



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

aa/bb/cc/dd-TDI

**ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ):  
ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO  
DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS  
OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO**

Beatriz Pereira Miranda

Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica, orientado por Ariane Frassoni e Ana Nunes

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE  
São José dos Campos  
Setembro de 2022

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

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

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas  
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
(CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação  
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

aa/bb/cc/dd-TDI

**ESTUDO DE QUALIDADE DO AR NA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ):  
ANÁLISE DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E VALIDAÇÃO  
DO MODELO BRAMS PARA O PERÍODO DOS JOGOS  
OLÍMPICOS DO RIO DE JANEIRO**

Beatriz Pereira Miranda

Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica, orientado por Ariane Frassoni e Ana Nunes

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE  
São José dos Campos  
Setembro de 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Miranda, Beatriz.

Cutter      Estudo de qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ): análise do ozônio troposférico e validação do modelo BRAMS para o período dos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro / Beatriz Pereira Miranda. – São José dos Campos : INPE, Setembro de 2022.

?? + 43 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

Relatório PIBIC () – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientador : Ariane Frassoni.

1. Ozônio troposférico. 2. Poluição do ar. 3. BRAMS. 4. Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

CDU 000.000

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

ATENÇÃO! A FOLHA DE  
APROVAÇÃO SERÁ IN-  
CLUIDA POSTERIORMENTE.



## RESUMO

O ozônio troposférico ( $O_3$ ) é um poluente secundário, que em altas concentrações degrada a qualidade do ar e é prejudicial à saúde humana. A comunidade científica mundial realiza esforços para reduzir suas concentrações bem como aperfeiçoar ferramentas que permitam o monitoramento e previsão da qualidade do ar, especialmente do  $O_3$  devido às suas implicações à saúde humana. Modelos de previsão numérica da qualidade do ar são ferramentas que contribuem para a tomada de decisões relativas à saúde da população exposta aos poluentes atmosféricos, especialmente em grandes centros urbanos, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Em 2016, o CPTEC/INPE forneceu previsões de qualidade do ar utilizando o modelo BRAMS versão 5.2 em 1 km de espaçamento horizontal, a cada hora, como apoio para os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2016 realizados entre agosto e setembro na cidade do Rio de Janeiro. Para a avaliação do modelo, realizou-se um levantamento dos dados observados de  $O_3$  na região de estudo. Os dados foram obtidos a partir de medições realizadas por 23 estações de monitoramento mantidas pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) localizadas em diversos bairros da RMRJ. As previsões de até 48h realizadas com o modelo BRAMS foram avaliadas a partir do cálculo de métricas estatísticas para identificar a destreza do modelo em representar os padrões diários e médios diários de  $O_3$  do período analisado. Em ambos os meses, a análise do ciclo diurno médio das concentrações de  $O_3$  mostram que as previsões de até 24h e até 48h superestimam as concentrações de  $O_3$  no período da tarde. Em geral, há maior superestimativa para as previsões de até 24h. Durante a noite e madrugada, porém, o modelo subestima as concentrações em ambos os prazos de previsão. Neste caso, as previsões de até 48h apresentam maiores subestimativas. Notou-se que nos horários de máxima e mínima concentração de  $O_3$  em cada estação, há grande variabilidade durante os dias de ambos os meses. É interessante ressaltar que o modelo não simula corretamente os horários de ocorrências das máximas e mínimas concentrações para todas as estações, sendo observado atraso ou adiantamento dos horários dos máximos e mínimos, dependendo da estação analisada. Conclui-se que o modelo apresenta desempenho satisfatório para ser aplicado em altíssima resolução espacial para previsão de qualidade do ar e suas incertezas residem no fato de que a variabilidade diária é fortemente afetada por diferentes variáveis, como a intensidade e localização das fontes e os fatores meteorológicos.

Palavras-chave: Ozônio troposférico. Poluição do ar. BRAMS. Região Metropolitana do Rio de Janeiro.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Média máxima dos padrões de qualidade do ar intermediários e final em um período de 8h . . . . .	9
4.1 Localização das estações meteorológicas e de qualidade do ar mantidas pelo INEA e limites da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Fonte: Produção da autora. . . . .	11
5.1 Ciclo diurno médio de $O_3$ nas estações em agosto e setembro de 2016 . .	16
5.2 Ciclo diurno médio de $O_3$ nas estações em agosto durante os anos em cada estação. . . . .	17
5.3 Ciclo diurno médio de $O_3$ nas estações em setembro durante os anos em cada estação. . . . .	18
5.4 Ciclo diurno médio de $O_3$ observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	19
5.5 Ciclo diurno médio de $O_3$ observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	20
5.6 Viés do ciclo diurno médio de $O_3$ observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	21
5.7 Ciclo diurno médio de $O_3$ observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	22
5.8 Ciclo diurno médio de TAR observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	23
5.9 Ciclo diurno médio de TAR observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	24
5.10 Viés do ciclo diurno médio de TAR observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	25

5.11	Viés do ciclo diurno médio de TAR observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	26
5.12	Horários de maior e menor concentração média de $O_3$ em cada estação. (a) Agosto, (b) Setembro. . . . .	27
5.13	Média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de maior concentração de $O_3$ nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	28
5.14	Média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de menor concentração de $O_3$ nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	29
5.15	Média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de maior concentração de $O_3$ nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	30
5.16	Média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de menor concentração de $O_3$ nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	31
5.17	Viés da média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de maior concentração de $O_3$ nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	32
5.18	Viés da média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de menor concentração de $O_3$ nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto. . . . .	33
5.19	Viés da média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de maior concentração de $O_3$ nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	34

5.20	Viés da média móvel de $O_3$ a cada 3 horas no horário de menor concentração de $O_3$ nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro. . . . .	35
5.21	Rosa dos ventos de todos os horários do mês de agosto de 2016. Comparação entre intensidade e direção do vento das estações com relação as obtidas através das previsões do modelo BRAMS para os dois prazos de previsão, 24h e 48h. . . . .	36
5.22	Rosa dos ventos de todos os horários do mês de setembro de 2016. Comparação entre intensidade e direção do vento das estações com relação as obtidas através das previsões do modelo BRAMS para os dois prazos de previsão, 24h e 48h. . . . .	37



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	2
<b>2 Atividades Desenvolvidas durante o período da bolsa</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Etapa 1 . . . . .	3
2.2 Etapa 2 . . . . .	3
2.3 Etapa 3 . . . . .	3
2.4 Etapa 4 . . . . .	3
<b>3 Revisão Bibliográfica</b> . . . . .	<b>5</b>
3.1 Ozônio . . . . .	5
3.2 Óxidos de Nitrogênio . . . . .	6
3.3 Compostos Orgânicos Voláteis – COVS . . . . .	6
3.4 Formação do Ozônio na Troposfera . . . . .	7
3.5 Padrões de Qualidade do Ar . . . . .	8
3.5.1 Níveis estabelecidos para o Ozônio: . . . . .	9
<b>4 DADOS E METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>11</b>
4.1 Descrição do método de aquisição dos dados . . . . .	11
4.2 Análise dos dados . . . . .	12
<b>5 Resultados Obtidos em função do Plano de Trabalho proposto</b> .	<b>15</b>
5.1 Ciclo diurno médio de $O_3$ (2016) x Ciclo diurno médio climatológico de $O_3$	15
5.2 Variabilidade anual do ciclo diurno médio de $O_3$ . . . . .	16
5.3 Ciclo diurno médio observado de $O_3$ x previsto . . . . .	17
5.4 Análise estatística . . . . .	18
5.4.1 Ciclo diurno médio observado de TAR x previsto . . . . .	20
5.4.2 Análise do viés da TAR . . . . .	21
5.4.3 Média móvel - Variação diária de $O_3$ . . . . .	22
5.4.4 Análise estatística da variação diária de $O_3$ . . . . .	24
5.5 Rosa dos ventos observada x prevista . . . . .	25
<b>6 Conclusões</b> . . . . .	<b>39</b>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . . 41

## 1 Introdução

Os gases traço presentes na atmosfera são fundamentais para o balanço de radiação do planeta. Os mais importantes encontrados na atmosfera da Terra são os chamados gases de efeito estufa. Apesar de representarem menos de 1% do total de gases da atmosfera, esses gases traço são fundamentais porque ajudam a manter a Terra aquecida, absorvendo a luz do sol. O ozônio ( $O_3$ ) faz parte desta classificação.

A nível estratosférico (entre 20 *km* e 50 *km* de altitude) o ozônio resulta naturalmente da interação entre radiação solar e oxigênio. A radiação solar dissocia as moléculas de oxigênio ( $O_2$ ), produzindo o oxigênio atômico ( $O$ ), que reage com outro  $O_2$  formando o  $O_3$ . Por ser um gás instável, o  $O_3$  rapidamente se destrói e reage com moléculas ( $O$ ) ou ( $O_2$ ) e com isso se desencadeia um ciclo de formação e destruição do ( $O_3$ ). Nesse nível da atmosfera, o  $O_3$  tem sua maior concentração, formando a chamada camada de ozônio, que tem o papel de proteger a terra da alta incidência de radiação ultravioleta.

O  $O_3$  também pode ser encontrado na troposfera (camada inferior da atmosfera). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (MMA, ), nessa camada, o  $O_3$  é um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente, mas é resultado da interação fotoquímica de outros poluentes primários (emitidos diretamente para a atmosfera). Os compostos orgânicos voláteis (COVs) e os óxidos de nitrogênio (NOx) são os principais responsáveis pelo desequilíbrio dos processos de destruição e formação do  $O_3$ . A partir do aumento de indústrias e das frotas veiculares, houve também o aumento da quantidade de COVs e NOx emitidos para a atmosfera e, por consequência, uma maior formação de  $O_3$ . Além disso, a influência da topografia e de condições meteorológicas são fatores importantes para a sua formação, transporte e difusão na atmosfera. Geralmente, a ocorrência de altas temperaturas, baixa umidade, ventos fracos e intensa radiação solar favorecem o processo de formação do  $O_3$  na troposfera.

O  $O_3$  exerce diversos efeitos nocivos à saúde humana. É sabido que nas grandes cidades, a degradação da qualidade do ar atinge principalmente crianças e idosos. Freitas et al. (2007) encontrou associação entre o  $O_3$  e o aumento de admissões de doenças respiratórias em menores de 15 anos. Em vista da importância da qualidade do ar para a saúde da população, é fundamental que se tenha disponível ferramentas que auxiliem no monitoramento e previsão da qualidade do ar em grandes centros urbanos, especialmente o  $O_3$ , tendo em vista seu impacto sobre a saúde das pessoas.

## 1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo avaliar as previsões numéricas de  $O_3$  do modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) fornecido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) para a RMRJ durante os jogos Olímpicos de 2016 ocorridos no Brasil e melhor entender as do poluente com variáveis meteorológicas previstas pelo modelo.

Como objetivos específicos, o presente trabalho propõe:

- estudar os padrões de qualidade do ar para a RMRJ com foco nos índices de  $O_3$ ;
- entender os padrões meteorológicos dominantes no período e correlacionar com os padrões de  $O_3$  observados;
- analisar as previsões numéricas do modelo BRAMS em alta resolução (1 km) para a RMRJ por meio de índices estatísticos e séries temporais, a fim de validar os resultados do modelo com dados observados e compreender o desempenho da versão do BRAMS 5.2 para a previsão da qualidade do ar durante os meses de agosto e setembro de 2016.

Palavras-chave: Ozônio troposférico. Poluição do ar. BRAMS. Região Metropolitana do Rio de Janeiro.



## **2 Atividades Desenvolvidas durante o período da bolsa**

As atividades desenvolvidas durante o período a que se refere este relatório são descritas a seguir.

### **2.1 Etapa 1**

Foi elaborado um estudo de referências bibliográficas sobre os conceitos básicos de legislação ambiental, padrões de qualidade do ar relacionados ao  $O_3$  e sobre a formação deste poluente na atmosfera. Além disso, foi estudado o artigo de [Rozante e Ramirez \(2021\)](#), que descreve o desenvolvimento de um conjunto de dados de temperatura no CPTEC/INPE baseado nas reanálises ERA5 do Centro Europeu de Previsão de Médio Prazo (ECMWF).

### **2.2 Etapa 2**

Foram obtidos dados de  $O_3$  e temperatura do ar a 2m (TAR) junto ao Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA). Após a organização dos dados e seleção das melhores estações, foram descritas as características dos locais de cada uma delas. Os dados do modelo BRAMS em 1km de resolução espacial foram obtidos junto ao CPTEC/INPE para o mesmo período a fim de avaliar sua habilidade de prever os padrões diários e médios diários do poluente nas estações de qualidade do ar do INEA.

Como atividades complementares, no período da pandemia, devido à diminuição das frotas veiculares nas ruas, houve também a diminuição das emissões por estas fontes. Foram obtidos dados de  $O_3$ ,  $NO_x$  e CO junto ao INEA para o primeiro mês de isolamento na RMRJ a fim de analisar a qualidade do ar nesse período.

### **2.3 Etapa 3**

Com o intuito de começar a familiarização com o ambiente de pesquisa e com o desenvolvimento de rotinas computacionais para o cálculo de estatísticas básicas e análise dos dados, o Ubuntu foi instalado com auxílio da orientadora. A partir disso, foram instalados também o Anaconda/Python e a ferramenta GrADS. Para a análise, foram gerados gráficos do ciclo diurno médio de  $O_3$  e TAR e médias diárias de  $O_3$  das estações analisadas, para os meses de agosto e setembro de 2016.

### **2.4 Etapa 4**

Esta etapa será melhor detalhada no Capítulo 4.

Nesta etapa foi realizado um levantamento de dados de  $O_3$  nas estações entre os anos de 2010 e 2020 com o objetivo de entender a evolução do poluente ao longo dos anos e calcular sua média, considerada como uma pseudo-climatologia, visto que o conjunto de dados era insuficiente para o cálculo de uma climatologia robusta, que deve contar com dados de pelo menos 30 anos.

A partir destes dados foram calculados ciclos diurnos médios climatológicos para as estações com pelo menos 5 anos de dados disponíveis nos meses de agosto e setembro.

Para a análise das previsões de até 48h do modelo BRAMS, foram extraídos dados das concentrações de  $O_3$  e TAR nos pontos de grade mais próximos às estações selecionadas. A partir do ciclo diurno médio das estações, foram obtidos os horários de maior e menor concentração de  $O_3$  para cada estação em ambos os meses. Nestes horários, foram plotadas as médias diárias de  $O_3$  nas estações junto às médias diárias previstas pelo modelo BRAMS nos prazos de até 24 e até 48h.

### 3 Revisão Bibliográfica

De acordo com o MMA (MMA, ), a poluição atmosférica pode ser definida como "qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança e à qualidade de vida da comunidade". Esses danos podem ser causados diretamente pelos contaminantes (poluente primário) ou por produtos resultantes de reações químicas sob a influência de determinados fatores ambientais. Poluentes que se originam das reações daqueles que são diretamente emitidos pelas fontes são denominados de poluentes secundários.

Dentre os poluentes secundários, pode-se destacar o  $O_3$ , cujos principais precursores são o  $NO_x$  e os COVS. Esses gases sofrem reações químicas na presença de luz solar, formando o  $O_3$ .

#### 3.1 Ozônio

O  $O_3$  é um gás oxidante, que está presente na atmosfera ao nível traço, ou seja, é um dos gases que ocupa menos de 1% do volume da atmosfera terrestre. Ele está presente na estratosfera, entre 20 km a 60 km de altura, em uma camada de cerca de 10 km de espessura, contendo aproximadamente 90% do total de ozônio contido na atmosfera.

O  $O_3$  é formado naturalmente a partir da fotodissociação do oxigênio atmosférico ( $O_2$ ). Esse processo ocorre a partir da absorção da radiação ultravioleta (UV) nos comprimentos de onda entre 0,1 microns e 0,2 microns. A fotólise do  $O_2$  leva à formação de dois átomos de oxigênio (O). Este, altamente reativo, se combina rapidamente com uma molécula de  $O_2$  para formar o  $O_3$ . As moléculas de  $O_3$  produzidas passam a absorver radiação UV entre 0,2 microns e 0,3 microns no processo de fotodissociação do  $O_3$  na estratosfera, entre 20km a 60km de altura. Como as ligações na molécula de  $O_3$  são mais fracas do que aquelas na molécula de  $O_2$ , a fotólise é conseguida com fótons de mais baixa energia. Este processo explica como o  $O_3$  age como um filtro para a radiação UV.

Na troposfera, o  $O_3$  também é encontrado naturalmente em baixas concentrações (10-20 partes por bilhão por volume – ppbv), quando em equilíbrio com seus precursores. No entanto, a influência das atividades antrópicas vem alterando consideravelmente esse equilíbrio e também os níveis globais de concentração (MARTINS,

2006).

Com o aumento da quantidade de automóveis e indústrias no planeta, houve um crescimento na emissão de  $\text{NO}_x$  e COVS. Uma vez que o  $\text{O}_3$  é produzido mediante reações químicas entre estes dois compostos na presença de radiação solar, principalmente em áreas urbanas, industriais e em regiões propensas à estagnação de massas de ar (GOMIDES et al., 2009), houve um aumento de sua produção nos últimos anos. Além do mais, o aumento do  $\text{O}_3$  troposférico não só exerce impacto negativo na qualidade do ar, mas também tem papel importante nos processos associados à mudança do clima, visto que este é um dos gases do efeito estufa (HOUGHTON et al., 2001).

### 3.2 Óxidos de Nitrogênio

Os gases conhecidos como  $\text{NO}_x$  são os formados durante os processos de combustão. Segundo a CETESB, os veículos são as principais fontes desses poluentes. O óxido de nitrogênio (NO) se transforma em  $\text{NO}_2$  sob a ação de luz solar, e este desempenha papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o  $\text{O}_3$ . Dependendo das concentrações, o  $\text{NO}_2$  causa prejuízos à saúde.

As concentrações de  $\text{NO}_2$  diminuem conforme as concentrações dos gases  $\text{NO}_x$  diminuem. (RUSSELL; MCCUE, 1998) mostrou em simulações para Los Angeles que reduzindo as emissões de  $\text{NO}_x$  também seriam reduzidos os picos de  $\text{NO}_2$  bem como o ácido nítrico e aerossóis de nitrato, que formam o  $\text{NO}_2$ .

O  $\text{NO}_2$  e o NO são compostos gasosos tóxicos e altamente oxidantes, formados pela combinação de oxigênio e nitrogênio. Esses poluentes desempenham um papel fundamental no ciclo do  $\text{O}_3$  troposférico, pois são precursores deste poluente. As principais fontes de  $\text{NO}_x$  são os motores dos automóveis e, em menor escala, as usinas termelétricas, indústrias, fogões a gás, aquecedores que utilizam querosene e o cigarro (CANÇADO et al., 2006), além de processos biológicos no solo e relâmpagos. Por seu efeito tóxico e oxidante, podem provocar severos prejuízos à saúde.

### 3.3 Compostos Orgânicos Voláteis – COVS

O termo COVS engloba um grande grupo de poluentes que se encontram presentes na atmosfera, principalmente, sob a forma gasosa (HOSHI et al., 2008). Segundo a CETESB, os COVS são gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos, sendo emitidos pelos veículos, pelas indústrias, pelos processos de estocagem e transferência de combustível etc. Muitos

dos gases que fazem parte desse grande grupo de poluentes podem ser considerados essenciais precedentes do  $O_3$ .

### 3.4 Formação do Ozônio na Troposfera

O ciclo do  $O_3$  na troposfera ainda não é totalmente conhecido devido ao alto grau de complexidade dos fatores que envolvem a produção e consumo desse gás. Porém, o mecanismo de formação e as reações químicas que regem sua formação na baixa troposfera já são conhecidos. Como visto anteriormente, o  $O_3$  é formado a partir da combinação de um átomo com uma molécula de oxigênio. Entretanto em altitudes mais baixas, a única fonte de oxigênio atômico é o  $NO_2$ , que é dissociado por um fóton ( $h\nu$ ) de comprimento de onda entre 0,28 microm e 0,43 microm.

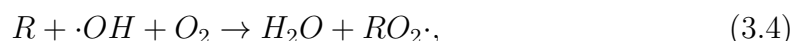


O oxigênio atômico produzido é rapidamente consumido, formando o ozônio, que por sua vez é degradado pelo óxido de nitrogênio.

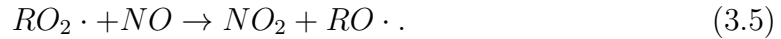


Essas três reações estabelecem uma concentração estável do ozônio na troposfera. Contudo, com a alta concentração de COV's, essencialmente os hidrocarbonetos, esse equilíbrio é prejudicado. Na presença desses compostos e de radicais hidroxila, o NO pode ser convertido a  $NO_2$  sem consumir  $O_3$ , contribuindo para um acúmulo do poluente.

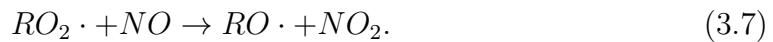
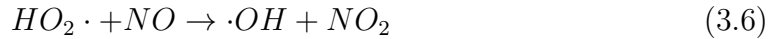
Os hidrocarbonetos (R) são atacados por radicais hidroxilas, formando radicais alquil peróxi ( $RO_2\cdot$ ), como apresentado na Equação a seguir:



que por sua vez reagem com o NO, produzindo assim, o  $NO_2$  e um radical alcoxi, tal que:



Esse radical gerado também pode contribuir para maiores concentrações de  $O_3$ , visto que é precursor de um novo radical alcóxi e do hidro peróxido  $HO_2$ , ambos capazes de transformar  $NO$  em  $NO_2$  da seguinte forma:



O radical hidroxila, principal composto oxidante do processo, possui três fontes principais na atmosfera, a saber:

- Dissociação fotoquímica do  $O_3$ ;
- Dissociação fotoquímica de compostos carboxílicos;
- Dissociação fotoquímica do ácido nitroso.

Analisando os mecanismos, observa-se que a formação do  $O_3$  e de outras espécies secundárias não é instantânea. Além disso, o  $O_3$ , devido a sua particular característica de formação, é altamente influenciado pelas condições de vento, temperatura, radiação e concentração de seus precursores. Em muitas regiões urbanas, os maiores níveis de  $O_3$  são observados relativamente afastados do grande centro urbano.

### 3.5 Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões nacionais de qualidade do ar são estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente. Em 2018 foi publicada a Resolução CONAMA nº 491/2018, que revogou a Resolução CONAMA nº 3/1990, estabelecendo assim novos indicadores da qualidade do ar e valores mais restritivos para os padrões de qualidade do ar de curto e longo período de exposição. Os valores tem como referência os valores guia recomendados pela Organização Mundial da Saúde em 2005 e, no caso do ozônio, a OMS reconhece que o efeito nocivo desse poluente para a saúde é resultante da exposição persistida a altas concentrações, e não a picos agudos de concentrações horárias. Por isso, o Ministério do Meio Ambiente adotou a métrica de médias de oito horas.

### 3.5.1 Níveis estabelecidos para o Ozônio:

A resolução vigente determina que os novos padrões sejam adotados em quatro etapas sequenciais (MMA, ): PI-1, PI-2, PI-3 e PF (PI: Padrão de Qualidade do Ar Intermediário e PF: Padrão de Qualidade do Ar Final). Estes devem ser adotados levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliações da Qualidade do Ar elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente.

Poluente Atmosférico	Ozônio - O <sub>3</sub>
Período de Referência	8 horas
PI-1	140
PI-2	130
PI-3	120
PF	100

Figura 3.1 - Média máxima dos padrões de qualidade do ar intermediários e final em um período de 8h





## 4 DADOS E METODOLOGIA

### 4.1 Descrição do método de aquisição dos dados

A aquisição da base de dados de  $O_3$ , TAR e vento a 10 metros foi realizada a partir da base de dados da Prefeitura do Rio e INEA. O estudo foi realizado para os meses de agosto e setembro de 2016, período de ocorrência das Olimpíadas do Rio de Janeiro.

Os dados observados de  $O_3$ , TAR e vento foram analisados em 20 estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas na RMRJ e distribuídas por nove municípios (Fig.4.1), a saber:

- Rio de Janeiro: Estações Leblon, Lagoa, Urca, Maracanã, Taquara, Campo dos Afonsos, Largo do Bodegão, Adalgisa Nery, Ilha de Paquetá e Ilha do Governado
- Duque de Caxias: Estações Pilar, São Bento e Jardim Primavera
- Demais municípios: Estação UERJ em São Gonçalo, Porto das Caixas em Itaboraí, Monte Serrat em Itaguaí, Piranema em Seropédica, Monteiro Lobato em Nova Iguaçu, São Bernardo em Belford Roxo e Engenheiro Pedreira em Japeri.

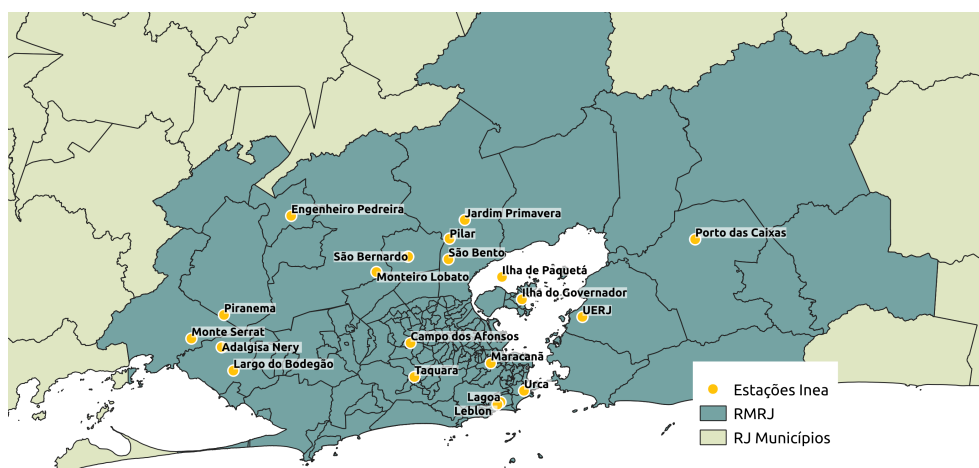


Figura 4.1 - Localização das estações meteorológicas e de qualidade do ar mantidas pelo INEA e limites da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Fonte: Produção da autora.

## 4.2 Análise dos dados

Os dados de  $O_3$ , TAR e vento do modelo BRAMS foram extraídos para os pontos de grade mais próximos às estações do INEA, obtendo-se, portanto, 20 pontos de latitude/longitude extraídos do modelo.

Foram calculados ciclos diurnos médios do modelo e das observações para a análise temporal do  $O_3$  e avaliação do BRAMS.

Foi computada uma média de cada variável para cada hora do dia no período analisado. O cálculo a cada hora do dia resultou em gráficos da média de  $O_3$  e TAR ao longo das 24 horas do dia para todas as estações analisadas ao longo de cada mês analisado. Os prazos de previsão de 24 e 48h do modelo BRAMS foram analisados separadamente neste processo. O cálculo foi obtido a partir da Equação 4.1:

$$\bar{x}_i = \frac{(x_{i,j_1} + x_{i,j_2} + \dots + x_{i,j_n})}{n}, \quad (4.1)$$

em que  $\bar{x}_i$  = média do  $O_3$  na hora  $i$ , para cada dia  $j$  por um número  $n$  de dias. O cálculo foi realizado separadamente para o mês de agosto e setembro de 2016.

A partir dos ciclo diurno médio das estações, foram selecionados os horários de maior e menor concentração de  $O_3$ . A variação diária de  $O_3$  das estações foi comparada com a variação diária do modelo BRAMS nos dois prazos de previsão para análise do desempenho do modelo em representar os padrões diários do poluente. Devido à grande variação das concentrações durante os dias de ambos os meses, optou-se por calcular a média móvel considerando um intervalo de 3 dias.

Para a análise do desempenho do modelo em representar os padrões médios diários e os padrões diários, foi calculado o viés, que é dado pela diferença entre as previsões e o dado de referência, e pode ser definido pela Equação 4.2:

$$BIAS = (\bar{y}_i - y_i), \quad (4.2)$$

em que  $\bar{y}_i$  = previsão e  $y_i$  = observação na hora  $i$ .

Para a análise das previsões da intensidade e direção do vento do modelo BRAMS nos dois prazos de previsão e em ambos os meses de interesse, foram extraídas as componentes zonal e meridional do vento nos pontos de grade mais próximos

as estações. Foi necessário calcular a direção e velocidade do vento, dados pelas equações a seguir:

$$u = -|v_H| \times \sin \left[ \frac{\pi}{180} \times \phi_{MET}(deg) \right] \quad (4.3)$$

$$v = -|v_H| \times \cos \left[ \frac{\pi}{180} \times \phi_{MET}(deg) \right] \quad (4.4)$$

$$\phi_{MET}(deg) = \frac{180}{\pi} \times \text{atan2}(-u, -v) \quad (4.5)$$

$$|v_H| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.6)$$

em que  $u$  e  $v$  são as componentes zonal e meridional do vento e  $\phi_{MET}(deg)$  é a direção do vento.

A partir dos dados da direção e velocidade do vento obtidas a partir das estações do INEA, foram plotadas rosas dos ventos para os meses de agosto e setembro, incluindo todos os horários. Os gráficos resultantes possuem a rosa dos ventos das estações e a rosa dos ventos nos prazos de 24 e 48h do modelo. Dessa forma pôde-se verificar o desempenho do modelo em representar a intensidade e direção predominante do vento nas estações.

Adicionalmente às análises realizadas, foi feito um levantamento de dados de  $O_3$  nas estações entre os anos de 2010 e 2020 para ambos os meses a fim de se obter uma pseudo-climatologia do padrão diário médio do poluente. Chama-se aqui de pseudo porque é necessário pelo menos 30 anos de dados para o cálculo de uma climatologia. Entretanto, devido às limitações do banco de dados do INEA, foi possível obter apenas um período de 5 anos de dados ininterruptos para o cálculo da climatologia para algumas estações.

Para a referida análise, definiu-se que a estação deveria possuir dados de  $O_3$  em pelo menos 5 anos. Dessa forma, a climatologia do ciclo diurno médio de  $O_3$  pôde ser calculada em 6 estações, a saber: Jardim Primavera, Taquara, Adalgisa Nery, Largo do Bodegão, Pilar e Monteiro Lobato.



## 5 Resultados Obtidos em função do Plano de Trabalho proposto

Aqui são descritos os resultados obtidos no trabalho, levando-se em consideração o plano de trabalho proposto pela orientadora.

### 5.1 Ciclo diurno médio de $O_3$ (2016) x Ciclo diurno médio climatológico de $O_3$

Com o cálculo do ciclo diurno médio de  $O_3$  para as estações de qualidade do ar, pode-se observar a existência de um ciclo diurno médio bem característico em agosto e setembro de 2016 na maioria das estações estudadas (Fig 5.1.a e 5.1.b). Observa-se as maiores concentrações no período da tarde, entre as 14h e 17h local, e as menores entre 6h e 9h. Na estação Adalgisa Nery, por outro lado, não foi observado o mesmo comportamento. No mês de setembro (Fig 5.1.b), esta estação apresenta suas maiores concentrações no período da madrugada e as menores no período da tarde. Esse comportamento pode ser derivado de um transporte do poluente para a região, causando aumento das concentrações em um horário não esperado.

A estação que apresenta as maiores concentrações em agosto é a estação Pilar (aproximadamente 56 ppb) e, em setembro, a estação Adalgisa Nery (29 ppb). Por meio da análise do ciclo diurno médio climatológico de ambos os meses (Fig 5.1.c e 5.1.d), observou-se que os horários de maior e menor concentração, seguindo os horários de maior e menor incidência de radiação solar, se mantêm. É possível observar que no ano de 2016, as estações se mantiveram com valores similares às suas médias climatológicas, não ultrapassando 50 ppb em ambos os meses. A estação Monteiro Lobato é a que mais se aproximou desse limiar, apresentando concentrações médias climatológicas de aproximadamente 45 ppb no horário de maior concentração. Observa-se também que o padrão climatológico do ciclo diurno médio para a estação Adalgisa Nery é semelhante às demais estações. Portanto, o padrão observado no mês de setembro de 2016 nesta estação foi atípico nesse sentido.

De forma a verificar a influência de ambos os meses de 2016 na climatologia, nas figuras 5.1.e e 5.1.f, observou-se que nos meses de 2016 as concentrações de  $O_3$  da maioria das estações se manteve com valores abaixo das concentrações climatológicas. Em setembro de 2016, a estação Monteiro Lobato foi a estação que registrou concentrações bem menores que as obtidas a partir da climatologia do ciclo diurno médio. Também é possível destacar que no mês de agosto de 2016, as estações Pilar e Taquara apresentaram concentrações maiores que as climatológicas durante o período da tarde. Além disso, em ambos os meses, observa-se que a estação Adal-

gisa Nery apresentou valores mais elevados que a média climatológica durante a madrugada.

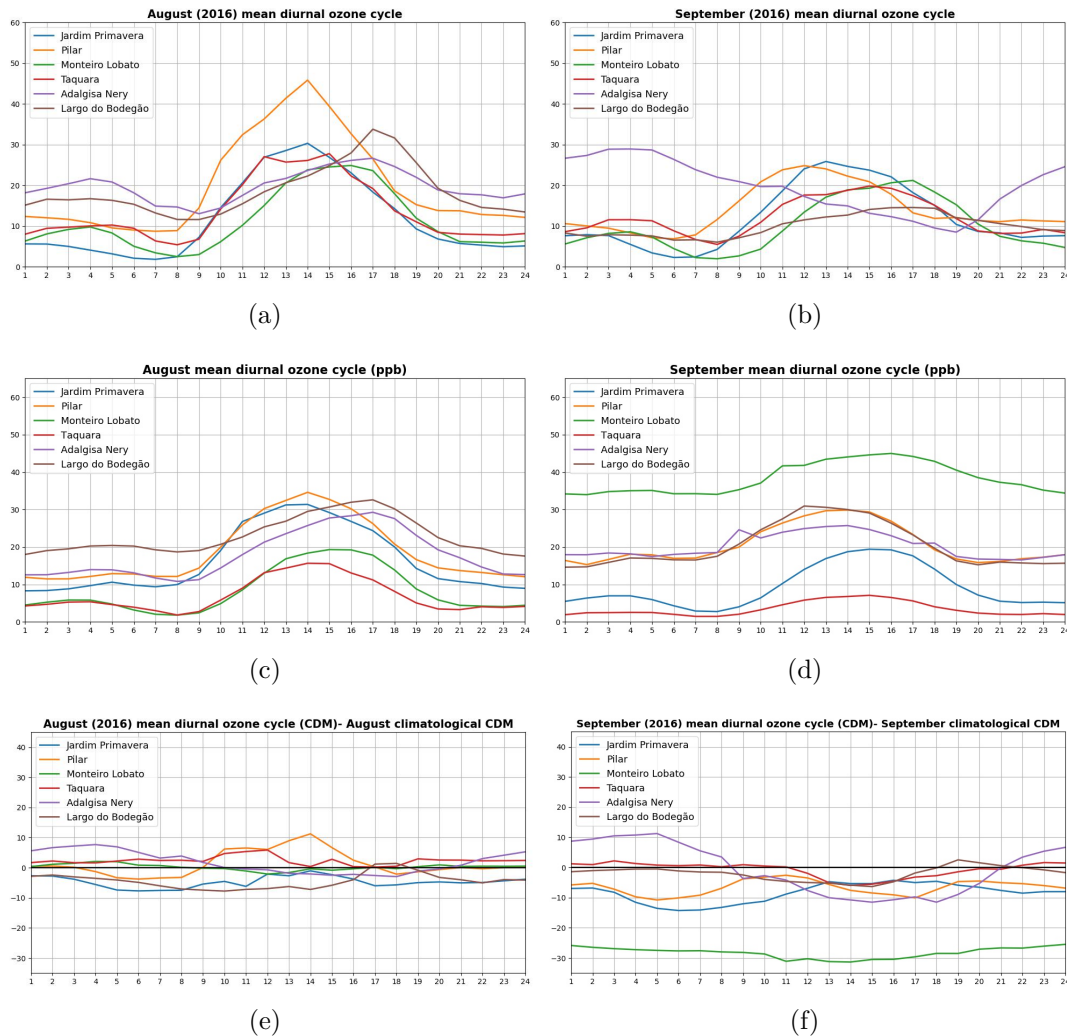


Figura 5.1 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  nas estações em agosto e setembro de 2016

## 5.2 Variabilidade anual do ciclo diurno médio de $O_3$

A análise da evolução do ciclo diurno médio de  $O_3$  das estações durante os anos disponíveis (Fig 5.2 e Fig 5.3) indica que não há um padrão claro de aumento ou diminuição das concentrações com relação aos anos. No entanto, a partir da estação Monteiro Lobato, que possui o maior conjunto de dados dentre as estações analisadas, é possível observar o aumento das concentrações de  $O_3$  em todos os horários do dia quando se compara os valores obtidos para o ano de 2010 e 2020 em ambos os meses, com o aumento das concentrações sendo maiores em setembro que

em agosto. Com relação ao ano de interesse, é possível observar que em agosto, na estação Pilar, o ano de 2016 foi o que apresentou as maiores concentrações de  $O_3$  no período da tarde. Enquanto isso, setembro de 2016 não apresentou concentrações maiores que os demais anos em nenhuma das estações.

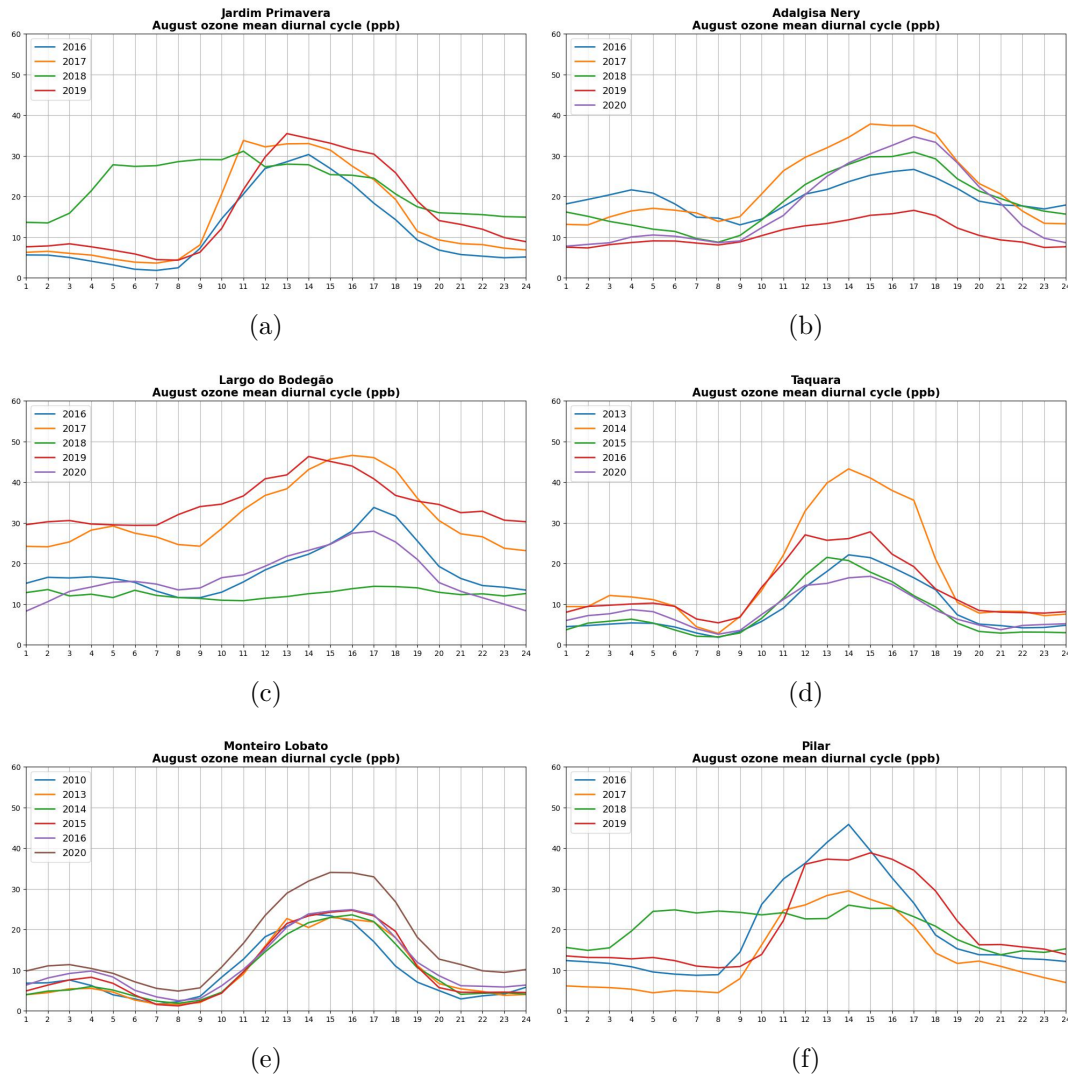


Figura 5.2 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  nas estações em agosto durante os anos em cada estação.

### 5.3 Ciclo diurno médio observado de $O_3$ x previsto

A partir da comparação entre o ciclo diurno médio de  $O_3$  das estações com o ciclo diurno médio de  $O_3$  previsto (Fig 5.4 e Fig 5.5), é possível observar que em ambos os meses, o modelo BRAMS atrasa o pico de maior e a mínima concentração do

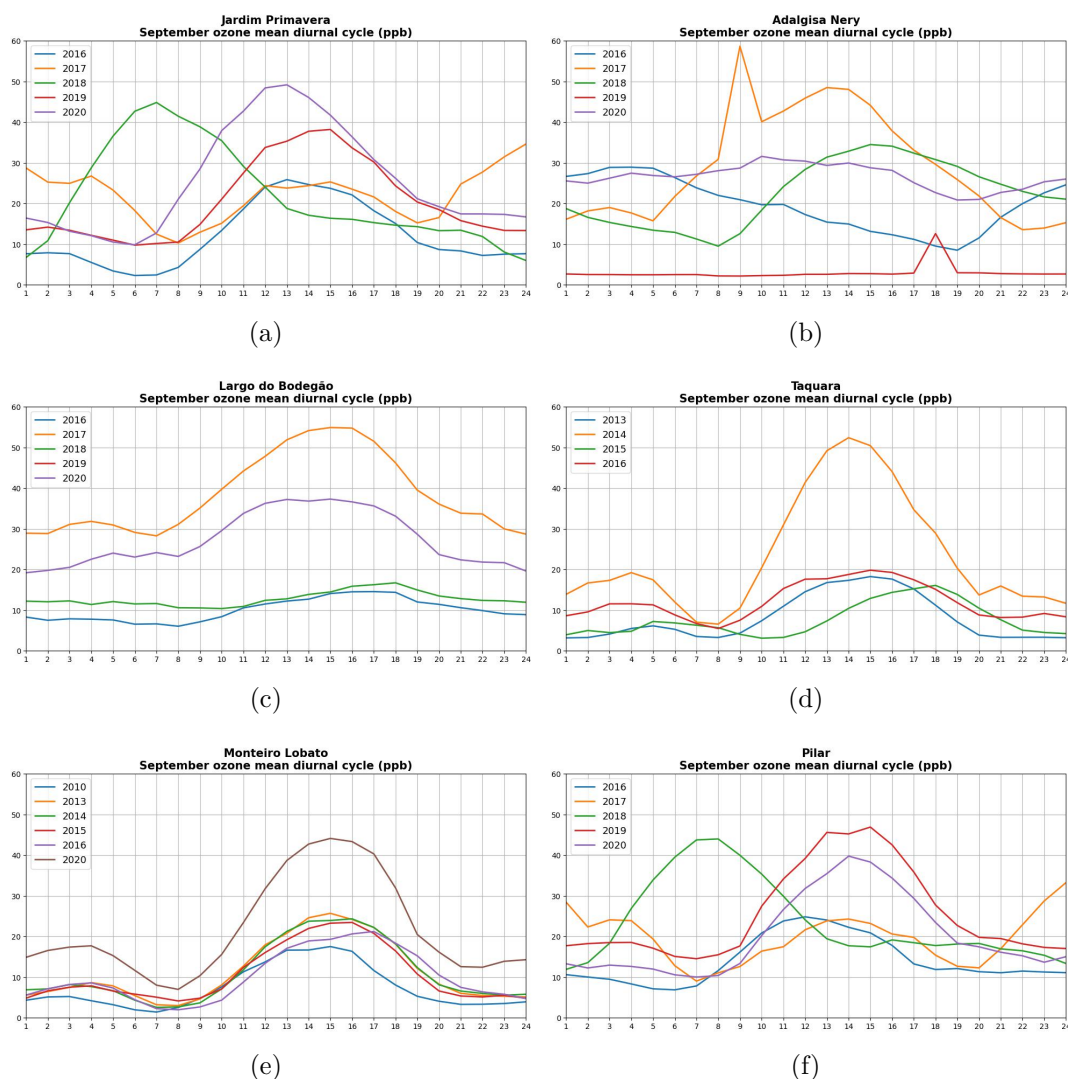


Figura 5.3 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  nas estações em setembro durante os anos em cada estação.

poluente em algumas horas. Com relação aos prazos de previsão, pode-se observar que em algumas estações as previsões de até 48h atrasam menos os horários de máximo e mínimo que as previsões de até 24h. Este padrão pode ser observado na estação Pilar em agosto e na estação Monteiro Lobato em setembro. Além disso, pode-se observar que mesmo com o atraso nos horários, o modelo BRAMS representa satisfatoriamente o ciclo diurno médio de  $O_3$  das estações.

#### 5.4 Análise estatística

Por meio da análise do viés do modelo BRAMS, observa-se que em algumas estações o modelo superestima as concentrações no início da tarde e subestima no início da



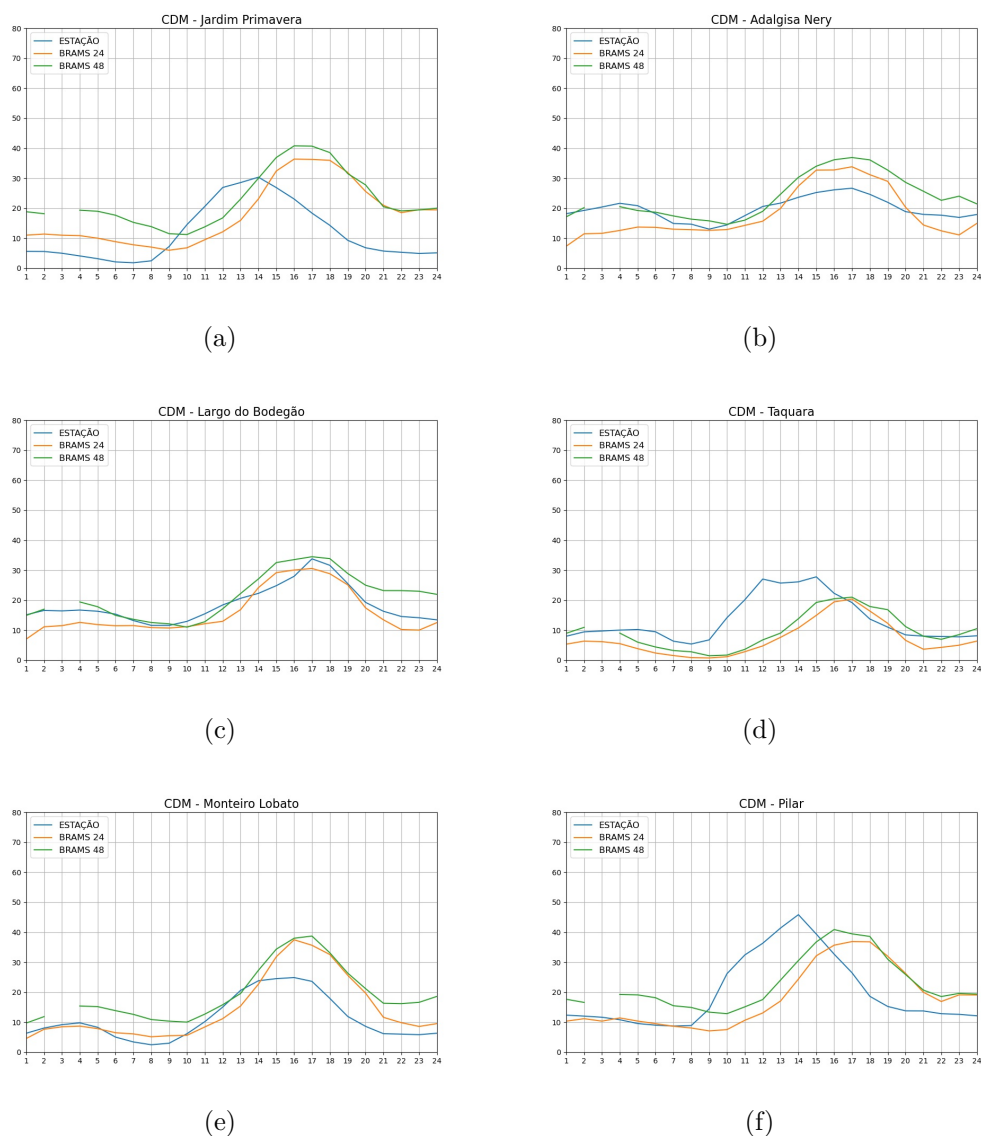
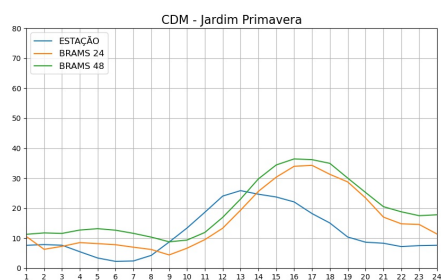


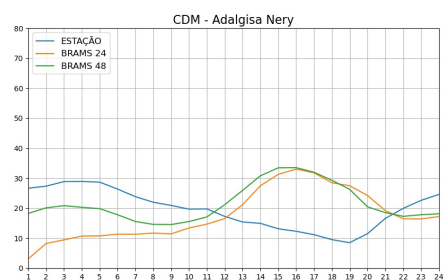
Figura 5.4 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

noite e madrugada. Esse comportamento pode ser verificado na figura 5.7a correspondente à estação Jardim Primavera no mês de setembro. Nela pode-se observar que o modelo superestimou as concentrações entre as 9h e 13h da tarde e subestimou nos demais horários. Estes padrões estão associados ao atraso do modelo em prever as máximas e mínimas concentrações, conforme observado na seção anterior.

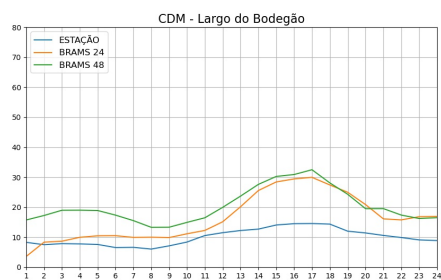
Com relação aos prazos de previsão, pode-se observar que quando o modelo subestima as concentrações, o prazo de previsão de até 48h tem desempenho melhor que



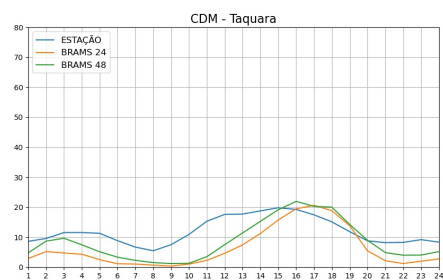
(a)



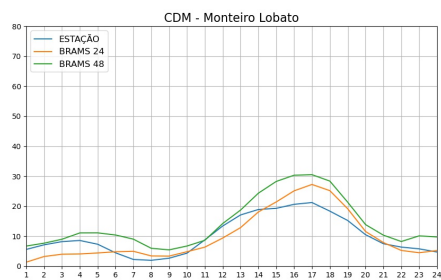
(b)



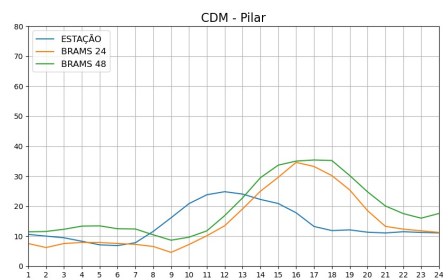
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.5 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.

o prazo de previsão de até 24h. Quando o modelo superestima, o comportamento se inverte. Esse comportamento pode ser exemplificado por meio da análise da estação Pilar em agosto (Fig 5.6.f) e em setembro (Fig 5.7.f).

#### 5.4.1 Ciclo diurno médio observado de TAR x previsto

A partir do conhecimento sobre a relação do  $O_3$  troposférico com a incidência de radiação solar, investigou-se o desempenho do modelo em prever o ciclo diurno médio da TAR nos dois prazos de previsão. Buscou-se analisar a relação entre os horários de

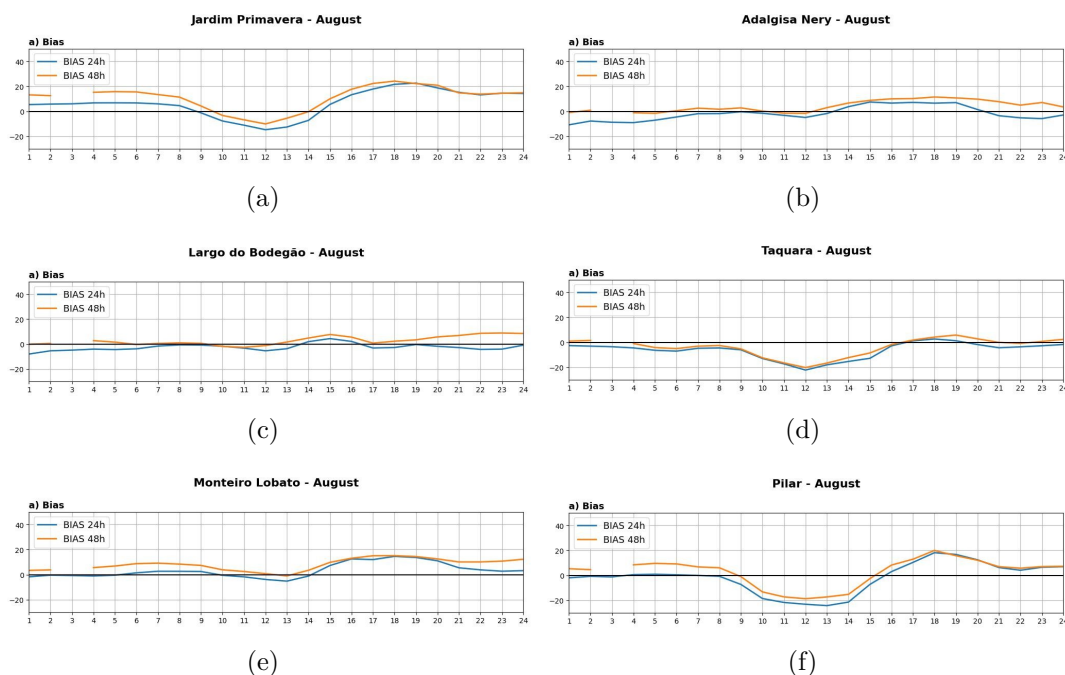


Figura 5.6 - Viés do ciclo diurno médio de  $O_3$  observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

maior incidência de radiação solar observados com os horários de maior concentração de  $O_3$  nas estações.

Nas figuras 5.8 e 5.9 é mostrado que em ambos os meses, o modelo representa satisfatoriamente o ciclo diurno médio da temperatura nas estações analisadas. No entanto, apresenta o mesmo comportamento identificado no ciclo diurno médio de  $O_3$ : atrasa os horários de maior e menor temperatura em algumas horas, comportamento este consistente com o padrão observado do  $O_3$ . O atraso da ocorrência da máxima e mínima TAR indica que pode haver um retardamento da liberação de calor sensível, o que por sua vez pode estar associado à nebulosidade prevista pelo modelo.

#### 5.4.2 Análise do viés da TAR

A partir da análise do viés (Figs. 5.10 e 5.11) observa-se que, em ambos os meses, o modelo superestima as temperaturas máximas (prevê valores mais elevados em comparação aos valores médios das estações) e subestima as temperaturas mínimas na maioria das estações. Dessa forma, observa-se que o comportamento do ciclo diurno médio da TAR está diretamente associado ao comportamento do ciclo diurno

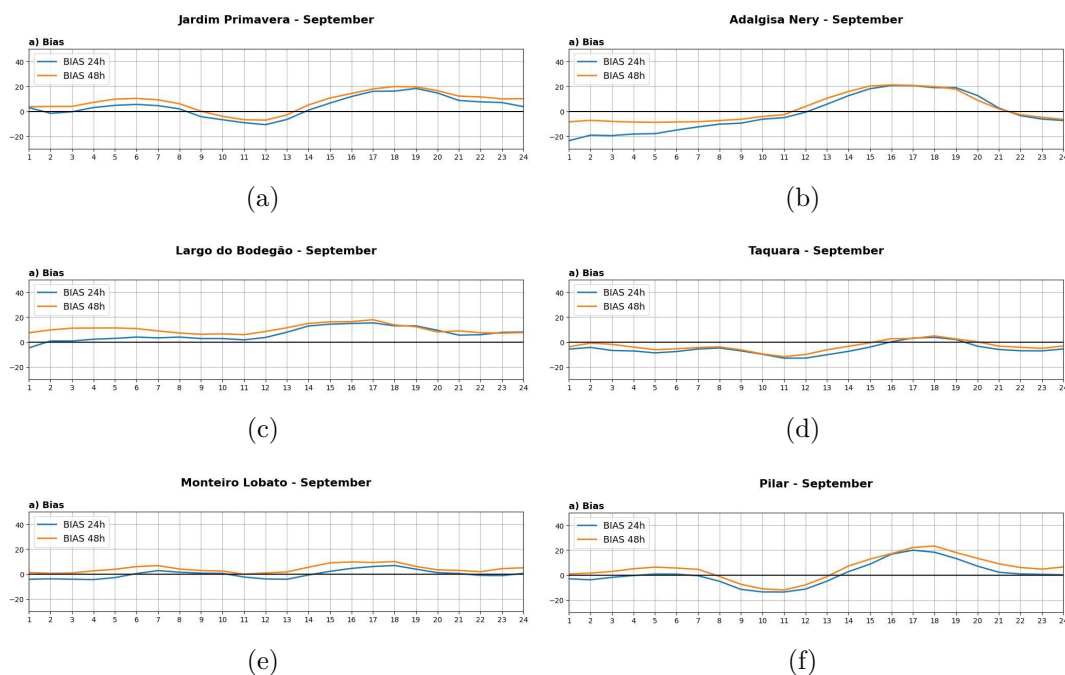


Figura 5.7 - Ciclo diurno médio de  $O_3$  observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.

médio de  $O_3$ . A superestimativa das temperaturas máximas pelo modelo pode estar associada à superestimativa das concentrações previstas do poluente no período da tarde.

### 5.4.3 Média móvel - Variação diária de $O_3$

A partir do ciclo diurno médio obtido para cada estação, foram selecionados os horários de maior e menor concentração de  $O_3$  em cada estação. Os horários podem ser verificados na Figura 5.12 composta por duas tabelas, uma para agosto e outra para setembro. Para verificar a capacidade do modelo em representar a variação diária do poluente, foi calculada a média móvel do  $O_3$  nas estações e foi realizada a comparação com a variabilidade prevista nos dois prazos de previsão a cada 3 dias nesse mesmo horário.

É possível observar que o modelo consegue representar satisfatoriamente a variação diária do poluente, indicando corretamente o aumento e diminuição das concentrações nos horários de maior e menor concentração. No entanto, pode-se perceber que quando há um aumento ou queda acentuada com relação aos dias anteriores, o modelo apresenta desempenho reduzido. Em agosto esse padrão pode ser observado na

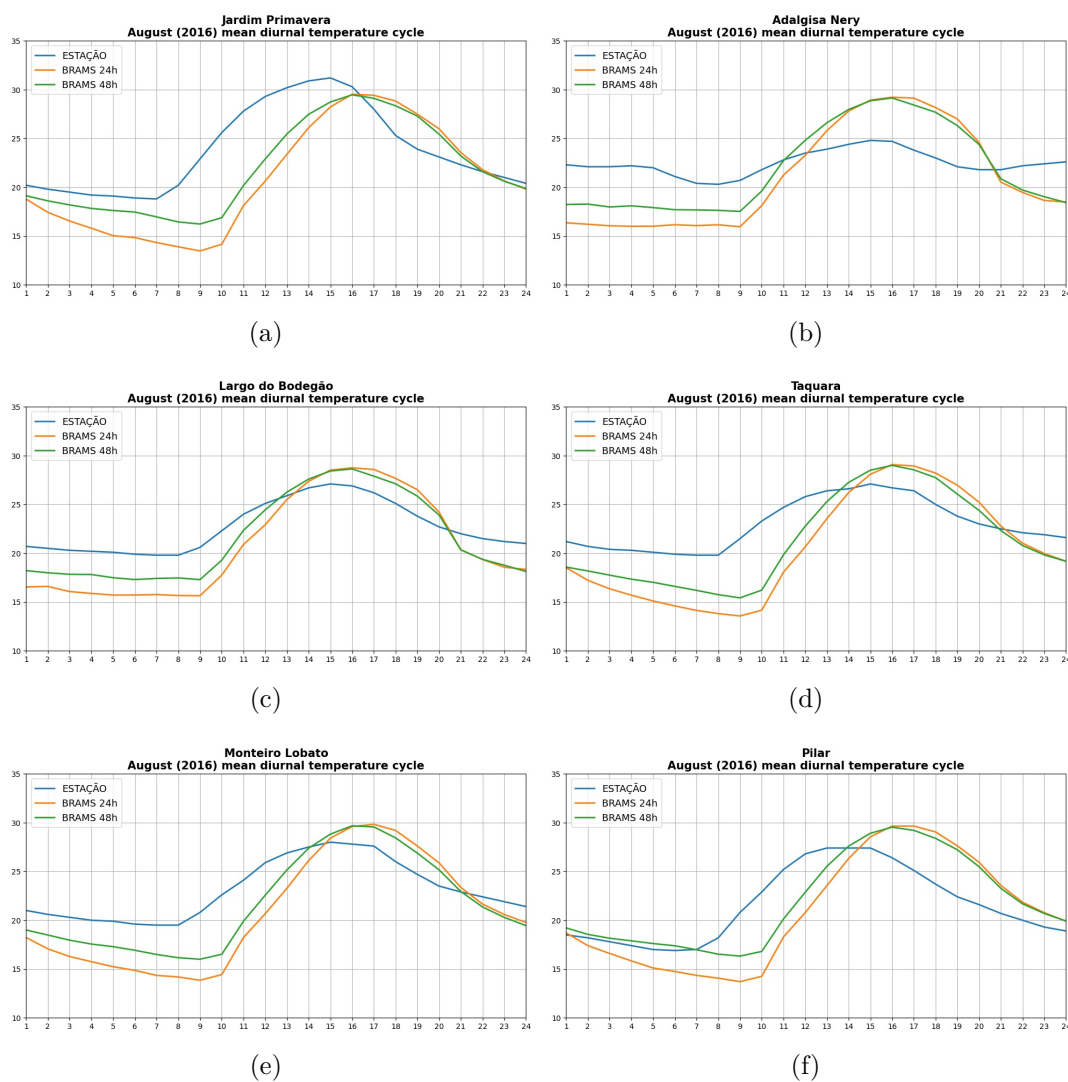


Figura 5.8 - Ciclo diurno médio de TAR observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

estação Pilar no horário de maior concentração (Fig 5.13.f) onde há um brusco aumento nas concentrações médias de  $O_3$  entre os dias 12 e 16 de agosto, e no horário de menor concentração (Fig 5.14.f) onde há uma queda brusca nas concentrações nos últimos dias do mês. No mês de setembro (Fig 5.15.b e 5.16.b) observa-se que para a estação Adalgisa Nery, o modelo teve o desempenho inferior ao representar a variação diária nos dois horários selecionados. Este fato pode estar relacionado ao ciclo diurno atípico registrado pela estação nesse mês.

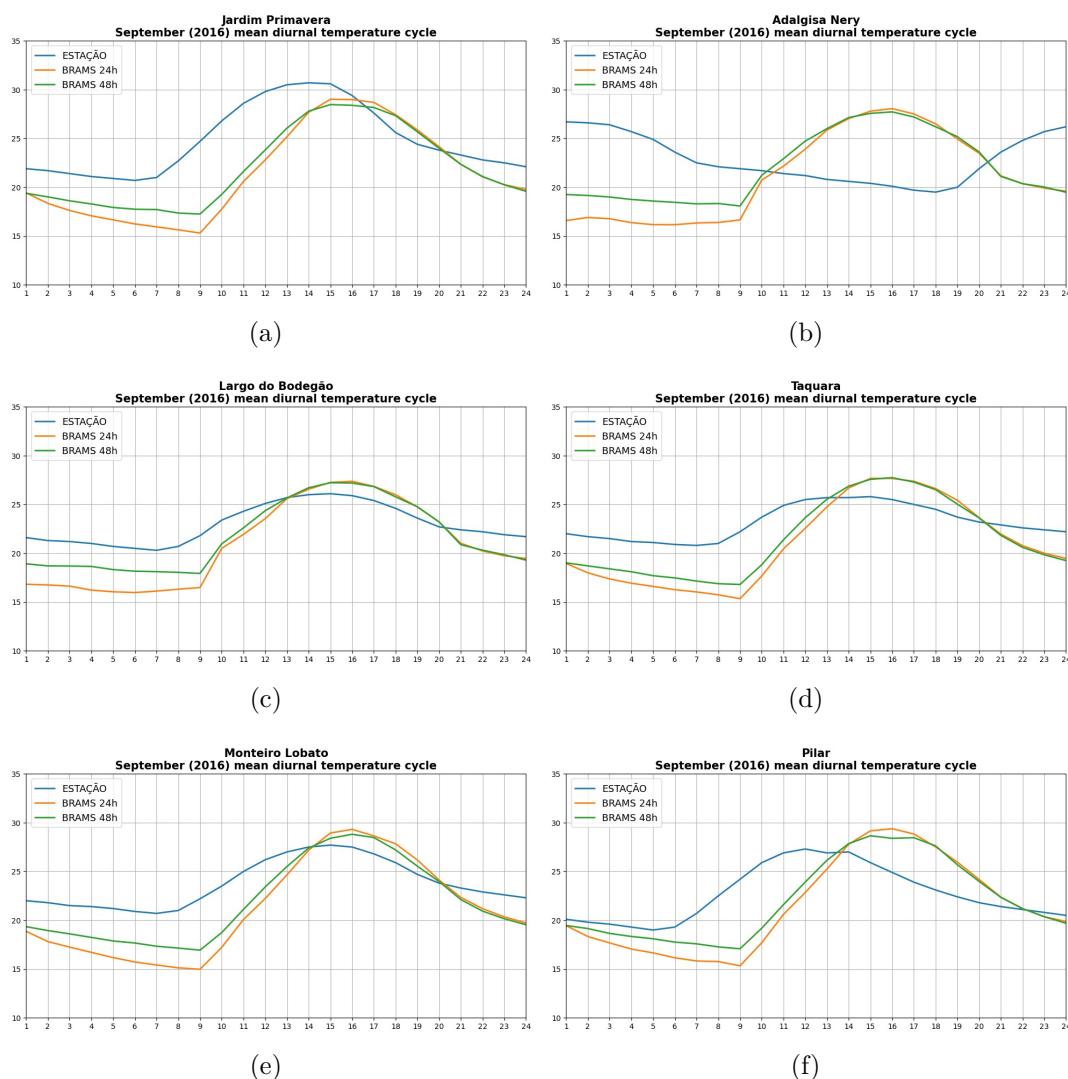


Figura 5.9 - Ciclo diurno médio de TAR observado versus o ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

#### 5.4.4 Análise estatística da variação diária de $O_3$

O cálculo do viés para a média móvel nos horários de maior (Figs. 5.17 e 5.19) e menor (Figs. 5.18 e 5.20) concentração de  $O_3$  em ambos os meses confirma que o modelo superestima e subestima as concentrações em diversos dias. No entanto, na maioria dos casos, os erros não passam de 25 ppb, exceto nos casos onde há elevação ou queda brusca das concentrações. Novamente, estes resultados estão associados ao atrado dos máximos e mínimos de  $O_3$  previstos pelo BRAMS.

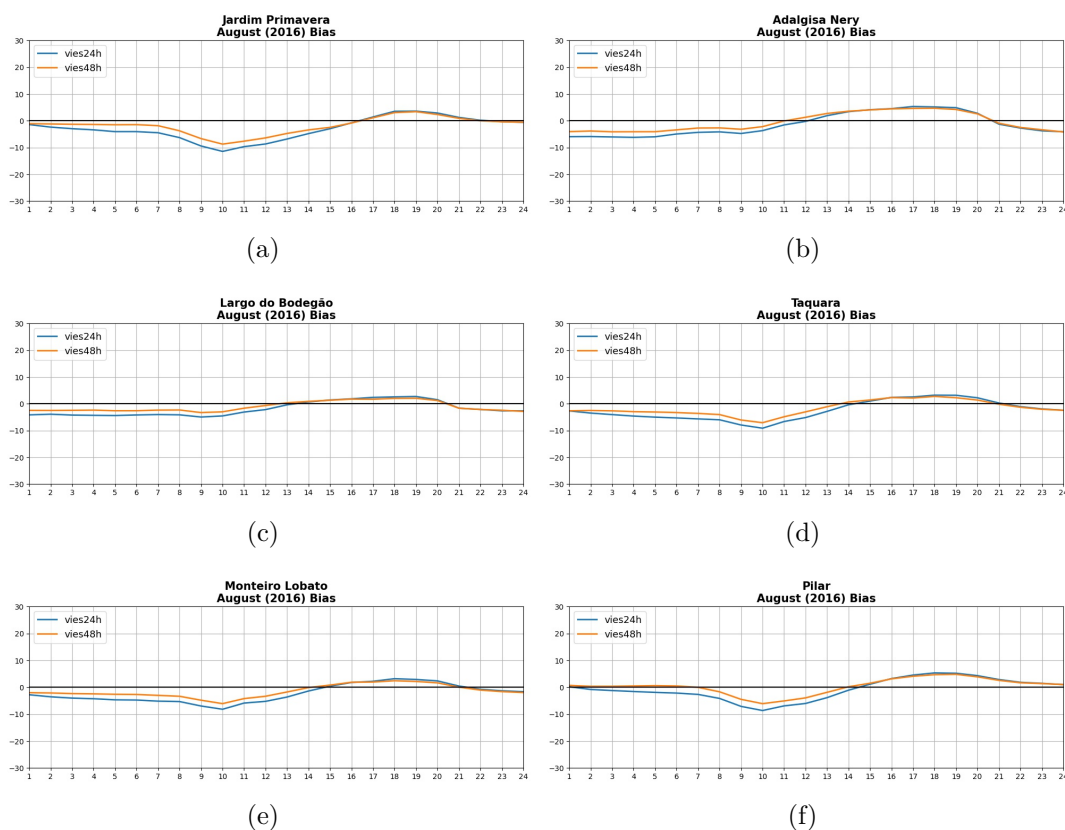


Figura 5.10 - Viés do ciclo diurno médio de TAR observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

## 5.5 Rosa dos ventos observada x prevista

As rosas dos ventos foram geradas para investigar se o atraso nos horários de maior e menor concentração de  $O_3$  e as super e subestimativas do modelo poderiam estar relacionadas ao escoamento próximo à superfície.

Pode-se observar que, em agosto (Fig 5.21), o modelo representa satisfatoriamente a direção predominante do vento na maioria das estações, no entanto, superestima as intensidades na maioria delas. Esse comportamento pode ser observado nas estações Largo do Bodegão e Adalgisa Nery. Durante o mês de agosto nessas estações, o modelo prevê corretamente a direção predominante de norte (N) e sul-sudoeste (S-SW), porém, superestima as intensidades em mais de 6 metros por segundo. Em setembro (Fig 5.22), o erro associado à intensidade do vento em ambas as estações permanece. A superestimativa das intensidades do vento na estação Adalgisa Nery em setembro pode ser um dos motivos associados ao ciclo diurno atípico registrado

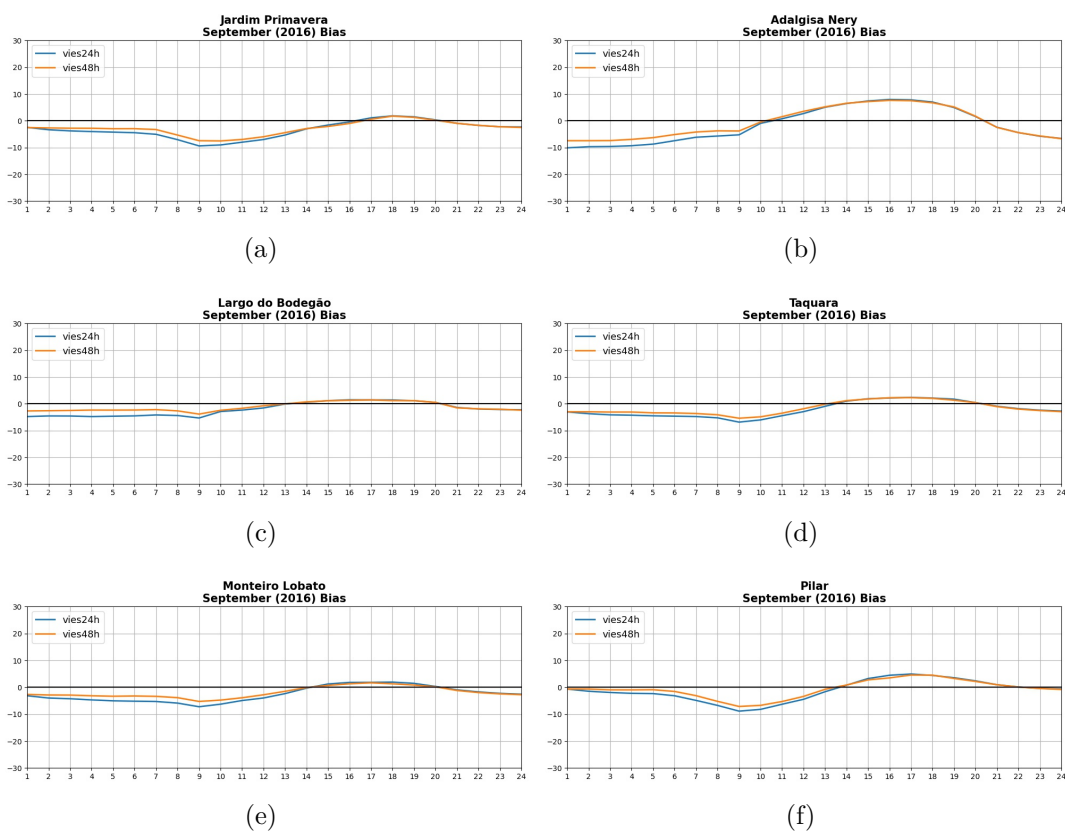


Figura 5.11 - Viés do ciclo diurno médio de TAR observado com relação ao ciclo diurno médio no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.

por essa estação nesse mês.



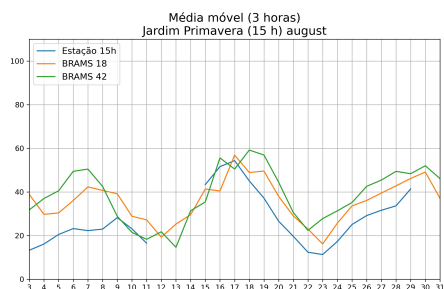
AGOSTO	Horário de maior concentração	Horário de menor concentração
Jardim Primavera	15h	7h
Adalgisa Nery	17h	10h
Largo do Bodegão	18h	9h
Taquara	14h	8h
Monteiro Lobato	17h	9h
Pilar	14h	8h

(a)

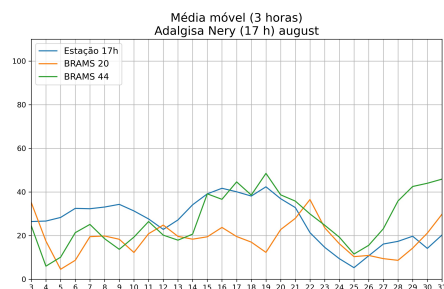
SETEMBRO	Horário de maior concentração	Horário de menor concentração
Jardim Primavera	14h	7h
Adalgisa Nery	5h	19h
Largo do Bodegão	18h	9h
Taquara	16h	8h
Monteiro Lobato	17h	8h
Pilar	12h	6h

(b)

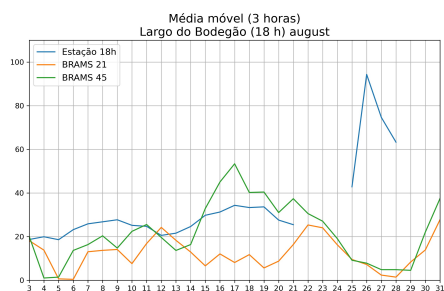
Figura 5.12 - Horários de maior e menor concentração média de O<sub>3</sub> em cada estação. (a) Agosto, (b) Setembro.



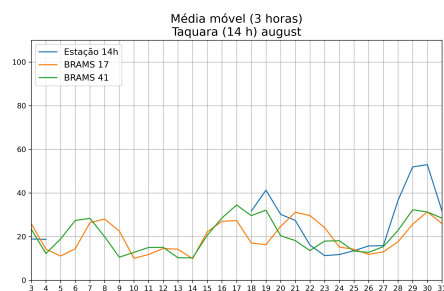
(a)



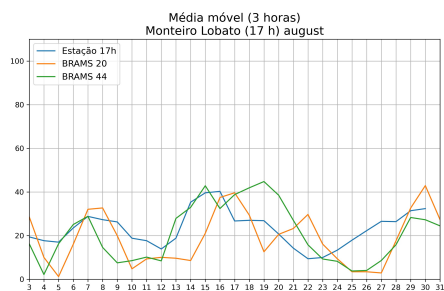
(b)



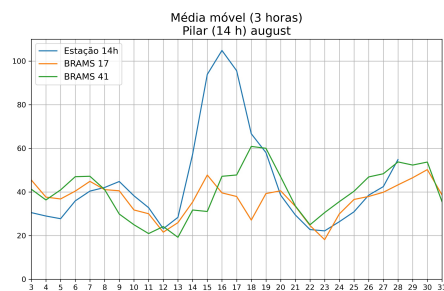
(c)



(d)

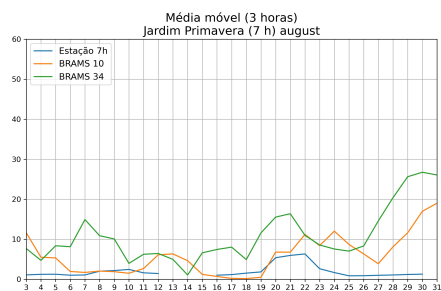


(e)

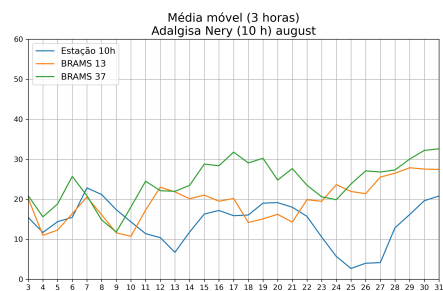


(f)

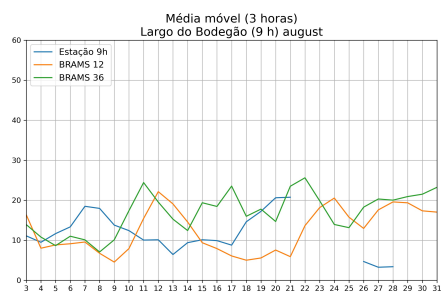
Figura 5.13 - Média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de maior concentração de  $O_3$  nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.



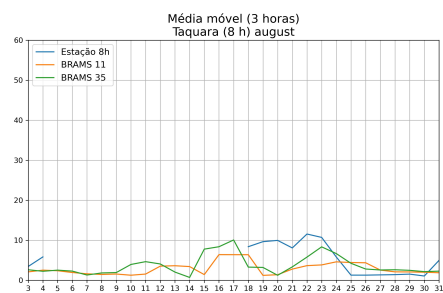
(a)



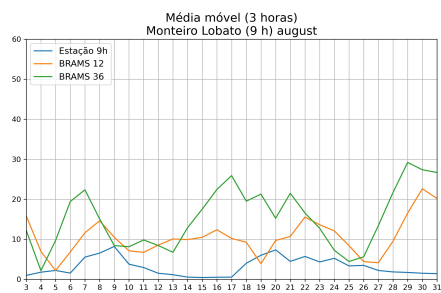
(b)



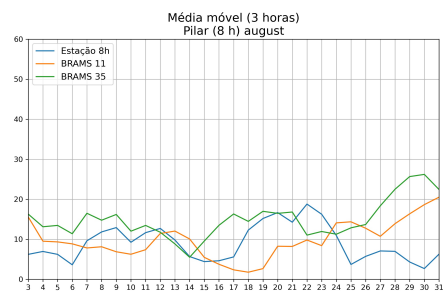
(c)



(d)

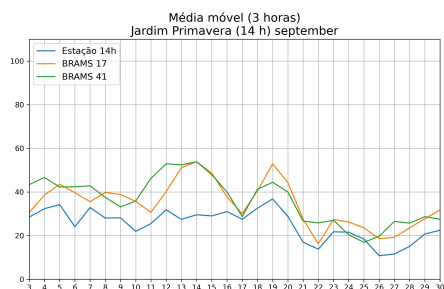


(e)

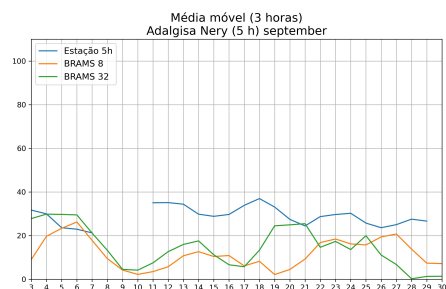


(f)

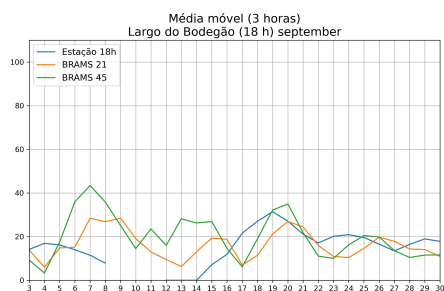
Figura 5.14 - Média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de menor concentração de  $O_3$  nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.



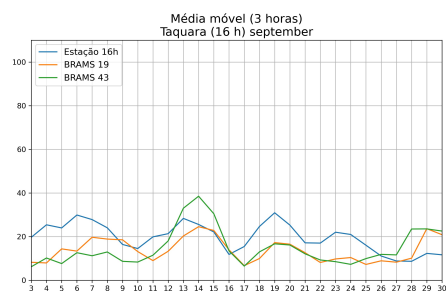
(a)



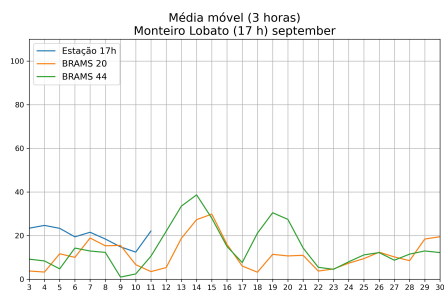
(b)



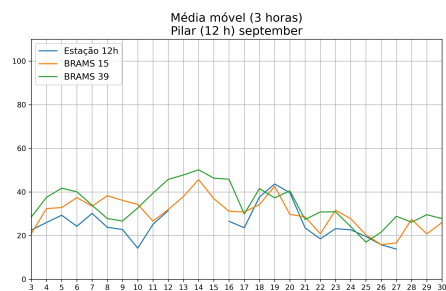
(c)



(d)

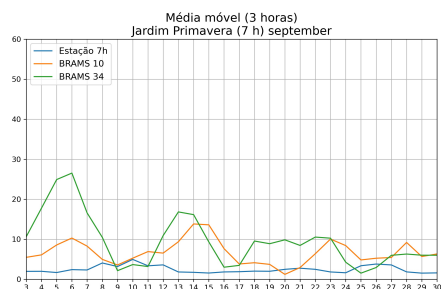


(e)

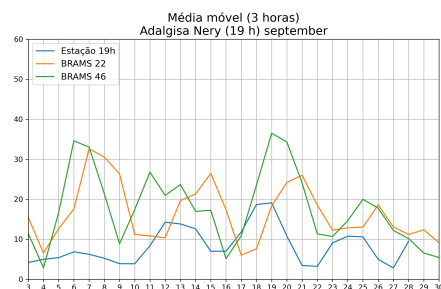


(f)

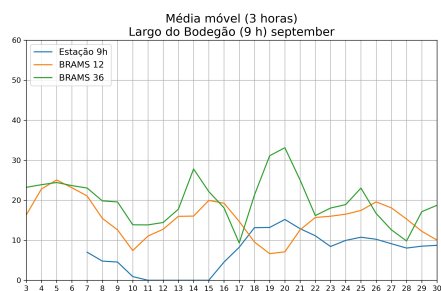
Figura 5.15 - Média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de maior concentração de  $O_3$  nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.



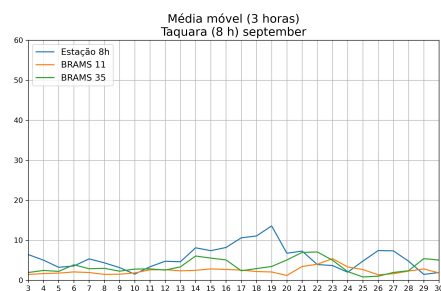
(a)



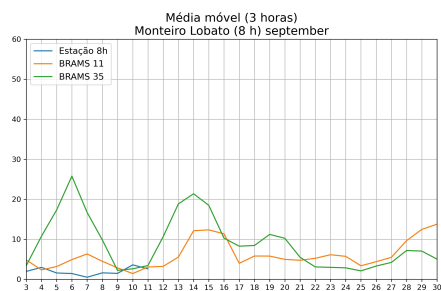
(b)



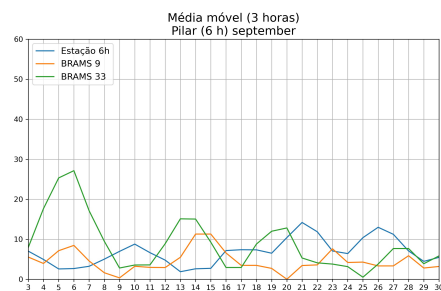
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.16 - Média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de menor concentração de  $O_3$  nas estações. Média móvel da estação versus média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.

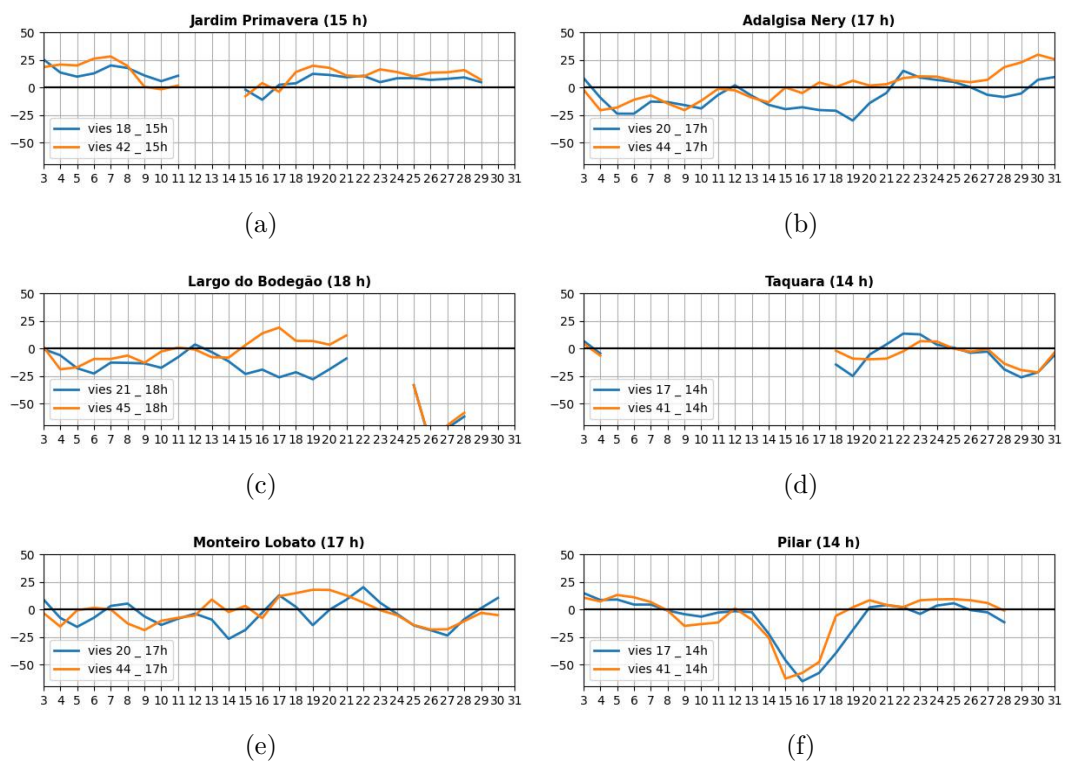


Figura 5.17 - Viés da média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de maior concentração de  $O_3$  nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

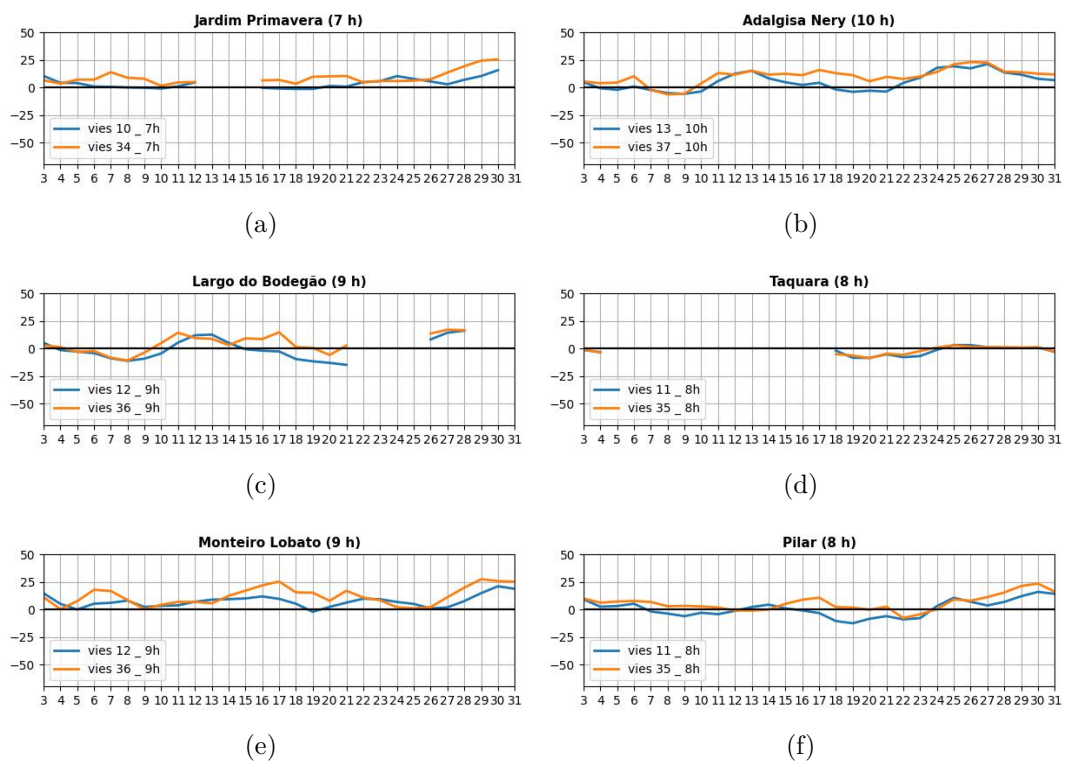


Figura 5.18 - Viés da média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de menor concentração de  $O_3$  nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em agosto.

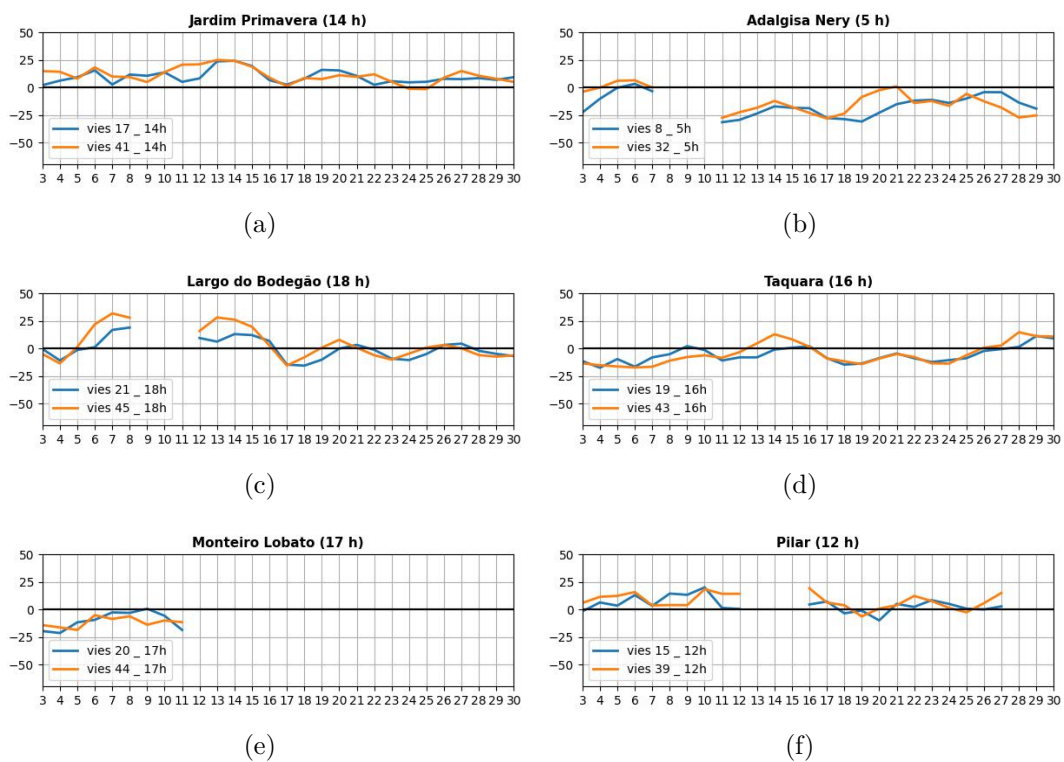


Figura 5.19 - Viés da média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de maior concentração de  $O_3$  nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.



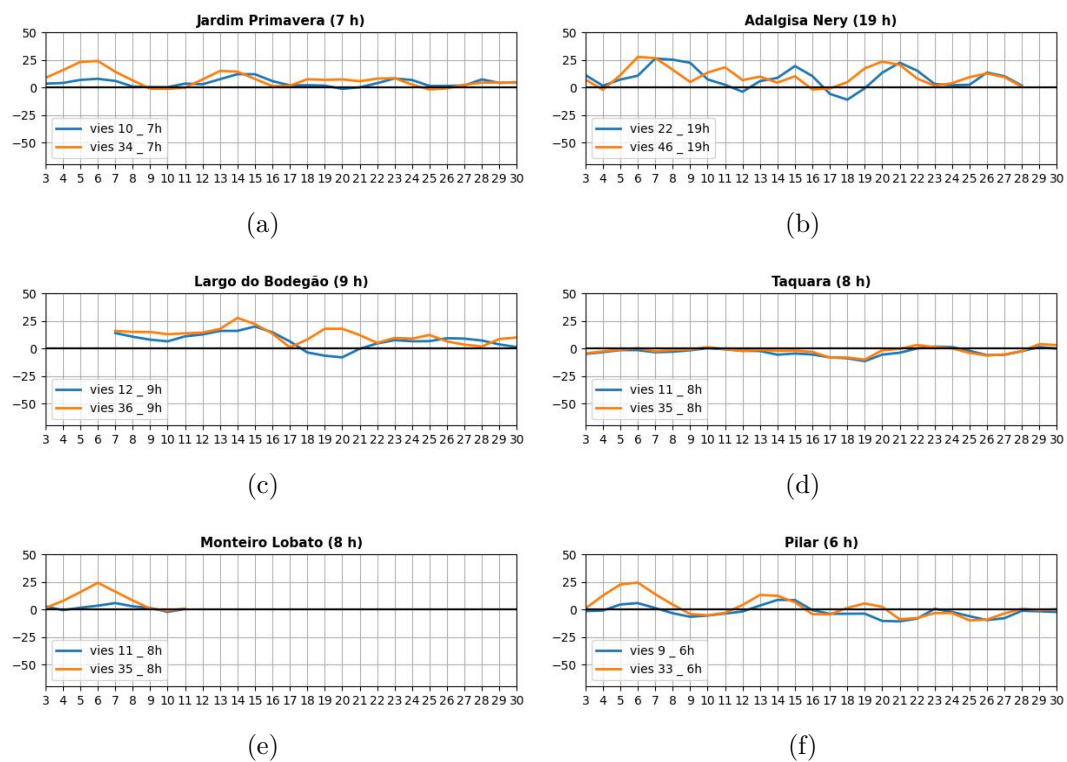


Figura 5.20 - Viés da média móvel de  $O_3$  a cada 3 horas no horário de menor concentração de  $O_3$  nas estações. Viés da média móvel da estação com relação a média móvel obtida a partir da previsão do modelo BRAMS no ponto de grade mais próximo às estações nos dois prazos de previsão 24h e 48h em setembro.

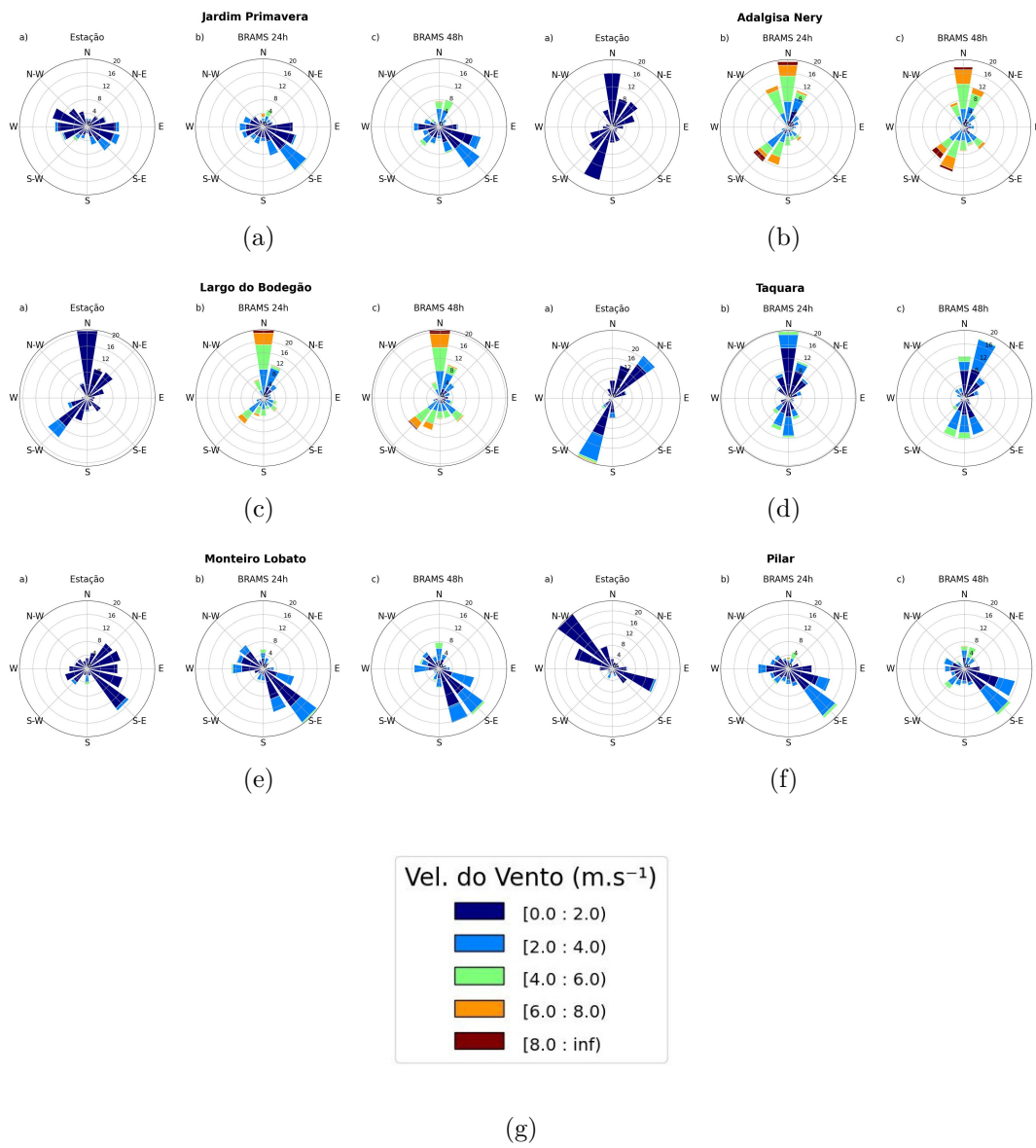


Figura 5.21 - Rosa dos ventos de todos os horários do mês de agosto de 2016. Comparação entre intensidade e direção do vento das estações com relação as obtidas através das previsões do modelo BRAMS para os dois prazos de previsão, 24h e 48h.

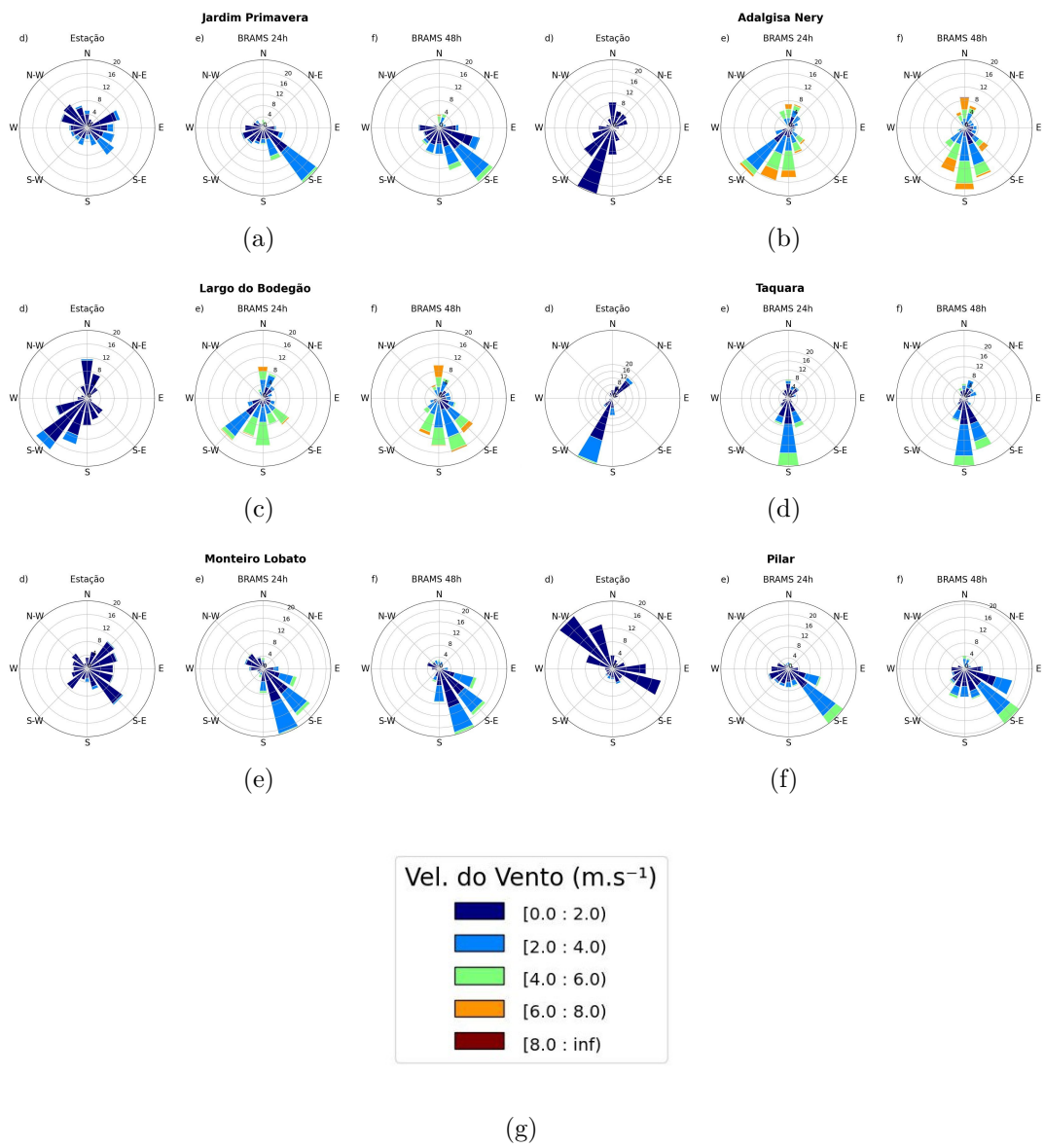


Figura 5.22 - Rosa dos ventos de todos os horários do mês de setembro de 2016. Comparação entre intensidade e direção do vento das estações com relação as obtidas através das previsões do modelo BRAMS para os dois prazos de previsão, 24h e 48h.



## 6 Conclusões

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que a maioria das estações analisadas não ultrapassaram os padrões climatológicos do ciclo diurno médio em agosto e setembro de 2016.

Foi possível observar que, de forma geral, o modelo simula corretamente o ciclo diurno médio, embora atrase os horários de ocorrências das maiores e menores concentrações. Ainda, o modelo simula satisfatoriamente a variabilidade diária do ozônio troposférico na maioria das estações. Devido ao atraso nos máximos e mínimos, é esperado que haja a ocorrência de superestimativa e subestimativa correspondentes.

Com relação à análise das previsões de direção e intensidade do vento e das previsões do ciclo diurno médio da temperatura, a exemplo das estações apresentadas, pode-se associar os erros no atraso e também nas concentrações de  $O_3$  previstas pelo modelo com o atraso dos horários de temperatura máxima e mínima e aos padrões de vento previstos. Conclui-se, portanto, que o modelo BRAMS apresentou desempenho satisfatório para ser aplicado em altíssima resolução espacial para previsão da qualidade do ar e suas incertezas residem no fato de que a variabilidade diária do ozônio é fortemente afetada por diferentes variáveis, como a intensidade e localização de fontes de poluentes e fatores meteorológicos.

Os resultados obtidos são indicativo de que o modelo possui um erro que pode ser removido com a aplicação de técnicas de correção de viés, sendo desta forma uma alternativa para a disponibilização de previsões numéricas de ozônio com maior qualidade.

Os resultados obtidos também servirão de base para o melhor entendimento dos processos físicos e químicos relacionados ao atraso das previsões de concentrações máximas e mínimas de ozônio do modelo, o que pode contribuir para o aperfeiçoamento do modelo para aplicação em previsão ambiental sobre regiões metropolitanas como a RMRJ.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANÇADO, J.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; RBEX, M. A. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v32s1/a02v32s1.pdf>>. Acesso em: 17 de Novembro de 2016. 6

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; Silva Dias, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43–65, 2007. ISSN 00068314. 1

GOMIDES, E.; DUTRA, F., F. E.; FERREIRA, F. D. **Emissão veicular e o ozônio troposférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2009. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/rafael/cibim\\_9\\_las\\_palmas-emissao\\_veiculares\\_-\\_oznio\\_29-aspectos\\_medio\\_ambientales.pdf](http://www.feam.br/images/stories/rafael/cibim_9_las_palmas-emissao_veiculares_-_oznio_29-aspectos_medio_ambientales.pdf)>. Acesso em: 03 de julho de 2017. 6

HOSHI, J.; AMANO, S.; SASAKI, Y.; KORENAGA, T. Investigation and estimation of emission sources of 54 volatile organic compounds in ambient air in Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 10, p. 2383–2393, 2008. 6

HOUGHTON, J.; DING, Y.; GRIGGS, D.; NOGUER, M.; LINDEN, P. van der; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881p. Disponível em: <<http://webpages.icav.up.pt/PTDC/CVT/098487/2008/IPPC,%202001.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2018. 6

MARTINS, L. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo**. 2006. Disponível em: <[http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d\\_leila\\_d\\_martins\\_0.pdf](http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_leila_d_martins_0.pdf)>. Acesso em: 30 de janeiro de 2018. 6

MMA. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br>>. Acesso em: 9 de janeiro de 2020. 1, 5, 9

ROZANTE, J.; RAMIREZ, E. A newly developed south american mapping of temperature(samet) with estimated lapse rate corrections. **International Journal of Climatology**, 2021. 3

RUSSELL, A.; MCCUE, K. **Mathematical modeling of the formation of nitrogen-containing air pollutants. 2. Evaluation of the effect of emission controls.** Pittsburgh, Pennsylvania, 1998. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00168a004>>. Acesso em: 28 jan. 2018. 6



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.