



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

-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**

Igor Frassoni Guedes dos Santos

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

[<http://urlib.net/xx/yy>](http://urlib.net/xx/yy)

INPE
Cachoeira Paulista
2019

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

**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^a 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 Ducca 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

-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**

Igor Frassoni Guedes dos Santos

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

[<http://urlib.net/xx/yy>](http://urlib.net/xx/yy)

INPE
Cachoeira Paulista
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Frassoni Guedes dos Santos, Igor.

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 / . – Cachoeira Paulista : INPE, 2019.
xiii + 34 p. ; (-TDI)

Iniciação Científica () – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, 2019.

Orientador : Ariane Frassoni dos Santos de Mattos.

1.Ozônio 2.RMRJ 3.BRAMS. 4.Poluição Atmosférica.

CDU 000.000



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

RESUMO

O ozônio troposférico é um poluente secundário prejudicial para os seres vivos e também age como um gás de efeito estufa. Ele não é emitido diretamente para a atmosfera, mas é um subproduto da reação química de compostos orgânicos voláteis (COVs) e óxidos de nitrogênio, na presença de radiação solar direta. Esforços têm sido realizados para reduzir as concentrações de O₃ na troposfera, a fim de minimizar seus impactos na saúde da população. Neste sentido, o uso de modelos de Previsão Numérica de Tempo auxilia na previsão da qualidade do ar especialmente em grandes centros urbanos, como é o caso da 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 1km 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. O presente trabalho tem como objetivo a análise das previsões de O₃ do modelo BRAMS referentes ao período dos Jogos Olímpicos 2016. Para analisar o desempenho do modelo, foram utilizados dados observados fornecidos pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro (SMAC) a partir do programa MonitorAR-Rio (Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar), das estações localizadas nos bairros Centro, Copacabana, Tijuca, Bangu, Irajá e Campo Grande. Para melhor análise e comparação das concentrações previstas, foi realizado o cálculo do viés das previsões de 24h e 48h do ciclo diurno médio do período analisado. Os resultados indicaram que o modelo tem um bom desempenho na previsão do máximo principal de concentração de O₃ que ocorre nas primeiras horas da tarde. Além disso, identificou-se que as previsões de 48h possuem, em geral, maior destreza que as de 24 horas e que o BRAMS tende a superestimar as concentrações de O₃ nas regiões do Centro e de Copacabana, enquanto que a tendência é de subestimativa das concentrações nos bairros Tijuca, Bangu, Irajá e Campo Grande.

Palavras-chave: Ozônio. RMRJ. BRAMS. Poluição. Atmosférica. RMRJ. Precipitação. Correlação. AOD.

AIR QUALITY STUDY IN THE METROPOLITAN REGION OF RIO DE JANEIRO (RMRJ): ANALYSIS OF THE TROPOSPHERIC OZONE AND VALIDATION OF THE BRAMS MODEL FOR THE PERIOD OF THE OLYMPIC GAMES OF RIO DE JANEIRO

ABSTRACT

Tropospheric ozone is a secondary pollutant that is harmful to living beings and also acts as a greenhouse effect gas. It is not emitted directly into the atmosphere, but is a by-product of the chemical reaction of volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxides in the presence of direct solar radiation. Efforts have been made to reduce O₃ concentrations in the troposphere in order to minimize its impacts on the health of the population. In this sense, the use of Numerical Weather Prediction models helps to predict air quality especially in large urban centers, such as the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (RMRJ). In 2016, CPTEC / INPE provided air quality forecasts using the model BRAMS version 5.2, in 1km horizontal spacing, every hour, as support for the 2016 Olympic and Paralympics Games held between August and September in the city of Rio de Janeiro. The present work has the objective of analyzing the O₃ forecasts of the BRAMS model for the period of the 2016 Olympic Games. To evaluate the performance of the model, we used observed data provided by the Municipal Department of Environment of the city of Rio de Janeiro (SMAC) from the MonitoAR-Rio Program (Air Quality Monitoring Program), in the stations located in the Centro, Copacabana, Tijuca, Bangu, Irajá and Campo Grande neighborhoods. For better analysis and comparison of the predicted concentrations was calculated the bias of the 24h and 48h forecasts of the average daytime cycle in the analyzed period. The results indicated that the model performs well in predicting the main O₃ maximum concentration that occurs in the early afternoon. In addition, it was identified that the forecasts of 48h are generally more dexterity than those of 24 hours and that BRAMS tends to overestimate the O₃ concentrations in the Center and Copacabana regions, while the tendency is to underestimate the concentrations in the Tijuca, Bangu, Irajá and Campo Grande.

Keywords: Ozone. RMRJ. BRAMS. Atmosphere. Pollution.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
4.1	Ciclo diurno médio das concentrações de óxidos de nitrogênio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 11
4.2	Ciclo diurno médio das concentrações de óxidos de nitrogênio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. . 12
4.3	Comparação entre as concentrações de NO_x e O_3 13
4.4	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno na estação Bangu. . . 14
4.5	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Bangu. . . . 15
4.6	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Campo Grande. 16
4.7	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Campo Grande. 17
4.8	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Copacabana. 18
4.9	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Copacabana. 19
4.10	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Centro. 20
4.11	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Centro. . . . 21
4.12	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Irajá. 22
4.13	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Irajá. 23
4.14	Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Tijuca. 24
4.15	Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Tijuca. . . . 25
4.16	Ciclo diurno médio da temperatura para a estação Copacabana 27
4.17	Média horária de ozônio observada e prevista para a estação Campo Grande 28
4.18	Ciclo diurno médio da temperatura para a estação a) Irajá, b) Tijuca, c) São Cristóvão, d) Copacabana. 29
4.19	Mapas espaciais de anomalias de temperaturas mínima, máxima e precipitação dos meses de agosto e setembro de 2016. 30

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Valores calculados de viés para cada estação.	26

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Ozônio	2
2.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	3
2.3 Compostos Orgânicos Voláteis	4
2.4 Formação do Ozônio na Troposfera	4
3 Metodologia de desenvolvimento do trabalho	7
3.1 Introdução ao Python	7
3.2 Metodologia	7
3.2.1 Rotinas Computacionais	9
3.3 Dados	10
3.3.1 Dados Observacionais da Área de Estudo	10
4 Resultados	11
5 Conclusões	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 Introdução

O diagnóstico da qualidade do ar nas grandes cidades vem ganhando espaço na produção científica atual no mundo todo, principalmente com relação ao ozônio troposférico (O₃) e seus efeitos nocivos nos seres vivos. As emissões na troposfera de gases traço tóxicos e os produtos de sua oxidação representam um risco direto à saúde. A produção de níveis elevados de O₃ próximo à superfície é de particular preocupação. Nos países em desenvolvimento, há um agravamento deste problema devido ao crescimento e da idade da frota veicular, bem como do intenso uso de combustíveis fósseis tanto no setor de transportes quanto na indústria (Alonso, 2011). Os efeitos nocivos da poluição antrópica na população têm motivado a comunidade científica internacional a prover metodologias para a estimativa, controle e mitigação da poluição no âmbito urbano, regional e global. Poluentes com tempo de vida mais longo, provenientes de fontes urbanas, podem afetar a química atmosférica numa escala continental e mesmo global, sendo fortemente influenciados por fatores meteorológicos e características geográficas. O O₃ produzido em áreas urbanas provém de uma complexa interação entre óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COV), emitidos em sua maioria por atividade veicular, e na presença de radiação solar.

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) agrega 21 municípios, ocupando uma área de aproximadamente 15% do total do Estado, concentrada em uma superfície de aproximadamente 6.700 km². Cerca de 75% da população total do Estado reside na RMRJ - mais de 12 milhões de habitantes. Destes 12 milhões, 53% estão concentrados somente na cidade do Rio de Janeiro. Segundo dados do Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (INEA), esse contingente impõe a característica de forte concentração populacional. Incluída entre as mais povoadas do Brasil, com aproximadamente 1.800 habitantes por metro quadrado, a região apresenta o maior grau de urbanização entre as regiões metropolitanas (98%) do país. Cerca de 71% da frota veicular de todo o Estado do Rio de Janeiro está registrado na RMRJ (DETRAN, 2013). Por ser uma região que concentra o segundo maior PIB do país (IBGE, 2017), há um grande volume de atividades e oferta de bens e serviços. A complexidade dessa região, como em qualquer metrópole contemporânea, torna imprescindível a observação de aspectos da dinâmica urbana e de suas implicações no ambiente, e com especial atenção nesse estudo, sobre a qualidade do ar na RMRJ.

Durante o período que antecedeu os Jogos Olímpicos e Paralímpicos do Rio de Ja-

neiro, identificou-se a necessidade de fornecer subsídios para a tomada de decisões em relação à qualidade do ar na RMRJ durante os Jogos Olímpicos. Em vista dos desafios científicos relacionados à previsão de qualidade do ar para a RMRJ, especialmente em se tratando da modelagem da qualidade do ar em alta resolução espacial sobre um domínio de topografia complexa como o Rio de Janeiro, o presente trabalho apresenta a implementação e validação do Sistema de Previsão de Qualidade do Ar para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (SPQA-RMRJ) no CPTEC/INPE, com foco para as previsões de O_3 . Esta iniciativa contribuiu para aperfeiçoar os produtos de previsão de qualidade do ar disponibilizados pelo CPTEC/INPE atualmente em operação e forneceu subsídios para os órgãos responsáveis pelo monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro durante os Jogos de 2016 realizados nos meses de agosto e setembro de 2016.

2 Revisão Bibliográfica

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, 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 suas diferentes combinações (poluente secundário).

Dentre os poluentes secundários, pode-se encontrar o ozônio troposférico (O_3) cujos principais precursores são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os Compostos Orgânicos Voláteis (COV's). Esses gases, combinam-se quimicamente com o oxigênio para formar o O_3 .

2.1 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 é formado a aproximadamente 30 km de altitude, onde os raios solares incidentes (com comprimento de onda menor que 242 nm) dissociam a molécula de oxigênio (O_2). Formado naturalmente a partir da fotodissociação do O_2 , a nível estratosférico, o ozônio possui a função de filtrar os raios ultravioletas do sol. O mesmo gás é encontrado também na troposfera em baixas concentrações, quando está em equilíbrio com seus precursores. Entretanto, quando a atmosfera sofre alterações com relação

aos seus gases, no caso, agentes poluidores, esse equilíbrio é perdido. Os níveis de ozônio na troposfera dependem de compostos orgânicos voláteis (COV's), do monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e da intensidade da radiação solar. Quando a quantidade de ozônio na troposfera se eleva, este, por ter caráter oxidante quando presente nessa altura da atmosfera, exerce diversos efeitos nocivos à saúde humana e ao ecossistema terrestre. Além do mais, é possível que o aumento do ozônio troposférico possa ter um impacto significativo na qualidade do ar e nas mudanças climáticas, visto que este é um dos gases do efeito estufa (HOUGHTON et al., 2001).

O O_3 é um gás presente a nível traço, presente em uma camada aproximadamente 50km acima da superfície terrestre, que exerce uma grande importância na estratosfera. Ele protege os seres vivos a partir da absorção da radiação eletromagnética emitida pelo sol no comprimento de onda do ultravioleta (UV). Formado naturalmente a partir da fotodissociação do oxigênio atmosférico (O_2). Esse processo absorve a radiação 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 (10-20ppbv), 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 de fundo (MARTINS, 2006). Com o aumento da quantidade de automóveis e indústrias no planeta, houve um crescimento na emissão de NO_x e COVs. Uma vez que o 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.

2.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os gases conhecidos como 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 dióxido de nitrogênio (NO_2) sob a ação de luz

solar, e este desempenha papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio. Dependendo das concentrações, o NO_2 causa prejuízos à saúde.

As concentrações de NO_2 diminuem, conforme as concentrações dos gases NO_x diminuem. (RUSSELL; MCCUE, 1998) mostrou em simulações para Los Angeles, que reduzindo as emissões de NO_x , também seriam reduzidos os picos de NO_2 bem como o ácido nítrico e aerossóis de nitrato, que formam o NO_2 .

O 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 O_3 troposférico, pois são precursores deste poluente. As principais fontes de NO_x são os motores dos automóveis e, em menor escala, as usinas termoelétricas, 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.

2.3 Compostos Orgânicos Voláteis

O termo Compostos Orgânicos Voláteis engloba um grande grupo de poluentes que se encontram presentes no ar atmosférico, principalmente, sob a forma gasosa (HOSHI et al., 2008). Segundo a CETESB, os COV's 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 .

2.4 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.

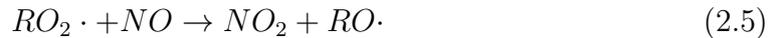


O oxigênio atômico produzido é rapidamente consumido, formando o ozônio, que

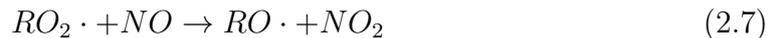
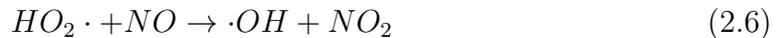
por sua vez é degradado pelo óxido de nitrogênio.



Essas três reações estabelecem uma concentração estável do ozônio na troposfera, contudo, com a alta concentração de COVs, essencialmente os hidrocarbonetos, esse equilíbrio é prejudicado. Na presença desses compostos e de radicais hidroxila, o NO pode ser convertido a NO₂ sem consumir O₃, contribuindo para um acúmulo do poluente.



Os hidrocarbonetos (R) são atacados por radicais hidroxilas, formando radicais alquil peróxi (RO₂·), que por sua vez reagem com o monóxido de nitrogênio, produzindo assim, o dióxido de nitrogênio e um radical alcoxi. Esse radical gerado também pode contribuir para maiores concentrações de ozônio, visto que é precursor de um novo radical alcóxi e do hidro peróxido HO₂, ambos capazes de transformar NO em NO₂ da seguinte forma:



O radical hidroxila, principal composto oxidante do processo, possui três fontes principais na atmosfera.

- Dissociação fotoquímica do ozônio;
- Dissociação fotoquímica de compostos carboxílicos;

- Dissociação fotoquímica do ácido nitroso.

Analisando os mecanismos, observa-se que a formação do ozônio e de outras espécies secundárias não é instantânea. Além disso, o ozônio, 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 ozônio são observados relativamente afastados do grande centro urbano.

3 Metodologia de desenvolvimento do trabalho

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas etapas foram seguidas, como uma revisão dos comandos utilizados no ambiente computacional Linux, a utilização de scripts nesse ambiente e a introdução do bolsista à uma nova linguagem de programação, o Python. A seguir, encontram-se uma breve discussão sobre esses itens.

3.1 Introdução ao Python

A linguagem de programação Python foi escolhida para realizar a criação de gráficos e calcular os índices estatísticos. Essa linguagem foi escolhida devido ao seu crescente número de usuários no meio acadêmico e científico, onde se mostra rápida e eficaz. O bolsista já possuía conhecimentos em outras linguagens de programação, assim, o contato com essa nova linguagem não foi tão difícil. De certa forma, o contato inicial se dá para conhecer o ambiente e os comandos diferentes que existem na linguagem, porém é claro, que rotinas mais elaboradas necessitariam de um tempo maior para o estudo e aperfeiçoamento do meio de programação.

3.2 Metodologia

A partir dos dados disponibilizados pelo programa MonitorAR-Rio, obteve-se as concentrações de ozônio e dos outros compostos analisados, medidas de 1 de agosto a 30 de setembro em intervalos de 10 minutos. Entretanto, alguns horários apresentavam ausência de dados. Assim, viu-se a necessidade de fazer um tratamento nos dados. Este tratamento constituiu na criação de uma rotina computacional capaz de tornar esses espaços vazios em valores indefinidos, de modo que esses valores não sejam considerados nos futuros usos. Apesar da ausência de dados em alguns horários, o impacto não foi tão significativo, uma vez que a frequência de dados é grande, não sendo prejudicial para a análise dos gráficos gerados. Após concluir o tratamento dos dados, foram gerados scripts a fim de se obter os ciclos diurnos médios de cada estação de monitoramento.

O Ciclo diurno médio foi escolhido para realizar essa análise, pois o mesmo possibilita a observação do comportamento padrão das concentrações dos compostos analisados durante cada hora do dia. Assim, o diagnóstico do desempenho do modelo BRAMS se tornaria mais facilmente analisado.

Com os dados de ciclo diurno médio prontos, o bolsista iniciou o desenvolvimento de scripts em Python para a geração de gráficos. Foram gerados gráficos do ciclo diurno de todos os compostos analisados neste trabalho, dentre os quais: Monóxido

de nitrogênio, dióxido de Nitrogênio, ozônio, óxidos de nitrogênio e o metano.

Para realizar o estudo dos erros sistemáticos do modelo BRAMS, foi realizado o cálculo do viés para cada hora do dia no ciclo diurno.

$$\text{Viés} = \text{Valor médio Previsto no horário} - \text{Valor médio Observado no horário}$$

O viés é obtido a partir da diferença de um valor médio de um determinado estimador estatístico (valores no ciclo diurno dos dados estimados) e o valor que se pretende estimar (valores no ciclo diurno dos dados observados). Desta forma, com o cálculo do viés obteve-se os valores dos erros sistemáticos cometidos pelo modelo em cada horário do ciclo diurno. Para verificar se a tendência geral do modelo é de subestimar ou superestimar as concentrações do ozônio, calculou-se o desvio viés.

$$\text{DesvioViés} = \sum_{t=1}^N \frac{\text{ValorPrevisto} - \text{ValorObservado}}{N}$$

O desvio viés é determinado pela somatória dos valores de viés dividido pelo número de valores somados (N). Caso o resultado obtido seja negativo, a análise mostra que, em geral, o modelo subestimou as concentrações dos compostos naquele período, e se o valor do desvio viés for positivo, o modelo superestimou essas concentrações.

Em ambos os casos, tanto para o cálculo do viés como do desvio viés, os resultados mais favoráveis são aqueles que mais se aproximam do valor zero, pois significam um menor erro cometido nas previsões.

Etapa 4-A: desenvolvimento de rotinas computacionais para o cálculo de índices estatísticos

Foram desenvolvidos scripts para a geração dos índices estatísticos utilizando a linguagem Python que serão melhor descritos na Seção 3.2.1. Esta etapa visou melhor entender como são computados índices estatísticos básicos comumente utilizados para análise de modelos numéricos da atmosfera.

Etapa 4-B: desenvolvimento de rotinas computacionais para analisar o comportamento das condições meteorológicas:

De forma a entender a relação das variáveis meteorológicas com os padrões de ozônio observados e previstos pelo modelo, fez-se necessário analisar o comportamento

das condições atmosféricas no período de estudo. Assim, foi necessário o desenvolvimento de rotinas computacionais para a análise meteorológica. Foram desenvolvidos scripts de forma a gerar gráficos de temperatura para o período de estudo, para cada estação de qualidade do ar disponível. Foram também analisados mapas espaciais de temperaturas e precipitação para o período de estudo já disponíveis no sítio do CPTEC/INPE.

Etapa 4-C: rotinas computacionais para analisar a destreza do modelo para a previsão das condições meteorológicas predominantes no período de estudo:

Esta etapa consiste no desenvolvimento de scripts visando a obtenção de resultados na comparação de dados meteorológicos previstos pelo modelo com dados obtidos no período de estudo.

3.2.1 Rotinas Computacionais

Foram desenvolvidos scripts para a geração de resultados estatísticos e também para geração de figuras comparando os dados observados com os dados previstos pelo modelo BRAMS.

As rotinas desenvolvidas anteriormente pelo bolsista foram revisadas e reescritas de forma a melhorar o processo de leitura dos dados, com uma maior consistência computacional, bem como facilitar a compreensão do algoritmo para possíveis consultas futuras.

Para o desenvolvimento destes scripts, é importante destacar uma das grandes qualidades da linguagem Python, pois a mesma dispõe de uma grande variedade de bibliotecas provenientes da comunidade, tornando o trabalho mais rápido e preciso. Isso pode ser visto quando se faz necessária a conversão das horas dos dados do modelo, que encontram-se em formato UTC, para o horário local, onde o Python prontamente disponibiliza mecanismos para que tal tarefa se torne rápida e de fácil compreensão.

Foram gerados doze scripts cuja finalidade é a leitura de dados e o cálculo de índices estatísticos, e finalmente a geração de gráficos.

3.3 Dados

Os dados de concentração de ozônio previstos para o período estudado foram gerados a partir das previsões operacionais durante o período de estudo a partir do modelo BRAMS versão 5.2, em 1km de espaçamento horizontal, com resolução temporal de uma hora. O BRAMS é modelo numérico desenvolvido para a previsão de tempo e qualidade do ar em escala regional com diversas funcionalidades específicas para prever os padrões de circulação e concentração da atmosfera sobre a América do Sul (BRAMS, 2017). Baseado no Sistema Regional de Modelagem Atmosférica (RAMS) originalmente desenvolvido na CSU-EUA, o software BRAMS está sob uma licença gratuita (CC-GPL). Atualmente, é desenvolvido e mantido pelo CPTEC-INPE, USP e outras instituições no Brasil e no exterior.

Durante os jogos olímpicos, o CPTEC/INPE produziu previsões operacionais uma vez por dia, a partir do horário das 00:00 UTC por até dois dias. Desta forma, foram produzidas previsões de 24 horas e de 48 horas. Além da previsão de ozônio, o sistema de previsão de qualidade do ar desenvolvido disponibilizou previsões de material particulado com diâmetro menor do que 2,5 microns, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio e material particulado integrado na coluna. Estas previsões foram disponibilizadas no sítio do CPTEC, juntamente com as previsões de circulação atmosférica, como vento a 10 metros, temperatura e umidade do ar a 2 metros, pressão atmosférica ao nível do mar e precipitação acumulada a cada hora.

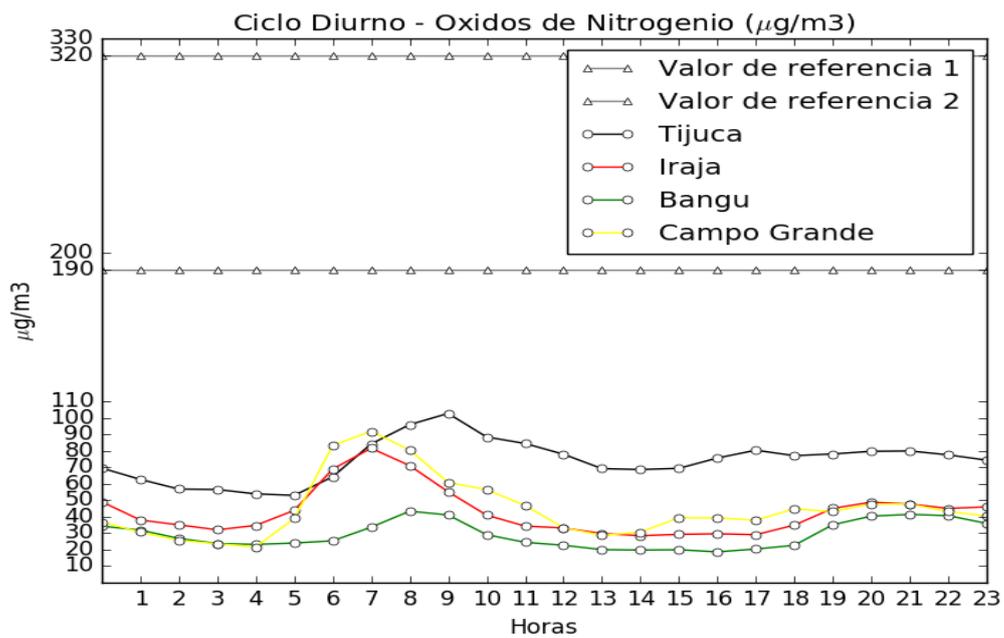
3.3.1 Dados Observacionais da Área de Estudo

Os dados de concentrações de ozônio observadas na RMRJ foram disponibilizados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente do Rio de Janeiro por meio do programa MonitorAr-Rio. Foram coletados dados de seis estações de monitoramento localizadas nos bairros Bangu, Campo Grande, Centro, Copacabana, Irajá e Tijuca durante o período analisado. Em 2008, a prefeitura do Rio de Janeiro e a Petrobras firmaram um convênio para implantação do Programa MonitorAr-Rio cujo objetivo foi restabelecer a operação da rede municipal de monitoramento de qualidade do ar. Além da reativação da coleta de dados, o convênio entre as duas entidades contemplou a ampliação do serviço com a aquisição de quatro novas estações fixas, assim como a complementação das antigas estações, pelo investimento em sensores meteorológicos e analisadores de ozônio (SMAC, 2017).

4 Resultados

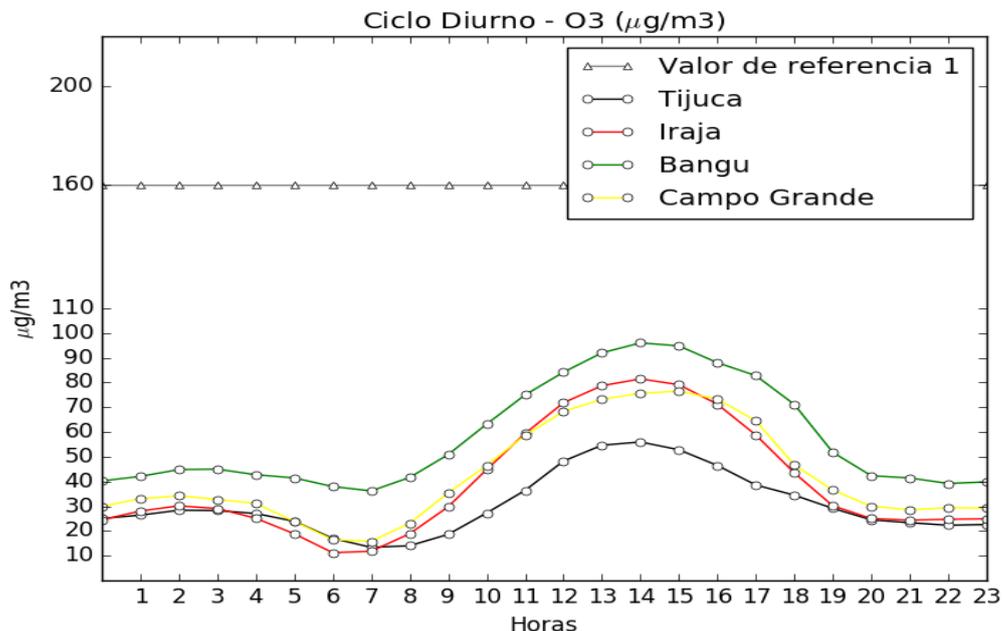
A partir dos dados observados, foram gerados gráficos de concentração de poluentes ao decorrer de 24 horas. A figura 4.1 a seguir indica os valores de óxidos de nitrogênio, NO_x , nas quatro estações de estudo.

Figura 4.1 - Ciclo diurno médio das concentrações de óxidos de nitrogênio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



A Figura 4.2 apresenta os valores de ozônio para as quatro estações de monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro.

Figura 4.2 - Ciclo diurno médio das concentrações de óxidos de nitrogênio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



As curvas provenientes dos compostos de COV's, NO_x e do O_3 apresentam um comportamento oposto, como pode ser observado na Figura 4.3. Quando se tem valores máximos de O_3 , o valor correspondente no mesmo período de tempo para o NO_x é mínimo, e vice-versa. Isso pode ser explicado pela degradação do NO_2 (que está contido no NO_x) pela radiação solar, gerando o oxigênio atômico. Com a combinação deste com a molécula de oxigênio (O_2), ocorre a formação do ozônio. Essa característica é evidenciada em horários que se tem grande incidência de radiação solar, como das 12 às 16 horas, onde há um pico de O_3 na atmosfera. Na Figura 4.3b), correspondente à estação de Bangu, há um pico de NO_x às 8h, quando passa a decair até o mínimo que ocorre às 16h. Observa-se que a partir das 7h ocorre o crescimento da curva de concentração de ozônio, pois a incidência de radiação solar está aumentando. Nota-se também que a presença de COV's é muito baixa.

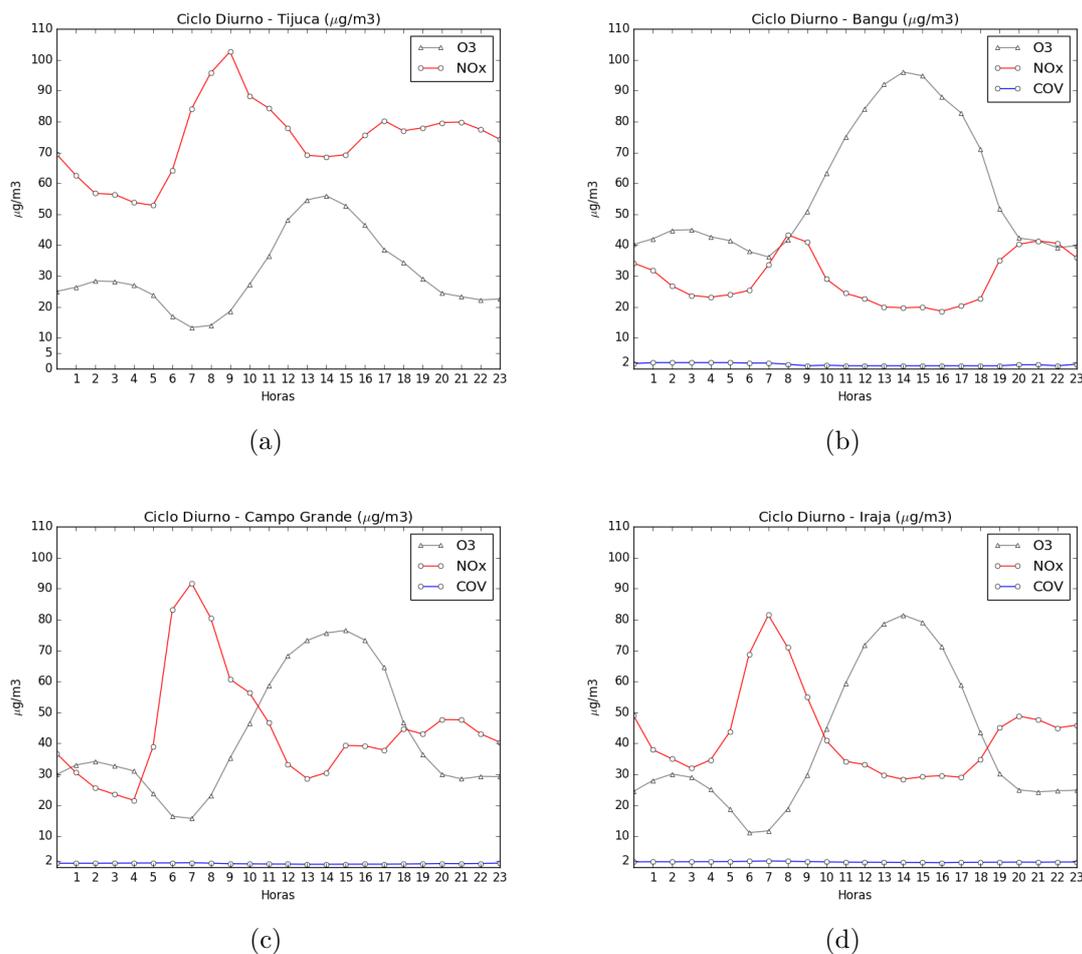
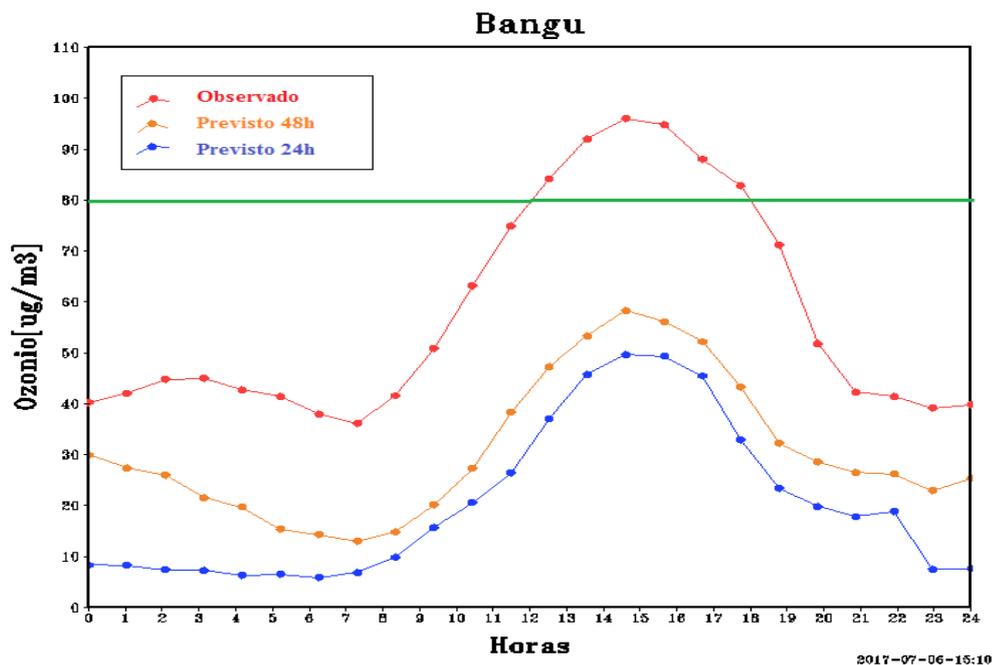


Figura 4.3 - Comparação entre as concentrações de NO_x e O_3 .

Foram plotados seis gráficos referentes a cada um dos bairros estudados, contendo as concentrações previstas pelo modelo BRAMS para os prazos de previsão de 24 horas e 48 horas e os dados observados pelas respectivas estações de monitoramento. Além disso, para melhor análise, outros seis gráficos foram produzidos com os valores de viés das respectivas previsões.

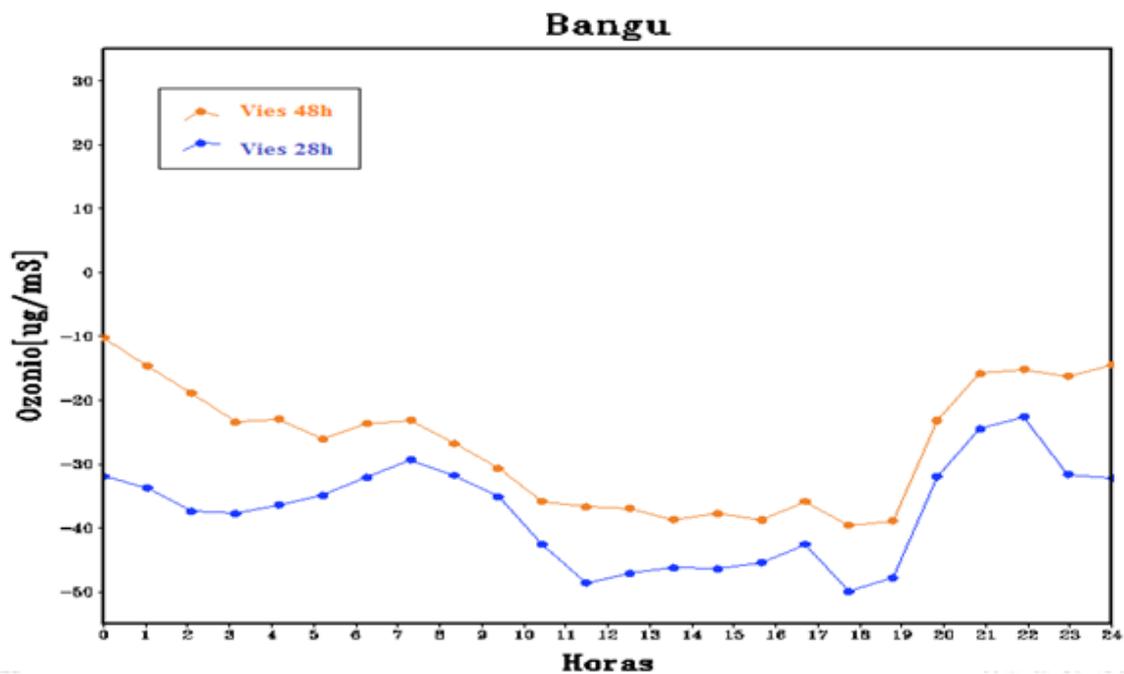
Na Figura 4.4 é mostrado o ciclo diurno médio da estação Bangu. Observa-se um valor máximo entre as 15:00 hora local (HL) e 16:00 HL. O pico máximo observado chega a ultrapassar o valor de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre os horários do meio dia até o final da tarde, por volta das 18:00 HL, indicando um ar regular de acordo com os valores aconselhados pelo INEA. Apesar de subestimar os valores, o modelo é capaz de prever as oscilações de concentração do ozônio observadas, especialmente o máximo durante o horário da tarde.

Figura 4.4 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno na estação Bangu.



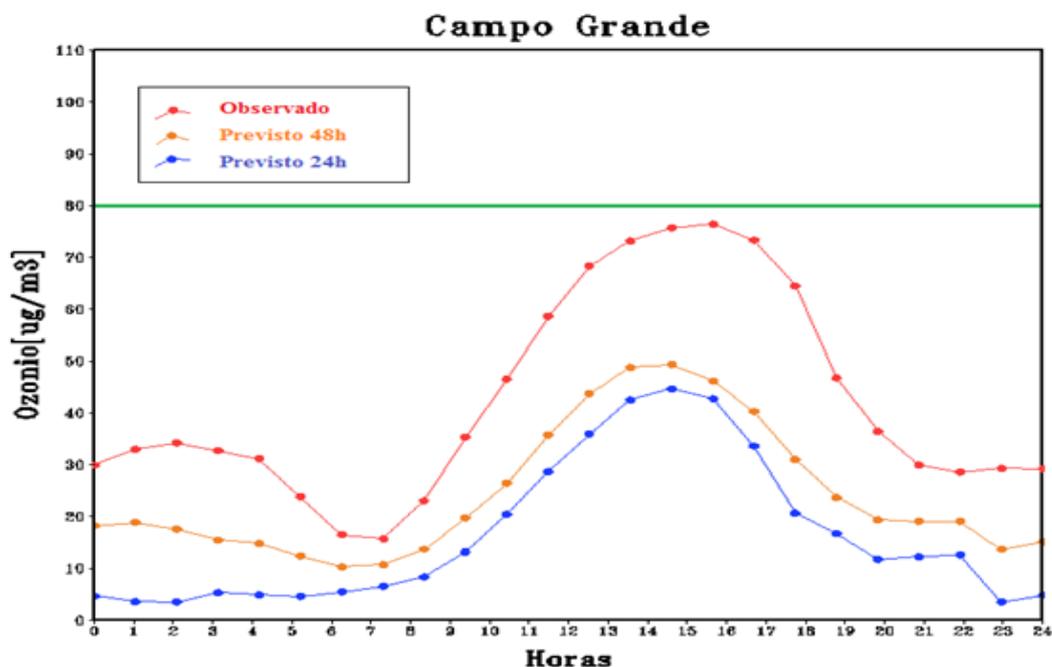
A partir do cálculo do viés para a estação de Bangu, observa-se que em todos os horários o modelo subestimou os valores de ozônio (Figura 4.5). Obteve-se um viés médio negativo de $37,4855 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a previsão de 24 horas e $26,8297 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a previsão de 48 horas, concluindo-se que as previsões de 48 horas de antecedência apresentaram um viés médio menor.

Figura 4.5 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Bangu.



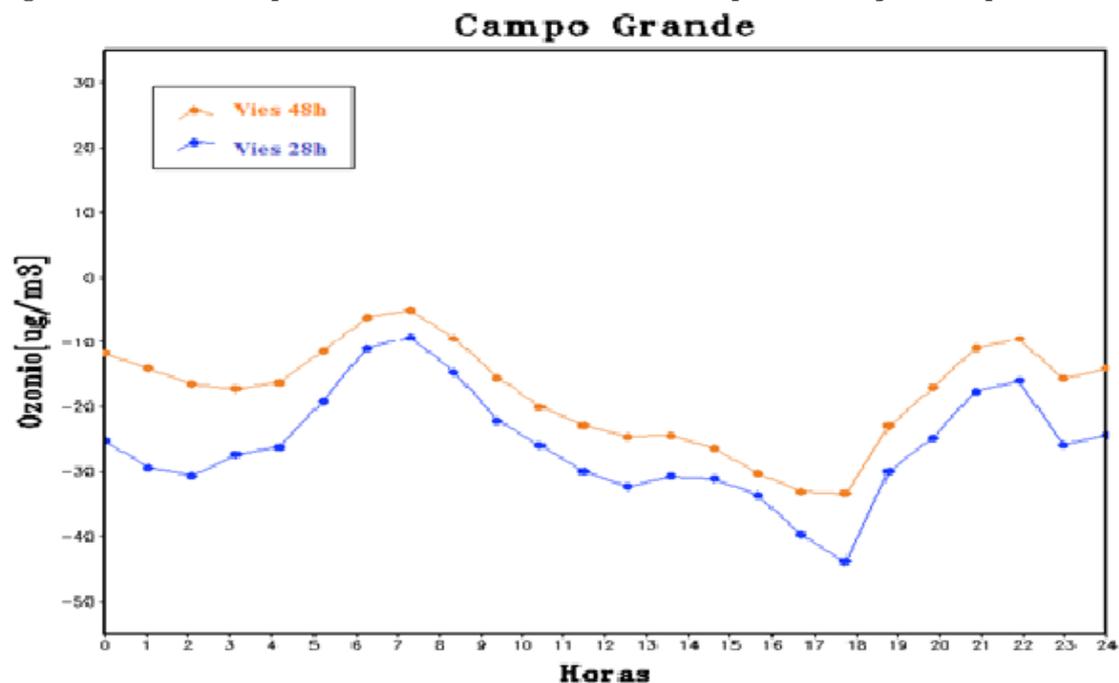
Comportamento similar foi encontrado para a estação de Campo Grande (Figura 4.6). Verificou-se que o modelo é capaz de prever com boa qualidade as concentrações de ozônio nos horários de pico máximo que ocorre entre os períodos de maior incidência de radiação solar. Porém, o modelo tem baixo desempenho durante o período noturno.

Figura 4.6 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Campo Grande.



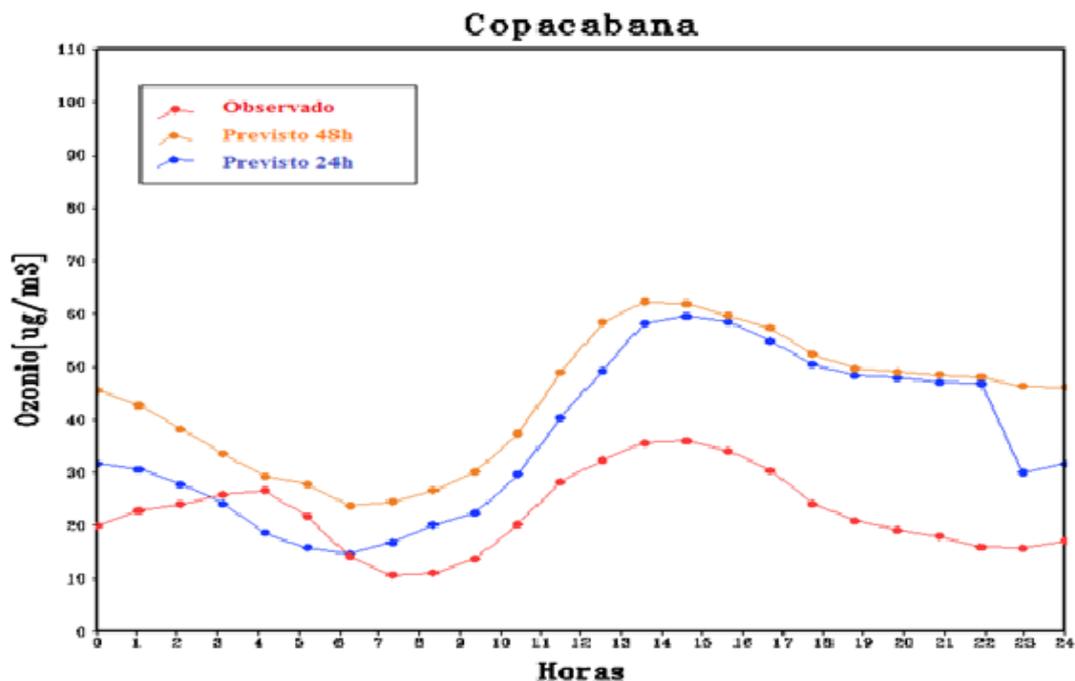
A Figura 4.7 indica que em todos os horários o modelo subestimou os valores de ozônio, porém entre as 06:00 e 08:00 da manhã o BRAMS tem melhor desempenho. Calculando o viés médio de Campo Grande, obteve-se valores negativos da ordem de 25,8876 para a previsão de 24 horas e 17,8854 para a previsão de 48 horas, concluindo-se novamente que as previsões de 48 horas têm menor erro.

Figura 4.7 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Campo Grande.



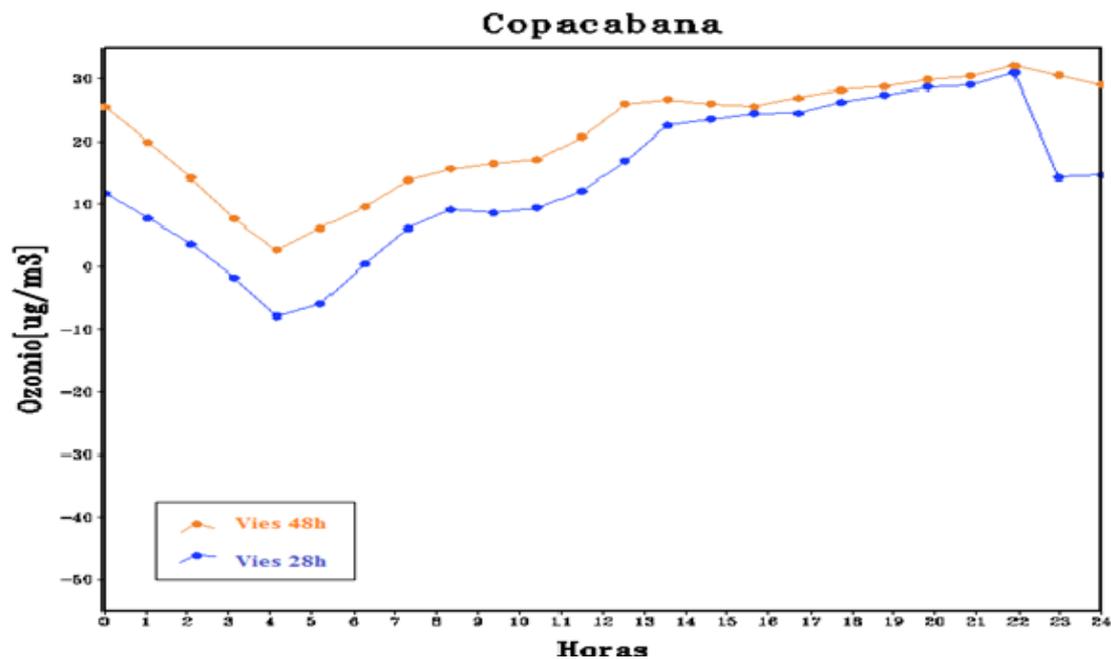
A Figura 4.8 indica que no bairro de Copacabana o modelo tem menor desempenho em acompanhar as oscilações das concentrações do ozônio, porém os valores previstos chegam a ser bem aproximados dos valores observados durante as primeiras horas do dia.

Figura 4.8 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Copacabana.



A Figura 4.9 indica que as previsões do modelo são bem assertivas, principalmente nos horários das 03:00 e 06:00 da manhã nas previsões de 24 horas e no horário das 04:00 da manhã nas previsões de 48 horas. Calculando o viés médio de Copacabana, obteve-se valores positivos de 14,0384 para a previsão de 24 horas e 21,2401 para a previsão de 48 horas. Assim, os valores previstos a 24 horas foram mais assertivos.

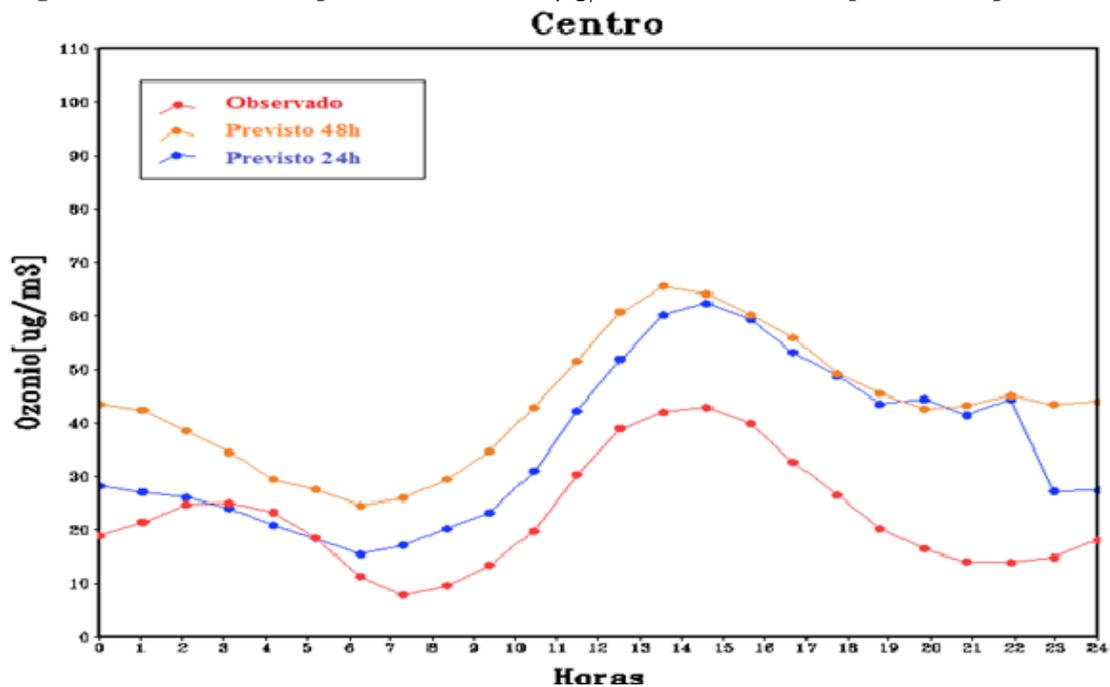
Figura 4.9 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Copacabana.



A Figura 4.10 indica o bom desempenho do modelo nos horários das 03:00 e 06:00 da manhã nas previsões de 24 horas e no horário das 04:00 da manhã nas previsões de 48 horas.

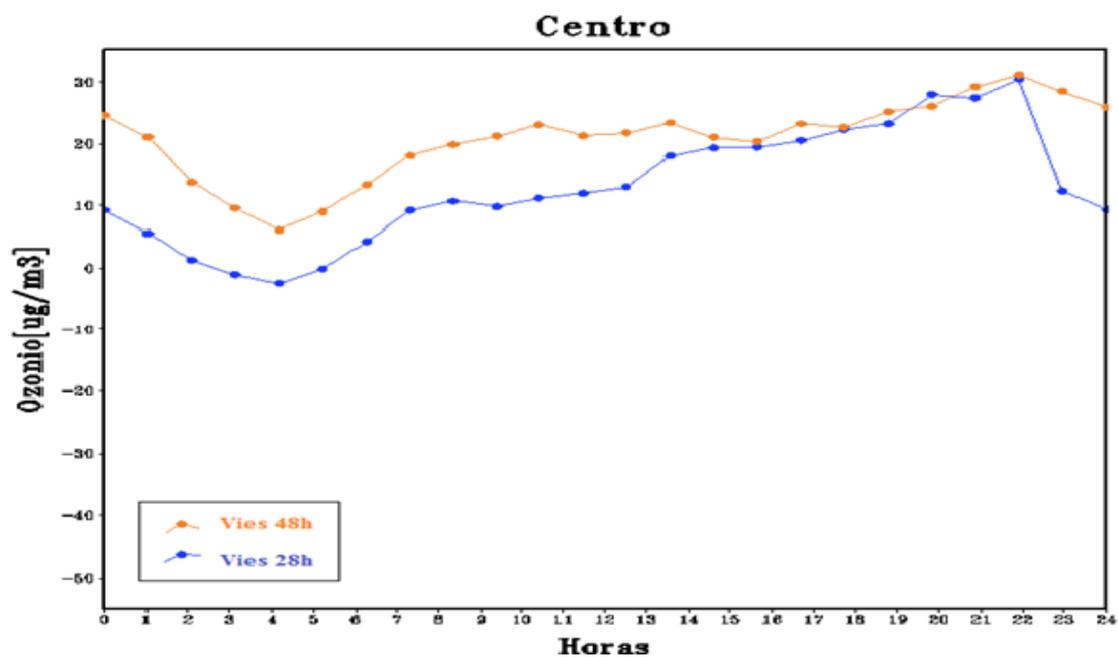
O modelo representa bem as concentrações de ozônio nos horários de pico máximo que ocorre entre os períodos de maior incidência de radiação solar. Contudo, nas primeiras horas do dia o BRAMS não consegue acompanhar as oscilações que causam um pequeno pico de ozônio na madrugada.

Figura 4.10 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Centro.



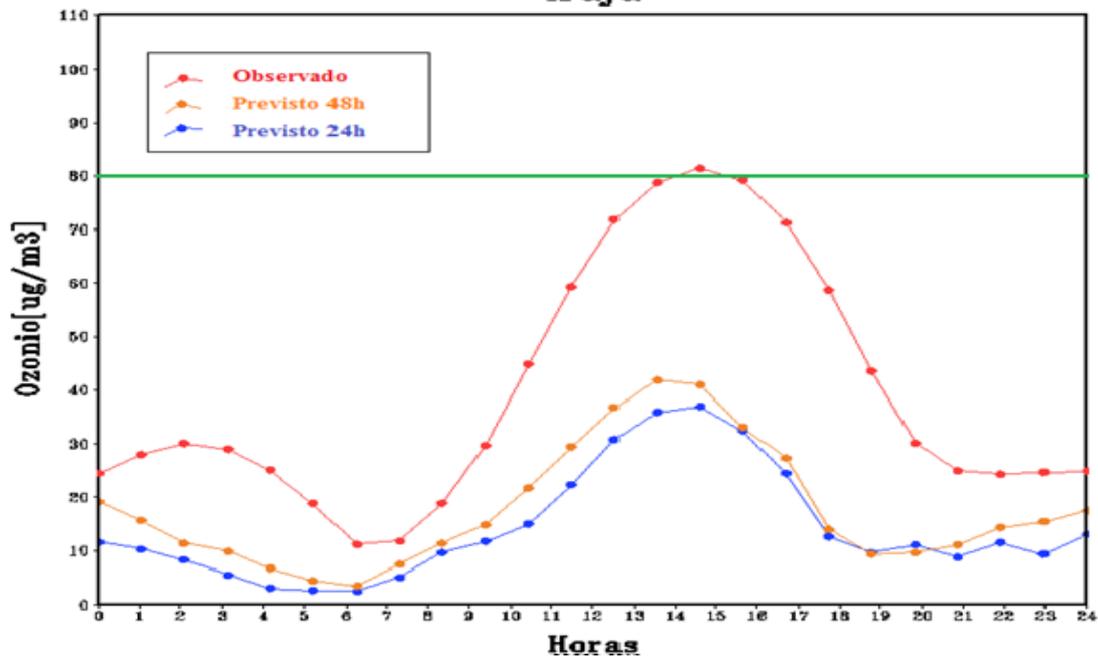
A Figura 4.11 indica que o viés médio da estação Centro é de 13,0596 para a previsão de 24 horas e 20,8336 para a previsão de 48 horas. Assim, os valores previstos com antecedência de 24 horas apresentaram menor erro.

Figura 4.11 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Centro.



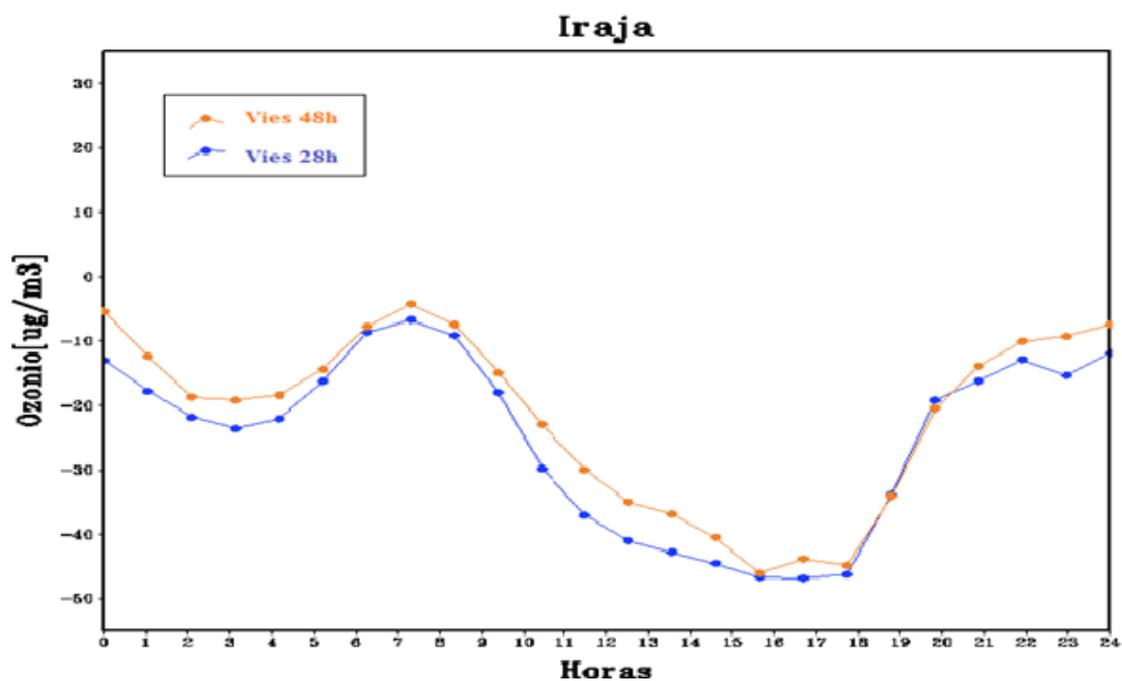
Observa-se na Figura 4.12 que o modelo conseguiu prever os horários de ozônio durante o dia apesar de subestimar os valores de concentração do poluente. O valor máximo observado chega a ultrapassar o valor de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no horário próximo das 15:00 HL, indicando que o ar deixou de ser considerado bom e passou a ser classificado como regular de acordo com o IQA utilizado pelo INEA.

Figura 4.12 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Irajá.



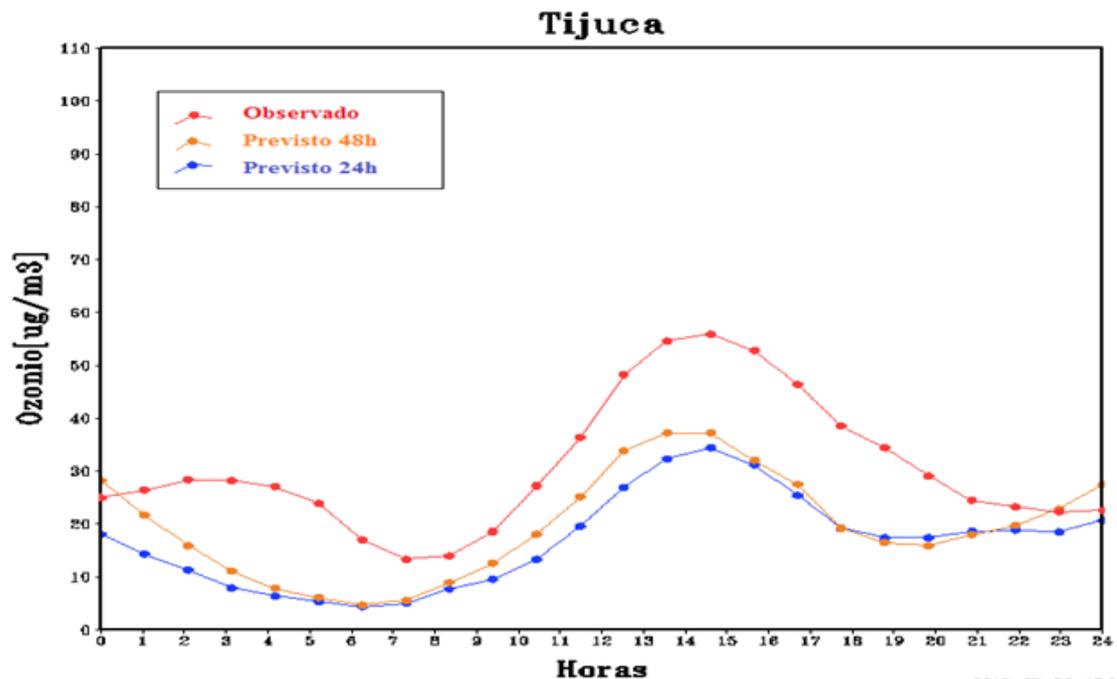
Calculando o viés médio para a estação de Irajá (Figura 4.13), obtiveram-se valores negativos de 43,3433 para a previsão de 24 horas e 39,8687 para a previsão de 48 horas.

Figura 4.13 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Iraja.



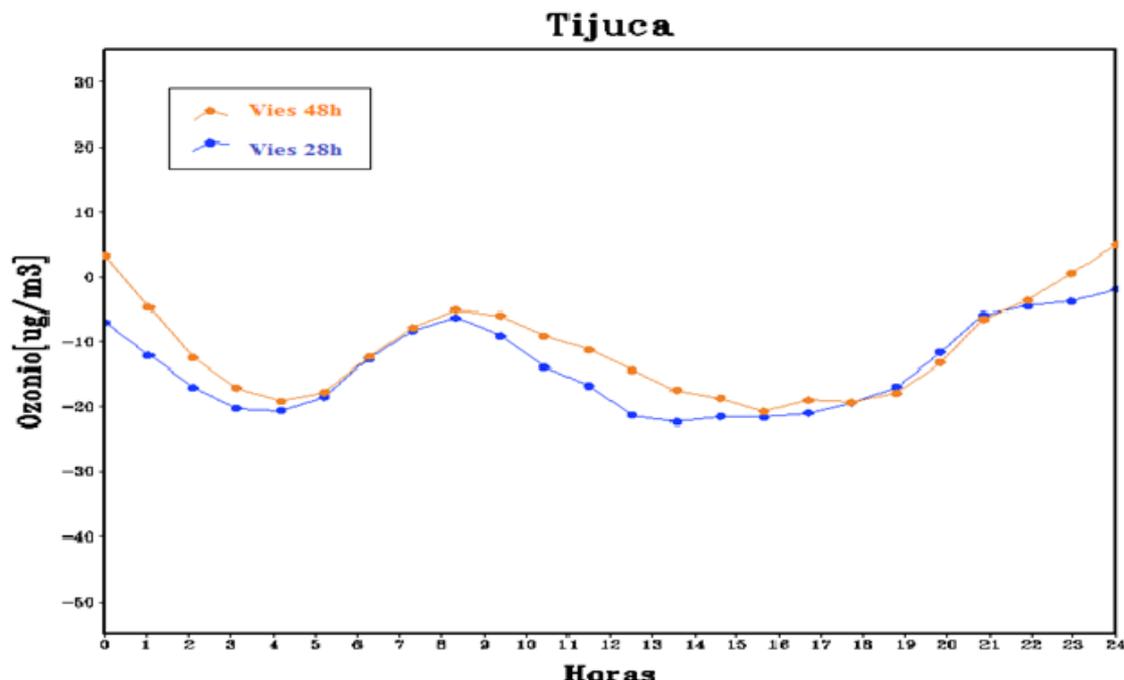
A Figura 4.14 mostra que o modelo conseguiu prever os horários de pico máximo de ozônio apesar de subestimar os valores de concentração do poluente. Também para esta estação observa-se que o modelo apresenta uma deficiência na representação das concentrações no período noturno.

Figura 4.14 - Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno para a estação Tijuca.



A Figura 4.15 mostra que o modelo apresenta pequeno viés médio para a estação do bairro da Tijuca. Na grande maioria dos casos, o BRAMS subestimou os valores, obtendo melhores previsões durante a madrugada e por volta das 08:00 HL. Valores de viés médio negativos foram obtidos no valor de 9,5141 para a previsão de 24 horas e 6,9829 para a previsão de 48 horas. Assim, os valores previstos a 48 horas apresentaram menor erro.

Figura 4.15 - Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas para a estação Tijuca.



Após análise de todos os gráficos observa-se que as concentrações do ozônio seguem um certo padrão. Geralmente, nas primeiras horas do dia os valores do poluente presente na troposfera começam a subir, chegando a um valor de máximo local entre as 02:00 e as 04:00. Logo em seguida, a quantidade de ozônio começa a decair, chegando a atingir as menores concentrações do dia, sendo que os menores valores são registrados entre os horários das 06:00 às 09:00 HL. Por volta das 10:00, as concentrações de ozônio voltam a subir rapidamente, formando um pico máximo entre os horários das 14:00 e das 16:00 HL, coincidindo com o período do dia com o máximo de insolação. Por fim, as concentrações do ozônio decrescem até os horários entre as 19:00 e 20:00, quando os valores do poluente se tornam mais estáveis.

Com exceção dos bairros Copacabana, Centro e Tijuca, o maior pico do ciclo diurno, formado entre os horários de maior incidência do sol, chega a atingir valores maiores que $70\mu\text{g}/\text{m}^3$, perto do limite máximo de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ considerado para indicar a condição de ar saudável. Além disso, dessas três regiões que se destacam por possuir grandes concentrações de ozônio no período da tarde, duas delas, Bangu e Irajá apresentam valores que excedem a quantidade de ozônio desejável no ar. Em Bangu, esses dados são mais alarmantes, uma vez que as concentrações excedem o limite durante as 11:30 até as 18:00 HL. Ou seja, durante quase 5 horas, o ar respirado

pelos habitantes de Bangu é classificado como regular, podendo causar tosse seca e cansaço na população mais sensível como crianças e idosos, segundo o INEA.

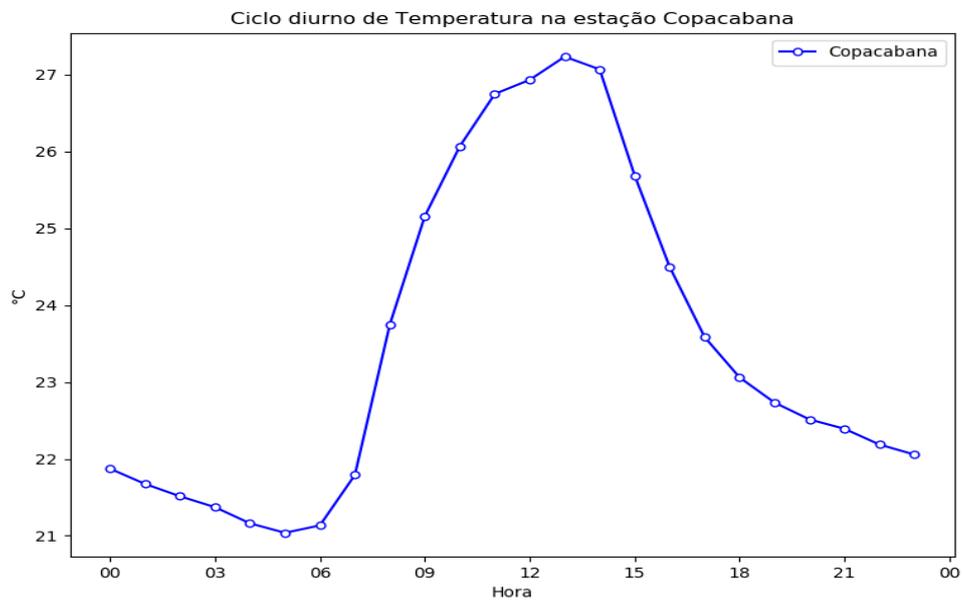
Em relação às previsões do modelo BRAMS, observa-se que na maioria dos casos ele tende a subestimar as concentrações de ozônio, com exceção dos bairros Centro e Copacabana. Seu melhor desempenho ocorreu nas previsões de 24 horas e 48 horas do bairro Tijuca, enquanto seus piores prognósticos foram obtidos para o bairro Irajá (Figura 4.1).

Tabela 4.1 - Valores calculados de viés para cada estação.

	Bangu	Campo Grande	Copacabana	Centro	Irajá	Tijuca
24horas	- 37,4855	- 25,8876	14,0384	13,0596	- 43,3433	- 9,5141
48horas	- 26,8297	- 17,8854	21,2401	20,8336	- 39,8687	- 6,9829

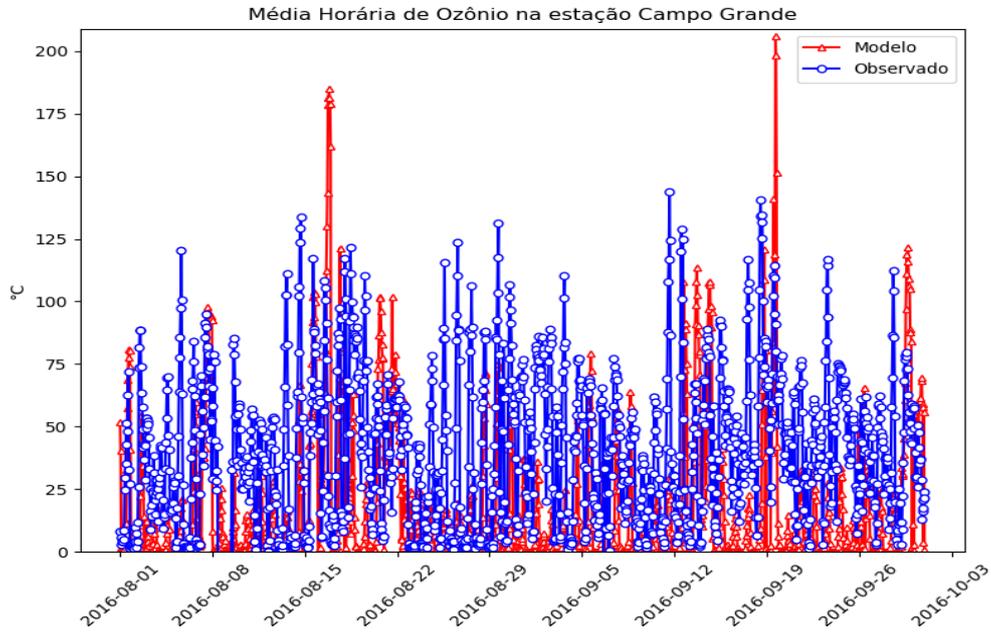
A Figura 4.16 é resultado de um script que plota o ciclo diurno da temperatura do ar na estação escolhida.

Figura 4.16 - Ciclo diurno médio da temperatura para a estação Copacabana

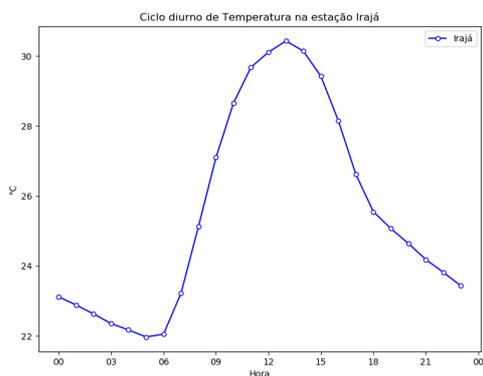


A Figura 4.17 é um outro exemplo do produto de um script que executa a leitura dos dados de ozônio das estações (dados observados) e dados do modelo BRAMS para plotar os respectivos dados.

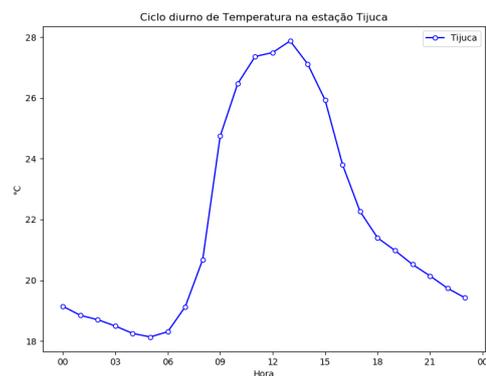
Figura 4.17 - Média horária de ozônio observada e prevista para a estação Campo Grande



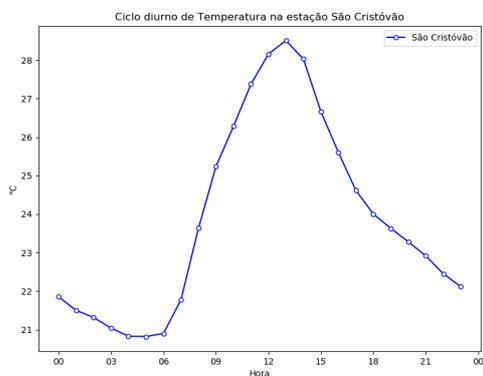
Como pode ser observado na Figura 4.18, observa-se que o ciclo diurno médio da temperatura é caracterizado por temperaturas mais elevadas no período da tarde, entre 14h e 15h local. Esta característica está diretamente associada à maior formação de ozônio troposférico também no período da tarde, devido à influência da radiação solar na produção deste poluente.



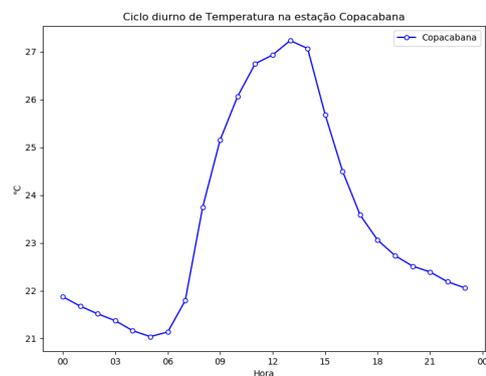
(a)



(b)



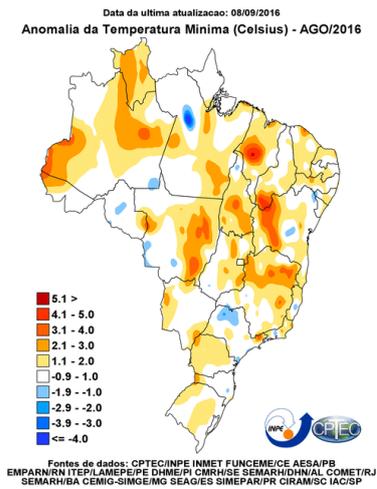
(c)



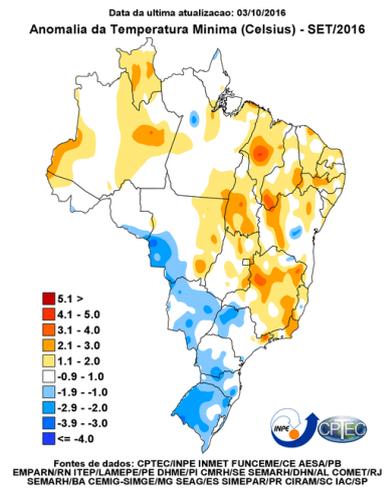
(d)

Figura 4.18 - Ciclo diurno médio da temperatura para a estação a) Irajá, b) Tijuca, c) São Cristóvão, d) Copacabana.

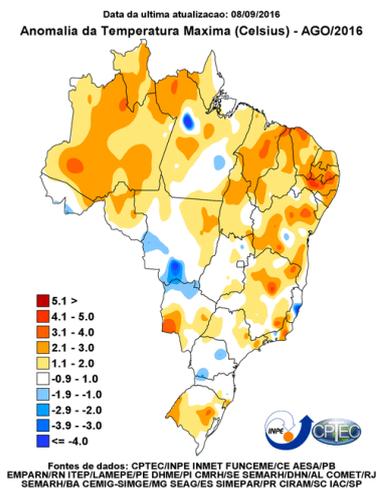
Os mapas espaciais das anomalias meteorológicas ocorridas durante o período de estudo são mostrados na Figura 4.19. Observa-se que em agosto há predominância de anomalias de chuva positivas em grande parte do Brasil, porém sobre a RMRJ as anomalias são negativas. A predominância de anomalias negativas também é observada em setembro na RMRJ, sendo que também é observado em grande parte do Brasil. Não se observou anomalias de temperatura importantes sobre a RMRJ. Estas características atmosféricas indicam condições favoráveis à ocorrência de bons índices de qualidade do ar.



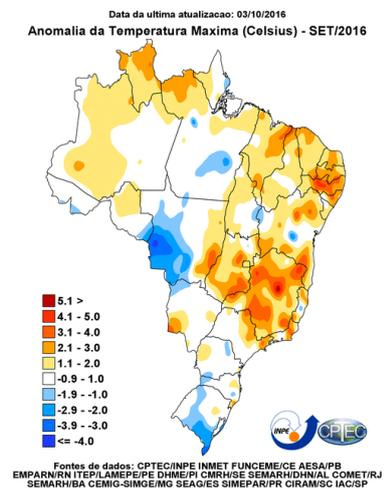
(a)



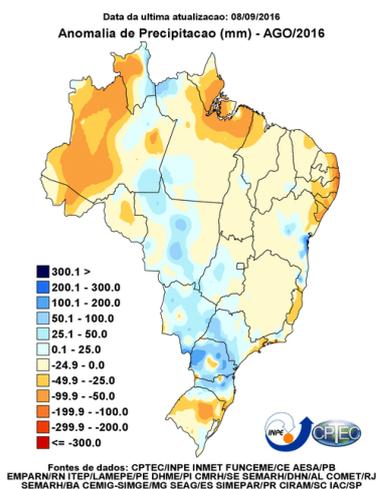
(b)



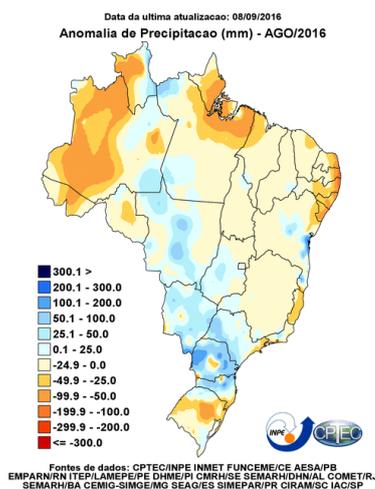
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.19 - Mapas espaciais de anomalias de temperaturas mínima (a e b), máxima (c e d) e precipitação (d e f) dos meses de agosto (figuras da esquerda) e setembro (figuras da direita) de 2016. Fonte: CPTEC/INPE

5 Conclusões

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro é uma região altamente populosa e industrializada. Devido a essas características, a poluição do ar é um fator a ser constantemente monitorado, uma vez que a região estudada é propensa a possuir más classificações no Índice de Qualidade do Ar proposto pelo Instituto Estadual do Ambiente. Essa preocupação com o caráter do ar foi intensificada no período dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos que ocorreram no Rio de Janeiro no ano de 2016. Nesse sentido, esse trabalho teve como um de seus objetivos a análise da qualidade do ar nos meses de agosto e setembro.

Com os dados obtidos verificou-se que, apesar do aumento significativo de pessoas na RMRJ nesses meses, o ar da região no que se refere a poluição causada pelo gás ozônio é classificada como boa, com algumas exceções nos bairros de Bangu e Irajá. Nesses dois bairros, apenas em Bangu o ozônio teve maiores chances de apresentar algum tipo de risco para a população mais sensível, uma vez que o tempo, em que as concentrações do poluente excederam o desejável, foi maior.

Verificou-se que com exceção de Bangu, os turistas, atletas e moradores do Rio de Janeiro estavam seguros contra os efeitos nocivos do ozônio troposférico. Contudo, o mesmo não pode ser afirmado para situações fora do analisado, uma vez que o período estudado engloba uma excepcionalidade, os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos. Devido ao evento, deve-se levar em consideração que a frota de veículos, uma das principais fontes de poluentes como os compostos orgânicos voláteis, foi totalmente alterada, provocando prováveis alterações nos horários de pico e valores absolutos nas concentrações de ozônio. Desse modo, para uma análise mais confiável sobre a qualidade do ar na RMRJ em condições normais, sugere-se um novo estudo observando diferentes períodos.

Em relação ao desempenho do modelo BRAMS, observa-se que em geral ele tem bom desempenho para prever o comportamento padrão do ozônio durante o período diurno, indicando corretamente os horários do pico máximo. Porém, há uma clara deficiência no modelo com relação à previsão das concentrações de ozônio no período noturno, especialmente o máximo local durante o período da madrugada. Ao mesmo tempo em que o modelo é capaz de prever com eficiência quando ocorrem os maiores picos de concentração, ele apresenta uma tendência de subestimativa dos valores absolutos. Assim, conclui-se que o modelo BRAMS apresenta um bom desempenho, exceto nas primeiras horas do dia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAMS. 2017. Disponível em: <<http://brams.cptec.inpe.br/about/>>. Acesso em: 10 de Julho de 2017. 10

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. 4

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>. Acesso em: 03 de julho de 2017. 3

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. 4

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. 3

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>. Acesso em: 30 de janeiro de 2018. 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. 4

SMAC. **SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE**. 2017.

Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/monitorar-rio>>.

Acesso em: 15 de Julho de 2017. 10

