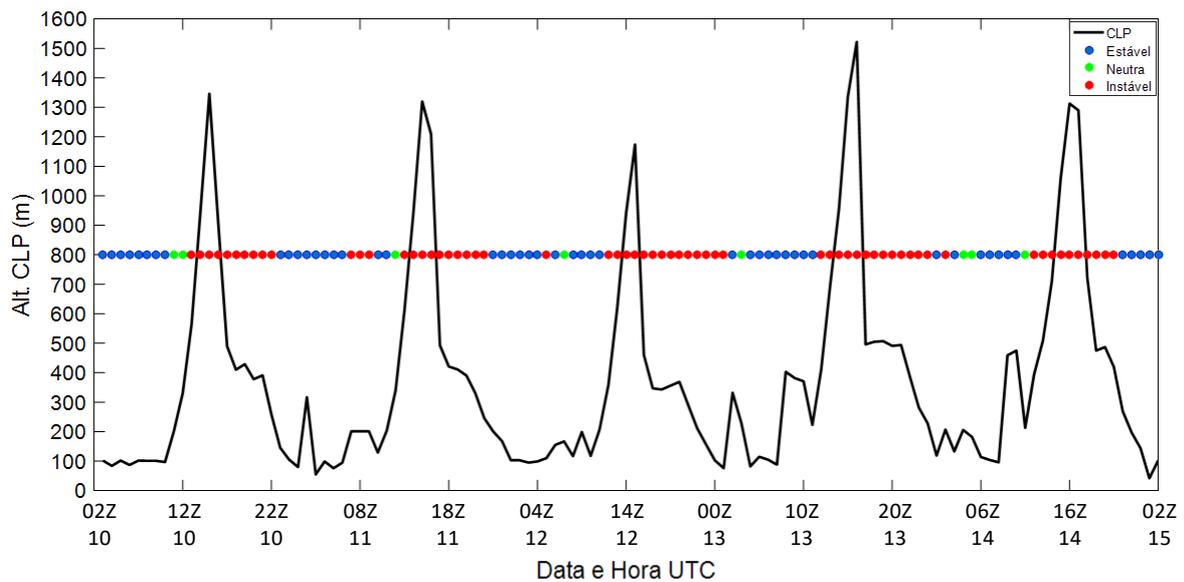
A Figura 20 apresenta a evolução da estabilidade atmosférica e das concentrações de  $PM_{10}$ , durante o segundo período (verão), para a estação Pedra de Guaratiba. Os resultados do modelo indicam que a atmosfera permaneceu 51% do tempo instável, 43% estável e 7% neutra durante o período de estudo. A maior incidência de radiação solar durante o verão favorece condições de atmosfera mais instável.

Para esse período, os maiores picos de concentração de  $PM_{10}$  foram identificados na transição da atmosfera instável para a estável. Os menores valores de concentração durante esse período foram identificados durante horários subsequentes, em que a atmosfera é configurada como estável. As maiores concentrações são verificadas durante a manhã e madrugada, horários quando os ventos, em geral são mais fracos (PIMENTEL et al., 2014). Já as menores concentrações são registradas, principalmente durante a tarde, horário de atuação da brisa marítima, como destacado por Dereczynski et al. (2009) e Carvalho (2010).

Através da Figura 21, é possível verificar que os horários de maiores concentrações de  $PM_{10}$ , assim como no período anterior, coincidem com as menores alturas de CLP, e vice-versa.



**Figura 20:** Estabilidade e concentração de PM<sub>10</sub> durante período de 10/02/2014 a 14/02/2014 na estação de Pedra de Guaratiba.



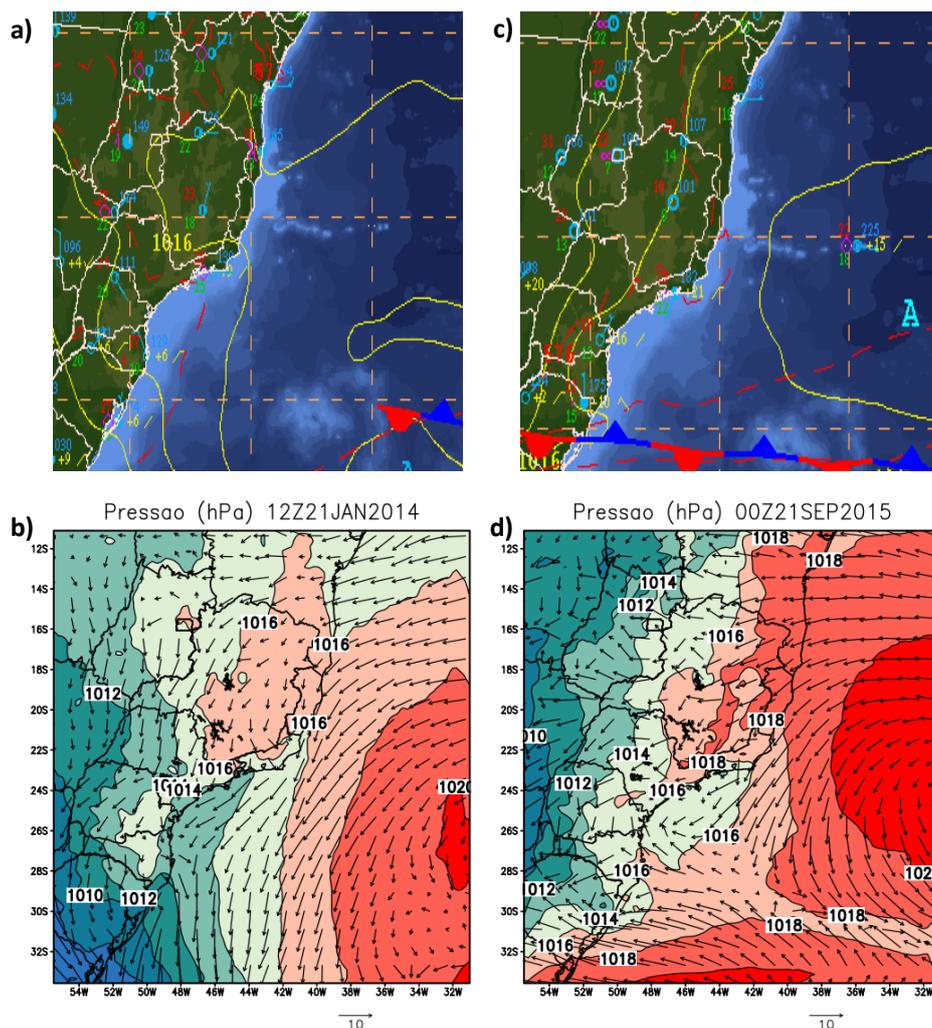
**Figura 21:** Estabilidade e Altura da CLP durante período de 10/02/2014 a 14/02/2014 na estação de Pedra de Guaratiba.

## **5.2 Análise para o O<sub>3</sub>**

### **5.2.1 Verificação dos resultados do modelo WRF: análise de grande escala e comparação com dados observados**

Através da análise das cartas sinóticas, também é possível verificar, de forma análoga ao verificado para o PM<sub>10</sub>, que os períodos selecionados durante o verão e o inverno apresentaram predomínio da atuação do ASAS. Os resultados corroboram com estudos realizados considerando a avaliação das concentrações de O<sub>3</sub> sob a região sudeste do Brasil (Carvalho et al., 2012, Silva Junior et al., 2013).

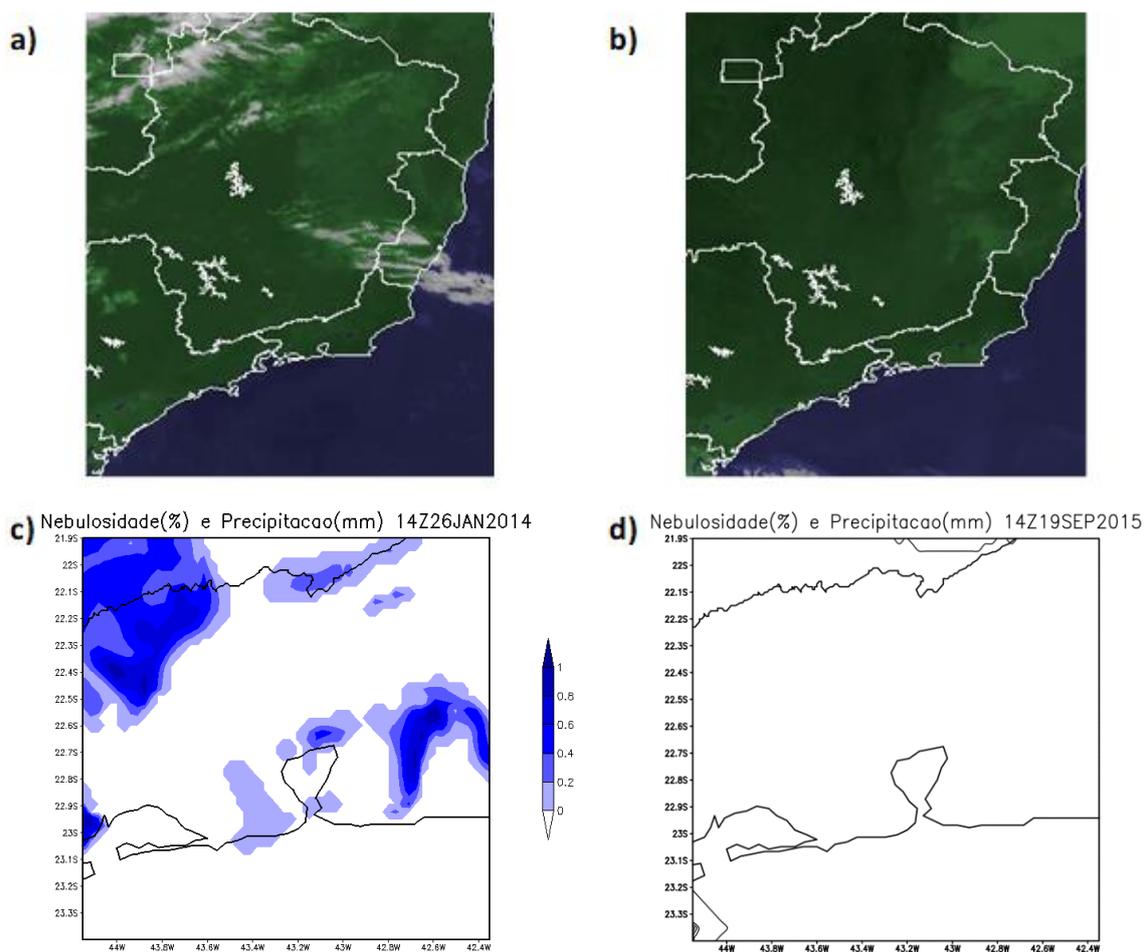
A comparação visual entre as cartas sinóticas e o campo de pressão e vento simulados pelo modelo WRF, através da grade de 27 Km, permitiu verificar que modelo simulou bem a configuração do ASAS, durante os dois períodos. De fato, também foi possível verificar, novamente, que o ASAS se encontra mais bem configurado durante o período de inverno. Como exemplo, a influência do ASAS sob a RMRJ durante o terceiro período pode ser observada através da carta sinótica apresentada na Figura 22 (a) e a partir do campo de pressão e vento gerados a partir dos resultados do modelo WRF (12Z do dia 21 de janeiro de 2014) (Figura 22 b). A atuação do ASAS durante o quarto período pode ser verificada pela observação da Figura 22 (c) durante às 00Z do dia 21 de setembro de 2015 e pela sua representação correspondente gerada pelo WRF (Figura 22 d).



**Figura 22:** Recorte Cartas Sinótica de (a) 21/01/2014 às 12Z e (c) de 21/09/2015 às 00Z, referente ao deslocamento da ASAS e Pressão ao nível médio do mar e vento, através da grade de 27 Km, WRF, (b)21/01/2014 às 12Z e (c) de 21/09/2015 às 00Z.

A ausência de nebulosidade, associada a atuação do ASAS pode ser identificada pelas imagens de satélite, nos dois períodos. As simulações revelaram que o modelo WRF representou as condições de céu-claro de forma satisfatória, concordando com as observações. Apenas em alguns horários durante o 3º período, o modelo apresentou presença de nebulosidade não identificada nas imagens de satélite. Exemplificando, a Figura 23 (a) mostra por meio da imagem de satélite das 14Z do dia 26 de janeiro de 2014 a ausência de nuvens sob a RMRJ, o que não é replicado na Figura 20 (c) quando analisado os resultados do modelo, que apresenta campos de nebulosidade, próximo a RMRJ e baixa nebulosidade sob ela. Do mesmo modo, a imagem de satélite das 14Z de 19 de setembro de 2015 (Figura 20 b), exemplifica, no decorrer do quarto período, a condição de céu-claro e a sua representação

através do WRF (Figura 20 d). Vale destacar que as figuras apresentadas referem-se ao período da tarde, horário propício a grande incidência de radiação solar, variável fundamental na formação do O<sub>3</sub>. Dessa forma, a verificação de predominância de ausência de nebulosidade, nos dois períodos, contribuiu para a formação de ozônio.

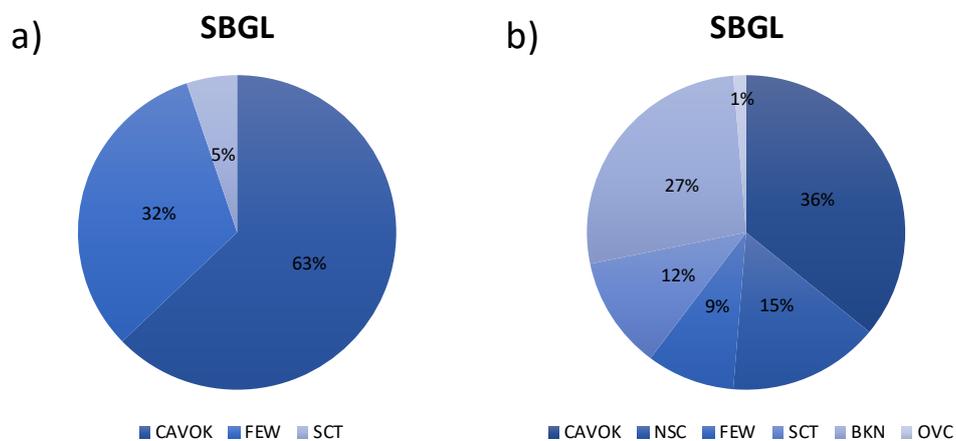


**Figura 23:** Recorte imagens de satélite (GOES, colorida) das (a) 14Z de 26 de janeiro de 2014 e (b) 14Z de 19 de setembro de 2015; nebulosidade e precipitação, através da grade de 3 Km, WRF, (c) 14Z de 26 de janeiro de 2014 e (d) 14Z de 19 de setembro de 2015.

Os dados METAR do Aeroporto Internacional Tom Jobim revelam que a porcentagem do número de horas em que a cobertura de nuvens foi de até 2/8 foi superior a 95% durante o terceiro período e 60% no quarto período. Durante o terceiro período, houveram registros de precipitação leve nas seguintes estações: Irajá 2,4 mm no dia 22 às 16h, Bangu 3,2 mm no dia 24 às 21h e Campo Grande 0,4 mm no dia 24 às 20h. Apesar da a estação de Irajá registrar valores de precipitação em um horário favorável a formação de O<sub>3</sub>,

não foi verificada queda significativa nas concentrações, inclusive com registro de valores acima do limiar estabelecido para comparação. Durante o quarto período, não foi verificada precipitação em nenhuma das estações consideradas. Os resultados do modelo indicam também concordância com as observações.

É importante frisar que a precipitação pode remover os precursores do O<sub>3</sub> da atmosfera via deposição úmida, porém nessa situação houve precipitação durante o final da tarde e noite, sem influência significativa sobre a concentração de O<sub>3</sub> na RMRJ.

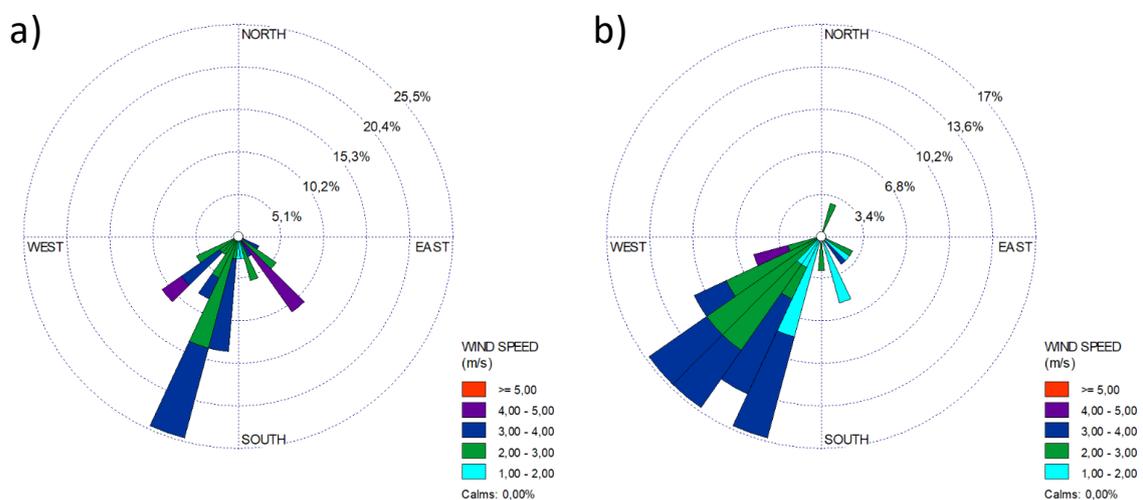


**Figura 24:** Frequência de ocorrência das classes de cobertura de nuvens utilizadas em mensagens METAR para os horários entre 06 e 18 Hora Local para cada dia no (a) período entre 21/01/2014 a 26/01/2014, no aeroporto SBGL e (b) no período entre 18/09/2015 a 23/09/2015, no aeroporto SBGL. CAVOK- Ceiling and Visibility Okay; SKC- Sky clear (clear below 12,000 for ASOS/AWOS); NSC- No significant clouds; FEW- Few (1/8 to 2/8 sky cover); SCT- Scattered (3/8 to 4/8 sky cover); BKN- Broken (5/8 to 7/8 sky cover); OVC- Overcast (8/8 sky cover).

Novamente, é válido ressaltar que as circulações de mesoescala são favorecidas quando o fluxo sinótico é fraco, o que acontece quando há atuação do ASAS. A Figura 25 exemplifica a atuação da brisa marítima no litoral da região durante o período da tarde, período de maior intensidade da mesma. Utilizando os dados de vento registrados na estação de Pedra de Guaratiba, estação mais próxima do oceano, pode-se verificar o comportamento da mesma durante os 2 períodos de estudo. Ventos mais intensos foram identificados quando provenientes da direção sudoeste, direção tipicamente associada a brisa marítima na RMRJ,

como destacado por Dereczynski et al. (2009). A análise do comportamento da brisa indica favorecimento no transporte de poluentes, para regiões localizadas a nordeste da região.

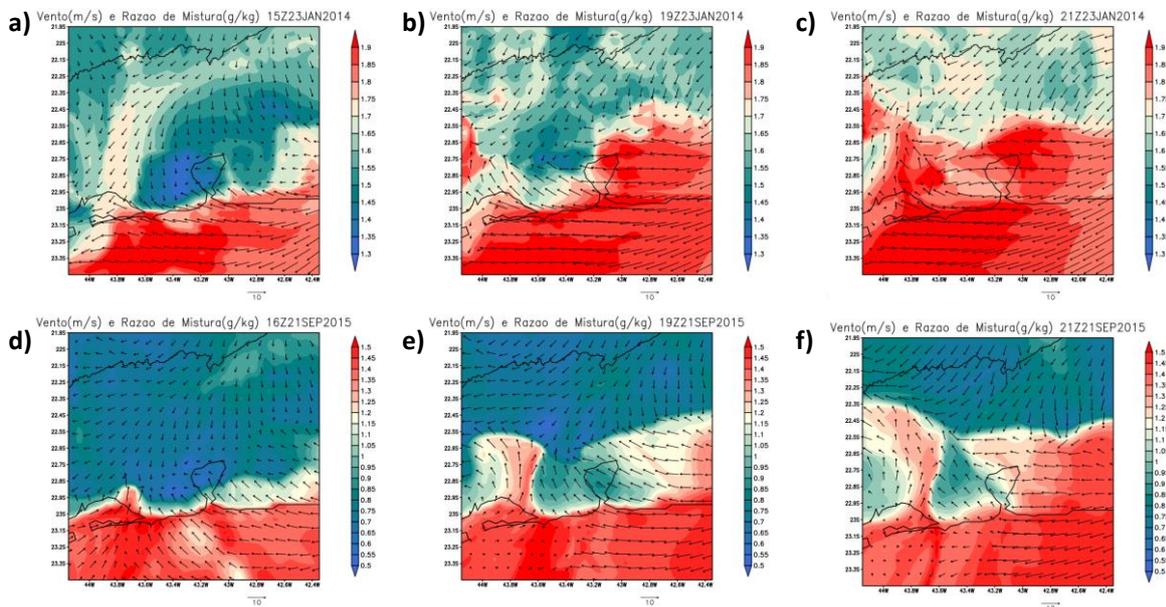
Também foi possível verificar que a velocidade média do vento durante a madrugada e de manhã, período que contribui para o acúmulo de poluentes precursores para formação do  $O_3$ , registrou predominância de ventos fracos abaixo de  $2,04 \text{ m.s}^{-1}$ , durante o terceiro período, e abaixo de  $2,01 \text{ m.s}^{-1}$ , durante o quarto período em todas as estações. Durante os dois períodos apresentados na Figura 25, é possível verificar, um aumento na intensidade do vento quando comparada aos períodos da manhã e madrugada. Esse padrão também foi identificado por Carvalho et al. (2010).



**Figura 25:** Rosa dos Ventos entre as 13 e 18 horas, estação Pedra de Guaratiba do período entre (a) 21/01/2014 a 26/01/2014, (b) 18/09/2015 a 23/09/2015.

Durante os dois períodos, os resultados do modelo indicam a ocorrência de brisa marítima no litoral no período da tarde em todos os dias em ambos os períodos. Os resultados do modelo WRF, a partir da análise da direção e magnitude do vento e da razão de mistura, destacaram a ocorrência da brisa marítima. As simulações representaram, durante ambos os períodos de estudo, a configuração de brisa marítima durante o período da tarde. Nota-se novamente que os horários de atuação da brisa marítima sobre a região, também são horários onde identifica-se o aumento dos valores de razão de mistura. A Figura 26 apresenta a evolução da brisa registrado no dia 23 de janeiro (terceiro período) (início da entrada de brisa marítima às 15 Z, maior intensidade da brisa às 19 Z, e às 21 Z a atuação da brisa sobre toda

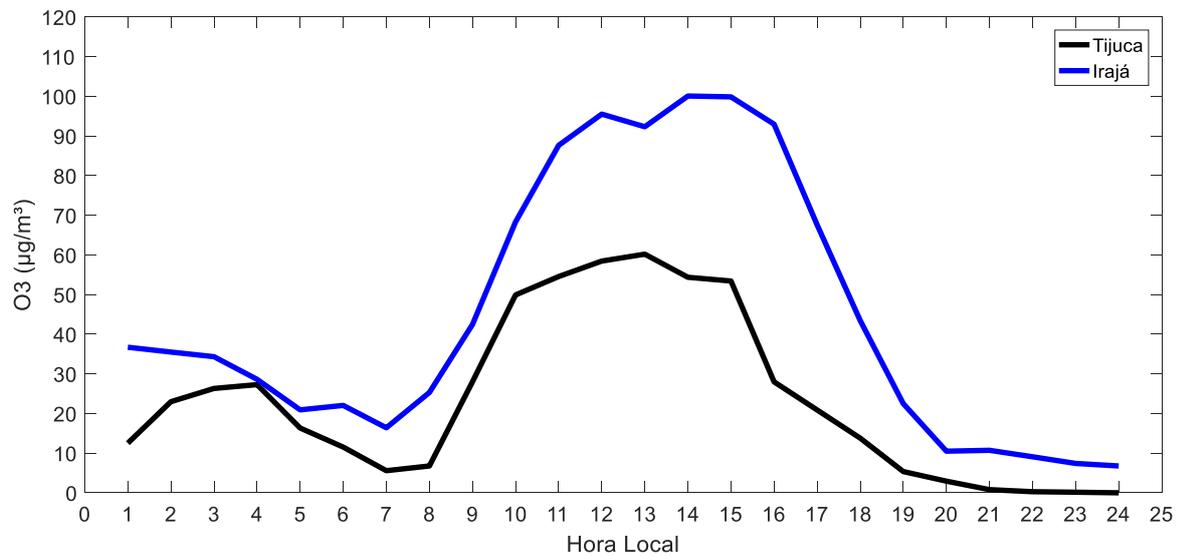
RMRJ. Durante o quarto período, no dia 21 de setembro uma configuração análoga também é verificada, durante os horários da 16, 19 e 21 Z.



**Figura 26:** Vento e Razão de Mistura de 23 de janeiro de 2014 (a) 15Z, (b) 19Z, (c) 21Z e Vento e Razão de Mistura de 21 de setembro (d) 16Z, (e) 19Z e (f) 21Z, através da grade de 3 Km, WRF.

Através da Figura 27 foi possível verificar a influência da brisa marítima, sobre as concentrações de  $O_3$ , na estação da Tijuca, localizada na região central, e na estação do Irajá, a noroeste desta. Novamente, podemos destacar que a brisa marítima sobre a região central, é principalmente de sudeste (PIMENTEL et al. 2014), o que pode influenciar no transporte de poluente para noroeste da região. Pode ser verificado durante o dia 21 de setembro de 2015 que as maiores concentrações de  $O_3$  são registradas na Tijuca entre 10 e 15 h (horário local); já as maiores no Irajá são registradas entre 11 e 17 h (horário local), tais horários são identificados como os de maiores incidência de radiação, demonstrando um comportamento típico para formação de  $O_3$ . Porém, devido a atuação de brisa, pode indicar que o transporte de poluente para noroeste favorece concentrações mais elevadas no Irajá (em comparação com a Tijuca). Tal fato é corroborado quando a análise da evolução das concentrações revela a partir das 16 h (horário local), o início da diminuição das concentrações de  $O_3$  na Tijuca, associado com um aumento nas concentrações do Irajá. Vale ressaltar que a estação Tijuca está localizada em uma área com alto fluxo veicular o que dificulta conclusões definitivas no

que se refere ao O<sub>3</sub>. O aumento do fluxo veicular na final tarde também pode afetar as razões COV/NO<sub>x</sub> favorecendo em alguns casos a diminuição das concentrações de O<sub>3</sub>.



**Figura 27:** Comportamento da concentração de O<sub>3</sub> ao longo do dia 21 de setembro de 2015, nas estações da Tijuca e Irajá.

Na Tabela 19 observar-se que a média de temperatura máxima durante o terceiro período ficou acima de 36 °C. A temperatura média do período também revela valores altos, em geral, superiores a 31 °C, comportamento típico durante o verão na RMRJ. A umidade relativa média esteve abaixo de 60% em todos os dias com valores de umidade relativa mínima variando predominantemente entre 31 e 43%, caracterizando dias secos. Durante o quarto período, a média de temperatura máxima ficou acima de 31 °C e a temperatura média variou entre 25 e 31°C. A umidade relativa média esteve entre de 46 e 76%, e a umidade relativa mínima entre 17 e 51%, também caracterizando o período como seco. A associação entre altos valores de concentração de O<sub>3</sub>, altas temperaturas e baixos valores de UR também foi identificada para a RMRJ por Carvalho et al. (2006), Carvalho (2010), Santos (2016).

**Tabela 19:** Média de temperatura máxima e média de temperatura, em °C, média de umidade relativa mínima e média de umidade relativa, em %, registradas na RMRJ durante o período de 21/01/2014 a 26/01/2014 e o período de 18/09/2015 a 23/09/2015.

Ano	2014						2015					
Dia/Mês	21/1	22/1	23/1	24/1	25/1	26/1	18/9	19/9	20/9	21/9	22/9	23/9
Méd. Temp. máx.	38,0	39,1	39,2	39,6	40,0	36,7	41,5	35,7	31,7	32,7	31,5	34,5
Temp. Méd.	31,5	32,4	32,4	32,4	32,0	31,3	31,6	28,7	26,0	26,1	25,5	26,2
Méd. Umid. Mín.	35,2	33,1	34,5	32,4	31,2	42,9	17,7	40,9	50,5	46,6	50,9	43,1
Umid. Méd.	58,8	55,3	54,7	53,7	52,6	59,6	46,3	63,5	70,5	70,2	72,6	72,0

Com relação ao terceiro período de estudo, os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos estatísticos para a temperatura do ar são apresentados na Tabela 20. A correlação de Pearson calculada a partir dos valores observados e simulados pelo WRF revelou valores altos, superiores a 0,79 em 7 estações. Através do ME, verificou-se que o modelo subestimou os valores de temperatura em todas as estações. O índice de concordância foi, em 7 estações, superior a 0,66. Assim como para a análise do PM<sub>10</sub>, somente para a estação de Copacabana, o modelo apresentou desempenho ruim com correlação inferior de 0,22 e índice de concordância de 0,08.

O primeiro critério ( $\sigma_{sim} \approx \sigma_{obs}$ ) para obter o *skill* da simulação foi atendido, utilizando uma diferença percentual de até 20% para avaliação, em 6 estações, com exceção de Copacabana e Tijuca. O segundo ( $RMSE < \sigma_{obs}$ ) critério em 7 estações, com exceção de Copacabana e terceiro ( $RMSE_{rdm} < \sigma_{obs}$ ) para todas estações. Logo, o modelo obteve o *skill*, ou seja, possui habilidade em representar o registrado nas estações de Bangu, Campo Grande, Centro, Irajá, Pedra de Guaratiba e São Cristóvão.

**Tabela 20:** Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 21/01/2014 a 26/01/2014.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,87	3,42	-2,85	0,76	1,90	3,77	2,90
Campo Grande	0,85	3,40	-2,72	0,75	2,05	3,78	2,77
Centro	0,83	2,20	-0,30	0,87	2,18	3,75	2,54
Copacabana	0,22	5,06	-3,66	0,08	3,50	3,59	0,75
Irajá	0,89	3,20	-2,45	0,82	2,05	4,22	3,08
Pedra de Guaratiba	0,79	2,19	-1,23	0,81	1,81	2,96	2,26
São Cristóvão	0,91	1,93	-1,28	0,91	1,45	3,48	2,85
Tijuca	0,88	4,86	-3,85	0,66	2,97	4,99	2,58

Na Tabela 21 encontram-se os resultados para o 4º período, quando consideradas a temperatura do ar registrada nas estações e simulada pelo modelo para esses pontos. A correlação de Pearson durante esse período apresentou-se entre 0,48 e 0,72, o maior índice verificado foi na estação Tijuca de 0,72 e o menor na estação de Copacabana de 0,48. A partir do ME, verificou-se que o modelo superestimou os valores de temperatura em 5 estações e subestimou 4 estações. O índice de concordância foi relativamente alto em 7 estações para temperatura, acima de 0,69, exceto para a estação Copacabana.

O primeiro critério para obter o *skill* da simulação foi atendido, utilizando uma diferença percentual de até 20% para avaliação, em 6 estações, com exceção de Copacabana e Tijuca. O segundo e terceiro critério forma atendidos em 7 estações, com exceção de Copacabana. Novamente, o modelo obteve o *skill* nas estações de Bangu, Campo Grande, Centro, Irajá, Pedra de Guaratiba e São Cristóvão, para temperatura.

**Tabela 21:** Análise Estatística da temperatura do ar simulada com a observada para o período de 18/09/2015 a 23/09/2015.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,65	4,19	1,00	0,76	4,07	5,29	4,09
Campo Grande	0,54	4,43	-0,67	0,69	4,38	4,82	4,21
Centro	0,62	3,92	2,13	0,69	3,29	3,94	3,53
Copacabana	0,48	4,30	-2,91	0,34	3,17	3,59	1,35
Irajá	0,64	3,93	-0,35	0,77	3,92	5,01	3,99
Pedra de Guaratiba	0,55	3,84	0,56	0,70	3,80	4,09	3,88
São Cristóvão	0,71	2,99	0,67	0,82	2,92	3,95	3,72
Tijuca	0,74	3,75	0,91	0,80	3,64	5,40	3,59

Os resultados a partir da aplicação dos métodos estatísticos, para umidade relativa, durante o terceiro período de estudo, estão disponíveis na Tabela 22. Através da aplicação da correlação de Pearson foram identificados valores entre 0,56 e 0,80 em 7 estações. Destaca-se novamente a estação de Copacabana que apresentou valor de -0,06. O ME revelou que o modelo superestimou em os valores de umidade relativa, em 7 estações, e subestimou os valores dessa variável apenas na estação São Cristóvão. O índice de concordância foi relativamente alto em 7 estações ficando acima 0,71, exceto para estação Copacabana (-0,04).

O primeiro, segundo e terceiro critério para obter o *skill* da simulação foi atendido em 7 estações, com exceção de Copacabana. Então, o modelo obteve o *skill* nas estações de Bangu, Campo Grande, Centro, Irajá, Pedra de Guaratiba, Tijuca e São Cristóvão, para umidade relativa.

**Tabela 22:** Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 21/01/2014 a 26/01/2014.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,67	12,08	4,59	0,77	11,17	14,10	13,14
Campo Grande	0,66	11,43	4,15	0,77	10,66	13,28	12,49
Centro	0,73	10,02	3,59	0,82	9,35	13,38	11,63
Copacabana	-0,06	22,50	17,75	-0,04	13,82	12,22	5,71
Irajá	0,80	9,38	2,97	0,88	8,89	14,31	14,13
Pedra de Guaratiba	0,56	11,36	2,20	0,71	11,14	12,87	10,63
São Cristóvão	0,78	8,93	-0,51	0,88	8,92	14,07	12,93
Tijuca	0,73	13,01	7,26	0,77	10,80	15,87	12,08

A aplicação dos métodos estatísticos durante o quarto período de estudo, para a umidade relativa, tem os resultados dispostos na Tabela 23. O índice de correlação de Pearson mostrou valores entre 0,42 e 0,77, sendo o maior valor foi verificado na estação Irajá (0,77) e o menor na estação de Copacabana (0,42). O ME indica que o modelo subestimou os valores de umidade relativa, durante o período, em 6 estações e superestimou para estação Copacabana. O índice de concordância para umidade relativa variou entre 0,35 (Pedra de Guaratiba) e 0,85 (Tijuca).

O primeiro e terceiro critério para obter o *skill* da simulação foi atendido em todas as estações. Porém, o segundo critério não foi obtido em nenhuma das estações indicando que o modelo não obteve o *skill*, para umidade relativa, durante esse período.

**Tabela 23:** Análise Estatística da umidade relativa do ar simulada com a observada para o período de 18/09/2015 a 23/09/2015.

Estação	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE <sub>rmd</sub>	$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$
Bangu	0,74	24,92	-21,89	0,53	11,92	17,61	13,71
Centro	0,68	20,86	-15,46	0,64	14,00	15,47	18,56
Copacabana	0,42	16,27	8,58	0,49	13,83	14,29	10,73
Irajá	0,77	23,24	-20,47	0,59	11,01	17,04	14,68
Pedra de Guaratiba	0,47	37,81	-31,45	0,35	20,98	21,88	18,58
São Cristóvão	0,73	21,83	-18,16	0,63	12,11	16,11	16,92
Tijuca	0,76	12,03	-3,74	0,85	11,43	15,91	17,17

### 5.1.2 Verificação da representação do perfil vertical e da estabilidade da atmosfera

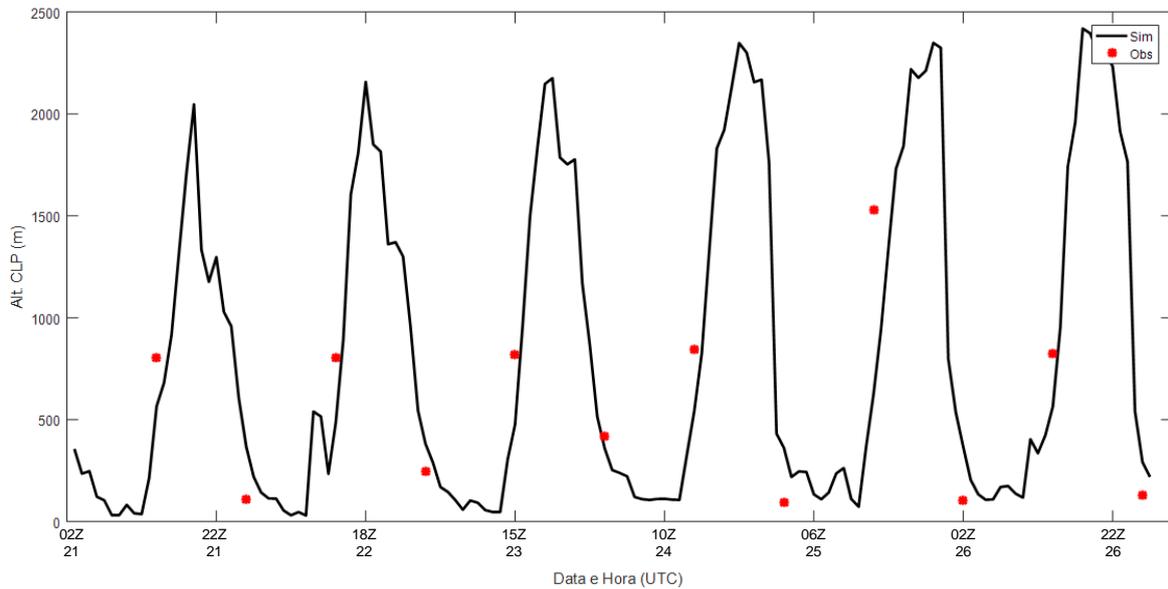
Utilizando o número de Richardson e a classificação da estabilidade atmosférica proposta por Clifton et al. (2013) foi possível analisar a estabilidade atmosférica nos períodos selecionados para o O<sub>3</sub>, da mesma forma como efetuado para o PM<sub>10</sub>.

No terceiro período de estudo, a comparação entre os dados observados e simulados mostrou uma classificação da estabilidade atmosférica igual em 4 dos 6 dias às 12 Z e em apenas 1 dia às 00 Z (Tabela 24). Assim como o segundo período, para o PM<sub>10</sub>, o modelo apresentou dificuldade de representar a estabilidade durante a noite, principalmente, durante o verão. Isso pode estar associado a dificuldade do modelo em estimar o resfriamento noturno da superfície.

**Tabela 24:** Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 21/01/2014 a 26/01/2014 do aeroporto SBGL.

		Estabilidade		
		10h (12Z)		22h (00Z)
Data	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
21/1	Instável	Instável	Estável	Estável
22/1	Instável	Instável	Estável	Instável
23/1	Instável	Instável	Estável	Neutra
24/1	Instável	Neutra	Estável	Neutra
25/1	Instável	Neutra	Estável	Estável
26/1	Instável	Instável	Neutra	Estável

Analisando a Figura 28 é possível verificar que, no geral, o modelo simulou de maneira eficaz a altura da CLP, em ambos os horários quando são lançadas as radiossondagens, com valores próximos aos observados. O ciclo diurno da CLP simulado pelo modelo também revela valores altos, superiores a 2000 m, durante o período da tarde.



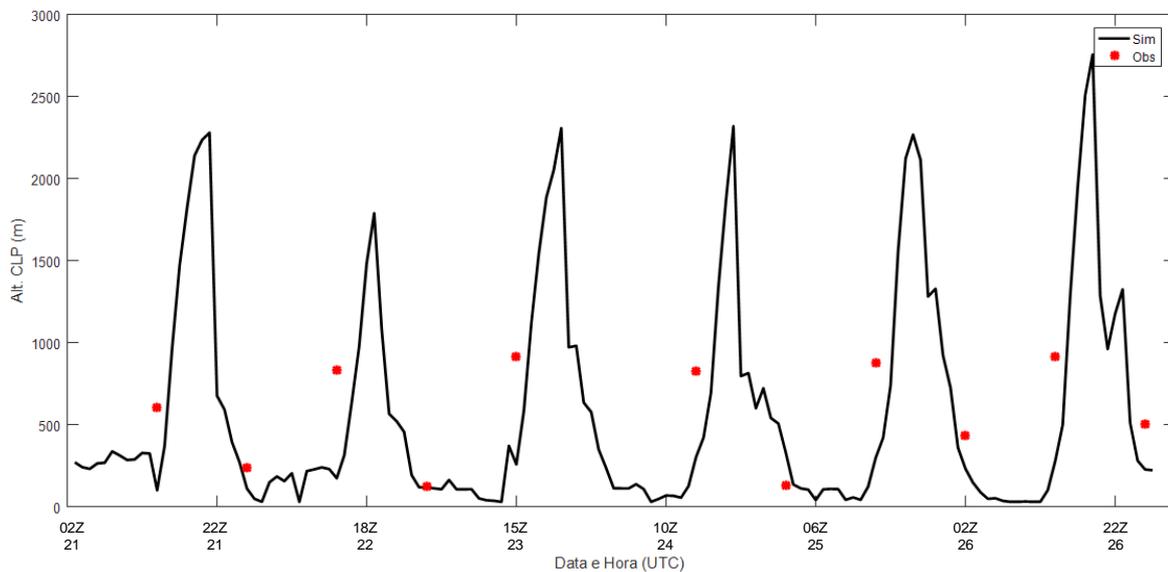
**Figura 28:** Altura da CLP simulada e observada de 21/01/2014 a 26/01/2014 do aeroporto SBGL.

Os resultados para o quarto período, revelou, principalmente, para o horário das 12Z, dificuldades em representar a evolução da estabilidade na CLP (Tabela 25). Verificou-se que, durante no inverno, o modelo simulou condições predominantemente de atmosfera neutra.

**Tabela 25:** Estabilidade Atmosférica observada e simulada do período de 18/09/2015 a 23/09/2015 do aeroporto SBGL.

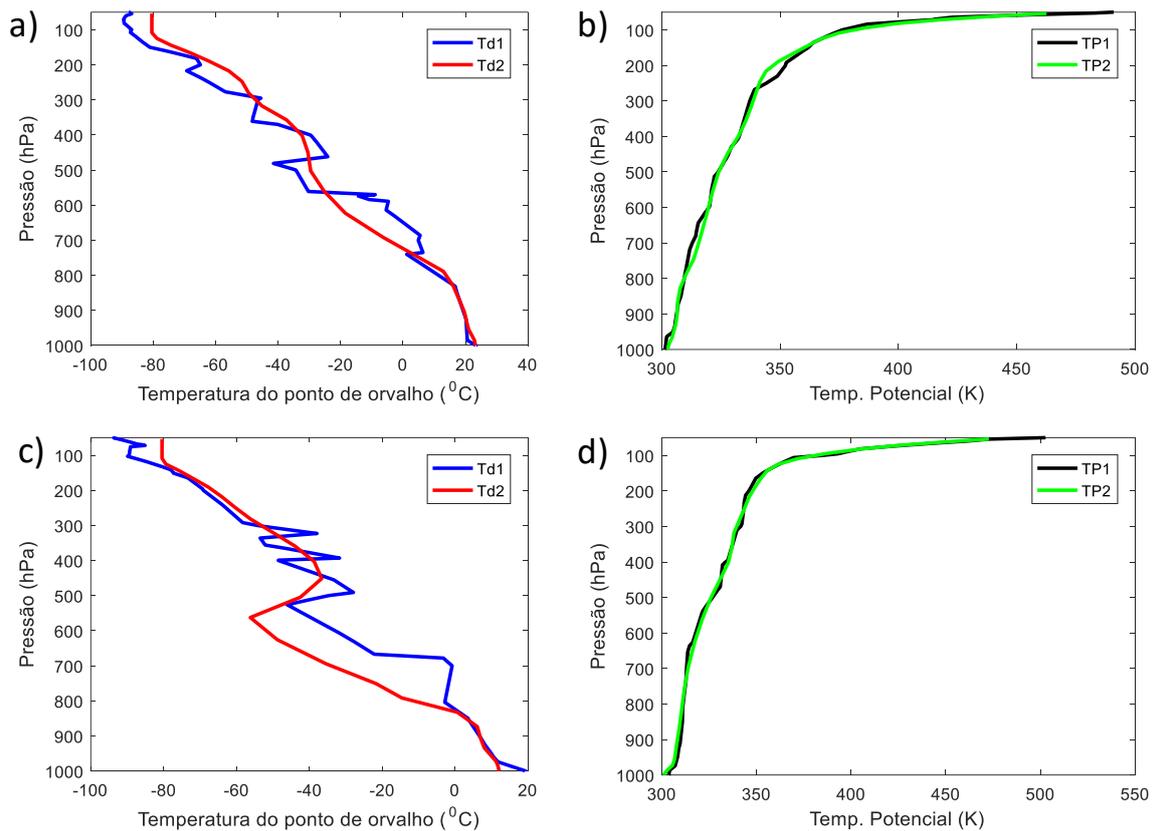
Estabilidade				
		Estabilidade		
		09h (12Z)	21h (00Z)	
Data	Obs.	Sim	Obs.	Sim.
18/9	Estável	Neutra	Estável	Neutra
19/9	Instável	Neutra	Estável	Estável
20/9	Instável	Neutra	-	-
21/9	Instável	Neutra	Estável	Estável
22/9	Instável	Neutra	Estável	Estável
23/9	Neutra	Neutra	Estável	Neutra

Através da Figura 29, em geral, foi possível verificar que o modelo simulou bem a altura da CLP, apresentando ligeira subestimativa dos resultados na maior parte do período.



**Figura 29:** Altura da CLP simulada e observada de 18/09/2015 a 23/09/2015 do aeroporto SBGL.

A Figura 30 apresenta o perfil vertical da temperatura potencial e da temperatura do ponto de orvalho simulados e observados para 2 períodos de estudo (terceiro e quarto), para horários específicos, correspondentes ao do lançamento de radiossondagens. Assim como nos períodos anteriores, verifica-se que o perfil vertical de temperatura potencial é bem representado, com diferenças ligeiramente superiores na camada abaixo de 800 hPa. Novamente em relação a representação de Td, os resultados do modelo indicam diferenças mais nítidas em relação às observações. Analisando o perfil vertical de temperatura e Td, observa-se que o modelo teve maior dificuldade em representar camadas úmida, do que camadas seca.

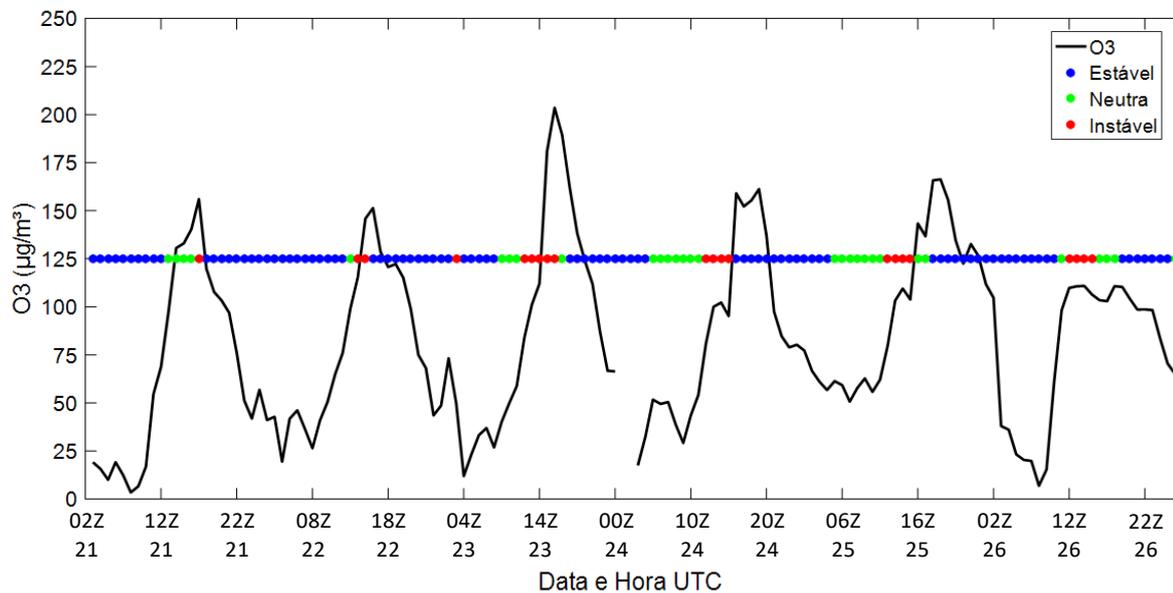


**Figura 30:** Perfil vertical simulado e observado (a) de temperatura do ponto de orvalho de 22/01/2014 às 00Z (b) de temperatura potencial de 25/02/2014 às 00Z (c) de temperatura do ponto de orvalho de 18/09/2015 às 12Z (d) de temperatura potencial de 19/09/2015 às 00Z. Onde: Td1: Td observada (em azul), Td2: Td simulada (em vermelho), TP1:  $\theta$  observada (em preto) e TP2:  $\theta$  simulada (em verde).

### 5.2.3 Avaliação do impacto da estabilidade atmosférica nas concentrações de $O_3$

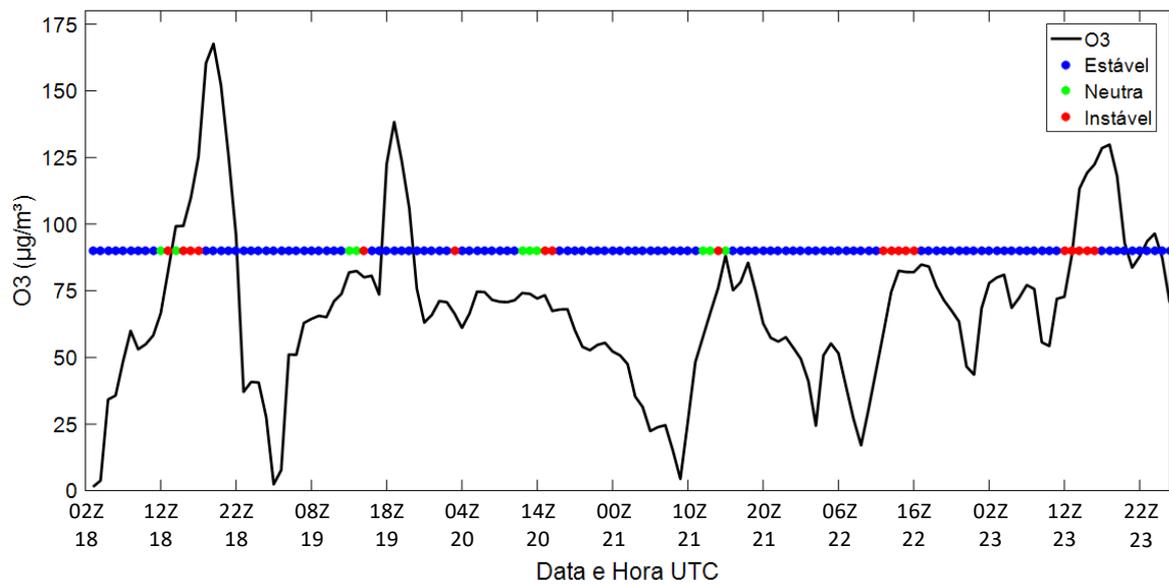
A Figura 31 apresenta a evolução das concentrações de  $O_3$  e a classificação da estabilidade atmosférica na estação de Pedra Guaratiba, durante o terceiro período (verão). Os resultados do modelo revelam uma atmosfera 65% do período em condições estáveis, 21% neutra e 14% instáveis. Esse comportamento é atípico para um período de verão onde a atmosfera, apresenta período de maior instabilidade, principalmente, durante a tarde por conta do intenso aquecimento da superfície. Os maiores picos de ozônio ocorreram próximo ao 15h (hora local), horário de grande incidência de radiação, quando, na maioria das vezes, o modelo simula a transição de uma atmosfera instável para uma estável. A predominância de condições estáveis, durante o verão, em um período com altas concentrações de  $O_3$ , pode representar uma associação significativa. Ressalta-se que uma vez que a formação do  $O_3$

necessita de incidência de radiação solar, a dependência com condições de estabilidade muitas vezes não é estudada.



**Figura 31:** Estabilidade e concentração de O<sub>3</sub> durante período de 21/01/2014 a 26/01/2014 na estação de Pedra de Guaratiba.

A Figura 32 apresenta a classificação da estabilidade atmosférica e da concentração de O<sub>3</sub>, na estação de Pedra Guaratiba, durante o período de inverno. Em 80% do período, a atmosfera se encontra estável, em 13% instável e 7% próxima a neutralidade. De fato, a predominância da estabilidade é tipicamente observada durante o inverno na região devido a menor incidência de radiação solar e a atuação do ASAS. Assim como o período anterior, os picos de concentração máxima de O<sub>3</sub>, ocorrem próximo ao meio dia e os picos de concentração mínima durante a noite e madrugada.



**Figura 32:** Estabilidade e concentração de O<sub>3</sub> durante período de 18/09/2015 a 23/09/2015 na estação de Pedra de Guaratiba.

## 6. Conclusões

Esse estudo teve como objetivo avaliar o impacto das condições de estabilidade atmosférica na qualidade do ar, através do uso de modelagem numérica, durante dias quando episódios de altas concentrações de  $O_3$  e  $PM_{10}$  foram registradas na RMRJ. Foram selecionados 4 períodos ao todo: dois períodos com altas concentrações de  $PM_{10}$  e dois com altas concentrações de  $O_3$  em dias consecutivos.

Foi possível verificar que os 4 períodos estudados estiveram sobre a influência do ASAS na maior parte dos períodos concordando com a literatura. Vale ressaltar que sob a influência do ASAS, a região sudeste, apresenta predominantemente condições de céu-claro e ventos fracos o que favorece a manutenção de episódios com altas concentrações de poluentes sobre a região. Condições de ausência de precipitação e baixa umidade relativa do ar foram verificados para todos os períodos analisados. No caso do  $O_3$ , a ocorrência de altas temperaturas também foi observada. Ressalta-se que apesar de diferentes mecanismos de formação, os períodos com alta concentrações de  $O_3$  e  $PM_{10}$  apresentaram condições meteorológicas semelhantes. Destaca-se também que essas condições foram bem representadas pelos resultados do modelo WRF. A comparação dos dados observados e simulados pelo modelo no que se refere as variáveis temperatura e umidade relativa revelou, em geral, bons resultados. Contudo, é necessário destacar a dificuldade do modelo em simular as duas variáveis, em todos os períodos, para a estação Copacabana, o que está diretamente relacionado a localização da mesma. Os resultados obtidos podem indicar uma baixa representatividade da estação de qualidade do ar nessa localidade sendo necessário a realização de estudos específicos para avaliar de forma mais aprofundada essa questão.

A análise dos resultados do modelo e das observações permitiu a identificação da atuação da brisa marítima durante os 4 períodos e o impacto no transporte de poluentes de áreas costeiras para regiões mais afastadas do litoral (predominantemente localizadas a nordeste/noroeste das estações). Contudo, é importante destacar que, durante o período de verão com altas concentrações de  $PM_{10}$ , a brisa marítima foi fraca quando comparada aos demais períodos o que favoreceu a manutenção do poluente sobre a região. A atuação da brisa marítima durante os episódios com altas concentrações de  $O_3$  não pôde ser conclusiva devido ao intenso fluxo de veículos próximo à estação avaliada; a emissão de altas de taxas de NO pode alterar as razões COV/NO<sub>x</sub> favorecendo, em alguns casos, a diminuição das concentrações de  $O_3$ .

A verificação do perfil vertical de temperatura potencial, variável fundamental para o cálculo da estabilidade atmosférica através do número de Ri, apresentou concordância entre os resultados simulados pelo WRF e as observações. A comparação da classificação entre a estabilidade atmosférica, verificada através do número de Ri, a partir dos dados observados (radiossondagem) e do modelo WRF, mostrou uma concordância maior durante o dia, para os períodos no verão, e durante a noite, para os períodos no inverno. A comparação entre a altura da CLP obtida através das observações e os resultados do modelo revelou resultados bem próximos. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo podem servir de subsídios para a utilização dos dados de altura da CLP gerados por modelos meteorológicos em modelos de qualidade do ar regulatórios que requerem tais informações. Contudo, vale ressaltar que são necessários mais estudos que ampliem a verificação do desempenho do modelo WRF, e de outros modelos meteorológicos, para outras situações meteorológicas e outras regiões do Brasil.

A avaliação do impacto da estabilidade revelou que as maiores concentrações de  $PM_{10}$  foram verificadas em horários de atmosfera estável e com baixa altura da CLP. As maiores concentrações de  $O_3$  ocorreram durante horários de instabilidade atmosférica, devido esses horários coincidirem com os de maior incidência de radiação solar, porém os resultados indicam que condições de estabilidade podem ser propícias à manutenção do poluente sobre a região. Interessante.

Nesse contexto, a partir da avaliação da alta dependência dos poluentes às condições meteorológicas é possível concluir que a previsão meteorológica, aliada a conhecimento sobre as fontes de emissão de poluentes prioritárias e da topografia de uma região, pode ser utilizada como indicativo para a previsão da qualidade do ar em uma região.

## Referências

- AIKAWA, M.; KAJINO, M., HIRAKIB, T.; MUKAIA, H. The contribution of site to washout and rainout: Precipitation chemistry based on sample analysis from 0.5 mm precipitation increments and numerical simulation. **Atmospheric Environment**, v. 95, p. 165-174, 2014.
- ALBUQUERQUE, T. T. A. **Formação E Transporte Das Partículas Finas Inorgânicas Em Uma Atmosfera Urbana: Exemplo De São Paulo**. 2010. 189 f. Tese (doutorado em Meteorologia). IAG/USP, São Paulo, 2010.
- ARBEX, M. A. ; SANTOS, U. P. ; MARTINS, L. C. ; SALDIVA, P. H. ; PEREIRA, L. A. A. ; BRAGA, A.L. . Air pollution and the respiratory system. **Jornal Brasileiro de Pneumologia** (Impresso), v. 38, p. 643-655, 2012.
- ARGYLE, P.; WATSON, S.J. Assessing the dependence of surface layer atmospheric stability on measurement height at offshore locations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 131, p. 88-99, 2014.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. ed.; Academic Press, 415 p.; 2001.
- BRAGA, A. L. F.; CONCEIÇÃO, G. M. S.; PEREIRA, L. A. A.; KISHI, H. S.; PEREIRA, J. C. R.; ANDRADE, M. F.; GONÇALVES, F. L. T.; SALDIVA, P. H. N.; LATORRE, M. R. D. O. Air Pollution and Pediatric Respiratory Hospital Admissions in São Paulo, Brazil. **Journal of Environmental Medicine**, v. 1, p. 95-102, 1999.
- BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N.; BÖHM, G. M. Poluição Atmosférica e a Saúde Humana. **REVISTA USP**, São Paulo, v. 51, p. 58-71, 2001.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 03**, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Publicado no Diário Oficial da União (DOU), 1990, Seção I, p. 15937 a 15939.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 05**, de 06 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do programa de controle da poluição do ar por veículos - PROCONVE. Publicado no Diário Oficial da União (DOU), Seção I, p. 8792-8795, 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 05**, de 15 de junho de 1989. Dispões sobre o programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Publicado no Diário Oficial da União (DOU), p. 14713-14714, 1989.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 491**, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Publicado no Diário Oficial da União (DOU), 2018.

BRUNEKREEF, B.; ANNESI-MAESANO, I.; AYRES, J.G.; FORASTIERE, F.; FORSBERG, B.; KÜNZLI, N.; PEKKANEN, J.; SIGSGAARD.; T. Ten principles for clean air. **European Respiratory Journal**, v. 39, n.3, 2012.

CARVALHO, V. S. B. **Meteorologia da Qualidade do Ar no que tange as Concentrações de Ozônio e dos Óxidos de Nitrogênio na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, V. S. B. **O impacto das megacidades sobre a qualidade do ar: os casos das regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro**. 2010. 237 f. Tese (doutorado em Meteorologia). IAG/USP, São Paulo, 2010.

CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D. ; MARTINS, L. D. ; MARTINS, J. A. ; MAZZOLI, C. R. R. ; ANDRADE, M. F. . Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 68-79, 2015.

CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D. ; MAZZOLI, C. R. R. ; ANDRADE, M. F. . Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 27, p. 458-469, 2012.

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, RJ, 2003.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL.  
**Relatório de Qualidade do Ar no estado de São Paulo - 2016.** São Paulo, 2017.

CLIFTON, A.; SCHRECK, S.; SCOTT, G.; KELLEY, N.; LUNDQUIST, J. K. Turbine Inflow Characterization at the National Wind Technology Center. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 135, n. 3, 2013.

CORREA, T. S.. **Validação das condições meteorológicas simuladas pelo modelo BRAMS em dias com altas concentrações de material particulado registradas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2013.65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Atmosféricas) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

CRAWFORD, J.; CHAMBERS, S. D.; COHEN, D. D.; WILLIAMS, A. G.; GRIFFITHS, A. D.; STELCER, E. Assessing the impact of atmospheric stability on locally and remotely sourced aerosols at Richmond, Australia, using Radon-222. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 127, p. 107–117, 2015.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, p.24-38, 2009.

ELBIR, T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 2149-2157, 2003.

GALLARDO, L. ; ANDRADE, M. F. ; CARVALHO, V. S. B. . Chapter 4: South America.. In: Tong Zhu, Megan Melamed, David Parrish, Michael Gauss, LauraGallardo Klenner, Mark Lawrence, Abdourahamane Konare, Cathy Liousse. (Org.). WMO/IGAC Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate. 1ed.: **World Meteorological Organization**, 2012.

GOUVEIA, N.; FREITAS, C.U.; MARTINS, L. C.; MARCÍLIO, I. O. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 22, n. 12, p. 2669-2677, 2006.

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.

- HAN, X.; ZHANG, M.; SKOROKHOD, A.; KOU, X. Modeling dry deposition of reactive nitrogen in China with RAMS-CMAQ. **Atmospheric Environment**, v. 166, p, 47-61, 2017.
- HARTMAN, D. L. **Global Physical Climatology**. Academic Press, 411p.; 1994.
- HE, Q.; ZHANG, L.; CUI, Y.; CHENG, M.; GUO, L.; LIU, M.; CHEN, L. Particle dry deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and its risk assessment in a typical coal-polluted and basin city, northern China. **Atmospheric Pollution Research**, v. 8, p. 1081-1089, 2017.
- HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 3a ed.; San Diego, Academic Press, 186p.; 1992.
- HU, X-M.; KLEIN, P.M.; XUE, M. Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer scheme within WRF for wind resource and air quality assessments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 10, p .490-10, 2013.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro-2014**, 2015.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro-2015**, 2016.
- JANJAI, S.; BUNTOUNG S.; NUNEZ M.; CHIWPREECHA K.; PATTARAPANITCHAI S. Meteorological factors affecting lower tropospheric ozone mixing ratios in Bangkok, Thailand. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 147, p. 76-89, 2016.
- KAJINO, M., AIKAWA, M. A model validation study of the washout/rainout contribution of sulfate and nitrate in wet deposition compared with precipitation chemistry data in Japan. **Atmospheric Environment**, v. 117, p. 124-134, 2015.
- LAWRENCE, M. G.; BUTLER, T. M.; STEINKAMP, J; GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 3969-3987, 2007.
- LORENZZETTI, J. A.; ARAÚJO, C. A. S.; CURTARELLI, M. P. Mean diel variability of surfaceenergy fluxes over Manso Reservoir. **Inland Waters**, v. 5, n. 2, p. 155-172, 2015.

MARTINS, J. A. **Efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região amazônica durante a estação seca.** 2006. 179 f. Tese (doutorado em Meteorologia). IAG/USP, São Paulo, 2006.

MIRANDA, R. M.; ANDRADE, M. F.; FORNARO, A.; ASTOLFO, R.; AFONSO DE ANDRE, P.; SALDIVA, P.H. Urban air pollution: a representative survey of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 55, n.1, p. 63-77, 2012.

MIROWSKY, J.; GORDON, T. Noninvasive effects measurements for air pollution human studies: methods, analysis, and implications. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, London, v. 25, p. 354-380, 2015.

MOHAN, M.; SIDDIQUI, T. A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 21, p. 3775-3781, 1998.

MONTI, E. Z.; ALBUQUERQUE, T. T. A. ; REISEN, V. A. Impactos das Variáveis Meteorológicas na Qualidade do Ar da Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 31, p. 546-554, 2016.

MYLONAS, M. P.; NASTOS, P. T. PBL parameterization schemes sensitivity analysis on WRF modeling of a tornadic event environment in Skala Lakonia in September 2015. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 208, p. 116-131, 2018.

OLMO, N.R.S.; SALDIVA, P.H.; BRAGA, A.L.F.; LIN, C.A.; SANTOS, U.P.; PEREIRA, L.A.A. A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: implications for epidemiological studies and public policy. **Clinics**, v. 66, n.4, p. 681-690, 2011.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS) WHO. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global Update 2005.** WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 2006.

PEREIRA, M.A.C.; LEMOS, M.; MAUAD, T.; ASSUNÇÃO, J. V.; SALDIVA, P.H. Urban, traffic- related particles and lung tumors in urethane treated mice. **Clinics**, v. 66, p. 1051-1054, 2011.

- PIELKE, R.A. Mesoscale meteorological modeling. Second Edition. International **Geophysics Series**, v.78, n.1, p.676, 2002.
- PIMENTEL, L. C. G., CORRÊA, E. B., Marton, E.; CATALDI, M.; NOGUEIRA, E. Influência dos parâmetros de configuração do modelo CALMET sobre a simulação da circulação atmosférica na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 29, p. 579-596, 2014.
- PINA, J. M.; MEIRELLES, S. T.; MORAES, R. M. Meteorological conditions, ozone concentration and leaf age affect gas exchange in Psidium guajava Paluma . **Hoehnea**, v. 44, p. 236-245, 2017.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.193- 212, 2010.
- SALDIVA, P. H. N.; POPE C. A. III; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W.; LICHTENFELS, A. J. F. C.; SALGE, J. M.; BARONE, I.; BÖHM, G. M. Air Pollution and Mortality in Elderly People: a Time-series Study in São Paulo, Brazil. **Archives of Environmental & Occupational Health**, v. 50, p. 159-63, 1995.
- SÁNCHEZ, M.P. **Investigação da Camada Limite Urbana na Região Metropolitana de São Paulo**. 2017. 136 p. Dissertação (IAG-USP)- Universidade de São Paulo. 2017
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MARTINS, D.L. ; YNOUE, Y.R. ; ANDRADE, MF . The impact on tropospheric ozone formation on the implementation of a program for mobile emissions control: a case study in Sao Paulo, Brazil. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 7, n. 2, p. 95- 119, 2006.
- SANTOS, T. C. ; CARVALHO, V. S. B. ; REBOITA, M. S. . Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental** (Online), v. 21, p. 307-313, 2016.
- SANTOS, T. C. **Relação de variáveis atmosféricas com a qualidade do ar no estado de São Paulo**. 2016. 88p. Dissertação (UNIFEI) - Universidade Federal de Itajubá. 2018.

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. New York, John Wiley & Sons, 1986.

SEINFELD, J.H. and PANDIS, S.N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. New York: John Wiley. 1224p. 2006.

SHIN, H. H.; HONG, S-Y. Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 139, p. 261-281, 2011.

SILVA JÚNIOR, R. S. ; Andrade, Maria de Fatima . Validação de poluentes fotoquímicos e inclusão do inventário de emissões no modelo de qualidade do ar WRF/CHEM, para a região metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 28, p. 105-121, 2013.

SILVEIRA, W. W.; Martins, F.B.; CARVALHO, V. S. B. Análise da variância aplicada a dados meteorológicos e de qualidade do ar registrados entre 1996 e 2013 no estado de São Paulo. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2014, Recife. O papel da Meteorologia na Construção de uma sociedade sustentável, 2014.

SIQUEIRA, V. A. Análise da camada limite planetária na interface água-terra em reservatórios hidroelétricos. 2017. 97p. Dissertação (UNIFEI) - Universidade Federal de Itajubá. 2017.

SKAMAROCK W. C.; J. B. KLEMP, J. DUDHIA, D. O. GILL, D. M. BARKER, M. G. DUDHA, X. HUANG, W. WANG AND Y. POWERS. A description of the advanced research WRF Ver.30. NCAR Technical Note. NCAR/TN- 475+STR. **National Centre for Atmospheric Research**, Boulder, CO, 2008.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 177 p. 1991.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Massachusetts: Kluwer Academic Norwell, 1988.

TYMVIOS, F.; CHARALAMBOUS, D.; MICHAELIDES, S.; LELIEVELD, J. Intercomparison of boundary layer parameterizations for summer conditions in the eastern

Mediterranean island of Cyprus using the WRF - ARW model. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 208, p. 45-59, 2018.

Wallace, J. M.; and Hobbs, P. V. **Atmospheric Science - An Introductory Survey**. Academic Press, 2006.

WANG, F.; CHAMBERS, S. D.; ZHANG, Z.; WILLIAMS, A. G.; DENG, X.; ZHANG, H.; LONATI, G.; CRAWFORD, J.; GRIFFITHS, A. D.; IANNIELLO, A.; ALLEGRINI, I. Quantifying stability influences on air pollution in Lanzhou, China, using a radon-based “stability monitor”: Seasonality and extreme events. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 145, p. 376–391, 2016.

Wang, X.; Wang, K. Homogenized Variability of Radiosonde-Derived Atmospheric Boundary Layer Height over the Global Land Surface from 1973 to 2014. **Journal of Climate**, v. 29, p. 6893-6908, 2016.

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

WU, W.; JIN, Y.; CARLSTEN, C. Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 141, p. 833-844, 2017.

YOUNE, R.Y. **Modelagem Numérica Da Formação, Crescimento E Transporte Das Partículas Inorgânicas Secundárias Constituintes Do Aerossol Urbano Na Região Metropolitana De São Paulo**. 2004. 166 f. Tese (doutorado em Meteorologia). IAG/USP, São Paulo, 2004.

ZANETTI, P. **Air Pollution Modelling. Southampton** - UK: Comp. Mech. Publications, 1990. 500 p.

ZHANG, Z.; WANG, F.; COSTABILE, F.; ALLEGRINI, I.; LIU, F.; HONG, W. Interpretation of ground-level ozone episodes with atmospheric stability index measurement. **Environmental Science and Pollution Research**, New York, v. 19, p. 3421-3429, 2012.