



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

aa/bb/cc/dd-TDI

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

Beatriz Pereira Miranda

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

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
Agosto de 2021

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 Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



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

aa/bb/cc/dd-TDI

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

Beatriz Pereira Miranda

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

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
Agosto de 2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sobrenome, Nomes.

Cutter Estudo de qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ): análise do ozônio troposférico e validação do modelo BRAMS para o período dos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro / Beatriz Pereira Miranda. – São José dos Campos : INPE, Agosto de 2021.

?? + 23 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

Dissertação ou Tese (Mestrado ou Doutorado em Nome do Curso) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, AAAA.

Orientador : José da Silva.

1. Palavra chave. 2. Palavra chave 3. Palavra chave. 4. Palavra chave. 5. Palavra chave I. Título.

CDU 000.000



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

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

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

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

Mestrado ou Doutorado em Nome do
Curso

RESUMO

Na troposfera, mediante a reação química entre compostos orgânicos voláteis (COVs) e óxidos de nitrogênio (Nox) na presença de radiação solar direta, ocorre a formação do ozônio troposférico (O₃). O O₃ troposférico é um poluente secundário prejudicial à saúde dos seres vivos. Por isso, a comunidade científica mundial realiza esforços para reduzir suas concentrações, a fim de minimizar seus impactos especialmente na saúde. Nesse sentido, a previsão da qualidade do ar, principalmente em grandes centros urbanos como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), é realizada por meio de ferramentas como os modelos de Previsão Numérica como o Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS). Em 2016, o CPTEC/INPE produziu operacionalmente previsões de qualidade do ar utilizando o modelo BRAMS (versão 5.2) em 1 km de espaçamento horizontal e resolução temporal de uma hora, como apoio para os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2016 realizados entre agosto e setembro na cidade do Rio de Janeiro. Este trabalho tem como objetivo avaliar as previsões de O₃ produzidas pelo CPTEC/INPE referentes ao período do evento olímpico de 2016. Na primeira fase deste trabalho, foram analisados dados observados de O₃ na região de estudo obtidos de 23 estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas em diversos bairros da RMRJ. Estas estações são mantidas pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e 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. Na segunda fase, foram obtidos junto ao CPTEC/INPE os dados das previsões realizadas pelo modelo BRAMS. Os resultados obtidos a partir dos dados observados indicam que a maioria das estações analisadas apresentaram a ocorrência de máxima concentração de O₃ próximo ao período de máxima insolação solar, entre 14h e 15h local. Este mesmo comportamento é representado pelo modelo BRAMS na maioria das estações, durante o período da tarde. Porém, há uma deficiência no modelo com relação à previsão das concentrações médias de ozônio no período noturno. A subestimativa identificada pode estar associada a uma possível subestimativa das emissões na RMRJ. Concluiu-se que o modelo BRAMS prevê corretamente o ciclo diurno médio do ozônio durante o período diurno, mas subestima as concentrações máximas durante o período noturno, e as causas serão melhor investigadas.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Média máxima dos padrões de qualidade do ar intermediários e final em um período de 8h	9
5.1 Médias horárias de 17 (Fig. a) e 41 horas (Fig. b) de previsão de O ₃ válidas para 17 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	13
5.2 Médias horárias de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão de O ₃ válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	14
5.3 Médias horárias de 17h (Fig. a) e 41 horas (Fig. b) de previsão de TAR válidas para 17 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	14
5.4 Médias horárias de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão de TAR válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	15
5.5 Viés médio de 9h (Fig. a) e 33 horas (Fig. b) de previsão válidas para 09:00 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	15
5.6 Viés médio de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	16
5.7 RMSE de 18 (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	16
5.8 RMSE de de 9 (Fig. a) e 33 horas (Fig. b) de previsão válidas para 09:00 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	17
5.9 Série temporal dos horários de máxima concentração de O ₃ ns estações Maracanã (Fig. a), Monteiro Lobato (Fig. b), Jardim Primavera (Fig. c), Largo do Bodegão (Fig. d) e Adalgisa Nery (Fig. e) para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.	18

LISTA DE TABELAS

Pág.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivos específicos	2
2 Atividades Desenvolvidas durante o período da bolsa	3
2.1 Etapa 1	3
2.2 Etapa 2	3
2.3 Etapa 3	3
2.4 Etapa 4	3
3 Revisão Bibliográfica	5
3.1 Ozônio	5
3.2 Óxidos de Nitrogênio	6
3.3 Compostos Orgânicos Voláteis – COV's	7
3.4 Formação do Ozônio na Troposfera	7
3.5 Padrões de Qualidade do Ar	9
3.5.1 Níveis estabelecidos para o Ozônio:	9
4 DADOS E METODOLOGIA	11
4.1 Descrição do método de aquisição dos dados	11
4.2 Análise dos dados	11
5 Resultados Obtidos em função do Plano de Trabalho proposto .	13
6 Conclusões Gerais	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1 Introdução

O ozônio faz parte dos chamados gases traço. Apesar de representarem menos de 1% do total de gases da atmosfera, estes são fundamentais para as propriedades químicas da mesma e para o balanço de radiação do planeta.

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

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

O O_3 exerce diversos efeitos nocivos à saúde humana. É sabido que, nas grandes cidades, a degradação da qualidade do ar a partir dos efeitos nocivos da poluição atinge principalmente crianças e idosos. Freitas et al. (2007) encontrou associação entre o O_3 e o aumento de admissões de doenças respiratórias em menores de 15 anos.

1.1 Objetivos

Utilizando as previsões da qualidade do ar do modelo BRAMS fornecido pelo CP-TEC/INPE, o trabalho tem como objetivo: estudar os padrões de qualidade do ar para a RMRJ com foco nos índices de O_3 ; entender os padrões meteorológicos dominantes no período e correlacionar com os padrões de O_3 observados; analisar as simulações do modelo BRAMS em alta resolução (1 km) para a região, a fim de

validar os resultados do modelo com dados observados e compreender o desempenho da versão operacional do BRAMS 5.2 para a previsão da qualidade do ar durante os meses de agosto e setembro de 2016.

1.1.1 Objetivos específicos

- Elaborar um estudo de referências bibliográficas sobre os conceitos básicos de legislação ambiental, padrões de qualidade do ar relacionados a O₃ e da formação deste poluente na atmosfera.
- Obter junto ao Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) e à Prefeitura do Rio os dados de ozônio das estações de monitoramento de qualidade do ar disponíveis, bem como os dados meteorológicos junto ao CPTEC/INPE e INMET para o período estudado (agosto e setembro de 2016).
- Familiarização com as ferramentas necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

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

2 Atividades Desenvolvidas durante o período da bolsa

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

2.1 Etapa 1

Foi elaborado um estudo de referências bibliográficas sobre os conceitos básicos de legislação ambiental, padrões de qualidade do ar relacionados a O_3 e da formação deste poluente na atmosfera.

Também foi estudado o artigo de [Rozante e Ramirez \(2021\)](#), que descreve o desenvolvimento de um novo conjunto de dados de temperatura desenvolvidos pelo CPTEC/INPE.

2.2 Etapa 2

Foram obtidos dados de O_3 junto ao Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) e à Prefeitura do Rio e dos dados meteorológicos junto ao CPTEC/INPE e INMET para o período estudado (agosto e setembro de 2016). Após a organização dos dados e seleção das melhores estações, foram descritas as características dos locais de cada uma delas. Como atividades complementares, no período da pandemia, devido a diminuição das frotas veiculares nas ruas houve também a diminuição das emissões por estas fontes. A partir disso, foram obtidos dados de O_3 , NO_x e CO junto ao INEA para o primeiro mês de isolamento na RMRJ a fim de analisar da qualidade do ar nesse período.

2.3 Etapa 3

Com intuito de começar a familiarização com um ambiente que atenda as necessárias para o desenvolvimento de rotinas computacionais para o cálculo de estatísticas básicas e análise dos dados o Ubuntu foi instalado com auxílio da orientadora. A partir disso, foram instalados também o Anaconda/Python e a ferramenta GrADS. Para a análise, com auxílio da orientadora, gráficos do ciclo diurno médio e médias diárias do O_3 das estações analisadas, para os meses de agosto e setembro de 2016. Gráficos do ciclo diurno médio separados por dias da semana também foram desenvolvidos utilizando a linguagem Python.

2.4 Etapa 4

Esta etapa será melhor detalhada no Capítulo 4.

Para a análise dos dados do modelo, foram produzidas figuras de média horária de cada prazo de previsão do O_3 e da TAR para a área da RMRJ.

Para a validação dos resultados da TAR, foram produzidas figuras do campo espacial de índices estatísticos como o viés e do RMSE a partir da interpolação das previsões do BRAMS na grade espacial do SAMet, para o mês de agosto de 2016.

Para validar as previsões de O_3 do modelo, foram extraídos, com auxílio da ferramenta GrADS, os dados horários de O_3 nos períodos de máxima concentração em cada estação, detectados por meio da análise do ciclo diurno médio observado nas estações de qualidade do ar analisadas, para serem plotados junto ao dado de referência em uma série temporal do mês de agosto. Entretanto, esta etapa não foi concluída, sendo necessário um período de pesquisa maior para que seja possível analisar estatisticamente, em pontos de estação, o desempenho do modelo BRAMS.

Em função do exposto, as Etapas 5 e 6 do plano de trabalho, que contemplam a análise dos resultados obtidos e publicação de relatório final e artigo científico, não puderam ser concluídas.

3 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 .

3.1 Ozônio

O O_3 é um gás oxidante, que está presente na atmosfera ao nível traço, ou seja, é um dos gases que ocupa menos de 1% do volume da atmosfera terrestre. Ele 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 O_3 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 O_3 na troposfera dependem dos níveis de COV's, do monóxido de carbono (CO), dos NO_x e da intensidade da radiação solar. Quando a quantidade de O_3 na baixa troposfera se eleva, este, por ter caráter oxidante quando presente nessa camada da atmosfera, exerce diversos efeitos nocivos à saúde humana e ao ecossistema terrestre. Além do mais, é possível que o aumento o O_3 troposférico possa ter um impacto negativo 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 ocorre

a partir da absorção da 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 (10-20 partes por bilhão por volume – ppbv), quando em equilíbrio com seus precursores. No entanto, a influência das atividades antrópicas vem alterando consideravelmente esse equilíbrio e também os níveis globais de concentração de fundo (MARTINS, 2006). Com o aumento da quantidade de automóveis e indústrias no planeta, houve um crescimento na emissão de NO_x e COV's. 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.

3.2 Óxidos de Nitrogênio

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 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.

3.3 Compostos Orgânicos Voláteis – COV's

O termo COV's engloba um grande grupo de poluentes que se encontram presentes na atmosfera, principalmente, sob a forma gasosa (HOSHI et al., 2008). Segundo a CETESB, os 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 .

3.4 Formação do Ozônio na Troposfera

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

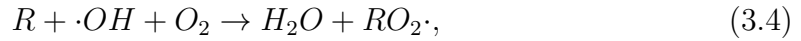


O oxigênio atômico produzido é rapidamente consumido, formando o ozônio, que por sua vez é degradado pelo óxido de nitrogênio.

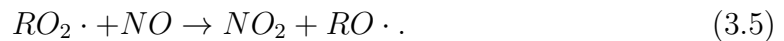


Essas três reações estabelecem uma concentração estável do ozônio na troposfera. Contudo, com a alta concentração de COV's, essencialmente os hidrocarbonetos, esse equilíbrio é prejudicado. Na presença desses compostos e de radicais hidroxila, o NO pode ser convertido a NO_2 sem consumir O_3 , contribuindo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

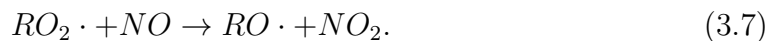
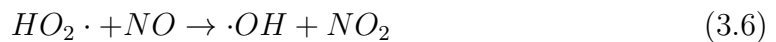
Os hidrocarbonetos (R) são atacados por radicais hidroxilas, formando radicais alquil peróxi ($RO_2\cdot$), como apresentado na Equação a seguir:



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



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



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

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

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

3.5 Padrões de Qualidade do Ar

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

3.5.1 Níveis estabelecidos para o Ozônio:

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

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

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

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Descrição do método de aquisição dos dados

A aquisição da base de dados de O_3 e Temperatura do ar a 2m (TAR) a ser analisada no projeto foi obtida a partir da base de dados da Prefeitura do Rio e INEA. O foco do estudo foram os meses de agosto e setembro de 2016, período de ocorrência das Olimpíadas do Rio de Janeiro.

Os dados observados de O_3 e TAR foram analisados em 23 estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas na RMRJ, a saber: Estação Centro, Copacabana, Tijuca, Campo Grande, Bangu, Irajá, Campos dos Afonsos, Campo Grande, Taquara, Leblon, Lagoa, Ilha do Governador, Ilha de Paqueta, Adalgisa Nery, Largo do Bodegão, Maracanã, Campos Elíseos, Pilar, São Bento, Vila São Luis, UERJ, Monteiro Lobato e Engenheiro Pedreira.

Além disso, foram obtidos junto ao CPTEC/INPE os dados das previsões realizadas pelo modelo BRAMS para o período de estudo e os dados de temperaturas mínimas e máximas do *South American Mapping of Temperature* (SAMeT) (ROZANTE; RAMIREZ, 2021). O SAMeT é um dado em ponto de grade baseado na reanálise do ERA-5, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5/ECMWF). As reanálises ERA5 possui resolução horizontal de 31 km, e os autores fizeram uma correção destes dados a partir da combinação com dados de estações meteorológicas de superfície da América do Sul, especialmente aquelas que não são enviadas para o *Global Telecommunication System* (GTS), e uma correção que leva em consideração a altitude das estações meteorológicas utilizadas na combinação, utilizando o *lapse rate* (ROZANTE; RAMIREZ, 2021). Neste processo, o produto é interpolado para uma grade de 10km de espaçamento horizontal, oferecendo aos usuários um produto de melhor qualidade para a América do Sul.

4.2 Análise dos dados

A partir dos dados observacionais do O_3 , foram calculados ciclos diurnos médios para a análise da evolução horária, computando uma média para cada hora do dia no período analisado. O cálculo a cada hora do dia resultou em um gráfico da média do O_3 ao longo das 24 horas do dia para todas as estações analisadas.

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

em que \bar{x}_i = média do O_3 na hora i , para cada dia j por um número n de dias. O cálculo foi realizado separadamente para o mês de agosto e setembro de 2016. Além disso, foram gerados scripts para o cálculo das médias horárias do O_3 , da TAR, da radiação de onda curta e das componentes zonal e meridional do vento com os dados do modelo BRAMS.

Ainda, com a utilização dos dados do SAMeT, foram gerados scripts para interpolação da TAR do modelo BRAMS, em 1km de resolução, para a grade do SAMeT, em 10km de resolução. Esta interpolação foi necessária pois para avaliar os dados do modelo em ponto de grade, não há uma referência com a mesma resolução espacial que possa ser utilizada. Assim, optou-se pela degradação dos resultados do modelo para sua avaliação.

Foram calculados o Viés, considerando a diferença entre as previsões e o dado de referência e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) das temperaturas máxima e mínima, dado pela Equação 4.2:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{y}_i - y_i)^2}{n}}, \quad (4.2)$$

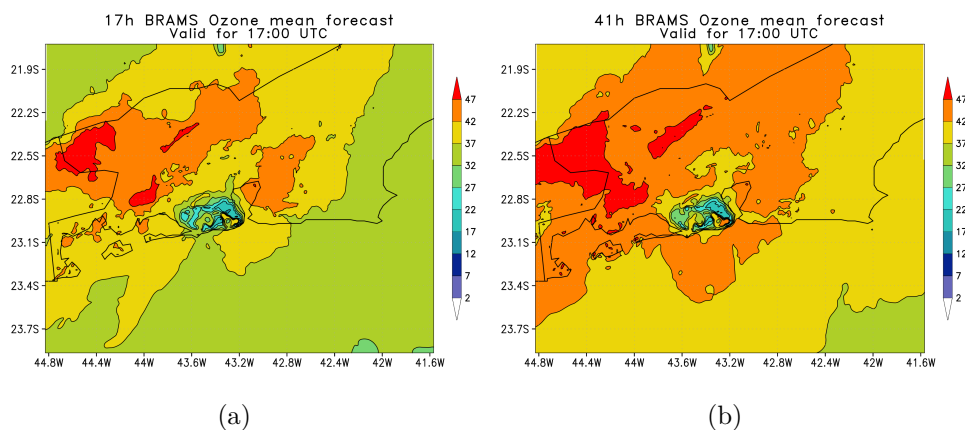
em que \bar{y}_i = previsão e y_i = observação na hora i , e n é o número de dias da análise. O cálculo foi realizado para o mês de agosto de 2016, e portanto, $n=31$.

5 Resultados Obtidos em função do Plano de Trabalho proposto

A partir do cálculo do ciclo diurno médio do O_3 para as estações analisadas, identificou-se que no geral, existe um ciclo diurno médio bem característico na maioria das estações estudadas. O pico de O_3 na atmosfera, esperado entre os horários de 14 às 15h devido à grande incidência de radiação solar, ficou bem evidenciado nas estações Maracanã, Monteiro Lobato e Jardim Primavera. Enquanto isso, nas estações Adalgisa Nery e Largo do Bodegão, o ciclo apresentou um padrão distinto. Além disso, em todas as 5 estações, houve um pico secundário entre os horários de 3 e 5h.

A partir do cálculo das médias espaciais horárias da previsão do O_3 para a RMRJ, identificou-se que o BRAMS apresenta o mesmo comportamento identificado nas observações em relação às concentrações durante o período da tarde (Figura 5.1). O modelo apresenta maiores concentrações nos horários de 17:00 UTC (14h local) (Figura 5.1) e 18:00 UTC (15h local) (Figura 5.2), o que é consistente com o observado na análise dos dados da maioria das estações de qualidade do ar.

Figura 5.1 - Médias horárias de 17 (Fig. a) e 41 horas (Fig. b) de previsão de O_3 válidas para 17 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.



Nos campos previstos de TAR para o horário de 17:00 UTC (Figuras 5.3 e 5.4), verifica-se que as temperaturas oscilam em torno de 28°C a 30°C em torno da Baía de Guanabara.

Para a validação da TAR, foram analisadas as figuras do campo espacial do viés e o RMSE para o horário de 09:00 UTC e 18:00 UTC.

Figura 5.2 - Médias horárias de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão de O₃ válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.

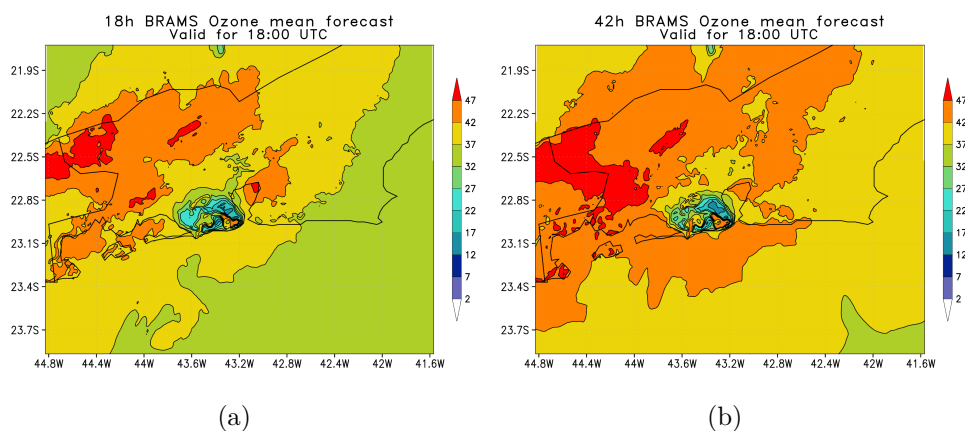
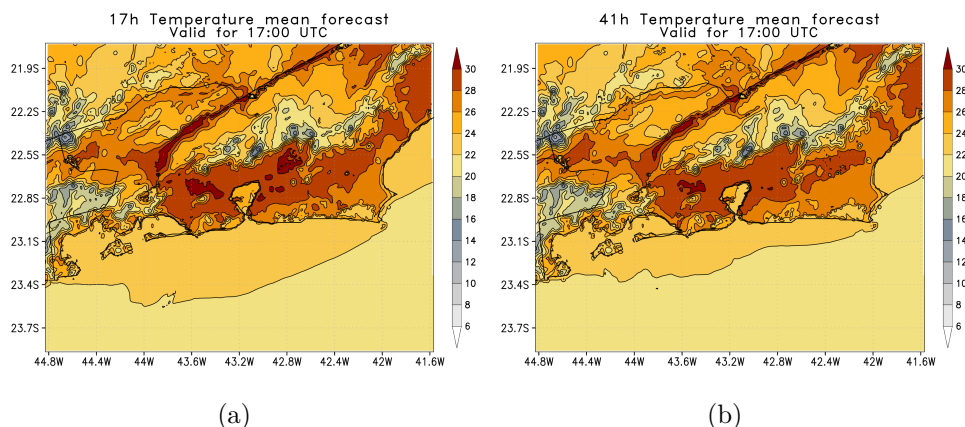


Figura 5.3 - Médias horárias de 17h (Fig. a) e 41 horas (Fig. b) de previsão de TAR válidas para 17 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.



Nas previsões para 09:00 UTC (Figura 5.5), o modelo apresenta mais superestima do que superestima dos valores de TAR, ocorrendo superestima em regiões próximas a costa e subestimativa nos municípios da Baixada Fluminense a oeste da Baía e em alguns pontos isolados em regiões elevadas. Esse padrão se mantém para os dois intervalos de previsão, sendo menos acentuado na previsão de 33 horas (Figura 5.5b).

Observa-se que nas previsões para 18:00 UTC, o modelo apresenta superestimativa nos valores de TAR seguindo dos arredores da Baía de Guanabara, até os principais maciços da RMRJ (Figura 5.6). Porém, há menor superestimativa na previsão de 42h (Figura 5.6b) do que na de 18 horas (Figura 5.6a). No restante da região há pontos de subestimativa em regiões próximas a costa e em regiões mais elevadas,

Figura 5.4 - Médias horárias de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão de TAR válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.

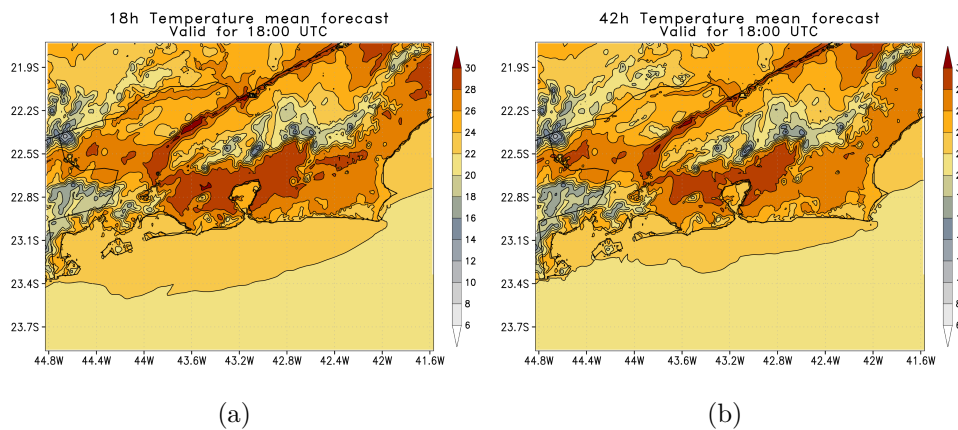
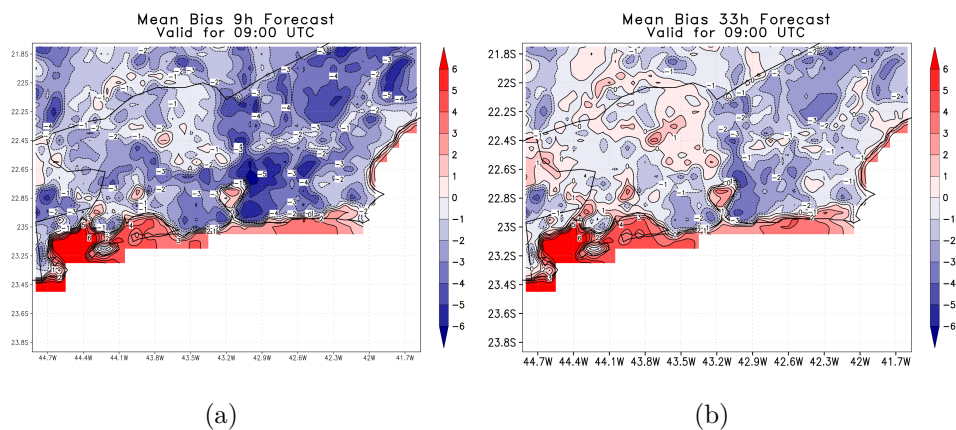


Figura 5.5 - Viés médio de 9h (Fig. a) e 33 horas (Fig. b) de previsão válidas para 09:00 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.



seguinto o mesmo padrão nos dois intervalos de previsão.

Como o RMSE ressalta os erros maiores verificados nos campos de viés, verifica-se que para o horário das 18:00 UTC (Figuras 5.7a e b), os maiores valores deste índice são observados sobre as regiões mais elevadas da RMRJ, bem como sobre o litoral. Os valores de RMSE são mais acentuados nas previsões de 42h (Figura 5.7b) e menores nas previsões de 18h (Figura 5.7a).

No caso das previsões das 09:00 UTC (Figuras 5.8a e b), os maiores valores de RMSE são observados no entorno da Baía de Guanabara e no extremo sudoeste da área analisada, sendo maiores os erros, em termos de abrangência, nas previsões de 33 horas (Figura 5.8b) e menores nas previsões de 9 horas (Figura 5.8a).

Figura 5.6 - Viés médio de 18h (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.

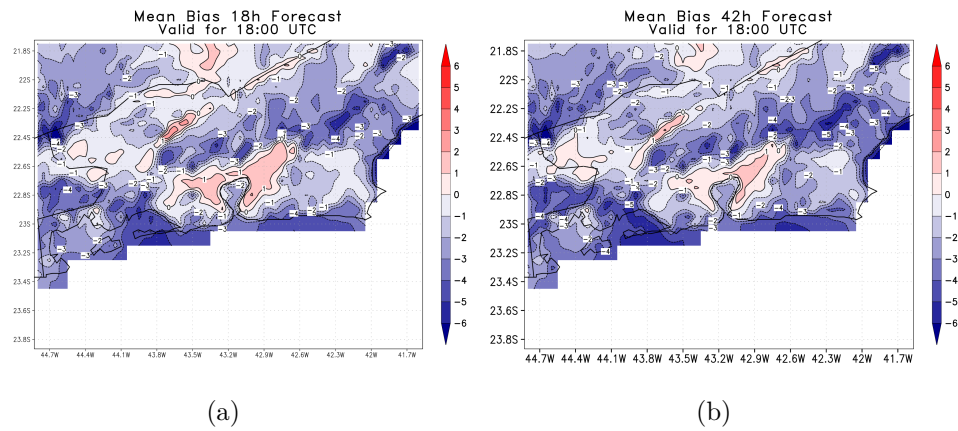
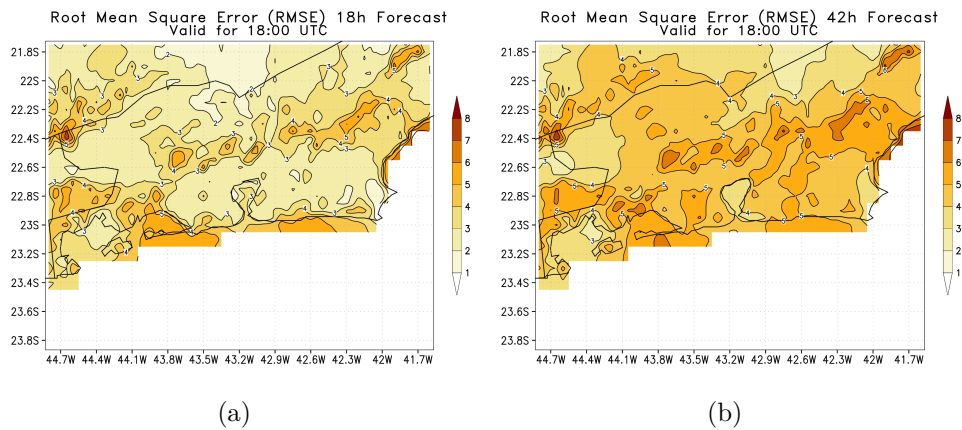


Figura 5.7 - RMSE de 18 (Fig. a) e 42 horas (Fig. b) de previsão válidas para 18 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.



Para validar os resultados das previsões de O_3 pretende-se plotar os dados extraídos do modelo BRAMS no ponto das estações junto ao seu dado de referência para o horário de máxima concentração em cada uma delas, que estão plotados na Figura 5.9.

Figura 5.8 - RMSE de de 9 (Fig. a) e 33 horas (Fig. b) de previsão válidas para 09:00 UTC, calculadas para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.

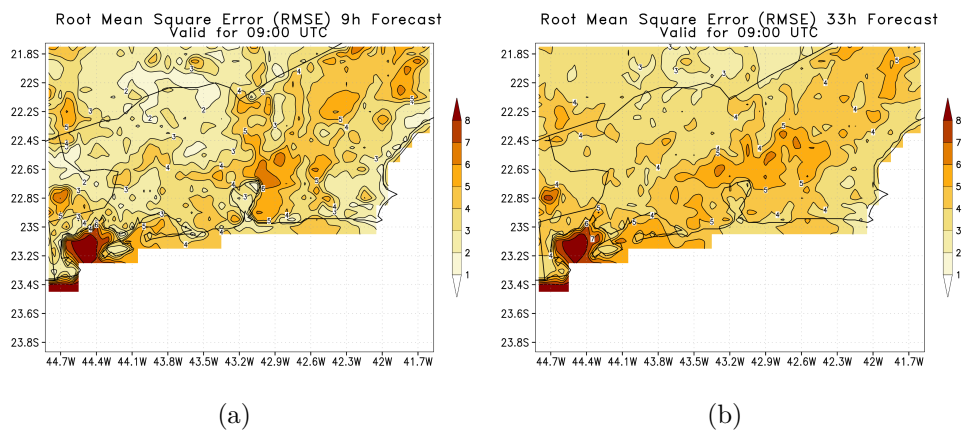
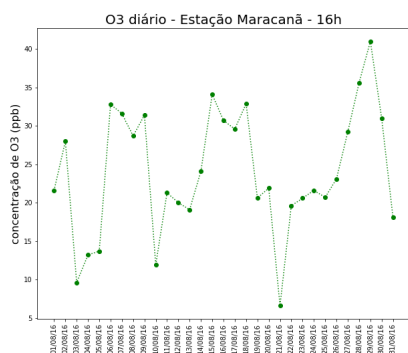
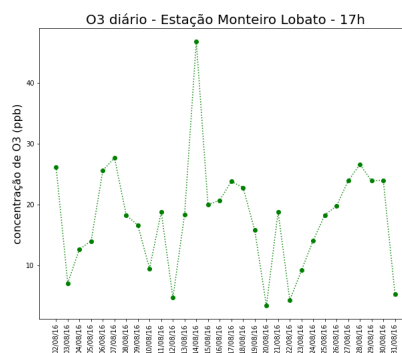


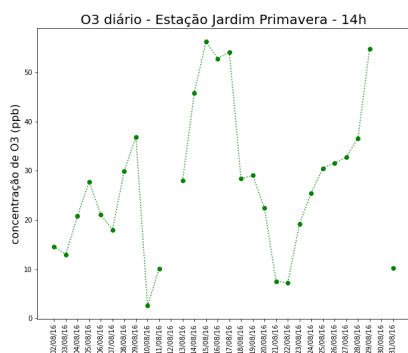
Figura 5.9 - Série temporal dos horários de máxima concentração de O_3 ns estações Maracanã (Fig. a), Monteiro Lobato (Fig. b), Jardim Primavera (Fig. c), Largo do Bodegão (Fig. d) e Adalgisa Nery (Fig. e) para o período de 01 a 31 de agosto de 2016.



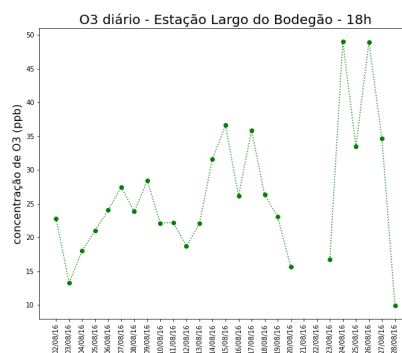
(a)



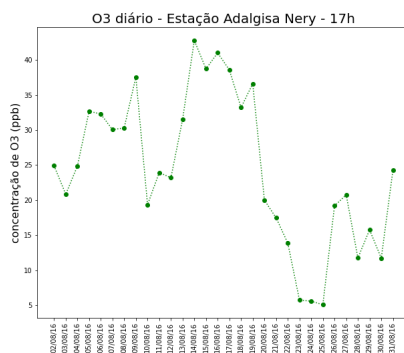
(b)



(c)



(d)



(e)

6 Conclusões Gerais

De acordo com os resultados obtidos, os padrões do ciclo diurno médio da concentração de O_3 na maioria das estações analisadas apresenta um comportamento associado ao período de maior intensidade de radiação solar. Além disso, analisando o modelo regional BRAMS, observa-se que ele representa satisfatoriamente o comportamento observado do O_3 no período da tarde. As concentrações noturnas ainda deverão ser melhor analisadas.

As previsões de TAR apresentam erros sistemáticos em grande parte da RMRJ. Verificou-se que os maiores erros no período de temperatura máxima são observados nos prazos de previsão maiores, enquanto que para os horários de ocorrência de temperaturas mínimas, os prazos de previsão mais curtos apresentam maiores erros. Isso indica que o modelo subestima a parte noturna e início da manhã do ciclo diurno, e superestima a porção da tarde do ciclo. Estes erros deverão ser melhor analisados no decorrer da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CANÇADO, J.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; RBEX, M. A. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v32s1/a02v32s1.pdf>>. Acesso em: 17 de Novembro de 2016. 6
- FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; Silva Dias, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43–65, 2007. ISSN 00068314. 1
- GOMIDES, E.; DUTRA, F., F. E.; FERREIRA, F. D. **Emissão veicular e o ozônio troposférico na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2009. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/rafael/cibim_9_las_palmas-emissao_veiculares_-_oznio_29-aspectos_medio_ambientales.pdf>. Acesso em: 03 de julho de 2017. 6
- HOSHI, J.; AMANO, S.; SASAKI, Y.; KORENAGA, T. Investigation and estimation of emission sources of 54 volatile organic compounds in ambient air in Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 10, p. 2383–2393, 2008. 7
- 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. 5
- 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. 6
- ROZANTE, J.; RAMIREZ, E. A newly developed south american mapping of temperature (samet) with estimated lapse rate corrections. **International Journal of Climatology**, 2021. 3, 11

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

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

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

Programas de Computador (PDC)

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

Pré-publicações (PRE)

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