



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
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**

Adriana Terada Tamada

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/ INPE) realizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/Cachoeira Paulista) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE) aprovada em 30 de Outubro de 2016.

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
2017

**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**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Adriana Terada Tamada (USP-EEL, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: dricatamada@gmail.com

Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (CPTEC/INPE, Orientadora)
E-mail: ariane.frassoni@cptec.inpe.br

COLABORADORES

José Roberto Rozante (CPTEC/INPE)

Julho de 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

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 /

Adriana Terada Tamada – Cachoeira Paulista: INPE, 2017.

Orientador: Ariane Frassoni dos Santos de Mattos

CDU



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.

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 O_3 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 O_3 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 O_3 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 O_3 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.

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 Paralympic 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

	Pág.
Figura 2.1 Imagem de satélite Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	4
Figura 2.2 Regiões administrativas da Cidade do Rio de Janeiro.....	5
Figura 6.1 Bangu.....	11
Figura 6.2 Viés Bangu.....	12
Figura 6.3 Campo Grande.....	13
Figura 6.4 Viés Campo Grande.....	14
Figura 6.5 Copacabana.....	15
Figura 6.6 Viés Copacabana.....	16
Figura 6.7 Centro.....	17
Figura 6.8 Viés Centro.....	18
Figura 6.9 Irajá	19
Figura 6.10 Viés Irajá.....	20
Figura 6.11 Tijuca.....	21
Figura 6.12 Viés Tijuca.....	22

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1 Índice de Qualidade do Ar.....	6
Tabela 3.2 Índice Geral de Qualidade do Ar e suas implicações gerais á saúde da População.....	6
Tabela 6.1 Valores de Desvio Viés.....	23

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

O ₃	Ozônio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSU –EUA	California State University
SMAC	Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. Introdução	1
1.1. Ozônio.....	1
1.1.2. Formação do Ozônio na Troposfera	2
1.2. Óxidos de Nitrogênio.....	3
1.3. Compostos Orgânicos Voláteis	3
2. Caracterização da área e período de estudo	4
2.1. Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	4
2.2. Olimpíadas e Paraolimpíadas	5
3. Índices de Qualidade do Ar.....	6
4. Dados.....	7
4.1. INPE/BRAMS	7
4.2. Dados Observacionais da Área de Estudo.....	7
4.3. GraDs.....	7
5. Desenvolvimento.....	9
5.1 Familiarização com o Unix e ferramentas computacionais.....	9
5.2. Metodologia	9
6. Resultados.....	11
7. Conclusão	24
8. Referências Bibliográficas	26

1. Introdução

Após a revolução industrial, no fim do século XVIII, e com maior intensidade no século XX, os impactos causados pela ação antrópica no meio ambiente tornaram-se mais significativos, em conformidade ao crescimento populacional e também ao consumismo pessoal, principalmente nos países desenvolvidos (DUTRA, E.G.; FIORAVANTE, F.; FERREIRA, D., 2009). Dentre esses impactos, destacam-se aqueles relacionados à degradação do meio ambiente devido à emissão de poluentes atmosféricos.

Segundo 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. Os 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 (O_3) troposférico cujos principais precursores são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs).

1.1. Ozônio

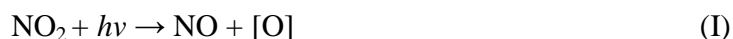
O O_3 é um gás presente a nível traço, presente em uma camada aproximadamente 50km acima da superfície terrestre, que exerce uma grande importância na estratosfera. Ele protege os seres vivos a partir da absorção da radiação eletromagnética emitida pelo sol no comprimento de onda do ultravioleta (UV). 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 (DUTRA, FIORAVANTE, e FERREIRA, 2009), houve um aumento de sua produção nos últimos anos.

1.1.2. Formação do Ozônio na Troposfera

O ciclo do O₃ na troposfera ainda não é conhecido em sua totalidade devido ao alto grau de complexidade dos fatores que envolvem a produção e consumo desse gás. Entretanto, muito já se sabe sobre o mecanismo de formação e as reações químicas que regem sua formação na baixa troposfera. Como já mencionado, o O₃ é formado a partir da combinação de um átomo com uma molécula de oxigênio. Porém em altitudes mais baixas, a única fonte de oxigênio atômico é o dióxido de nitrogênio (NO₂), que é dissociado por um fóton (*hν*) de comprimento de onda entre 0,28 micrôn e 0,43 micrôn.



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.

- 1) Dissociação fotoquímica do ozônio
- 2) Dissociação fotoquímica de compostos carboxílicos
- 3) Dissociação fotoquímica do ácido nitroso

Analisando os mecanismos, observa-se que a formação do ozônio e de outras espécies secundárias não é instantânea (DALLAROSA,2005). 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. (SEINFELD,J.H.,1989).

1.2. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

O NO₂ 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 O₃ 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.

1.3. Componentes 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 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 O₃.

2. Caracterização da área e período de estudo

Nesta Seção serão descritas as informações referentes à área analisada neste estudo bem como o período utilizado.

2.1. Região Metropolitana do Rio de Janeiro

Localizada no sudoeste do estado do Rio de Janeiro, a RMRJ é a segunda maior região metropolitana do Brasil com 6 744,634km² de área, ficando atrás somente da RMSP que possui 7 946,84km² área.

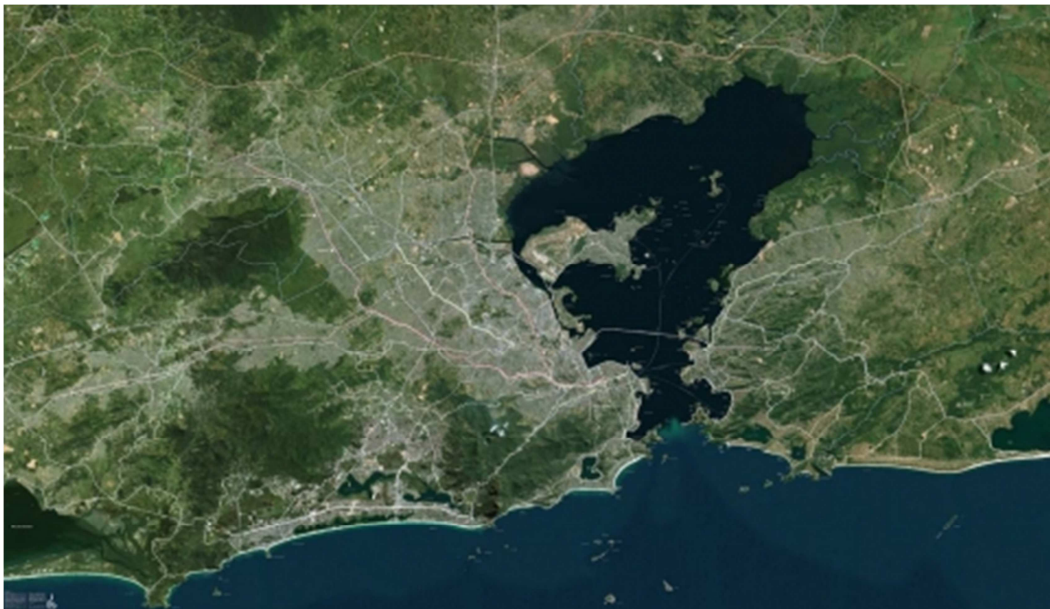


Figura 2.1- Imagem de satélite Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

Fonte:http://www.geonutilus.com.br/wpcontent/uploads/2011/06/Regiao_Metropolitana_d_o_Rio_de_janeiro_publicado2.jpg

Constituída de 21 municípios, a RMRJ congrega o segundo maior polo industrial do Brasil e possui uma população de cerca de 12.330.186 habitantes, estimada pelo IBGE em 2016, que corresponde a 6% da população total brasileira. Somente na cidade do Rio de Janeiro vivem aproximadamente 6.498.837 habitantes, representando mais da metade da população do RMRJ. Nesse sentido, o estudo realizado tem enfoque em bairros localizados no município do Rio de Janeiro, sendo eles o Centro, Copacabana, Tijuca, Bangu, Irajá e Campo Grande.

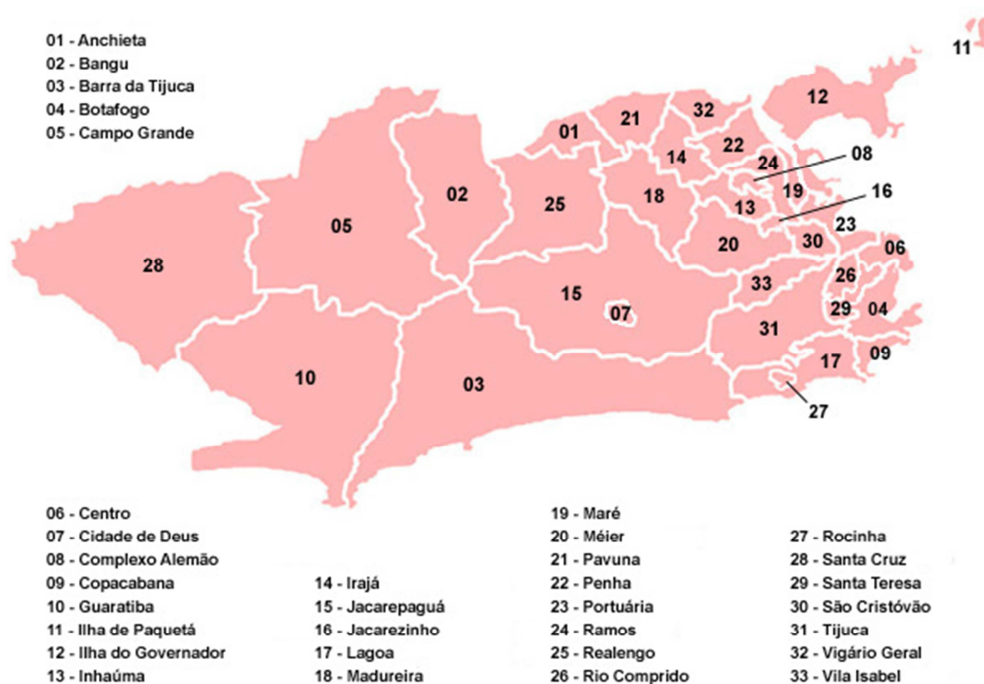


Figura 2.2 - Regiões administrativas da Cidade do Rio de Janeiro
 Fonte: (<http://www.encontrariodejaneiro.com.br>)

2.2. Olimpíadas e Paraolimpíadas

O período estudado nesse trabalho engloba os dias de 1 de agosto até o dia 30 de setembro de 2016. Essas datas selecionadas, abrangem a temporada dos Jogos Olímpicos (5 a 21 de agosto) e Paraolímpicos (7 a 18 de setembro) que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro nesse mesmo ano. As Olimpíadas ocorrem a cada quatro e são consideradas o evento esportivo mais importante da atualidade, atraindo milhares de turistas e atletas do mundo inteiro. Nesse sentido, houve uma grande preocupação com a poluição presente na cidade sede, sobretudo com a qualidade do ar, uma vez que esta afeta diretamente a saúde e desempenho dos atletas, além de prejudicar o bem-estar dos visitantes.

3. Índices de Qualidade do Ar

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro o Índice de Qualidade do Ar utilizado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) acompanha os padrões nacionais estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.

Tabela 3.1- Índice de Qualidade do Ar

O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	
Classificação	Índice
Boa	0-80
Regular	81-160
Inadequada	161-200
Má	201-800
Péssima	>800

Fonte : Adaptado de CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.

A escala do IQA para o O₃ apresentada na Tabela 3.1 é de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Os valores de concentração são medidos a cada 1 hora e são considerados bons se encontram-se entre o intervalo de 0 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, regulares entre 81 a 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, inadequados entre 160 a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, maus entre 201 a 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e péssimos se maiores que 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A Tabela 3.2 indica o Índice Geral de Qualidade do Ar e suas implicações gerais á saúde da população.

Tabela 3.2: Índice Geral de Qualidade do Ar e suas implicações gerais á saúde da população

Qualidade	Riscos gerais à Saúde
Boa	Praticamente não há riscos à saúde.
Regular	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
Inadequada	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Má	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dimfis_gear/documents/document/zwew

4. Dados

4.1. INPE/BRAMS

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 (FREITAS et al., 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 (CENTRO DE PREVISAO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS, 2017).

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.

4.2. 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).

4.3. Grid Analysis and Display System – GrADS

Para leitura dos dados fornecidos e impressão de gráficos, foi utilizado a ferramenta computacional GrADS – Sistema de Visualização e Análise de Dados em Pontos de Grade. Esse programa é um software interativo utilizado nas tarefas de acesso, manipulação e visualização de dados geofísicos em geral e possui quatro dimensões: longitude, latitude, níveis verticais e tempo. Atualmente, o GrADS é o software mais utilizado nos centros operacionais e de pesquisa meteorológica espalhados pelo mundo, inclusive no Brasil (SOUZA,E.B., 2004)

5. Desenvolvimento

Para o desenvolvimento do presente trabalho, algumas etapas importantes de familiarização com o ambiente computacional foram realizadas, o que permitiu a geração dos resultados a serem apresentados. A seguir estas etapas serão brevemente discutidas.

Também aqui será discutida a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho.

5.1 Familiarização com o Unix e ferramentas computacionais

O Unix é um importante e efetivo sistema operacional utilizado em quase todos os procedimentos computacionais do CPTEC. Desse modo, fez-se necessário um período destinado a familiarização com o sistema Unix e do software Grads. Para tal, foi realizado a leitura de algumas apostilas introdutórias, como a disponível no site <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0522/referencias/apostilagrads.pdf> e de outros materiais disponíveis. Além disso, praticou-se exercícios envolvendo atividades como a criação de diretórios, produção de gráficos e leitura de dados, para melhor aprendizado e compreensão do assunto estudado.

5.2. Metodologia

A partir dos dados disponibilizados pela MonitorAR-Rio, obteve-se as concentrações de ozônio medidas de 1 de agosto a 30 de setembro em intervalos de 10 minutos. Contudo, alguns horários apresentavam ausência de valores. Assim, foi necessário a realização de um tratamento nos dados. O tratamento em questão constituiu na criação de uma rotina computacional capaz de excluir todos os horários desprovidos de medidas. Apesar da descontinuidade gerada a partir deste método, o impacto não foi importante uma vez que a frequência de dados é grande, não sendo prejudicial para a análise dos gráficos gerados. Após concluir o procedimento, *scripts* foram gerados a fim de se obter os ciclos diurnos médios de cada estação de monitoramento.

A utilização do ciclo diurno médio durante o período de estudo foi a metodologia escolhida, pois possibilita a observação do comportamento padrão das concentrações de ozônio durante cada horário do dia. Dessa forma, o diagnóstico do desempenho do modelo BRAMS poderia ser mais facilmente analisado.

Para estudar os erros sistemáticos do modelo BRAMS, foi realizado o cálculo do viés para cada horário do dia no ciclo diurno.

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

O viés é calculado pela 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). Assim, 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.

$$\text{Desvio Viés} = \frac{\sum_{t=1}^N \text{Valor Previsto} - \text{Valor Observado}}{N}$$

O desvio viés é determinado pela somatória dos valores de viés dividido pelo número de valores somados (N). Se o valor adquirido for negativo, isso significa que, em geral, o modelo subestimou as concentrações de ozônio naquele período, e se o valor do desvio viés for positivo, o modelo superestimou essas concentrações.

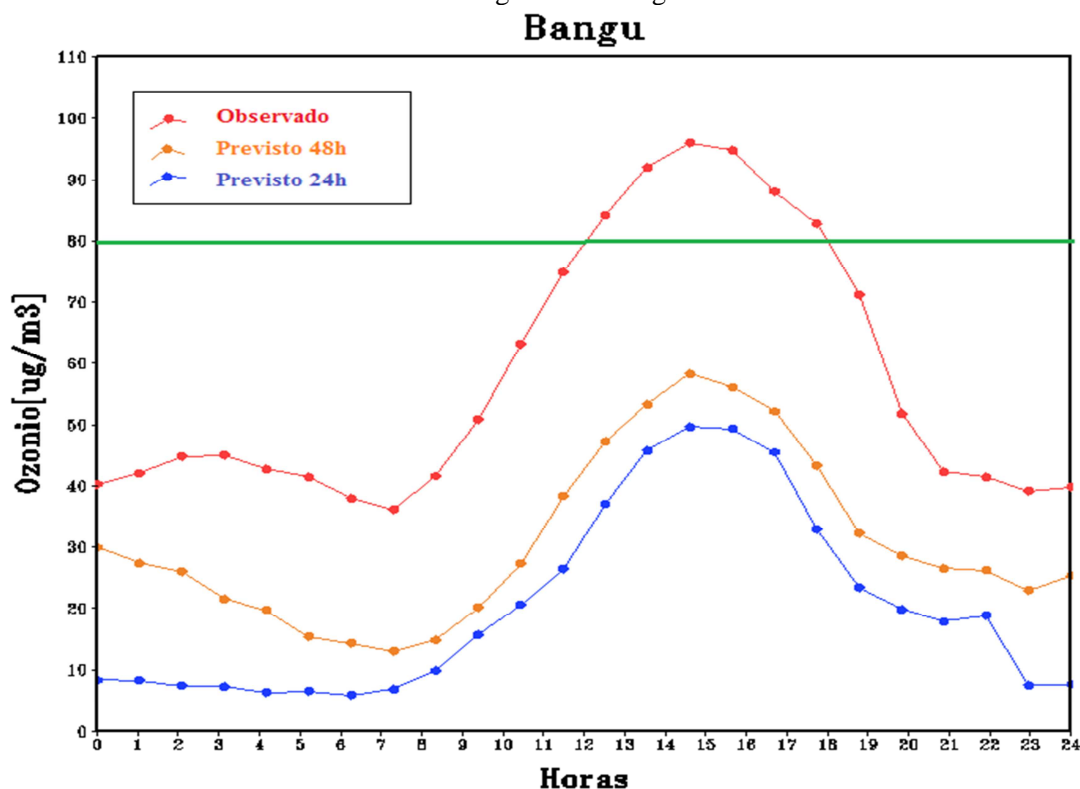
Em ambos os casos, tanto para o cálculo do viés como do desvio viés, os resultados mais favoráveis são aqueles que mais se aproximam do valor zero, pois significam um menor erro cometido nas previsões.

6. Resultados

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 6.1 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 6.1- Bangu.

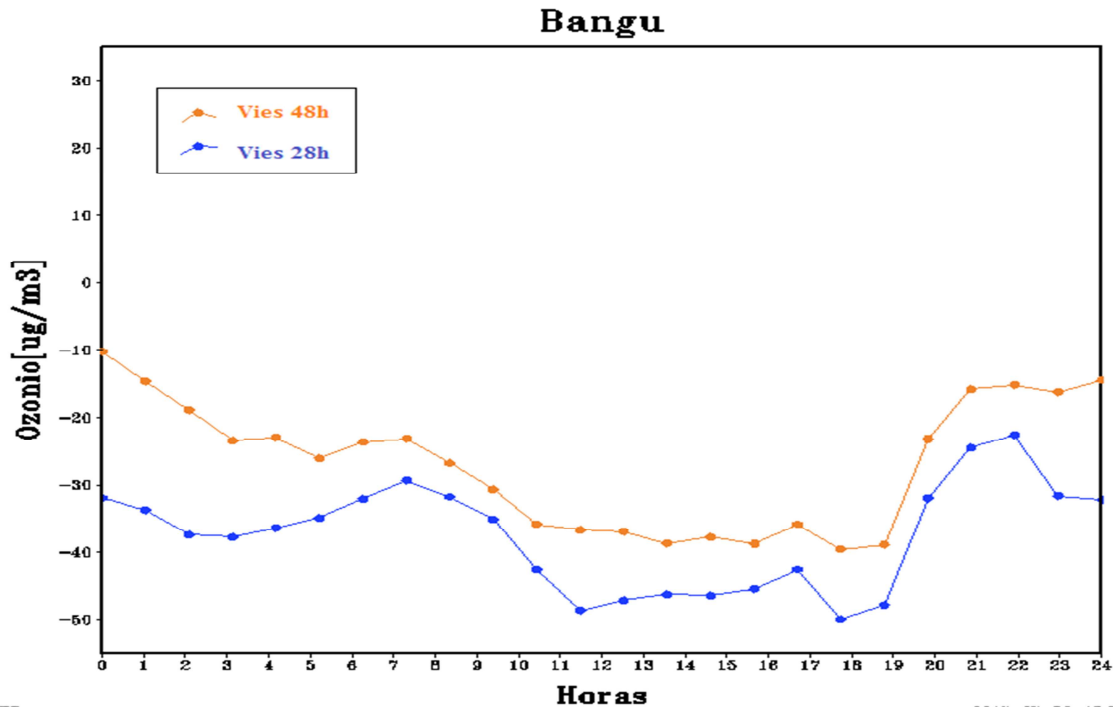


Ciclo diurno das concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$

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 6.2). 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.

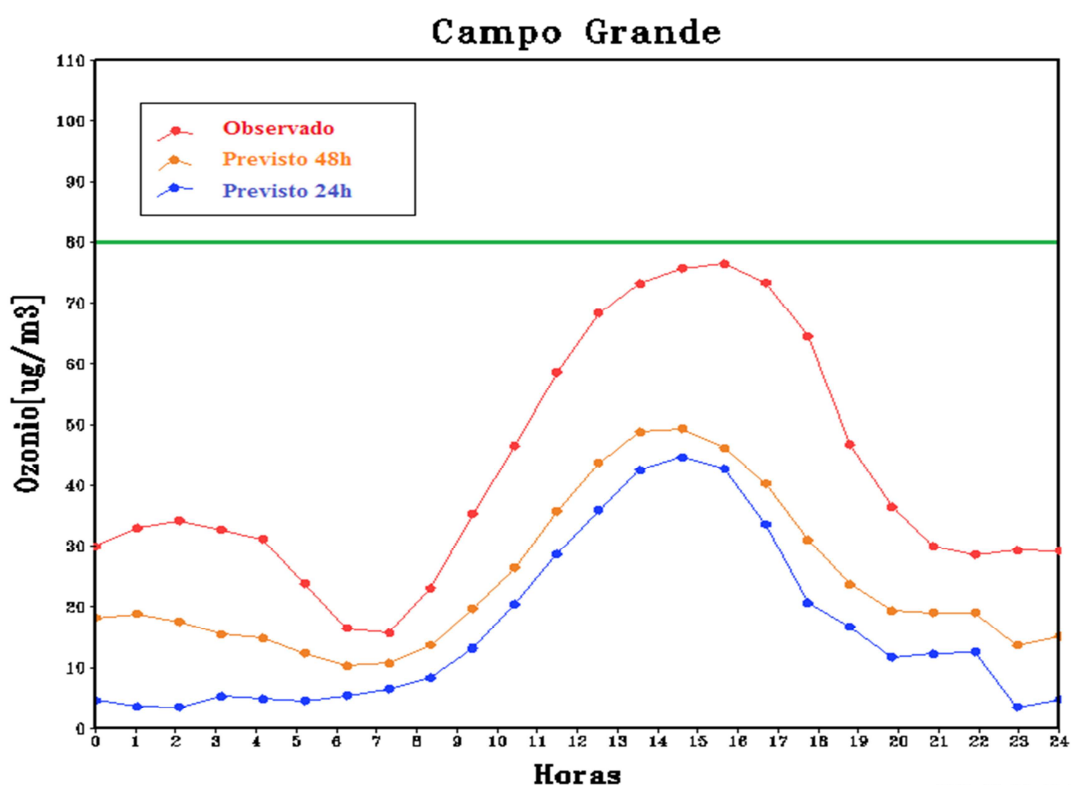
Figura 6.2 - Viés Bangu.



Viés das previsões de 48horas e de 24 horas.

Comportamento similar foi encontrado para a estação de Campo Grande (Figura 6.3). 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.

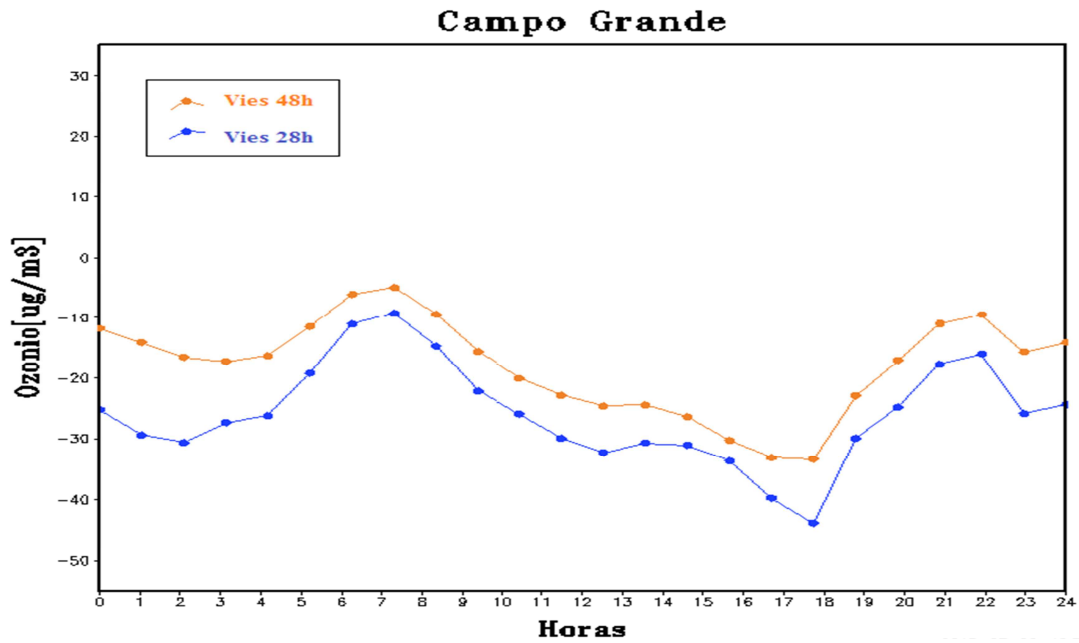
Figura 6.3- Campo Grande



Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno.

A Figura 6.4 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.

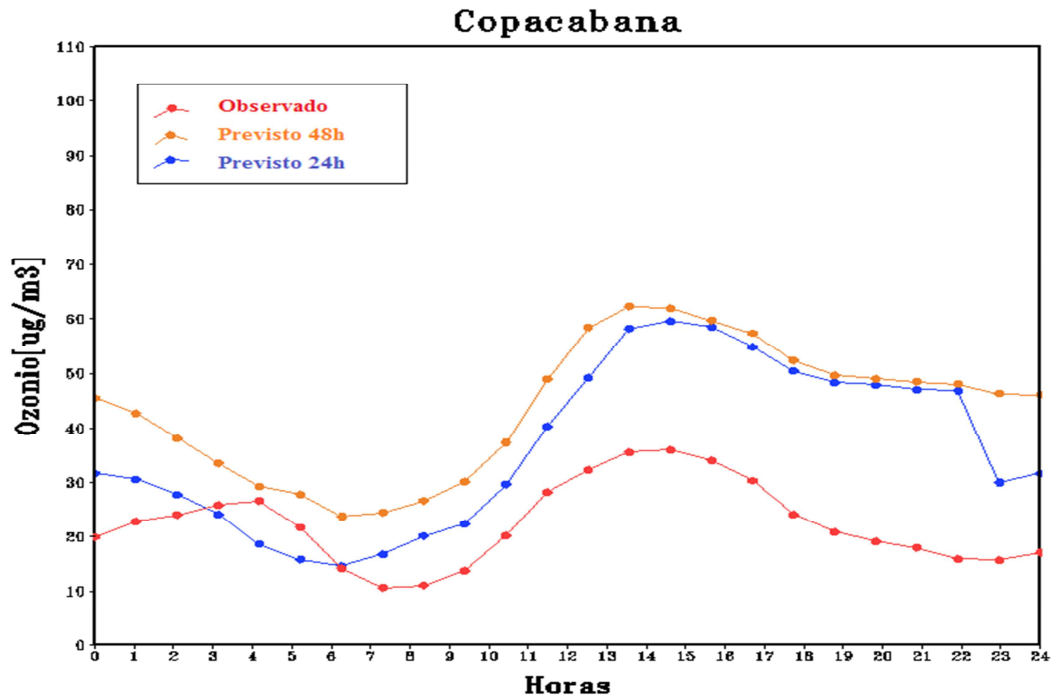
Figura 6.4 - Viés Campo Grande.



Viés das previsões de 48horas e de 24 horas.

A Figura 6.5 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 6.5 - Copacabana

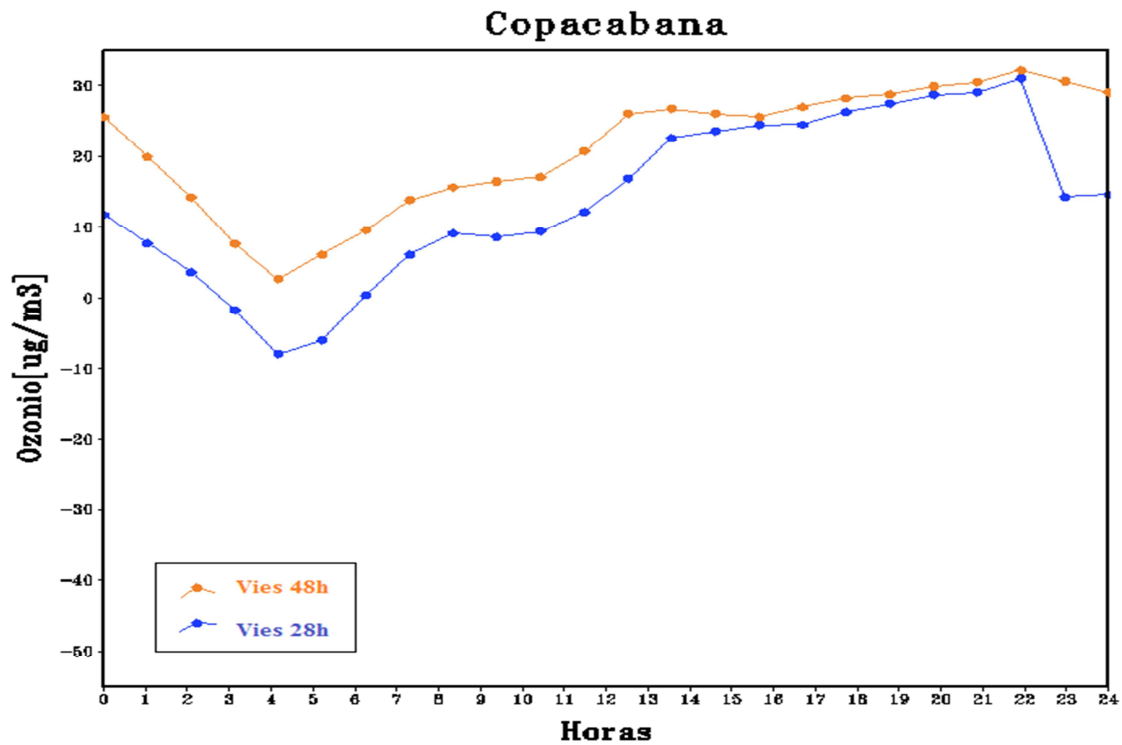


Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno.

A Figura 6.6 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 6.6 – Viés Copacabana

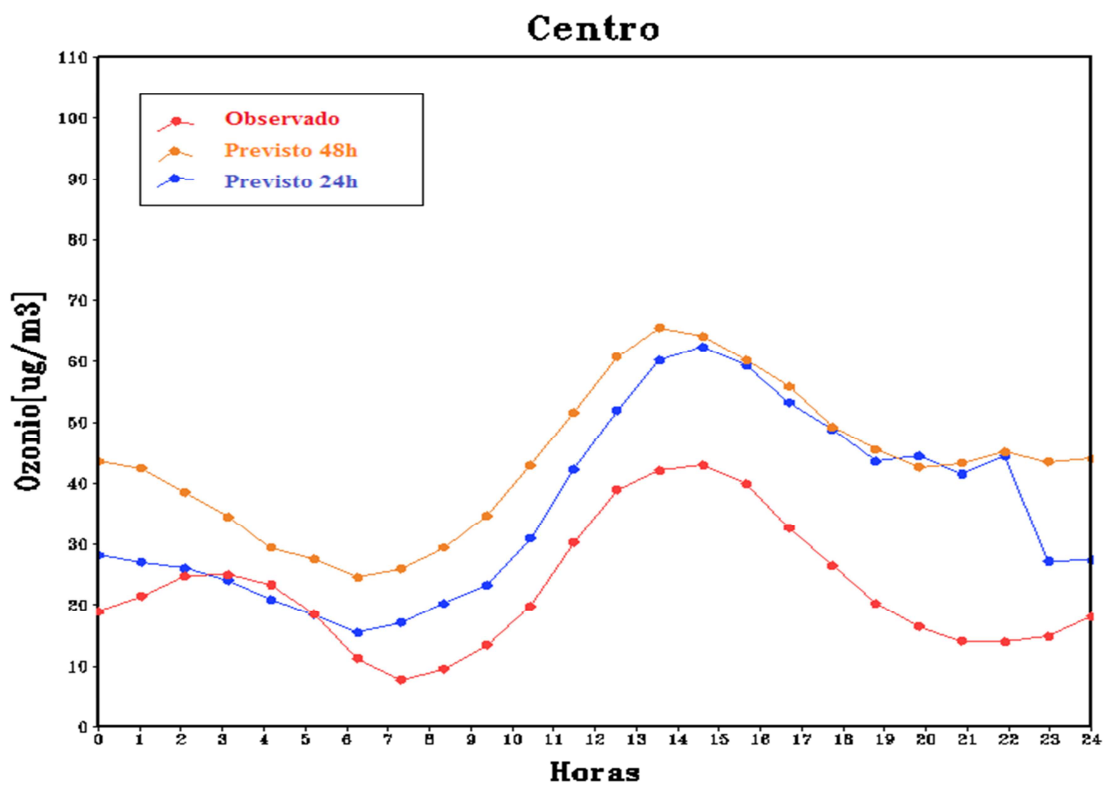


Viés das previsões de 48horas e de 24 horas.

A Figura 6.7 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.

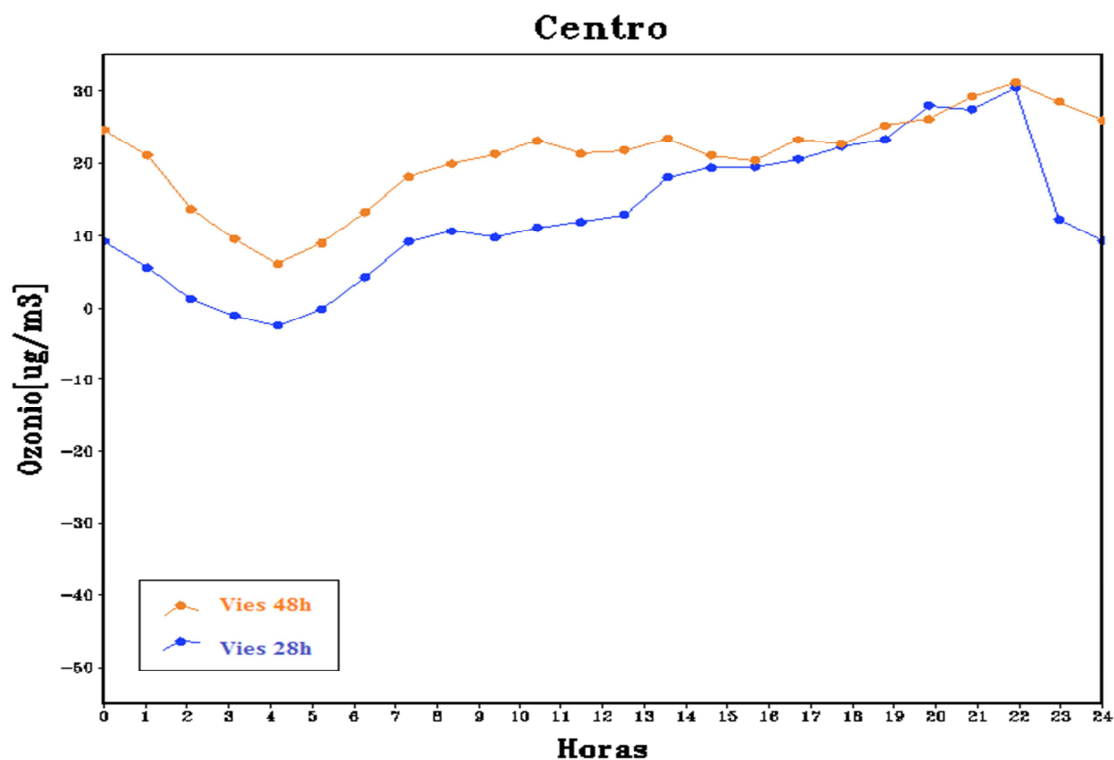
Figura 6.7 – Centro



Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno.

A Figura 6.8 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.

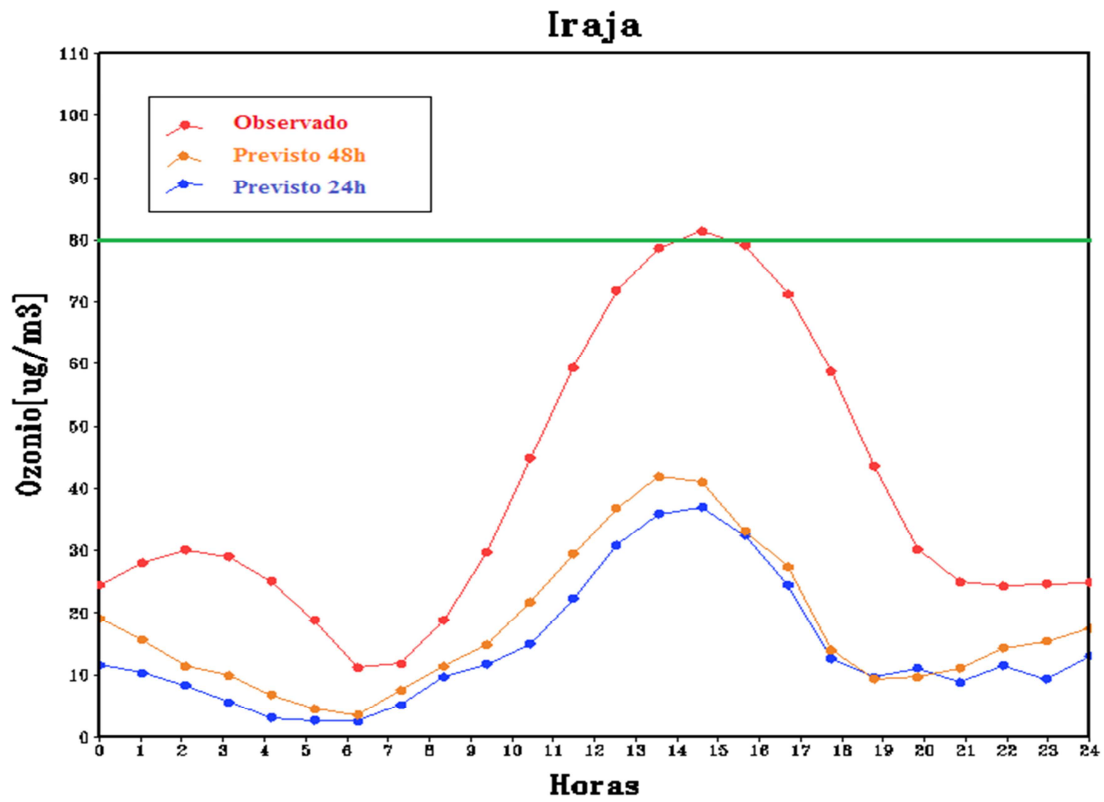
Figura 6.8 – Viés Centro



Viés das previsões de 48 horas e de 24 horas.

Observa-se na Figura 6.9 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.

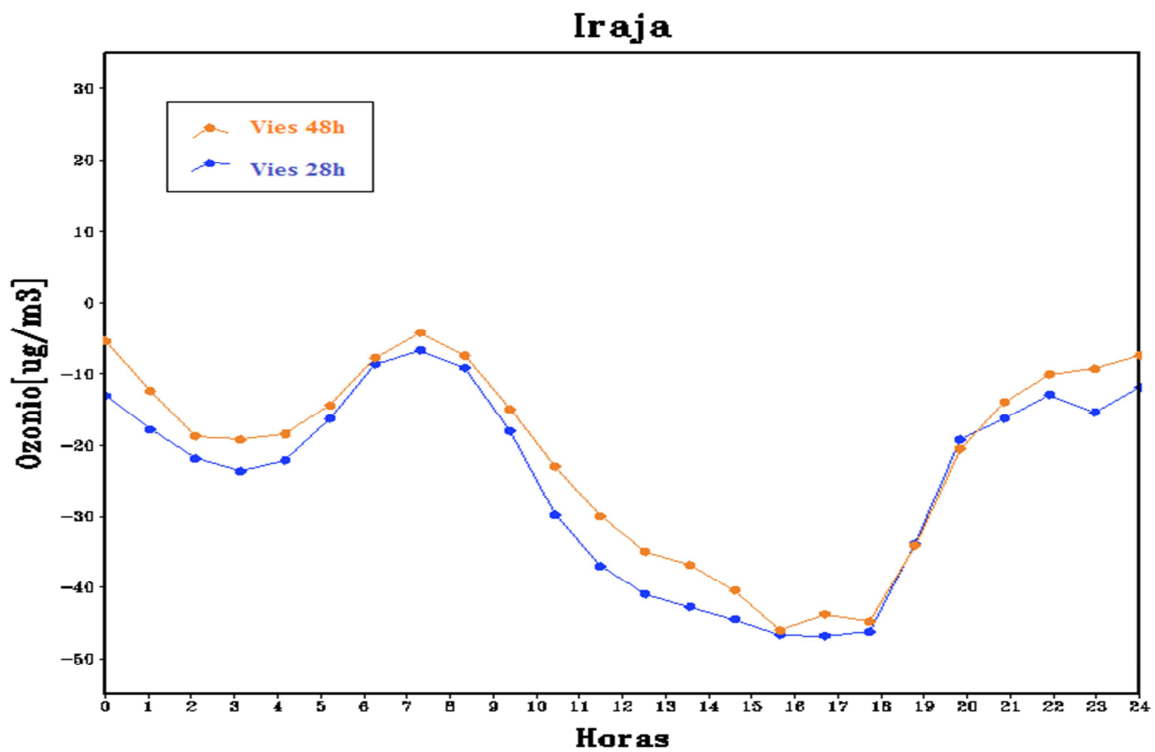
Figura 6.9 – Irajá



Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno.

Calculando o viés médio para a estação de Irajá (Figura 6.10), obtiveram-se valores negativos de 43,3433 para a previsão de 24 horas e 39,8687 para a previsão de 48 horas

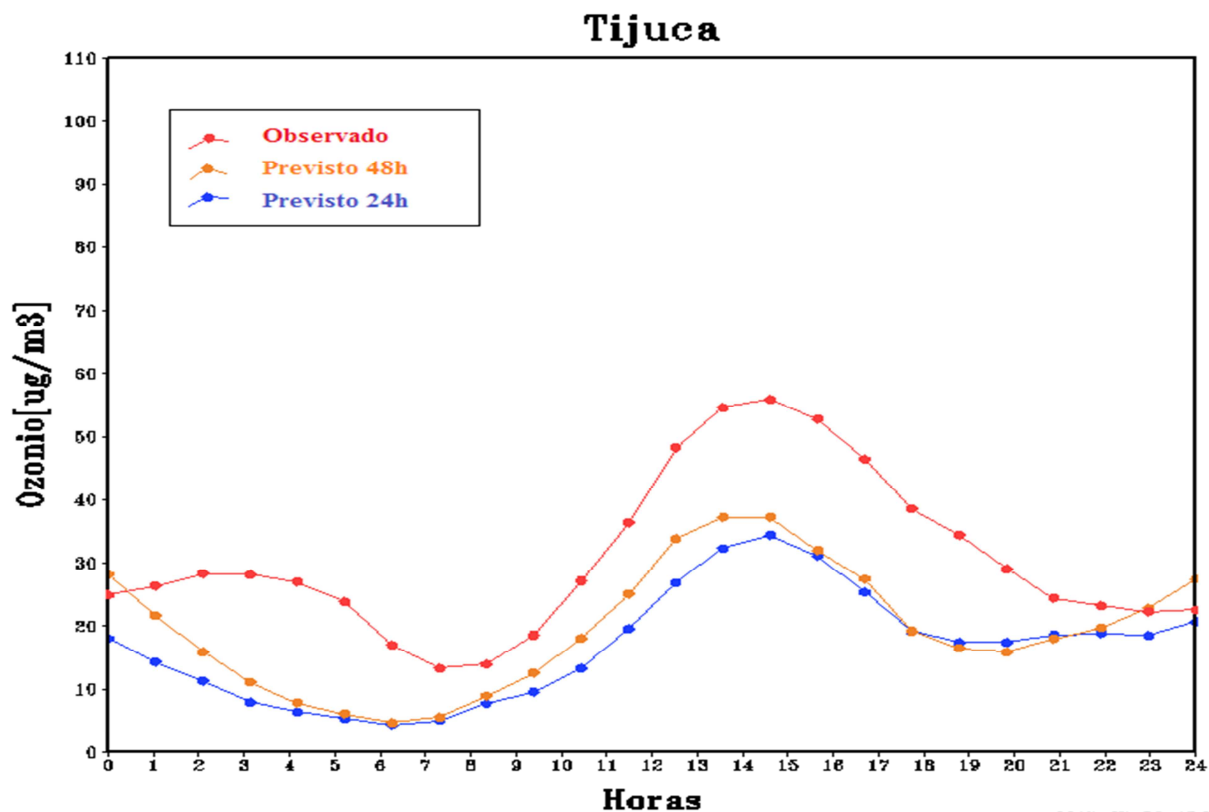
Figura 6.10 – Viés Irajá



Viés das previsões de 48horas e de 24 horas.

A Figura 6.11 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.

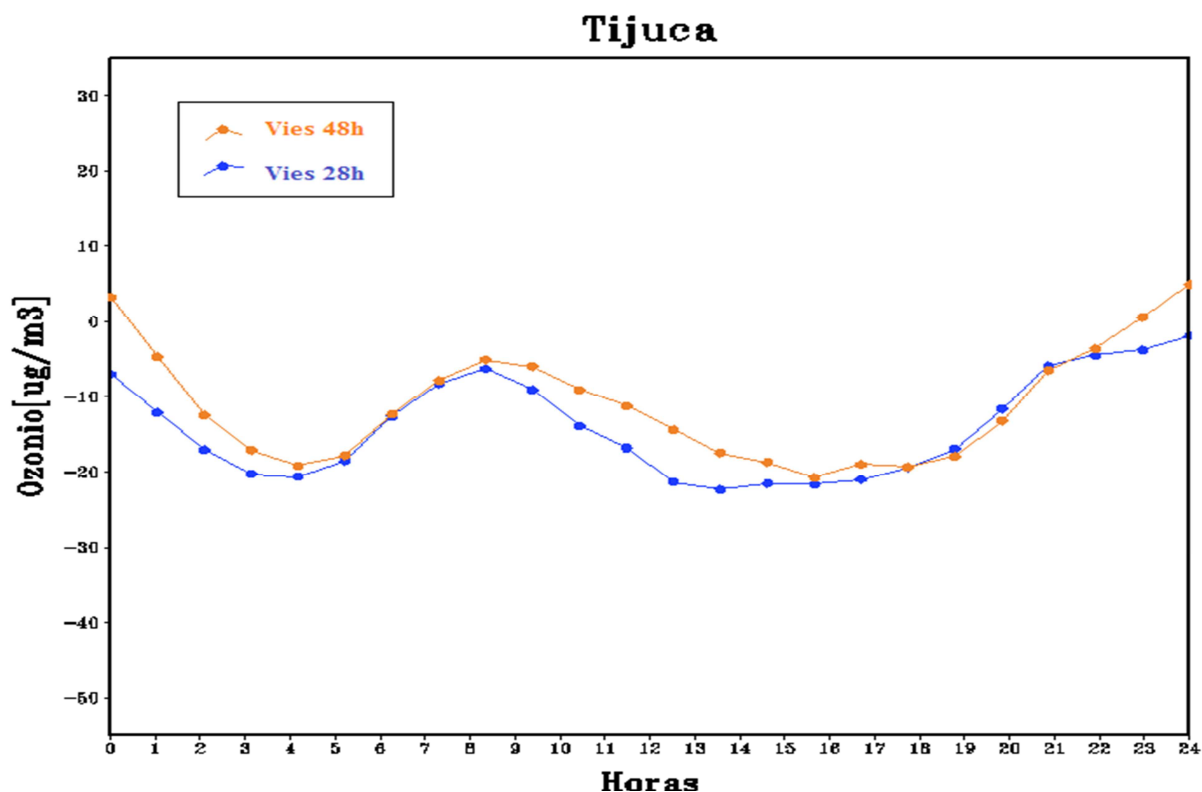
Figura 6.11 – Tijuca



Concentrações do ozônio em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no ciclo diurno.

A Figura 6.12. 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 6.12 – Viés Tijuca



Viés das previsões de 48horas e de 24 horas.

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.

Tabela 6.1 – Valores de Desvio Viés

	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

Valores calculados do desvio viés para cara bairro

7. Conclusão

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.

Então, 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.

Analisando somente as concentrações e o comportamento do ozônio é difícil identificar por que o modelo tende a subestimar as concentrações de ozônio, especialmente durante o período noturno. Isto porque a formação desse importante oxidante fotoquímico além de depender de fatores como a temperatura, radiação solar e vento, ela também é influenciada, de forma não linear, pelas concentrações de COVs e NO_x, sendo necessário o

aprofundamento do estudo para identificar as deficiências do modelo BRAMS apontadas neste estudo.

Referências Bibliográficas

CANÇADO, J.E.D., BRAGA, A., PEREIRA, L.A.A, MARCOS ABDO RBEX, M.A, **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica.** 2006. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v32s1/a02v32s1.pdf>>. Acessado em: 17 novembro de 2016

CENTRO DE PREVISAO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS. INPE. 2017. Disponível em < <http://brams.cptec.inpe.br/about/>>. Acessado em: 5 de Julho de 2017.

DALLAROSA, J.B. **Estudo da formação e dispersão de ozônio troposférico em áreas de atividade de processamento de carvão aplicando modelos numéricos.** 2005. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto -Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/8475>> .Acessado em: 9 de Julho de 2017.

DUTRA, E.G.; FIORAVANTE, F.; FERREIRA, D. **Emissão Veicular e o Ozônio Termosférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.** 2009. Disponível em < http://www.feam.br/images/stories/rafael/cibim_9_las_palmas-emissao_veiculares_-_oznio_29-aspectos_medio_ambientales.pdf> . Acessado em: 10 de Julho de 2017.

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.

MARTINS, L.D. **Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo - USP, 2006. Tese de Doutorado - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Departamento de Ciências Atmosféricas. Disponível em <http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_leila_d_martins_0.pdf>. Acessado em: 10 de Julho de 2017.

SEINFELD, J.H. **Urban Air Pollution** : State of Science. Science, v.243 p.745-752, 1989

SMAC. SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. Rio de Janeiro –RJ- 2017. Disponível em < <http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/monitorar-rio>>. Acessado em: 15 de Julho de 2017.

SOUZA, E.B., **Apostila do Curso de Extensão Organizado pela Coordenação do Colegiado de Meteorologia.** 13 de fevereiro de 2004. Disponível em <<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0522/referencias/apostilagrad.pdf>>. Acessado em: 14 novembro de 2016.

