



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.08.14.06-TDI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM TRÊS LOCAIS
NO ESTADO DE SÃO PAULO COM
CARACTERÍSTICAS DISTINTAS DE
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO**

Luciana de Freitas Tessarolo

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Maria Pau-
lete Pereira Martins, aprovada em
25 de maio de 2012.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BRRMH2>

INPE
São José dos Campos
2012

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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (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)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.08.14.06-TDI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM TRÊS LOCAIS
NO ESTADO DE SÃO PAULO COM
CARACTERÍSTICAS DISTINTAS DE
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO**

Luciana de Freitas Tessarolo

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Maria Pau-
lete Pereira Martins, aprovada em
25 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BRRMH2>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T284a Tessarolo, Luciana de Freitas.
Análise da qualidade do ar em três locais no Estado de São Paulo com características distintas de desenvolvimento econômico / Luciana de Freitas Tessarolo. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xxx + 160 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.08.14.06-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientadora : Dra. Maria Paulete Pereira Martins.

1. índice de qualidade do ar. 2. monitoramento. 3. poluentes.
4. Rio Claro. 5. Cubatão. 6. Cachoeira Paulista. I.Título.

CDU 551.508.951(815.6)

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

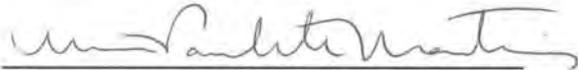
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Gilberto Fernando Fisch



Presidente / IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dra. Maria Paulete Pereira Martins



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Plínio Carlos Alvalá



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Rauda Lucia Mariani



Convidado(a) / UFF / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Luciana de Freitas Tassarolo**

São José dos Campos, 25 de maio de 2012

"Hoje em dia, o ser humano apenas tem ante si três grandes problemas que foram ironicamente provocados por ele próprio: a super povoação, o desaparecimento dos recursos naturais e a destruição do meio ambiente. Triunfar sobre estes problemas, vistos sermos nós a sua causa, deveria ser a nossa mais profunda motivação."

JACQUES YVES COUSTEAU (1910-1997)

A meus amados pais e a meu amado irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente a Deus pelo dom da vida e a Nossa Senhora pelas bênçãos concedidas a cada dia. Obrigada por me concederem saúde, sabedoria e força para não desistir frente às dificuldades e por estarem sempre a minha frente para me guiar, a meu lado para me acompanhar, atrás de mim para me proteger, dentro de mim para me consolar e acima de mim para me abençoar!

A meus amados pais, Augusto e Regina, obrigada pelos ensinamentos de vida, pela oportunidade de estudo e pelo apoio incondicional em todos os momentos. A meu irmão, Augusto Júnior, obrigada pela força, pelo apoio e por cuidar de nossa família nas horas em que não estive presente. Vocês são a minha vida... Amo vocês eternamente!

A minha avó, Lúcia, meus tios e meus primos, agradeço pelo carinho, pela torcida e pelo incentivo de sempre!

A minha orientadora, Dr. Maria Paulete Pereira Martins, que foi mais do que uma professora, foi uma grande amiga. Obrigada pelo apoio e pela ajuda em todos os momentos, pela dedicação e pela atenção, pelos ensinamentos e pelas palavras de força e de sabedoria ao longo desse período!

Ao Asiel Bomfin Jr., obrigada pela atenção e pela ajuda ao longo de todo o trabalho. Obrigada pela companhia e pela dedicação durante toda a coleta de dados.

Obrigada a todos do LIM pela calorosa recepção. Agradecimento especial dedico ao Nilson Rodrigues pela atenção, pela ajuda na resolução dos problemas e pelo fornecimento dos dados.

Ao CEAPLA, ao CEPEMA, à CETESB e ao SAISP, obrigada pelo envio dos dados, pela atenção e pela ajuda no esclarecimento de minhas dúvidas.

Ao pessoal da JCTM, agradeço pelas visitas técnicas ao laboratório, pelas explicações e pela atenção durante todo o trabalho.

A meu querido amigo e companheiro de todas as horas, Iury. Obrigada pela presença constante, pelas valiosas opiniões e correções ao longo de todo o trabalho, pelo incentivo e pela força em todos os momentos!

A minha querida turma de Mestrado, agradeço por toda a companhia, pela amizade pela troca de experiências, pelo aprendizado e pelos divertidos momentos que passamos juntos!

Aos demais alunos de Mestrado e de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, obrigada pelas conversas nos corredores e pela torcida! Às queridas da Secretaria, Simone e Luana, obrigada pelo apoio e pela ajuda de sempre!

A meus queridos amigos: Marília, Livia, Fernando, Theomar, Luís e Rachell. Obrigada pela força, pelas conversas e pelos momentos de descontração!

A meus amados amigos do Espírito Santo, que, mesmo distantes, estão sempre muito presentes. Obrigada pela torcida e pelos maravilhosos momentos quando estamos juntos! Vocês estarão sempre em meu coração!

À Petrobrás, agradeço pelo financiamento do projeto "Implementação de um Sistema de Monitoramento Atmosférico para o Estudo dos Impactos das Queimadas na Qualidade do Ar e no Clima", através do qual foi possível a aquisição da estação de monitoramento da qualidade do ar.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pelo auxílio financeiro concedido durante o mestrado.

RESUMO

A problemática da poluição atmosférica implica em efeitos adversos na saúde humana, nos ecossistemas e nas construções. Uma importante maneira de acompanhar e manter a qualidade do ar consiste no monitoramento dos níveis de poluentes atmosféricos. Baseando-se nessa importância, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do ar em três cidades no Estado de São Paulo (Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista) com características distintas de desenvolvimento econômico e de fontes de poluentes. Neste estudo, são analisadas as concentrações dos poluentes ozônio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos metano e não-metano e material particulado com diâmetro menor $10 \mu\text{m}$, utilizando amostradores automáticos instalados em um laboratório móvel. A partir das medidas de concentração, é calculado o Índice de Qualidade do Ar para cada poluente e também o nível de poluição ao qual a população estava exposta durante o período de monitoramento em cada local. Algumas variáveis meteorológicas foram monitoradas, a fim de se verificar sua influência local na dispersão dos poluentes. Em Rio Claro, os resultados mostram que este município, com nível intermediário de desenvolvimento em relação aos outros dois, apresentou concentrações elevadas de CO e material particulado, as quais podem ser causadas pelas emissões de queimadas das lavouras de cana-de-açúcar existentes nas redondezas. Já em Cubatão, cidade caracterizada pelo grande desenvolvimento industrial, os poluentes de maior concentração foram CO e NO, possivelmente devido ao fluxo de veículos nas rodovias próximas, além dos hidrocarbonetos metano e não-metano, cujas grandes fontes possíveis são as indústrias de petróleo e derivados e as emissões fugitivas oriundas de armazéns de solventes e combustíveis presentes nas vizinhanças do local de monitoramento. Em Cachoeira Paulista, uma cidade pequena, não industrializada e que é atravessada pela Rodovia Presidente Dutra, o poluente com maior concentração foi o ozônio. Os níveis de CO e NO estavam abaixo do limite de detecção dos analisadores, sugerindo, assim, que as emissões veiculares não têm grande influência na qualidade do ar do sítio de coleta devido à direção predominante do vento. A qualidade do ar foi classificada como "boa" em grande parte dos dias monitorados para todas as cidades, com exceção de 13 dias com qualidade "regular" em relação ao PM_{10} em Rio Claro, 1 dia em Cubatão com qualidade "regular" em relação ao CO e 17 dias em Cachoeira Paulista com qualidade "regular" em relação ao O_3 . Também foi verificado que as condições atmosféricas locais são favoráveis à dispersão no período da tarde, enquanto que os níveis dos poluentes apresentam-se mais elevados nos demais períodos do dia para a maioria dos poluentes.

AIR QUALITY ANALYSIS IN THREE CITIES IN THE STATE OF SÃO PAULO WITH DISTINCT CHARACTERISTICS OF ECONOMIC DEVELOPMENT.

ABSTRACT

The problematic of atmospheric pollution implies adverse effects on the human health, the ecosystem and the constructions. An important way to monitor and maintain the air quality consists of the monitoring of the atmospheric pollutants levels. Based on this importance, the present work aims to evaluate the air quality in three cities in the State of São Paulo (Rio Claro, Cubatão and Cachoeira Paulista) with different characteristics of economic development and of sources of pollutants. On this study, the concentrations of pollutants ozone, sulphur dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, methane and nonmethane hydrocarbons, particulate matter with diameter smaller than $10 \mu\text{m}$ are analyzed using automatic samplers installed in a mobile laboratory. From the measures of concentration, the Air Quality Index for each pollutant is calculated and also the pollution level which the population was exposed during the monitoring period in each place. Some meteorological variables were monitored in order to check their local influence on the pollutants dispersion. In Rio Claro, the results show that this municipality, with intermediary level of development in relation to the others, presented high concentrations of CO and particulate matter, that can be caused by the emissions of sugarcane crop burning existing nearby. Already in Cubatão, city characterized by the high industrial development, the pollutants with highest concentration were CO and NO, possibly due to the vehicles flow on the near highway, besides methane and nonmethane hydrocarbons, which major possible sources are the petroleum industries and derivatives and the fugitive emissions arising from solvents and fuel storages present on the neighborhood of the monitoring place. In Cachoeira Paulista, a small city, not industrialized and that is crossed by Presidente Dutra Highway, the pollutant with higher concentration was the ozone. The levels of CO e NO were below the detection limit of the samplers, suggesting that the vehicles emissions don't have great influence on air quality of collection place due to prevailing wind direction. The air quality was classified as "good" in major part of the monitored days for all the cities, except in 13 days with "regular" quality in relation to PM_{10} in Rio Claro, 1 day in Cubatão with "regular" quality in relation to CO and 17 days in Cachoeira Paulista with "regular" quality in relation to O_3 . It was also checked that the local atmospheric conditions are favorable for the dispersion in the afternoon, whereas the pollutant levels are more high in others periods of the day for most of the pollutants.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Poluentes primários e secundários. 19
2.2	Tipos de pluma e o correspondente estado da atmosfera. 40
3.1	Visão externa (esquerda) e interna (direita) do Laboratório. 46
3.2	Localização de Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista no estado de São Paulo. 54
3.3	Plantações de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2009. Em destaque, está o município de Rio Claro. 55
3.4	Localização de algumas indústrias (marcadores amarelos) situadas próximas ao CEPEMA (quadrado verde). 57
3.5	Localização do Laboratório CONSOLIDAR (quadrado verde) e da Rodovia Presidente Dutra (quadrado vermelho). 59
3.6	Localização do CEPEMA (quadrado verde) e dos postos de monitoramento do SAISP (P25, P27 e P28 - círculos vermelhos). 63
4.1	Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 11/07/2009 às 18UTC. . 66
4.2	Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 18/08/2009 às 18UTC. . 66
4.3	Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 09/09/2009 às 18UTC. . 67
4.4	Rosa dos ventos de Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 68
4.5	Rosa dos ventos de Rio Claro às 9h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 68
4.6	Rosa dos ventos de Rio Claro às 15h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 69
4.7	Rosa dos ventos de Rio Claro às 21h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 70
4.8	Precipitação acumulada diária em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 70
4.9	Umidade relativa em Rio Claro às 15h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009. 71
4.10	Média da radiação solar diária nos meses de junho/2009, julho/2009, agosto/2009 e setembro/2009. 72

4.11	Concentração horária média, mínima e máxima de CO em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	73
4.12	Concentração de CO em Rio Claro ao longo do dia 07/08/2009. . . .	74
4.13	Concentração horária média, mínima e máxima de O ₃ em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	75
4.14	Concentração de O ₃ e nebulosidade às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	76
4.15	Concentração de O ₃ e velocidade do vento às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	76
4.16	Concentração de O ₃ e temperatura do ar às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	77
4.17	Concentração de O ₃ em Rio Claro ao longo do dia 12/08/2009. . . .	77
4.18	Média da radiação solar em Rio Claro ao longo do dia 12/08/2009. .	78
4.19	Concentração horária média, mínima e máxima de NO em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	79
4.20	Concentração de NO em Rio Claro ao longo do dia 04/07/2009. . . .	79
4.21	Concentração horária média, mínima e máxima de NO ₂ em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	80
4.22	Concentração de NO ₂ (perfil azul) e de NO (perfil vermelho) em Rio Claro ao longo do dia 01/07/2009.	81
4.23	Concentração horária média, mínima e máxima de SO ₂ em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	82
4.24	Concentração de SO ₂ em Rio Claro ao longo do dia 26/06/2009. . .	82
4.25	Concentração horária média, mínima e máxima de PM ₁₀ em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	83
4.26	Concentração de PM ₁₀ em Rio Claro ao longo do dia 16/07/2009. . .	84
4.27	Concentração de PM ₁₀ em Rio Claro ao longo do dia 23/07/2009. . .	84
4.28	Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao CO. . .	85
4.29	Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao O ₃ . . .	86
4.30	Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao NO ₂ . .	86
4.31	Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao SO ₂ . .	87
4.32	Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao PM ₁₀ . .	87
4.33	Classificação geral da qualidade do ar em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.	88
4.34	Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 27/10/2009 às 18UTC. .	90
4.35	Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 09/11/2009 às 18UTC. .	90

4.36	Perfil horário médio da temperatura em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	91
4.37	Média da radiação solar diária nos meses de outubro/2009 e novembro/2009.	91
4.38	Rosa dos ventos de Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	92
4.39	Rosa dos ventos de Cubatão entre 01:00 e 06:00h no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	93
4.40	Rosa dos ventos de Cubatão entre 07:00 e 12:00h durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	93
4.41	Rosa dos ventos de Cubatão entre 13:00 e 18:00h durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	94
4.42	Rosa dos ventos de Cubatão entre 19:00 e 24:00h no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	95
4.43	Perfil médio da velocidade do vento em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	95
4.44	Precipitação acumulada diária em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009 registrada pelos postos P25, P27 e P28.	96
4.45	Perfil horário médio da umidade relativa em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	96
4.46	Concentração horária média, mínima e máxima de CO em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	97
4.47	Concentração de CO e magnitude do vento em Cubatão ao longo do dia 16/10/2009.	98
4.48	Concentração horária média, mínima e máxima de O ₃ em Cubatão para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009: Dados Laboratório CONSOLIDAR	99
4.49	Concentração horária média, mínima e máxima de O ₃ em Cubatão nos dias válidos de O ₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009: Dados CETESB.	99
4.50	Rosa dos ventos de Cubatão entre 01:00 e 05:00h nos dias válidos de O ₃ no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	100
4.51	Média horária da temperatura do ar em Cubatão nos dias válidos de O ₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	101
4.52	Média horária da precipitação em Cubatão nos dias válidos de O ₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	101

4.53	Concentração horária de O ₃ e de NO ₂ em Cubatão nos dias válidos de O ₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	102
4.54	Concentração de O ₃ e de NO ₂ em Cubatão no dia 22/10/2009. . . .	102
4.55	Média da radiação solar em Cubatão ao longo do dia 22/10/2009. .	103
4.56	Concentração horária média, mínima e máxima de NO em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	104
4.57	Concentração de NO e velocidade do vento em Cubatão ao longo do dia 22/10/2009.	104
4.58	Concentração horária média, mínima e máxima de NO ₂ em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	105
4.59	Concentração de NO ₂ e de NO em Cubatão ao longo do dia 21/10/2009.	106
4.60	Concentração horária média, mínima e máxima de SO ₂ em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	107
4.61	Comportamento do vento entre 6h e 13h em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	108
4.62	Concentração de SO ₂ em Cubatão ao longo do dia 18/10/2009. . . .	109
4.63	Concentração horária média, mínima e máxima de PM ₁₀ em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	110
4.64	Concentração de PM ₁₀ em Cubatão ao longo do dia 18/10/2009. . .	110
4.65	Concentração horária média, mínima e máxima de metano em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	111
4.66	Concentração horária média, mínima e máxima de hidrocarbonetos não-metano em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009. .	111
4.67	Concentração de metano em Cubatão ao longo do dia 24/10/2009. .	112
4.68	Concentração de hidrocarbonetos não-metano em Cubatão ao longo do dia 24/10/2009.	113
4.69	Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao CO. . .	114
4.70	Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao O ₃	114
4.71	Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao NO ₂ . . .	115
4.72	Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao SO ₂ . . .	115
4.73	Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao PM ₁₀ . .	116
4.74	Classificação geral da qualidade do ar em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.	116
4.75	Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 12/11/2011 às 18UTC. .	118
4.76	Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 09/12/2011 às 18:15UTC.	118
4.77	Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 06/01/2012 às 18UTC. .	119

4.78	Perfil horário médio da temperatura em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	119
4.79	Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	120
4.80	Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 01:00 e 06:00h durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	121
4.81	Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 07:00 e 12:00h no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	121
4.82	Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 13:00 e 18:00h durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	122
4.83	Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 19:00 e 24:00h no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	122
4.84	Perfil médio da velocidade do vento em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	123
4.85	Precipitação acumulada diária em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	124
4.86	Perfil horário médio da umidade relativa em Cachoeira Paulista no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	124
4.87	Média da radiação solar diária nos meses de outubro/2011, novembro/2011, dezembro/2011 e janeiro/2012.	125
4.88	Concentração horária média, mínima e máxima de O ₃ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	126
4.89	Concentração de O ₃ e velocidade do vento às 15h em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	127
4.90	Concentração de O ₃ e temperatura do ar às 15h em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	127
4.91	Concentração horária de O ₃ e de NO ₂ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	128
4.92	Concentração de O ₃ em Cachoeira Paulista no dia 24/11/2011.	128
4.93	Média da radiação solar em Cachoeira Paulista ao longo do dia 24/11/2011.	129
4.94	Concentração horária média, mínima e máxima de NO ₂ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	130
4.95	Concentração de NO ₂ em Cachoeira Paulista no dia 24/11/2011.	130
4.96	Concentração horária média, mínima e máxima de SO ₂ em Cachoeira Paulista nos 7 dias válidos.	131

4.97	Concentração horária média, mínima e máxima de PM_{10} em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012. . .	132
4.98	Concentração de PM_{10} em Cachoeira Paulista ao longo do dia 07/11/2011.	133
4.99	Concentração horária média, mínima e máxima de metano em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012. . .	134
4.100	Concentração de metano em Cachoeira Paulista ao longo do dia 08/11/2011.	135
4.101	Concentração horária média, mínima e máxima de hidrocarbonetos não-metano em Cachoeira Paulista nos 16 dias válidos.	135
4.102	Rosa dos ventos entre 18h e 23h em Cachoeira Paulista nos 16 dias válidos para os hidrocarbonetos não-metano.	136
4.103	Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao O_3	137
4.104	Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao NO_2	137
4.105	Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao PM_{10}	138
4.106	Classificação geral da qualidade do ar em Cachoeira Paulista no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.	138
A.1	Funções para o cálculo do índice de qualidade do ar para CO , SO_2 e NO_2	159
A.2	Funções para o cálculo do índice de qualidade do ar para O_3 , PTS, PM_{10} e FMC.	160

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Gases que compõem o ar troposférico seco.	9
2.2 Termos que descrevem as partículas atmosféricas.	13
2.3 Alguns gases e partículas relacionados a tópicos de poluição do ar. .	15
2.4 Padrões nacionais de qualidade do ar.	31
2.5 Critérios para episódios críticos de poluição do ar.	32
2.6 Padrões norte-americanos de qualidade do ar.	32
2.7 Padrões de qualidade do ar - OMS.	33
2.8 Classificação da qualidade do ar.	35
2.9 Efeitos sobre a saúde para cada qualificação do ar.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ar	– Argônio
C_p	– Concentração do poluente 'p'
C_{max}	– Concentração que representa o ponto de inflexão na função com valor imediatamente maior que C_p
C_{min}	– Concentração que representa o ponto de inflexão na função com valor imediatamente menor que C_p
CEAPLA	– Centro de Análise e Planejamento Ambiental
CEPEMA	– Centre de Capacitação e Pesquisas em Meio Ambiente
CETESB	– Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Defesa do Meio Ambiente
CFC's	– Clorofluorcarbonos
CH_3SCH_3	– Sulfeto de Dimetila
CH_4	– Metano
CLP	– Camada Limite Planetária
CO	– Monóxido de Carbono
CO-Hb	– Carboxihemoglobina
CO_2	– Dióxido de Carbono
CONAMA	– Conselho Nacional do Meio Ambiente
COS	– Sulfeto de Carbonila
COV's	– Compostos Orgânicos Voláteis
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
C^{14}	– Elemento Carbono 14
DSA	– Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
E	– Leste
ENE	– Leste-Nordeste
EPA	– Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana
ESE	– Leste-Sudeste
FEENA	– Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade
FEPAM	– Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS
FMC	– Fumaça
GFC	– <i>Gas Filter Correlation</i>
H_2S	– Ácido Sulfídrico
H_2SO_4	– Ácido Sulfúrico
HNO_3	– Ácido Nítrico
HO_2	– Radical Hidroperoxil
hv	– Energia da radiação ultravioleta
HPA	– Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGCE	– Instituto de Geociências e Ciências Exatas
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	– Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEN	– Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPMet	– Instituto de Pesquisas Meteorológicas
IQAr	– Índice de Qualidade do Ar
IQAr _{max}	– Índice correspondente a C _{max}
IQAr _{min}	– Índice correspondente a C _{min}
IQAr _p	– Índice de Qualidade do Ar referente ao poluente 'p'
k ₁ , k ₂ , k ₃	– Constantes de taxa de reação
LIDAR	– <i>Light Detection and Ranging</i>
LIM	– Laboratório de Instrumentação Meteorológica
M	– Molécula capaz de absorver a energia liberada em excesso na reação
MISR	– <i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>
Mo	– Molibdênio
MODIS	– <i>Moderate-resolution Imaging SpectroRadiometer</i>
N	– Norte
NE	– Nordeste
NMHC	– Hidrocarbonetos Não-Metano
NNE	– Norte-Nordeste
NNW	– Norte-Noroeste
NO	– Óxido Nítrico
NO ₂	– Dióxido de Nitrogênio
NO ₂ [*]	– Moléculas de dióxido de nitrogênio excitadas
NO _x	– Óxidos de Nitrogênio
NW	– Noroeste
N ₂	– Nitrogênio
N ₂ O	– Óxido Nitroso
OH ⁻	– Radical Hidroxila
OMS	– Organização Mundial de Saúde
ONU	– Organização das Nações Unidas
O ₂	– Oxigênio
O ₃	– Ozônio
PCD's	– Plataformas de Coleta de Dados
PM Cachoeira Paulista	– Prefeitura Municipal de Cachoeira Paulista
PM Cubatão	– Prefeitura Municipal de Cubatão
PM Rio Claro	– Prefeitura Municipal de Rio Claro
PM ₁₀	– Material Particulado menor que 10 μm

PM _{2,5}	–	Material Particulado menor que 2,5 μm
POLI-USP	–	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PRONAR	–	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PTS	–	Partículas Totais em Suspensão
P25	–	Posto Casa 8
P27	–	Posto Cosipa
P28	–	Posto Portão 40
QUALAR	–	Sistema de Informação da Qualidade do Ar
RO ₂	–	Radical Peroxil
S	–	Sul
SAISP	–	Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo
SE	–	Sudeste
SISNAMA	–	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SO ₂	–	Dióxido de Enxofre
SO ₃	–	Trióxido de Enxofre
SO _x	–	Óxidos de Enxofre
SSE	–	Sul-Sudeste
SSW	–	Sul-Sudoeste
SW	–	Sudoeste
THC's	–	Total de Hidrocarbonetos
UNESP	–	Universidade Estadual Paulista
USP	–	Universidade de São Paulo
W	–	Oeste
WinAQMS	–	Sistema Windows de Monitoramento da Qualidade do Ar
WNW	–	Oeste-Noroeste
WSW	–	Oeste-Sudoeste
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivos Específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Atmosfera	7
2.1.1 Constituintes Atmosféricos	8
2.1.1.1 Constituintes Gasosos	10
2.1.1.2 Partículas	12
2.2 Poluição Atmosférica	15
2.2.1 Breve Histórico	16
2.2.2 Caracterização dos Poluentes Atmosféricos	17
2.2.2.1 Material Particulado	19
2.2.2.2 Dióxido de enxofre	21
2.2.2.3 Monóxido de Carbono	22
2.2.2.4 Ozônio	23
2.2.2.5 Óxidos de Nitrogênio	26
2.2.2.6 Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano	28
2.3 Padrões de Qualidade do Ar	29
2.4 Dispersão de Poluentes	36
2.4.1 Características do Local de Emissão	37
2.4.2 Características do Poluente Emitido	37
2.4.3 Condições Meteorológicas	38
2.4.3.1 Velocidade e Direção do Vento	38
2.4.3.2 Turbulência	38
2.4.3.3 Estabilidade	38
2.4.4 Efeitos do Terreno	40
2.4.4.1 Estruturas Urbanas	40
2.4.4.2 Zonas Costeiras	41
2.4.4.3 Áreas Montanhosas e Áreas com Vales	42
2.5 Monitoramento da Qualidade do Ar	43

3	DADOS E METODOLOGIA	45
3.1	Descrição do Laboratório CONSOLIDAR	46
3.1.1	Analizador de Ozônio	48
3.1.2	Analizador de Monóxido de Carbono	48
3.1.3	Analizador de Óxidos de Nitrogênio	49
3.1.4	Analizador de Dióxido de Enxofre	50
3.1.5	Monitor de Material Particulado PM ₁₀	51
3.1.6	Monitor de Hidrocarbonetos	52
3.1.7	Sistema de Calibração	52
3.2	Caracterização dos Locais de Monitoramento	53
3.2.1	Região de Rio Claro	54
3.2.2	Região de Cubatão	56
3.2.3	Região de Cachoeira Paulista	58
3.3	Aquisição e Tratamento dos Dados	59
3.3.1	Dados de Monitoramento dos Poluentes	59
3.3.2	Informações Meteorológicas	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Monitoramento da Qualidade do Ar em Rio Claro	65
4.1.1	Características Meteorológicas	65
4.1.2	Análise da Qualidade do Ar	72
4.1.2.1	Monóxido de Carbono	73
4.1.2.2	Ozônio	74
4.1.2.3	Óxido Nítrico	78
4.1.2.4	Dióxido de Nitrogênio	79
4.1.2.5	Dióxido de Enxofre	81
4.1.2.6	Material Particulado PM ₁₀	83
4.1.2.7	Análise do Índice de Qualidade do Ar	85
4.2	Monitoramento da Qualidade do Ar em Cubatão	89
4.2.1	Características Meteorológicas	89
4.2.2	Análise da Qualidade do Ar	97
4.2.2.1	Monóxido de Carbono	97
4.2.2.2	Ozônio	98
4.2.2.3	Óxido Nítrico	103
4.2.2.4	Dióxido de Nitrogênio	105
4.2.2.5	Dióxido de Enxofre	106

4.2.2.6	Material Particulado PM ₁₀	109
4.2.2.7	Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano	110
4.2.2.8	Análise do Índice de Qualidade do Ar	113
4.3	Monitoramento da Qualidade do Ar em Cachoeira Paulista	117
4.3.1	Características Meteorológicas	117
4.3.2	Análise da Qualidade do Ar	125
4.3.2.1	Ozônio	125
4.3.2.2	Dióxido de Nitrogênio	129
4.3.2.3	Dióxido de Enxofre	131
4.3.2.4	Material Particulado PM ₁₀	132
4.3.2.5	Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano	133
4.3.2.6	Análise do Índice de Qualidade do Ar	136
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
	APÊNDICE A - Tipos de Amostradores da Qualidade do Ar	155
A.1	Amostradores Passivos	155
A.2	Amostradores Ativos	155
A.3	Amostradores Automáticos	156
A.4	Sensores Remotos	156
A.5	Biomonitoramento	157
	ANEXO A - Funções para o Cálculo do IQAr	159

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sócio-econômico é um importante fator capaz de permitir ao homem desfrutar de condições de vida adequadas no ambiente em que vive. Porém, o alcance dessas melhorias na qualidade de vida deve estar em harmonia com a natureza, uma vez que o próprio homem tem o dever de proteger e preservar os recursos naturais.

A preocupação com a proteção do meio ambiente deve ser uma parte integrante e não isolada do processo de desenvolvimento, a fim de que seja alcançado o desenvolvimento sustentável, o qual, segundo a definição da Organização das Nações Unidas (ONU, 1987), consiste no desenvolvimento que atende as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades.

A realidade vinculada ao processo de urbanização e industrialização foge um pouco do ideal de sustentabilidade, constata-se essa que, no quesito qualidade do ar, pode ser percebida através da redução de visibilidade e de efeitos adversos à saúde, ao ecossistema e aos bens construídos. Geralmente, condições atmosféricas desfavoráveis à qualidade de vida saudável estão associadas a grandes centros urbanos. Porém, a presença de poluentes no ar também pode ser detectada em regiões vizinhas às fontes emissoras ou até mesmo distantes desses locais, uma vez que as espécies podem ser dispersas, por exemplo, pela ação do vento, sendo, portanto, muito influenciadas pelas condições atmosféricas.

Uma importante ferramenta utilizada para auxiliar na caracterização dos efeitos da poluição do ar sobre o meio consiste na determinação das concentrações dos poluentes na atmosfera. A partir desse monitoramento, a qualidade do ar pode ser avaliada através da comparação com os padrões legais e ações podem ser elaboradas no sentido de controlar os níveis de poluição.

O impacto negativo causado pelos poluentes na qualidade do ar é uma problemática que repercute em preocupação internacional. Inúmeras pesquisas objetivando a caracterização da qualidade do ar são realizadas em várias partes do mundo.

Zhou et al. (2006) analisaram as características da qualidade do ar em

Guangzhou, capital da província chinesa de Guangdong, situada numa região com forte economia industrial e com alto consumo de energia a base de carvão. Entre 1981 e 2005, as partículas totais em suspensão permaneceram como o poluente mais relevante, seguido do dióxido de enxofre e do dióxido de nitrogênio. Devido aos esforços sustentáveis realizados para controlar a poluição do ar ambiente, a qualidade do ar em Guangzhou alcançou os padrões secundários entre 2000 e 2005. O índice de qualidade do ar apresentou valores mais baixos entre os meses de abril e setembro, estando mais altos em janeiro e dezembro. Esses resultados mostram que a atmosfera da cidade é bastante influenciada pelas condições meteorológicas locais, destacando-se o sistema de Monção Leste-Asiático, que propicia, entre os meses de abril e setembro, a dispersão e diluição dos poluentes do ar ambiente através das frequentes chuvas e fortes correntes de ar ascendentes e descendentes. Entretanto, a poluição do ar causada pelos efluentes gasosos liberados pelos veículos ainda é um problema ambiental significativo na cidade.

Nagendra et al. (2007) avaliaram a qualidade do ar perto de uma interseção de tráfego intenso em Bangalore, uma cidade indiana com sérios problemas de poluição veicular. Durante os anos de 1997 a 2005, o índice de qualidade do ar médio indicou categorias de bom a moderado em 85-90% do tempo de estudo, restando apenas uma parcela menor caracterizada como ruim e muito ruim. Essa tendência de decréscimo dos valores do índice de qualidade do ar é resultado da iniciativa do governo indiano de introduzir um amplo controle da poluição, a fim de melhorar a qualidade do ar urbano.

Entre 1985 e 2005, Mayer et al. (2008) estudaram, no sudoeste da Alemanha, a evolução da poluição do ar em áreas urbanas, influenciadas por diferentes fontes locais de emissão, e rurais, caracterizando as concentrações de fundo como um todo. Suas análises mostraram uma melhora na qualidade do ar em todas as áreas urbanas, com os índices evoluindo de muito ruim e ruim no início do período de investigação para suficiente e satisfatório após o ano de 2000. Nas áreas rurais, puderam ser determinados apenas os dados entre 1995 e 2005, indicando qualidade boa e satisfatória, mas sem tendência de decréscimo.

No nordeste da Europa continental, Buchholz et al. (2010) analisaram as características da poluição do ar entre 2001 e 2007. Seus resultados mostraram que as variações nos índices de qualidade do ar diários estão associadas às diferentes

características de emissão, indicando qualidade suficiente a pobre nas áreas industriais e próximas de vias de tráfego, e qualidade satisfatória em estações que representam as concentrações de fundo da área urbana como um todo.

No Brasil, existem inúmeras fontes de contaminantes atmosféricos, dentre as quais podem ser destacadas a queima de biomassa, as emissões industriais e as emissões veiculares. Logo, a medição das concentrações de poluentes, como ozônio, óxidos de nitrogênio, material particulado, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e hidrocarbonetos, nas cidades brasileiras é de suma importância para auxiliar na avaliação da qualidade do ar.

Neste estudo, são destacados três municípios do Estado de São Paulo que apresentam diferentes perfis econômicos e fontes de poluição características nas redondezas. A cidade de Rio Claro está situada em uma região com grande predomínio do plantio de cana-de-açúcar e, por consequência, com grande queima de biomassa antecedendo o corte da lavoura. As emissões industriais destacam-se no município de Cubatão, cuja localização próxima à Serra do Mar é desfavorável à dispersão dos poluentes. Situada no Vale do Paraíba às margens na Rodovia Presidente Dutra, Cachoeira Paulista é uma cidade pequena caracterizada por não possuir indústrias e plantio de cana nas redondezas, sendo as emissões veiculares as fontes de poluição mais próximas do município. Em relação às atividades econômicas, o município mais desenvolvido é Cubatão, seguido de Rio Claro, em nível intermediário, e, por último, Cachoeira Paulista, com característica predominantemente rural.

No presente trabalho, realizou-se uma análise da qualidade do ar nos três municípios através do monitoramento da concentração dos poluentes ozônio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, partículas menores que $10 \mu\text{m}$ e hidrocarbonetos metano e não-metano, a fim de se determinar o comportamento médio diário local dessas substâncias. Para esta análise, dados de concentração dos poluentes foram coletados com auxílio de amostradores instalados em um laboratório móvel. Para os poluentes monitorados pela legislação, é calculado o Índice de Qualidade do Ar, um parâmetro utilizado para qualificar o ar com base nos efeitos aos quais está sujeita a saúde da população. O comportamento médio local das variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, precipitação e radiação solar, também é analisado, com o objetivo de verificar a influência so-

bre o perfil dos poluentes.

Em relação à estrutura deste trabalho, são apresentadas na Seção 2 as características da atmosfera e de seus constituintes, bem como uma descrição da poluição atmosférica e das substâncias classificadas como poluentes. Também são descritas informações sobre os padrões nacionais de qualidade do ar, características dos fatores que influenciam na dispersão dos poluentes, além da importância de se realizar o monitoramento da qualidade do ar.

Na Seção 3, é feita uma descrição do laboratório móvel e do princípio de funcionamento dos analisadores de poluentes, além da caracterização dos locais de monitoramento. Também são apresentadas as metodologias utilizadas para a aquisição e o tratamento dos dados de concentração de poluentes e das informações meteorológicas.

Os resultados do monitoramento da qualidade do ar em cada local são apresentados na Seção 4 e, na Seção 5, as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo caracterizar a qualidade do ar a partir do monitoramento da concentração de poluentes em três cidades do Estado de São Paulo (Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista), as quais possuem características econômicas distintas (semi-rural, industrial e rural, respectivamente) e estão sujeitas à influência de fontes de emissão de poluentes, principalmente queima de biomassa, indústrias e veículos, respectivamente.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento da concentração dos poluentes (ozônio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, partículas menores que $10 \mu\text{m}$ e hidrocarbonetos metano e não-metano) nos três municípios de estudo;
- Verificar a influência das condições meteorológicas locais na dispersão dos poluentes;
- Calcular o Índice de Qualidade do Ar em relação a cada poluente;

- Classificar a qualidade do ar local durante o período de monitoramento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Atmosfera

A atmosfera consiste em uma fina camada gasosa presa por atração gravitacional que envolve a superfície terrestre, composta por uma mistura de gases que abrange tanto espécies com concentrações mais estáveis, como o nitrogênio e o oxigênio, quanto aquelas com alta variabilidade, como o vapor d'água.

Até uma altura de aproximadamente 100 km, a atmosfera apresenta-se como uma camada com composição uniforme, conhecida como homosfera, uma vez que os movimentos turbulentos existentes nessa região proporcionam uma mistura efetiva do fluido. Acima dessa altura, o processo de difusão molecular pelos movimentos aleatório das moléculas torna-se dominante, determinando a composição da atmosfera local conhecida como heterosfera (CHANDRASEKAR, 2010).

A atmosfera também é dividida verticalmente em camadas, segundo suas características térmicas. Na parte mais baixa, a troposfera caracteriza-se por apresentar a temperatura diminuindo com a altura e é a região mais importante do ponto de vista meteorológico, uma vez que concentra cerca de 75% da massa total da atmosfera e quase toda quantidade de vapor d'água, o que propicia a presença de praticamente todas as nuvens e dos fenômenos meteorológicos decorrentes de sua presença. Em relação a sua espessura, ocorrem variações dependendo da latitude e da época do ano, abrangendo nos polos e na região tropical, em média, alturas de, respectivamente, 6 e 15 km no inverno e de 10 e 18 km no verão. Em seguida, há a estratosfera, que se estende, para além da tropopausa, até quase 50 km, na qual a temperatura aumenta com a altura devido à absorção da radiação solar pela camada de átomos de ozônio (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Segundo Manahan (2000), a importância da atmosfera está relacionada ao fato dela atuar como uma manta protetora contra o ambiente hostil do espaço e "nutrir" a vida na Terra. Além de intermediar o fornecimento de dióxido de carbono para as plantas e de oxigênio para a respiração, a atmosfera também participa do ciclo hidrológico, transportando água dos oceanos para o continente, absorvendo a maioria dos raios cósmicos do espaço e a maioria da radiação eletromagnética vinda do sol, filtrando a radiação nociva aos organismos vivos e evitando que ela atinja a superfície terrestre. Ao reabsorver grande parte da radiação emitida pela

superfície, acaba promovendo a estabilização da temperatura da Terra.

A capacidade que os componentes atmosféricos possuem de transmitir a radiação de onda curta vinda do Sol e absorver uma grande fração da radiação de onda longa vinda da superfície terrestre é o fator responsável por impedir a dispersão total do calor para o espaço, possibilitando um aquecimento natural do planeta. Esse efeito, conhecido como efeito estufa, advindo da própria natureza é imprescindível para a manutenção da vida na Terra. Contudo, o aumento da concentração de componentes que contribuem para o efeito estufa eleva a quantidade de calor retida na atmosfera, provocando o desequilíbrio do sistema térmico natural. Os principais gases de efeito estufa emitidos antropogênicamente são dióxido de carbono, metano, clorofluorcarbonos (CFC's) e óxido nitroso. (RODHE, 1990; CLINE, 1991; NORDHAUS, 1991).

Apesar de ser um grande receptáculo de poluentes gerados pelas atividades humanas, o ar tem a capacidade de dispersar e diluir os poluentes rapidamente, diminuindo os efeitos locais. Porém, ao reconduzir os poluentes ao solo através de precipitação seca e úmida, pode levar à contaminação dos ecossistemas terrestres e aquáticos (TURCO, 1997).

2.1.1 Constituintes Atmosféricos

Os gregos antigos consideravam que todas as coisas materiais eram compostas por quatro elementos eternos e imutáveis, sendo o ar um desses elementos (os outros eram terra, fogo e água). John Mayow, em 1676, sugeriu que o ar era composto por uma mistura de dois componentes distintos, um que sustentava a combustão e a vida ("*fire-air*"), nomeado mais tarde de oxigênio por Antoine-Laurent Lavoisier, e o outro que não tinha essa habilidade ("*foul-air*"), ao qual Daniel Rutherford denominou nitrogênio (TURCO, 1997; WALLACE; HOBBS, 2006).

Considerando um volume de ar seco, o componente gasoso dominante é o nitrogênio (N_2), que ocupa aproximadamente 78% desse volume, seguido de oxigênio (O_2), com uma fração de aproximadamente 21%, argônio (Ar), com quase 0,9%, e dióxido de carbono (CO_2), com aproximadamente 0,03%. Os demais gases apresentam níveis traço de concentração e são também de grande importância devido a sua reatividade (MANAHAN, 2000; WALLACE; HOBBS, 2006). Na Tabela 2.1, estão listados alguns dos gases constituintes da atmosfera.

Tabela 2.1 - Gases que compõem o ar troposférico seco.

Gás	Fórmula química	Fração de volume de ar ocupada pelas espécies (à pressão de 1 atm)	Tempo de residência (tempo de vida)	Fontes principais
Nitrogênio	N ₂	78,084%	1,6x10 ⁷ anos	Biológica
Oxigênio	O ₂	20,946%	3000-4000 anos	Biológica
Argônio	Ar	0,934%	-	Radiogênica
Dióxido de carbono	CO ₂	379 ppm(v)	3-4 anos	Biológica, oceânica e combustão (concentração aumentando)
Neônio	Ne	18,8 ppm(v)	-	Vulcânica(?)
Hélio	He	5,24 ppm(v)	-	Radiogênica
Metano	CH ₄	1,7 ppm(v)	9 anos	Biológica e antropogênica
Hidrogênio	H ₂	0,56 ppm(v)	≈ 2 anos	Biológica e antropogênica
Óxido nitroso	N ₂ O	0,31 ppm(v)	156 anos	Biológica e antropogênica
Monóxido de carbono	CO	40-200 ppb(v)	≈ 60 anos	Fotoquímica, combustão e antropogênica
Ozônio	O ₃	10-100 ppb(v)	Dias-Semanas	Fotoquímica
Hidrocarbonetos não-metano (NMHC)	-	40-200 ppb(v)	Variável	Biológica e antropogênica
Halocarbonos	-	3,8 ppb(v)	Variável	Principalmente antropogênica
Peróxido de hidrogênio	H ₂ O ₂	0,1-10 ppb(v)	1 dia	Fotoquímica
Formaldeído	HCHO	0,1-1 ppb(v)	≈ 1,5h	Fotoquímica
Espécies nitrogenadas [NO + NO ₂ (=NO _x) + NO ₃ ⁻ + N ₂ O ₅ + HNO ₃ + PAN]	NO _y	10 ppt(v)-1 ppm(v)	Variável	Solos, antropogênica e relâmpagos

(Continua)

Tabela 2.1 - Conclusão

Gás	Fórmula química	Fração de volume de ar ocupada pelas espécies	Tempo de residência (tempo de vida)	Fontes principais
Amônia	NH ₃	10 ppt(v)-1 ppb(v)	2-10 dias	Biológica
Dióxido de enxofre	SO ₂	10 ppt(v)-1 ppb(v)	Dias	Fotoquímica, vulcânica e antropogênica
Sulfeto de dimetila (SDM)	CH ₃ SCH ₃	10-100 ppt(v)	0,7 dias	Biológica e oceânica
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	5-500 ppt(v)	1-5 dias	Biogênica e vulcânica
Disulfeto de carbono	CS ₂	1-300 ppt(v)	≈ 120 h	Biológica e antropogênica
Radical hidroxila	OH ⁻	0-0,4 ppt(v)	≈ 1s	Fotoquímica
Radical hidroperóxil	HÓ ₂	0-5 ppt(v)	-	Fotoquímica

Fonte: Adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

A atmosfera também contém vapor d'água, com uma concentração variando de 1 a 4% (v/v), e considerável quantidade de material particulado (WALLACE; HOBBS, 2006).

2.1.1.1 Constituintes Gasosos

Segundo Holloway e Wayne (2010), os constituintes gasosos estão presentes na atmosfera advindos de seu aprisionamento juntamente com o material que formou a Terra, de sua emissão subsequente por algumas fontes ou de sua geração como resultado de algumas transformações químicas.

Apesar de ser encontrado em maior concentração, o nitrogênio é considerado quimicamente inerte, devido à forte energia de ligação entre os dois átomos de sua molécula. É removido da atmosfera principalmente por processos biológicos que envolvem bactérias do solo e plânctons que habitam os oceanos. Em contrapartida, retorna à atmosfera através da decomposição de plantas e animais (AHRENS, 2008).

O oxigênio é o segundo gás mais abundante na atmosfera e apresenta-se como

um participante muito mais ativo, já que ocorrem muitos processos oxidantes na atmosfera. A principal fonte de oxigênio para a atmosfera é o processo de fotossíntese, no qual as plantas, na presença de luz solar, transformam dióxido de carbono e água em glicose e oxigênio. Através da decomposição de matéria orgânica, da formação de óxidos e durante a respiração, o oxigênio acaba sendo removido da atmosfera (WALLACE; HOBBS, 2006; AHRENS, 2008).

De acordo com Frederick (2008), o argônio é produzido através do decaimento radioativo de um isótopo de potássio na crosta terrestre. Sendo um gás nobre e, logo, um gás inerte, não participa significativamente do ciclo de reações químicas na atmosfera.

O vapor de água é um constituinte cuja concentração varia bastante no tempo e no espaço, apresentando valores elevados nas regiões equatoriais e tropicais. Constitui também um gás de efeito estufa, absorvendo radiação e evitando que parte dela seja perdida para o espaço. Também desempenha um papel importante no ciclo hidrológico e no balanço de energia (HOLLOWAY; WAYNE, 2010).

Apesar de ocupar um percentual pequeno do volume de ar, o dióxido de carbono é muito importante para química atmosférica por ser também um gás de efeito estufa. É inserido na atmosfera através da decomposição da vegetação, a partir de erupções vulcânicas, é exalado pela vida animal, além de ser liberado por fontes antropogênicas. Por outro lado, é removido através da fotossíntese, na qual os vegetais consomem CO_2 para produzir açúcar, como também através da dissolução direta nas águas superficiais (AHRENS, 2008).

O hidrocarboneto mais abundante e menos reativo na atmosfera é o metano (CH_4), derivado, por exemplo, da decomposição da matéria orgânica, de processos digestivos em animais ruminantes e da atividade biológica de cupins. Os hidrocarbonetos com maior potencial poluidor são aqueles reativos emitidos pelos automóveis, os quais, na presença de óxido de nitrogênio sob condições de baixa umidade, luz solar e inversão térmica, produzem "*smog*"¹ fotoquímico, o qual é caracterizado pela presença de material particulado obscurecendo a visibilidade, de oxidantes como o ozônio e de espécies orgânicas nocivas como os aldeídos (MANAHAN, 2000).

Óxidos de enxofre são importantes constituintes atmosféricos com alto poten-

¹"Smog" é um termo em inglês derivado das palavras "*smoke*" (fumaça) e "*fog*" (neblina).

cial poluidor. A origem primária dos poluentes sulfúricos é o enxofre dos combustíveis, cuja queima o transforma em um composto prejudicial aos humanos e às plantas e um grande contribuinte para a formação de chuva ácida, o dióxido de enxofre (SO₂). Outros compostos sulfurados, como o ácido sulfídrico (H₂S) e o sulfeto de carbonila (COS), também estão presentes no ar, advindos de erupções vulcânicas e gerados por organismos vivos (JONES, 2008; HOLLOWAY; WAYNE, 2010).

Outros componentes atmosféricos considerados poluentes são os óxidos de nitrogênio. O óxido nitroso (N₂O) é liberado a partir do solo como resultado das atividades microbiológicas. A combustão do nitrogênio atmosférico ocorrendo em altas temperaturas, proporcionada, por exemplo, por descargas elétricas, é um dos caminhos que leva à formação de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), conhecidos como NO_x. De forma geral, são emitidos em processos de combustão veicular, em processos industriais e pelas usinas termoelétricas que utilizam óleo combustível ou gás natural (WALLACE; HOBBS, 2006; JONES, 2008).

2.1.1.2 Partículas

As partículas presentes na atmosfera variam desde agregados de pequenas moléculas até pedaços de poeira facilmente visíveis a olho nu, podendo estar na forma líquida ou sólida. Partículas pequenas suspensas no ar são chamadas aerossóis, as quais, quando líquidas, são conhecidas como nuvens ou névoa, e, quando sólidas, recebem o nome de fumaça ou poeira (HOLLOWAY; WAYNE, 2010).

Na Tabela 2.2, estão ilustrados os termos comumente utilizados para descrever as partículas atmosféricas.

Para exemplificar partículas sólidas muito pequenas, podem ser citados "*black carbon*", iodeto de prata e núcleos de sal marinho. Como partículas sólidas maiores, estão incluídos pó de cimento, poeira de terra, pó de fundição e carvão pulverizado. No grupo de material particulado líquido, são exemplos gotas de chuva, nevoeiro e névoa de ácido sulfúrico (MANAHAN, 2000).

Tabela 2.2 - Termos que descrevem as partículas atmosféricas.

Termo	Significado
Aerossol	Partícula atmosférica de tamanho coloidal
Aerossol de condensação	Formado pela condensação de vapores ou reações de gases
Aerossol de dispersão	Formado pela moagem de sólidos, atomização de líquidos ou dispersão de poeiras
Nevoeiro	Termo denotando níveis altos de gotículas de água
Neblina	Denota visibilidade diminuída devido à presença de partículas
Névoas	Partículas líquidas
Fumaça	Partículas formadas pela combustão incompleta de combustível

Fonte: Adaptada de Manahan (2000).

Dependendo de sua origem, os aerossóis podem surgir a partir de fontes naturais ou antropogênicas. Fontes antropogênicas são aquelas determinadas pelas atividades humanas, como processos industriais, escapamento de automóveis, queima de biomassa, queima de combustíveis fósseis, mineração e erosões do solo na agricultura. Dessas atividades, resultam importantes tipos de aerossóis, como as partículas de fuligem e fumaça. A entrada desses aerossóis antropogênicos na atmosfera representa, aproximadamente, 20% dos advindos de fontes naturais (KONDRATYEV et al., 2006; WALLACE; HOBBS, 2006).

Já as fontes naturais são as responsáveis pela liberação de aerossóis de origem biológica e a partir da superfície terrestre. As partículas biológicas incluem sementes, pólen, esporos e fragmentos animais. Nesse grupo, também estão incluídos fumaça liberada pela queima de florestas e os aerossóis compostos por sal marinho, originados a partir de gotículas ejetadas na atmosfera quando as bolhas de ar se rompem na superfície do mar. A partir da superfície terrestre, as partículas podem ser transferidas para a atmosfera através de erupções vulcânicas, a partir dos ventos e da turbulência atmosférica, nos quais os grãos tornam-se aéreos e, ao retornarem ao solo, criam uma explosão de partículas de poeira no ar (WALLACE; HOBBS, 2006).

Os principais modos de transporte dos aerossóis são os ventos atmosféricos e os movimentos relativos do ar de convecção, advecção e turbulência. As partículas menores estão sujeitas aos processos de difusão através de movimentos

Brownianos, movimentos irregulares e aleatórios causados pelas flutuações na taxa na qual as partículas são bombardeadas pelas moléculas dos gases que as cercam (TURCO, 1997).

Em relação aos mecanismos de remoção, as partículas podem sofrer deposição seca, na qual precisam ter tamanho suficientemente grande para serem removidas gravitacionalmente, ou serem removidas por precipitação ou deposição úmida. Os aerossóis também podem sofrer processo de coagulação quando colidem uns com os outros para formarem partículas maiores. Isso proporciona um efeito direto de redução do número de partículas no ar e possibilita uma deposição seca mais rápida (MANAHAN, 2000).

A presença dos aerossóis na atmosfera proporciona inúmeros efeitos, dos quais o mais perceptível está relacionado à distorção ou à redução de visibilidade. Esses efeitos ocorrem devido à capacidade dos aerossóis de espalhar e absorver radiação. Outro efeito está relacionado à alteração da transferência de radiação solar na atmosfera, já que enquanto alguns aerossóis absorvem a radiação solar incidente, levando ao aumento da temperatura do ar, outros espalham a radiação solar de volta para o espaço, causando diminuição de temperatura (CHANDRASEKAR, 2010).

Os efeitos causados pelas partículas à saúde humana estão diretamente relacionados ao seu tamanho. Segundo a Agência de Proteção Ambiental Norteamericana (EPA, 2011), as partículas menores que $10 \mu\text{m}$ são as que, geralmente, passam através da garganta e do nariz e alcançam os pulmões. Por isso que, uma vez inaladas, podem causar sérios problemas à saúde.

Uma característica dos aerossóis líquidos é que podem reagir em solução. Quando são sólidos, fornecem uma superfície ativa, sobre a qual reações químicas podem ocorrer e gases traço podem ser absorvidos. Servindo como base, são utilizados como núcleos de condensação de vapor de água, exercendo uma grande influência sobre o tempo e sobre os fenômenos de poluição atmosférica (MANAHAN, 2000).

2.2 Poluição Atmosférica

O direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, considerado como bem de uso comum do povo e essencial para uma qualidade de vida sadia, é garantido a todos pelo Artigo 225 da Constituição Federal de 1988. Sendo o ar parte integrante dos elementos que influenciam diretamente o habitat humano, sua preservação deve ser defendida pelo Poder Público e pela coletividade (BRASIL, 1988).

Segundo Jacobson (2002), a partir do momento em que gases ou partículas emitidos antropogenicamente apresentam uma concentração suficientemente alta, podendo acarretar efeitos diretos ou indiretos aos seres vivos, ao ecossistema, ao patrimônio nacional e ao clima regional, surge um problema de poluição do ar. Na Tabela 2.3, estão ilustrados alguns importantes componentes envolvidos nessa temática.

Tabela 2.3 - Alguns gases e partículas relacionados a tópicos de poluição do ar.

Poluição do ar em ambientes fechados	Poluição do ar em ambientes urbanos abertos	Deposição ácida	Redução do ozônio estratosférico	Mudanças climáticas globais
Gases				
Dióxido de nitrogênio	Ozônio	Dióxido de enxofre	Ozônio	Vapor d'água
Monóxido de carbono	Óxido nítrico	Ácido sulfúrico	Óxido nítrico	Dióxido de carbono
Formaldeído	Dióxido de nitrogênio	Dióxido de nitrogênio	Ácido nítrico	Metano
Dióxido de enxofre	Monóxido de carbono	Ácido nítrico	Ácido hidrocloreídrico	Óxido nitroso
Gases orgânicos	Eteno	Ácido hidrocloreídrico	Nitrato de cloro	Ozônio
Radônio	Tolueno Xileno PAN***	Dióxido de carbono	CFC-11* CFC-12**	CFC-11* CFC-12**
Componentes de partículas de aerossol				
Carbono negro	Carbono negro	Sulfato	Cloreto	Carbono negro
Matéria orgânica	Matéria orgânica	Nitrato	Sulfato	Matéria orgânica
Sulfato	Sulfato	Cloreto	Nitrato	Sulfato
Nitrato	Nitrato			Nitrato

(Continua)

Tabela 2.3 - Conclusão

Poluição do ar em ambientes fechados	Poluição do ar em ambientes urbanos abertos	Deposição ácida	Redução do ozônio estratosférico	Mudanças climáticas globais
Componentes de partículas de aerossol				
Amônio	Amônio			Amônio
Alérgenos	Poeira sólida			Poeira sólida
Asbestos	"Spray" marinho			"Spray" marinho
Esporos de fungos	Partículas de pneus			
Pólenes	Chumbo			
Fumaça de tabaco				

* Triclorofluormetano

** Diclorofluormetano

*** Peroxiacetil nitrato

Fonte: Adaptada de Jacobson (2002).

2.2.1 Breve Histórico

Os primeiros indícios de poluição do ar apareceram na era pré-cristã, época na qual o carvão era utilizado como combustível e a sociedade estava exposta a um ambiente com qualidade muito aquém do desejável (BRAGA et al., 2002; COELHO, 2007). Com o advento da Revolução Industrial, a fumaça que emanava das fábricas passou a ser sinônimo de progresso e o pensamento da sociedade era descrito como: "Onde há sujeira, há dinheiro" (BEST, 1999). Sendo essa a expressão da época, a poluição era vista como sinal de expansão econômica e progresso tecnológico (LYRA, 2008).

Foi apenas após o acontecimento de trágicos episódios de excessiva poluição pelo mundo, dos quais os mais expressivos ocorreram na Europa e nos Estados Unidos, que a comunidade científica visualizou concretamente a necessidade do controle de emissões de poluentes. O primeiro deles ocorreu em 1930 na região industrial do Vale de Meuse na Bélgica, onde os poluentes emitidos permaneceram estacionados sobre a região devido às condições meteorológicas desfavoráveis que impediram sua dispersão, causando doenças e dezenas de mortes. Em 1948, em Donora na Pensilvânia (Estados Unidos), uma nuvem de poluentes emitidos pelas indústrias locais ficou estacionada sobre a cidade, ocasionando também problemas de saúde e mortes. Porém, o episódio mais grave ocorreu na cidade de Londres durante o inverno de 1952. A emissão de SO₂ e de

material particulado na região formou um nevoeiro de poluentes, o qual não pôde ser disperso devido ao fenômeno de inversão térmica, o que levou a milhares de mortes (BRAGA et al., 2002; COELHO, 2007; LYRA, 2008).

A partir desses acidentes, medidas governamentais foram adotadas visando ao controle da poluição ambiental. No Reino Unido, o "*Clean Air Act*" de 1956 introduziu um novo conceito de "áreas de controle de fumaça", nas quais era restrita a queima de combustíveis que emitissem fumaça (BEST, 1999). Nos Estados Unidos, o "*Clean Air Act*" de 1963 autorizou as pesquisas em técnicas de monitoramento e controle da poluição do ar e, em 1971, foi criada a Agência de Proteção Ambiental norte-americana, "*Environmental Protection Agency - EPA*", a fim de implementar as várias exigências legais ambientais. A partir de 1990, a EPA passou a ser a autoridade responsável por definir os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente para poluentes considerados nocivos à saúde pública e ao meio ambiente (EPA, 2011).

2.2.2 Caracterização dos Poluentes Atmosféricos

Segundo o Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976 de São Paulo (SÃO PAULO (Estado), 1976):

Artigo 3º - Considera-se poluente toda e qualquer forma de matéria ou energia lançada ou liberada nas águas, no ar ou no solo:

I - com intensidade, em quantidade e de concentração, em desacordo, com os padrões de emissão estabelecidos neste regulamento e normas dele decorrentes;

II - com características e condições de lançamento ou liberação, em desacordo com os padrões de condicionamento e projeto estabelecidos nas mesmas prescrições;

III - por fontes de poluição com características de localização e utilização em desacordo com os referidos padrões de condicionamento e projeto;

IV - com intensidade, em quantidade e de concentração ou com características que, direta ou indiretamente, tornem ou possam tornar ultrapassáveis os padrões de qualidade do meio ambiente estabelecidos neste regulamento e normas

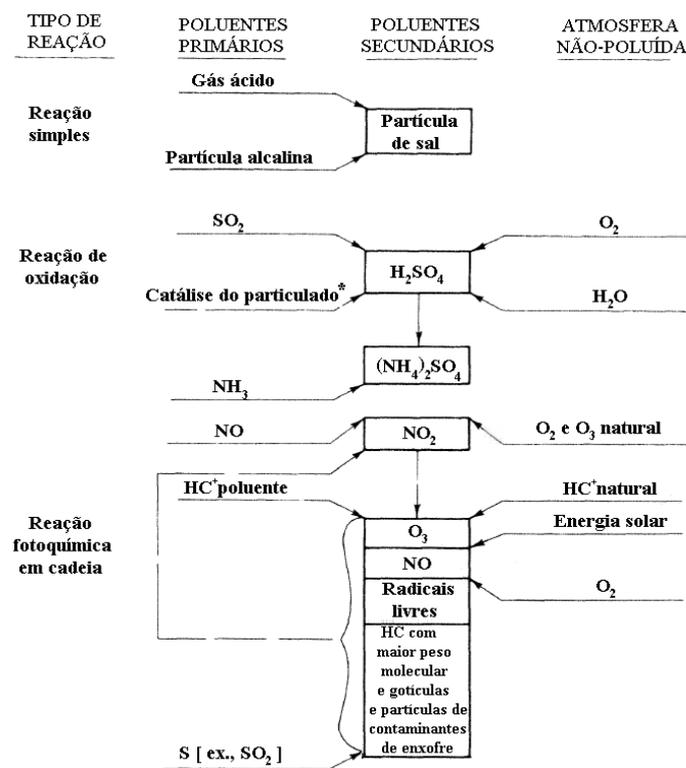
dele decorrentes;

V - que, independentemente de estarem enquadrados nos incisos anteriores, tornem ou possam tornar as águas, o ar ou o solo impróprios, nocivos ou ofensivos à saúde; inconvenientes ao bem-estar público; danosos aos materiais, à fauna e à flora, prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade, bem como às atividades normais da comunidade.

Em suma, poluentes atmosféricos caracterizam-se por ser qualquer substância presente no ar que possa torná-lo impróprio, inconveniente ao bem-estar da população e nocivo à saúde, aos materiais, à segurança, às atividades normais da sociedade e ao uso e gozo da propriedade (LYRA, 2008; CETESB, 2011).

Existe uma vasta quantidade de poluentes na atmosfera, podendo estar na forma de gases, partículas sólidas, gotas ou no estado líquido. Em relação a sua composição química, podem pertencer ao grupo de compostos de enxofre, compostos de nitrogênio, compostos orgânicos, halogenados, material particulado, ozônio e monóxido de carbono (CETESB, 2011).

Os poluentes também podem ser classificados como primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente na atmosfera (SÃO PAULO (Estado), 1976), como, por exemplo, CO e NO emitidos pelos automóveis e a fumaça liberada pelas instalações industriais (BOUBEL et al., 1994; TURCO, 1997). Já os poluentes secundários são gerados na atmosfera ao longo do tempo a partir de interações químicas entre seus precursores (SÃO PAULO (Estado), 1976). Dentre os secundários, estão o ozônio gerado fotoquimicamente no "smog" e finas partículas de aerossóis formadas a partir da condensação de vapores orgânicos (BOUBEL et al., 1994; TURCO, 1997). Na Figura 2.1, estão ilustrados os poluentes primários e secundários.



* Reação pode ocorrer sem catálise (HC⁺, hidrocarbonetos).

Figura 2.1 - Poluentes primários e secundários.
Fonte: Adaptada de Boubel et al. (1994).

A presença e a concentração de determinadas espécies químicas na atmosfera são fatores responsáveis por indicar a qualidade do ar em uma região. A seguir, serão descritas características dos principais poluentes atmosféricos.

2.2.2.1 Material Particulado

Como já foi exposto, o material particulado consiste em todo material sólido ou líquido que se mantém em suspensão na atmosfera, devido a seu pequeno tamanho, como resultado tanto de emissões naturais, como as erupções vulcânicas e os aerossóis marinhos, como de fontes antropogênicas, como processos industriais e veículos automotores (HOLLOWAY; WAYNE, 2010; CETESB, 2011).

Segundo a Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Defesa do Meio Ambiente (CETESB, 2011), os três grandes grupos de material particulado incluem fumaça, partículas totais em suspensão e partículas inaláveis.

- Fumaça

A fumaça (FMC) representa as pequenas partículas suspensas no ar resultantes de processos de combustão incompleta (MANAHAN, 2000; CETESB, 2011). Consistem predominantemente de carbono e outros materiais combustíveis e estão presentes em quantidade suficiente para serem observadas independentemente da presença de outros sólidos (SEINFELD; PANDIS, 2006). Segundo a CETESB (2011), sua determinação é com base na medida da refletância da luz que incide sobre a amostra de poeira.

- Partículas Totais em Suspensão

As partículas totais em suspensão (PTS) podem ser definidas como aquelas que possuem um diâmetro menor que 100 μm (LYRA, 2008; FEPAM, 2011). Parte dessas partículas pode ser inalada, provocando problemas à saúde, e as demais podem interferir nas condições estéticas do meio ambiente e prejudicar as atividades da população (CETESB, 2011).

Segundo a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM, 2011), as principais fontes antropogênicas de PTS são processos industriais, exaustão de veículos automotores, queima de biomassa e poeira de rua suspensa; enquanto que pólen e aerossóis marinhos são enquadrados como fontes naturais.

- Partículas Inaláveis

As partículas inaláveis (PM_{10}) correspondem àquelas cujo diâmetro é menor que 10 μm . Podem ser subdivididas entre partículas finas e grossas.

As partículas grossas apresentam diâmetro entre 2,5 e 10 μm (CETESB, 2011; EPA, 2011), e, por possuírem uma massa maior, sofrem rápida remoção gravitacional a partir do ar ambiente. São menos nocivas aos humanos, uma vez que podem ser facilmente retidas no sistema respiratório superior (ZANNETTI, 1990).

No processo de combustão, estruturas aromáticas são sintetizadas dentro da chama e transformadas em hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA). Uma parte desses HPA, que são fortes carcinogênicos, é liberada pela chama. A outra parte permanece dentro da zona de reação por tempo suficiente para ser transformada em PM_{10} . Através desse tipo de processo, podem ser consideradas

fontes de partículas grossas os veículos automotores, as indústrias que geram energia a partir de combustíveis sólidos, como o carvão, e de óleo combustível pesado. Queima de biomassa e ressuspensão de partículas do solo são também outras fontes de PM_{10} (JONES, 2008).

Já as partículas finas enquadram-se no grupo com diâmetro menor que $2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) e são consideradas mais importantes devido a seus efeitos adversos na saúde humana, por serem capazes de atingir os alvéolos pulmonares quando inaladas (CETESB, 2011; EPA, 2011), e aos danos à visibilidade (ZANNETTI, 1990; CHANDRASEKAR, 2010; EPA, 2011). Essas partículas podem ser emitidas diretamente através de queimadas ou formadas quando gases liberados por plantas industriais, instalações de geração de energia ou automóveis reagem no ar (EPA, 2011).

Segundo a CETESB (2011), estudos realizados na Região Metropolitana de São Paulo mostraram que os veículos automotores, principalmente os a diesel, e as poeiras ressuspensas das ruas são responsáveis pela emissão de, respectivamente, 40% e 25% do total dessas partículas.

2.2.2.2 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre (SO_2) é um gás incolor capaz de exibir sabor em concentrações maiores que 0,3 ppm e um forte odor em níveis maiores que 0,5 ppm (JACOBSON, 2002). Juntamente com o trióxido de enxofre (SO_3), faz parte do grupo de gases altamente reativos conhecido como óxidos de enxofre (SO_x) (EPA, 2011).

Diretamente na forma de poluente primário, o SO_2 pode ser liberado por fontes naturais, como vulcões. Contudo, as fontes que mais contribuem com sua emissão são as antropogênicas, das quais pode-se destacar a queima de combustíveis fósseis que contém enxofre, como carvão e petróleo, processos de fundição de metais e outros processos industriais (TRESMONDI, 2003; MONTALI, 2010; FEPAM, 2011). Segundo a EPA (2011), as maiores fontes de emissão de SO_2 são os processos de combustão de combustíveis fósseis em plantas de geração de energia, as quais contribuem com 73% da emissão.

A quantidade de SO_2 produzida pela queima de combustíveis fósseis é proporcional ao teor de enxofre presente no combustível (DAVIS; CORNWELL, 1998), po-

dendo ser visualizado através da Equação 2.1.



Como um poluente secundário, o SO_2 é produzido quimicamente no ar a partir da oxidação de H_2S liberado por decomposição biológica e por algumas fontes industriais (JACOBSON, 2002; TRESMONDI, 2003), bem como da oxidação de sulfeto de dimetila (CH_3SCH_3 - SDM) liberado predominantemente por reações biológicas nos oceanos envolvendo certas espécies de algas (SEINFELD; PANDIS, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006).

O SO_2 pode reagir com outras substâncias no ar, formando pequenas partículas de sais de sulfato, as quais podem causar diminuição da visibilidade na atmosfera (CETESB, 2011), como também penetrar nas partes sensíveis dos pulmões, causando ou piorando doenças respiratórias (EPA, 2011). Ao ser oxidado em presença de vapor de água, dá origem ao ácido sulfúrico (H_2SO_4), um dos principais constituintes da chuva ácida, a qual, uma vez formada, pode acarretar muitos impactos ao meio ambiente, como danos à vegetação, e às heranças culturais, como danos aos monumentos históricos (MONTALI, 2010; FEPAM, 2011).

Esse poluente sulfuroso estava presente no famoso episódio de poluição ocorrido em Londres em 1952. O típico "smog" de Londres foi resultado do acúmulo de fumaça proveniente da queima de carvão utilizada, na época, para gerar energia e calor. Essa fumaça continha altas concentrações de enxofre, o que proporcionou a formação de ácido sulfúrico nas gotículas de nevoeiro. Juntamente com a densa camada de fumaça e fuligem, as partículas sulfurosas inibiram o funcionamento normal dos pulmões, proporcionando inúmeros problemas respiratórios e a morte de milhares de pessoas (TURCO, 1997).

2.2.2.3 Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) consiste em um gás incolor, inodoro e insípido, que, apesar de não absorver radiação suficiente para ser considerado um gás de efeito estufa, sua oxidação à CO_2 afeta o clima global, sendo essa conversão seu principal mecanismo de sumidouro (JACOBSON, 2002). Sua remoção a partir de microorganismos do solo também constitui uma forma de evitar seu acúmulo na atmosfera (DAVIS; CORNWELL, 1998; MANAHAN, 2000; SEINFELD; PANDIS, 2006).

O principal mecanismo de formação de CO é através da queima incompleta de

combustíveis, o que torna o sistema de exaustão de veículos sua maior fonte. Segundo a CETESB (2011), estima-se que 98% da quantidade de CO emitida na Região Metropolitana de São Paulo sejam provenientes dos veículos automotores. O CO também pode ser liberado através da queima de biomassa, erupções vulcânicas, queimadas e atividades industriais (JACOBSON, 2002; EPA, 2011).

Efeitos nocivos à saúde podem ser causados quando há exposição ao CO (EPA, 2011). Normalmente, o oxigênio do ar é dissolvido no sangue ao associar-se à hemoglobina, a fim de ser transportado para os órgãos e tecidos do corpo. Porém, quando o CO é inalado, acaba sendo absorvido pelos pulmões e penetrando na corrente sanguínea, na qual irá reagir com a hemoglobina, formando carboxihemoglobina (CO-Hb). Como a hemoglobina tem maior afinidade pelo CO do que pelo O₂, haverá diminuição da capacidade do sangue em carregar oxigênio para as células (TURCO, 1997; DAVIS; CORNWELL, 1998). Os sintomas apresentados estão associados ao nível de exposição sofrido pelo indivíduo e podem variar desde uma dor de cabeça até, em casos extremos, a morte (JACOBSON, 2002).

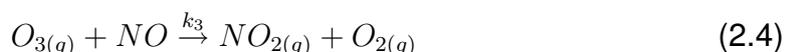
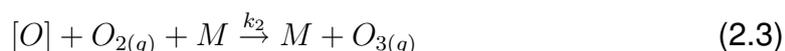
2.2.2.4 Ozônio

O ozônio (O₃) consiste em um gás quimicamente muito ativo, incolor e inodoro (FEPAM, 2011). Em concentrações elevadas, apresenta uma coloração levemente púrpura, ao absorver fracamente o comprimento de onda equivalente à luz verde no visível e transmitir vermelho e azul, e exibe um odor ao exceder 0,2 ppm (JACOBSON, 2002).

A denominação "oxidantes fotoquímicos" é utilizada para se referenciar a uma mistura de poluentes secundários formados por reações, na presença de luz, envolvendo óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (COV's), os quais são liberados na queima incompleta e na evaporação de combustíveis e solventes, sendo o ozônio o produto principal dessas reações fotoquímicas (CETESB, 2011).

A produção de ozônio troposférico é baseada na fotólise de NO₂, mostrada pelas Equações 2.2 e 2.3. Uma vez formado, o ozônio reage com NO para formar NO₂ (Equação 2.4) (SEINFELD; PANDIS, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006).





Em que $h\nu$ é a energia da radiação ultravioleta, k_1 , k_2 e k_3 são as constantes de taxa de reações e M representa N_2 , O_2 ou outra molécula capaz de absorver a energia liberada em excesso pela reação. Considerando apenas a ocorrência das três reações anteriores, verifica-se a formação de um ciclo no estado estacionário entre NO , NO_2 e O_3 , sem formação ou consumo significativo de O_3 (TRESMONDI, 2003; WALLACE; HOBBS, 2006).

A presença de COV's, liberados principalmente por fontes antropogênicas e biogênicas na atmosfera, também propicia a formação de ozônio. Essas moléculas orgânicas reagem com o radical hidroxila (OH^-), dando origem a radicais intermediários (Equação 2.5). Esses, por sua vez, reagirão com O_2 para formar radicais peroxil (Equação 2.6) e hidroperoxil (Equação 2.8), os quais serão responsáveis por converter NO em NO_2 (Equações 2.7 e 2.9) (CRUTZEN, 1979; ATKINSON, 2000; SEINFELD; PANDIS, 2006; JONES, 2008).



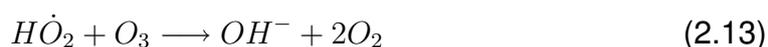
Havendo formação de NO_2 por outro caminho que não seja a oxidação de NO pelo ozônio, impede-se o consumo de O_3 e favorece o aumento de sua concentração na troposfera.

É importante observar que, tanto em ambientes poluídos, onde há oxidação fotoquímica de hidrocarbonetos, quanto em ambientes "limpos", com a ocorrência de oxidação de monóxido de carbono, a formação de ozônio é criticamente dependente da presença de NO (CRUTZEN, 1979; FISHMAN et al., 1979).

Além de ser produzido fotoquimicamente, uma pequena parcela de ozônio é fornecida à troposfera através do transporte vertical a partir da estratosfera (JACOB, 1999; WALLACE; HOBBS, 2006). Segundo o Painel Intergovernamental sobre

Mudanças Climáticas (IPCC, 2001), estima-se que, aproximadamente, 475 Tg de O_3 por ano são transportados da estratosfera para a troposfera.

Além das fontes de ozônio, existem mecanismos responsáveis pela perda desse composto, os quais são dominados pela destruição fotolítica de O_3 troposférico, seguida de reação do átomo de oxigênio excitado ($O(^1D)$) com água (Equações 2.10 e 2.11) e por ciclos fotoquímicos de destruição catalítica envolvendo OH^- e $H\dot{O}_2$ (Equações 2.12 e 2.13). Perdas adicionais de O_3 incluem reações com materiais orgânicos na superfície terrestre (JACOB, 1999; WANG et al., 1998; IPCC, 2001).



Existe um paradoxo em relação ao papel que o ozônio desempenha na atmosfera, uma vez que, dependendo de sua localização, pode trazer benefícios ou malefícios para os seres vivos. Na baixa atmosfera, respirar altas concentrações de ozônio, denominado ozônio mau, pode causar sérios danos à saúde, como irritação das vias respiratórias, dor de cabeça, e redução das funções dos pulmões, assim como danos ao ecossistema e à vegetação (JACOBSON, 2002; EPA, 2011; FEPAM, 2011). Além disso, compõe o denominado "smog" fotoquímico, uma camada de névoa fotoquímica que afeta a visibilidade (CETESB, 2011). Porém, na região da estratosfera, é considerado um ozônio bom, uma vez que desempenha o papel de absorver a radiação solar ultravioleta (entre 240 e 290 nm). Na faixa de, aproximadamente, 25 km de altitude, o ozônio forma uma camada protetora, a qual impede que grande parte dessa radiação nociva aos organismos unicelulares e aos animais e plantas superiores atinja a superfície da Terra (SEINFELD; PANDIS, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006).

O "smog" fotoquímico foi originalmente identificado em Los Angeles (EUA) no início da década de 1940, tendo como principal fonte de seus poluentes primários o sistema de exaustão dos automóveis. Combinada com a presença de intensa radiação solar e forte inversão térmica, a emissão de NO_x , CO e hidrocarbonetos reativos levaram à formação de altas concentrações de ozônio e de uma neblina marrom, o que resultou em um denso "smog" tóxico (TURCO, 1997).

Segundo Wallace e Hobbs (2006), as concentrações de ozônio são geralmente baixas ao longo dos anos nas regiões oceânicas tropicais, com valores em torno de 30-40 ppb. Sobre as latitudes médias, há uma variação sazonal em sua concentração, atingindo um máximo na primavera. Altas concentrações, com valores excedendo 100 ppb (IPCC, 2001), são encontradas nas regiões metropolitanas, uma vez que são locais bastante industrializados e com intenso fluxo de veículos, concentrando grandes fontes de seus precursores.

2.2.2.5 Óxidos de Nitrogênio

Denominam-se óxidos de nitrogênio (NO_x) a somatória de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), os quais pertencem à importante família de espécies traço contendo nitrogênio da atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006). Sua importância na química troposférica está relacionada a seu papel na determinação da distribuição de ozônio (CRUTZEN, 1979; LOGAN, 1983; LEE et al., 1997; PENNER et al., 1991) e a sua influência na concentração de radicais hidroxila (OH^-) (LOGAN et al., 1981).

De forma geral, esses compostos nitrogenados são introduzidos na atmosfera a partir de combustão de combustíveis fósseis, atividade de microorganismos no solo, queima de biomassa, emissões de aeronaves, oxidação de amônia, relâmpagos e transporte a partir da estratosfera (LOGAN, 1983; PENNER et al., 1991; LEE et al., 1997; IPCC, 2001; SEINFELD; PANDIS, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006; JONES, 2008), sendo que a maior quantidade é emitida na forma de NO (LOGAN, 1983).

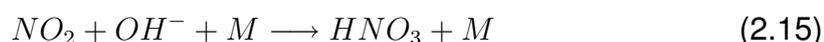
O óxido nítrico caracteriza-se por ser um gás incolor e inodoro (MANAHAN, 2000). Quando é formado pela oxidação do nitrogênio presente no combustível fóssil, é denominado NO do combustível. Sendo formado pela reação de nitrogênio e oxigênio sob altas temperaturas e pressões, é conhecido como NO térmico (TRESMONDI, 2003). A formação de NO térmico (Equação 2.14) requer uma grande quantidade de energia, já que, para serem quebradas, as ligações entre os átomos de oxigênio e entre os de nitrogênio necessitam, respectivamente, de 118 kcal/mol e 225 kcal/mol, e a velocidade com a qual essa reação ocorre é diretamente proporcional ao aumento de temperatura (MANAHAN, 2000).



O dióxido de nitrogênio consiste em um gás com coloração marrom avermelhada e com odor pungente (MANAHAN, 2000; JACOBSON, 2002), cuja maior fonte é a

oxidação de NO na atmosfera proporcionada pelo O₃ (Equação 2.4), por radicais peróxil orgânicos (Equação 2.7) e por radicais hidroperoxil (Equação 2.9) (LOGAN, 1983).

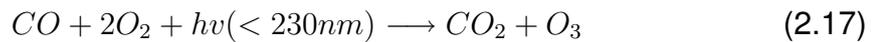
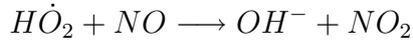
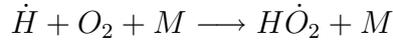
Os óxidos de nitrogênio são removidos da atmosfera a partir da conversão a ácido nítrico (HNO₃) (Equação 2.15), o qual é retirado diretamente via precipitação ou deposição na superfície, ou por reações com bases, como amônia, para formação de partículas de nitrato (CRUTZEN, 1979; LOGAN, 1983; GALLOWAY; LIKENS, 1981; PENNER et al., 1991; DAVIS; CORNWELL, 1998; MANAHAN, 2000). Outro sumidouro de NO₂ e, em uma extensão bem menor, de NO está relacionado a uma via seca de deposição, a qual contempla uma variedade de superfícies, como vegetação (HILL, 1971), solo e cimento (LOGAN, 1983).



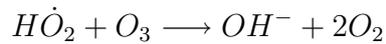
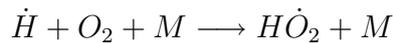
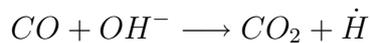
Os efeitos nocivos à saúde humana estão relacionados à exposição ao NO₂. A inalação de NO₂ pode causar inflamação das vias respiratórias, aumentar a sensibilidade à asma e a bronquites e, em concentrações elevadas, levar à morte (TURCO, 1997; JACOBSON, 2002). Como também é um precursor de HNO₃, podem causar danos à vegetação e ao patrimônio cultural devido à formação de chuva ácida (FEPAM, 2011). Apesar de atacar a hemoglobina do sangue e reduzir a eficiência de transporte de oxigênio, o NO acaba tornando-se menos tóxico por apresentar uma concentração muito menor que outros poluentes, como o CO, que causam o mesmo efeito (MANAHAN, 2000).

Os óxidos de nitrogênio desempenham um importante papel na química do ozônio troposférico, uma vez que sua concentração na atmosfera determinará se a região é uma fonte ou um sumidouro de O₃ (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Em regiões com alta concentração de NO_x, a reação entre CO e OH⁻ (Equação 2.16) inicia uma sequência fotoquímica que leva à formação de ozônio (Equação 2.17) (CRUTZEN, 1979; FISHMAN et al., 1979; PENNER et al., 1991).



Porém, em regiões nas quais há baixa concentração de NO_x , também inicia-se uma sequência de reações (Equação 2.16) na qual haverá destruição de ozônio (Equação 2.18) (CRUTZEN, 1979; FISHMAN et al., 1979; PENNER et al., 1991).



Segundo Fishman et al. (1979), a produção e a destruição de ozônio alcançam o equilíbrio quando as concentrações de NO_x são de aproximadamente 25 ppt. Acima desse valor, a produção de ozônio cresce mais lentamente e atinge um máximo com níveis de NO_x em torno de 70 ppt.

Os óxidos de nitrogênio também influenciam diretamente a concentração de radicais OH^- na atmosfera, uma vez que pertencem a uma cadeia de interações químicas que converte os radicais hidroxila em radicais hidroperóxil. Essa sequência de reações está relacionada à capacidade de limpeza da atmosfera, já que fornece o caminho dominante para a remoção de uma série de espécies, como CH_4 , CO , H_2S e SO_2 (LEVY, 1971; LOGAN et al., 1981).

2.2.2.6 Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano

Hidrocarbonetos são moléculas compostas somente por átomos de hidrogênio e carbono. Quando o hidrogênio é substituído por átomos de oxigênio, nitrogênio, halogênio ou outro grupo radical, originam-se diferentes compostos pertencentes a outras funções orgânicas (CLEMENTE, 2000).

Esses compostos também podem ser emitidos a partir de fontes naturais e antropogênicas. Naturalmente, são liberados na decomposição e queima de matéria orgânica, biogenicamente liberados por plantas vivas, como o terpeno, o qual é caracterizado pelo cheiro de pinho e limão, e como o isopreno, encontrado nas regiões de floresta (TRESMONDI, 2003). Dentre as fontes antropogênicas, destacam-se processos que utilizam petróleo e seus derivados e emissões fugitivas provenientes da evaporação de solventes e de combustíveis armazenados (CARNEIRO, 2004).

O hidrocarboneto de maior abundância na atmosfera é o metano (CH_4), sendo emitido em maior quantidade por fontes antropogênicas, como combustão de combustíveis, queima de biomassa, aterros, tratamento de resíduos e animais ruminantes. Dentre as fontes naturais, podem ser citados pântanos, cupins e oceanos. Grandes sumidouros de metano incluem solos, perdas estratosféricas e oxidação pelo radical hidroxila (SEINFELD; PANDIS, 2006). O metano é considerado um gás de efeito estufa com grande potencial, devido a sua alta capacidade de absorver radiação infravermelha (JONES, 2008).

Existem numerosos hidrocarbonetos não-metano (NMHC), os quais são agrupados em várias classes de acordo com sua estrutura molecular. São eles: alcanos, como etano e propano; alcenos, como eteno e propeno; e os aromáticos, como benzeno e tolueno (WALLACE; HOBBS, 2006). Juntamente com os hidrocarbonetos oxigenados, como os álcoois, aldeídos e ácidos orgânicos, os NMHC compõem o grupo de hidrocarbonetos gasosos, denominados compostos orgânicos voláteis (COV's), geralmente encontrados na atmosfera de muitos centros urbanos e industriais (TRESMONDI, 2003).

Segundo a CETESB (2011), alguns hidrocarbonetos podem ser carcinogênicos e mutagênicos, como o benzeno, para os quais não há uma concentração ambiente considerada segura contra os efeitos adversos à saúde.

2.3 Padrões de Qualidade do Ar

No Brasil, o primeiro requisito legal a estabelecer os padrões de qualidade do ar foi a Portaria Ministerial nº 231, de 27 de abril de 1976 (SANTA CATARINA (Estado), 1976), segundo a qual:

- I - são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassados, poderão afetar a

saúde, segurança e bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais, e ao meio ambiente em geral.

De forma geral, os padrões de qualidade do ar traduzem legalmente os limites máximos para a concentração de um determinado componente atmosférico, para que seja preservada a qualidade do ar, mantendo-se as emissões nos níveis não prejudiciais à saúde (CLEMENTE, 2000). Para determiná-los, são realizados estudos científicos dos efeitos produzidos pelo poluente, a fim de que sejam fixados níveis que propiciem uma margem de segurança adequada (LISBOA; KAWANO, 2007; CETESB, 2011).

Através da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, instituiu-se a Política Nacional do Meio Ambiente, com o objetivo de assegurar a preservação, a melhoria e a recuperação da qualidade ambiental propícia à vida. Como órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), foi conferido ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a competência de estabelecer normas, critérios e padrões nacionais de controle e manutenção da qualidade do meio ambiente (BRASIL, 1981).

Como um dos instrumentos básicos de gestão ambiental, a Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989, instituiu o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), a fim de limitar nacionalmente os níveis de emissão de poluentes atmosféricos. Também foram estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar. Os padrões primários equivalem às concentrações de poluentes atmosféricos que podem afetar a saúde da população caso sejam ultrapassadas. Os padrões secundários correspondem às concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso ao bem-estar público e ao meio ambiente. Resumidamente, representam, respectivamente, os níveis máximos toleráveis, sendo metas a curto e médio prazo, e os níveis desejáveis, metas a longo prazo, de concentração de poluentes (BRASIL, 1989).

Os poluentes atmosféricos padronizados foram selecionados devido a sua grande frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente (LISBOA; KAWANO, 2007). Como já mencionado, fazem parte do grupo de poluentes utilizados como indicadores da qualidade do ar: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio.

A Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar (BRASIL, 1990), ampliando a quantidade de parâmetros estabelecidos pela Portaria Ministerial nº 231/76. Na Tabela 2.4, estão ilustrados os padrões de qualidade do ar, bem como seus respectivos períodos de amostragem e métodos de medição.

Tabela 2.4 - Padrões nacionais de qualidade do ar.

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Método de medição
Partículas totais em suspensão	24 h (1)	240	150	Amostragem de grandes volumes
	MGA (2)	80	60	
Dióxido de enxofre	24 h (1)	365	100	Pararosanilina
	MAA (3)	80	40	
Monóxido de carbono	1 h (1)	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo
		(35 ppm)	(35 ppm)	
	8 h (1)	10.000	10.000	
		(9 ppm)	(9 ppm)	
Ozônio	1 h (1)	160	160	Quimiluminescência
Fumaça	24 h (1)	150	100	Refletância
	MAA (3)	60	40	
Partículas inaláveis	24 h (1)	150	150	Separação inercial / filtração
	MAA (3)	50	50	
Dióxido de nitrogênio	1 h (1)	320	190	Quimiluminescência
	MAA (3)	100	100	

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

(2) MGA - Média Geométrica Anual.

(3) MAA - Média Aritmética Anual.

Fonte: Adaptada de Brasil (1990).

A Resolução CONAMA nº 3/90 também estabelece os níveis de qualidade do ar para a elaboração de um plano de emergência para episódios considerados críticos de poluição do ar. Episódios críticos de poluição do ar constituem situações nas quais existem altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo em virtude de condições meteorológicas desfavoráveis a sua dispersão (BRASIL, 1990). Para a execução desse plano, estabeleceram-se os níveis de atenção, alerta e emergência, mostrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Critérios para episódios críticos de poluição do ar.

Parâmetros	Níveis		
	Atenção	Alerta	Emergência
Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24 h	800	1.600	2.100
Partículas totais em suspensão (PTS) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24 h	375	625	875
SO ₂ x PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)x($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24 h	65.000	261.000	393.000
Monóxido de carbono (ppm) - 8 h	15	30	40
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1 h	400*	800	1.000
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24 h	250	420	500
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24 h	250	420	500
Dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1 h	1.130	2.260	3.000

(*) O nível de atenção declarado pela CETESB (2011) para O₃, segundo legislação estadual, é 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Fonte: Adaptada de Brasil (1990).

Nos Estados Unidos, segundo a EPA (2011), os seis principais poluentes, denominados poluentes críticos, são monóxido de carbono, chumbo, dióxido de nitrogênio, material particulado (diâmetro menor que 2,5 e 10 μm), ozônio e dióxido de enxofre, cujos níveis padrões de qualidade, bem como o tempo de amostragem, estão listados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Padrões norte-americanos de qualidade do ar.

Poluentes	Padrões primários		Padrões secundários	
	Nível	Tempo médio	Nível	Tempo médio
Monóxido de carbono	9 ppm	8 h	-	-
	35 ppm	1 h	-	-
Chumbo	0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Média móvel de 3 meses	Igual ao Primário	

(Continua)

Tabela 2.6 - Conclusão

Poluentes	Poluentes primários		Poluentes secundários	
	Nível	Tempo médio	Nível	Tempo médio
Dióxido de nitrogênio	53 ppb	Anual (média aritmética)	Igual ao Primário	
	100 ppb	1 h	-	
Material particulado (PM ₁₀)	150 µg/m ³	24 h	Igual ao Primário	
Material particulado (PM _{2,5})	15.0 µg/m ³	Anual (média aritmética)	Igual ao Primário	
	35 µg/m ³	24 h	Igual ao Primário	
Ozônio	0,075 ppm	8 h	Igual ao Primário	
Dióxido de enxofre	75 ppb	1 h	0,5 ppm	3 h

Fonte: Adaptado de EPA (2012).

Comparando a legislação brasileira com a norte-americana, verificam-se padrões de qualidade do ar bastante semelhantes para partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e ozônio. Para o dióxido de nitrogênio, a diferença recai sobre o tempo de amostragem de uma hora, para o qual o padrão brasileiro estabelece 170 ppb, enquanto o norte-americano determina 100 ppb.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) determina padrões de qualidade do ar para os seguintes poluentes: material particulado PM₁₀, material particulado PM_{2,5}, ozônio, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio. Os níveis padronizados para estes poluentes, bem como o tempo médio de amostragem, estão ilustrados na Tabela 2.7 (WHO, 2005).

Tabela 2.7 - Padrões de qualidade do ar - OMS.

Poluentes	Tempo médio	Nível
Dióxido de enxofre	24h	20 µg/m ³
	10 min	500 µg/m ³
Dióxido de nitrogênio	1 ano	40 µg/m ³
	1 h	200 µg/m ³
Material particulado (PM ₁₀)	1 ano	20 µg/m ³
	24 h	50 µg/m ³

(Continua)

Tabela 2.7 - Conclusão

Poluentes	Tempo médio	Nível
Material particulado (PM _{2,5})	1 ano	10 µg/m ³
	24 h	25 µg/m ³
Ozônio	8 h	100 µg/m ³

Fonte: Adaptado de WHO (2005).

Como o monitoramento da qualidade do ar no Brasil compete a cada Estado, o Decreto nº 5.993, de 16 de abril de 1975 de São Paulo, atribuiu à CETESB o controle da qualidade do meio ambiente e a fiscalização das fontes poluidoras em todo Estado de São Paulo (SÃO PAULO (Estado), 1975).

A CETESB possui redes de monitoramento automáticas e manuais. A automática conta com estações medidoras na Região Metropolitana de São Paulo, Cubatão, Campinas, São José dos Campos, Sorocaba e Paulínia e estações móveis para estudos temporários. Esse tipo de rede registra ininterruptamente os níveis de poluentes na atmosfera e os dados são disponibilizados de hora em hora na internet e em boletins diários. As redes manuais estão localizadas na Região Metropolitana de São Paulo, no interior e no litoral, nos quais as amostras são coletadas no campo e enviadas para serem analisadas nos laboratórios da CETESB (CETESB, 2011).

Segundo a CETESB (2011), a divulgação da qualidade do ar é feita através do Índice de Qualidade do Ar (IQA), desenvolvido com base em experiências norte-americanas e canadenses, o qual foca nos efeitos relacionados à saúde que os indivíduos estão sujeitos, dentro de poucas horas ou dias, após respirarem um ar não saudável. Esse índice é obtido através de uma função linear segmentada feita para cada poluente, cujos pontos de inflexão representam os padrões de qualidade do ar e os episódios críticos de poluição. As funções referentes a cada poluente estão ilustradas no Anexo A.

Como essa função relaciona a concentração do poluente com o valor do índice, pode ser determinado um número adimensional referido a uma escala com base nos padrões de qualidade do ar (LISBOA; KAWANO, 2007). Após determinado o valor do índice, o ar recebe uma qualificação, feita conforme ilustrado na Tabela 2.8. Para efeito de divulgação, a qualidade do ar de uma estação é determinada pelo pior caso encontrado e está associada aos efeitos sobre a saúde

independente do poluente em questão (CETESB, 2011), como apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.8 - Classificação da qualidade do ar.

Qualidade	Índice	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Boa	0 - 50	0 - 50	0 - 80	0 - 4,5	0 - 100	0 - 80
Regular	51 - 100	50 - 150	80 - 160	4,5 - 9	100 - 320	80 - 365
Inadequada	101 - 199	150 - 250	160 - 200	9 - 15	320 - 1130	365 - 800
Má	200 - 299	250 - 420	200 - 800	15 - 30	1130 - 2260	800 - 1600
Péssima	> 299	> 420	> 800	> 30	> 2260	> 1600

Fonte: Adaptada de CETESB (2011).

Tabela 2.9 - Efeitos sobre a saúde para cada qualificação do ar.

Qualidade	Índice	Significado
Boa	0 - 50	Praticamente não há riscos à saúde.
Regular	51 - 100	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	101 - 199	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	200 - 299	Toda a população pode apresentar agravamentos 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).
Péssima	> 299	Toda população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: Adaptada de CETESB (2011).

2.4 Dispersão de Poluentes

A Meteorologia, ciência que estuda a atmosfera, seus movimentos e seus fenômenos, está intimamente relacionada com a qualidade do ar, já que influencia na determinação dos níveis de concentração dos poluentes, configurando seus mecanismos de transporte para outras áreas e de remoção a partir da atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2006).

A maior parte dos poluentes emitidos tanto pelas atividades antropogênicas quanto pelas fontes naturais entram na atmosfera a partir da porção mais baixa da troposfera, denominada Camada Limite Planetária (CLP), a qual é formada como consequência da interação entre a superfície e a atmosfera (ARYA, 2001). Na atmosfera, os poluentes podem ser dispersos e diluídos, resultando em baixas concentrações, ou concentrados em uma pequena área, levando a episódios de poluição do ar (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Como a atmosfera influencia a dispersão dos poluentes, é interessante verificar em qual escala de movimento, dependendo da dimensão de tempo e espaço, bem como do fenômeno atmosférico dominante, o processo está inserido. Vários autores definem as escalas de movimento de diferentes maneiras, sendo que a mais tradicional é a classificação por Orlanski (1975), a qual contém oito subdivisões (macro- α , macro- β , meso- α , meso- β , meso- γ , micro- α , micro- β e micro- γ). De forma resumida, as três escalas básicas são caracterizadas da seguinte forma (THUNIS; BORNSTEIN, 1996; SEINFELD; PANDIS, 2006):

- Microescala - engloba fenômenos que ocorrem na escala espacial horizontal de centenas de metros e temporal de na ordem de minutos, como o movimento das plumas e a turbulência;
- Mesoescala - os fenômenos ocorrem em escalas espaciais de centenas de quilômetros e temporais de até um dia. Como exemplo dos fenômenos, tem-se brisas marítimas e terrestres, ventos de montanhas e de vales e circulações urbanas;
- Macroescala - fazem parte dessa classe os fenômenos que abrangem escalas espaciais de milhares de quilômetros e temporais de semanas, como os sistemas frontais e a circulação geral da atmosfera.

Existem vários fatores que afetam esse comportamento, os quais podem ser ca-

tegorizados em termos de características do local de emissão, características do poluente emitido, condições meteorológicas e efeitos do terreno. A caracterização desses fatores foi feita de acordo com Boubel et al. (1994), Turco (1997), Davis e Cornwell (1998) e Jacobson (2002).

2.4.1 Características do Local de Emissão

O tamanho da fonte é um fator que determina como o poluente irá se dispersar na atmosfera, uma vez que os movimentos do ar acontecem em muitas escalas de tamanho. Fontes espacialmente pequenas são dispersas por movimentos de pequena escala na vizinhança, enquanto que as fontes maiores são influenciadas pelos movimentos de grande escala.

As emissões industriais são descarregadas na atmosfera verticalmente através de dutos ou chaminés. O movimento horizontal do vento ao redor faz com que a pluma desloque-se em sua direção, possibilitando sua diluição e dispersão. Seguindo na direção do vento dominante, quanto maior a distância entre a fonte emissora e a fonte receptora, maior será o volume de ar disponível para a diluição dos contaminantes.

A altura da pluma é afetada pela velocidade vertical do fluxo descarregado e pela tendência da massa gasosa a permanecer suspensa no ar, sendo também proporcional à temperatura do gás emitido. Entende-se como altura efetiva da chaminé a somatória da altura da pluma com a altura física do duto.

2.4.2 Características do Poluente Emitido

Em relação ao material particulado, partículas com pequena dimensão são capazes de permanecer por um longo tempo em suspensão e, logo, conseguem deslocar-se por distâncias maiores. Já os materiais com maior dimensão acabam atingindo apenas as proximidades da fonte emissora.

A dispersão também é limitada pelo tempo de residência do poluente na atmosfera. As espécies hidrossolúveis, as quais podem se dissolver nas gotículas de água para formação de nuvens ou podem ser removidas da atmosfera através de precipitação, geralmente possuem um tempo de residência atmosférico de poucos dias. Já os poluentes quimicamente instáveis apresentam tempos de residência variados. Por exemplo, o tempo médio de vida do CO antes de reagir com os radicais hidroxila é de, aproximadamente, um mês.

2.4.3 Condições Meteorológicas

Os parâmetros meteorológicos que influenciam na dispersão são: velocidade e direção do vento, turbulência e estabilidade.

2.4.3.1 Velocidade e Direção do Vento

A direção do vento determina a direção na qual os contaminantes irão se mover na atmosfera.

Já a velocidade do vento irá influenciar a altura da pluma e a taxa de diluição dos gases assim que deixam o ponto de emissão, podendo acarretar dois efeitos contrários. O aumento da velocidade do vento faz com que a pluma mude para a direção horizontal mais rapidamente, resultando em uma diminuição em sua altura e, conseqüentemente, no aumento da concentração de poluentes na superfície. De outra forma, o aumento na velocidade do vento também proporciona um aumento na taxa de diluição do poluente, tendendo a diminuir a concentração nessa direção.

2.4.3.2 Turbulência

Turbulência consiste no movimento altamente aleatório e irregular do fluido, caracterizado pela presença de redemoinhos denominados vórtices, os quais possuem grande variedade de tamanhos, sendo que os vórtices menores formam-se e alimentam os vórtices maiores.

Os vórtices podem surgir a partir de duas causas diferentes: turbulência mecânica e turbulência térmica. A turbulência mecânica é causada pelo atrito com a superfície e pelo cisalhamento do vento, enquanto a térmica ou convectiva é resultante da convecção que ocorre sobre superfícies aquecidas.

O processo mais importante na atmosfera relacionado à dispersão de poluentes é denominado difusão turbulenta. Os vórtices atmosféricos causam um rompimento das parcelas de ar, fazendo com que o ar poluído seja misturado e, por consequência, diluído.

2.4.3.3 Estabilidade

A estabilidade é definida como sendo a tendência da atmosfera em propagar movimentos verticais ou resistir a eles e é influenciada tanto pela velocidade do

vento, quanto pela taxa de variação da temperatura na vertical ("*lapse rate*"). Em relação à influência térmica, esse fator meteorológico é subdividido em três categorias: estável, neutro e instável.

A atmosfera é classificada como neutra quando sua estrutura térmica não influencia os movimentos. Sob essas condições, a taxa de variação vertical da temperatura experimentada por uma parcela de ar que se expande ou se contrai adiabaticamente é conhecida como "*lapse rate*" adiabático seco e apresenta um valor de, aproximadamente, $-1,00^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Isso significa que, a cada elevação de 100 m, a temperatura cai em $1,00^{\circ}\text{C}$.

Quando a atmosfera apresenta um "*lapse rate*" menor que o adiabático seco, ou seja, maior em valor absoluto, sua temperatura cai mais rapidamente comparada às condições de neutralidade. Logo, a taxa é dita ser superadiabática e a atmosfera é considerada instável. Nessas condições, as parcelas de ar que se movimentam considerando o "*lapse rate*" adiabático seco adquirem temperaturas maiores que as do ambiente, melhorando, assim, os movimentos gerados pela turbulência mecânica.

Por outro lado, se o "*lapse rate*" do ambiente for maior que o adiabático seco, ou seja, menor em valor absoluto, a temperatura da atmosfera cai mais lentamente comparada às condições neutras. Assim, a taxa é denominada subadiabática e a atmosfera é considerada estável. Com essas características, as parcelas de ar com "*lapse rate*" adiabático seco apresentam temperatura menores que as do ambiente, inibindo os movimentos gerados pela turbulência mecânica. Quando essas inversões térmicas ocorrem nas partes baixas da atmosfera, acabam atuando como uma barreira à dispersão.

De forma geral, como os movimentos verticais são intensificados com a flutuabilidade, os poluentes são dispersos mais rapidamente em condições de instabilidade atmosférica.

Em uma região plana, a forma característica da pluma liberada pelas altas chaminés depende da estabilidade da atmosfera. Em uma atmosfera estável, os poluentes emitidos deslocam-se horizontalmente, resultando em uma pluma "*fanning*". Quando a atmosfera fica instável ou neutra abaixo e estável acima da chaminé, os poluentes são carregados em direção à superfície, formando uma pluma "*fumigating*". Em atmosfera instável, forma-se a pluma "*looping*", nas quais

o fluxo alternadamente pode subir e descer, dependendo da extensão da turbulência. Sob condições de neutralidade, a pluma tende a se dispersar lentamente de forma ascendente e descendente, sendo denominada "*coning*". O último tipo de pluma, conhecida como "*lofting*", desenvolve-se quando a atmosfera está estável abaixo e neutra acima da chaminé, possibilitando uma exposição mínima aos poluentes na superfície. Na Figura 2.2, estão ilustrados os diferentes tipos de pluma descritos acima relacionados à respectiva condição de estabilidade.

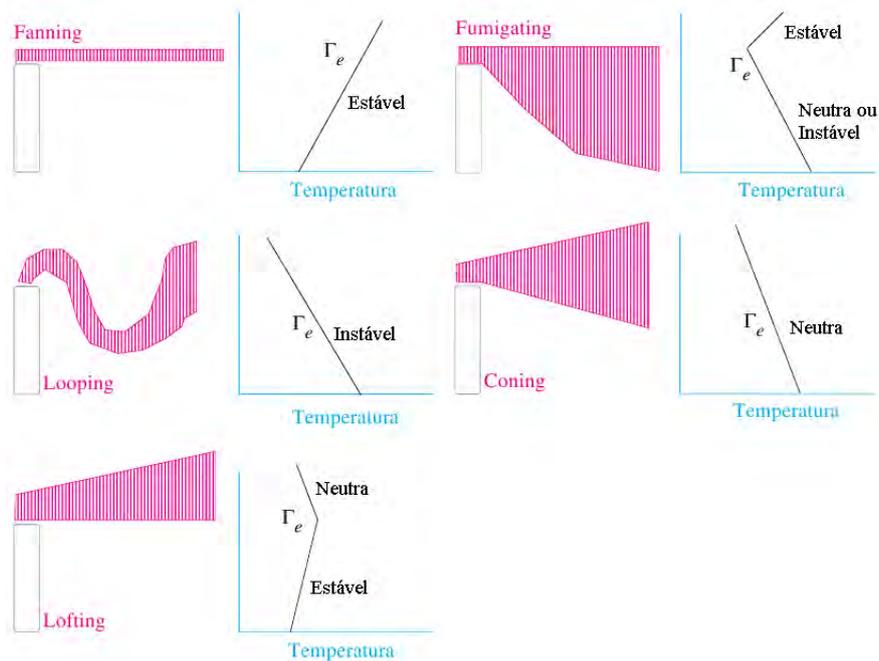


Figura 2.2 - Tipos de pluma e o correspondente estado da atmosfera.
 Fonte: Adaptada de Jacobson (2002).

2.4.4 Efeitos do Terreno

A estrutura do meio no qual o poluente é emitido também afeta a dispersão. Nessa categoria, os tipos de ambiente que podem ser considerados são: estruturas urbanas, zonas costeiras, áreas montanhosas e áreas com vales.

2.4.4.1 Estruturas Urbanas

Em ambientes com elevada urbanização, a massa do material é capaz de absorver e irradiar calor em uma taxa maior que a da área ao redor, causando um fenômeno denominado ilha de calor. Por causa desse efeito, a estabilidade da

atmosfera local é alterada, ficando menor do que sobre as redondezas.

Dependendo da localização da fonte emissora, podem existir dois efeitos contrários. Se as fontes estiverem na superfície, o volume de ar instável formado contribuirá para a diluição dos contaminantes. Porém, com fontes mais altas, como as chaminés industriais, as plumas transportadas para as vizinhanças são misturadas ao nível do solo, aumentando a concentração de poluentes.

Dentre os locais com ocorrência de ilhas de calor, podem ser citados grandes complexos industriais e cidades de pequeno a grande porte. Assim como são aquecidos rapidamente durante o dia, os materiais presentes em ambientes urbanos, como o asfalto e o concreto dos edifícios, acabam resfriando-se de forma rápida durante a noite. Aliado ao fato de que as altas construções acabam transformando-se em obstáculos à circulação do ar, esse resfriamento radiativo dificulta a dispersão dos poluentes emitidos no período noturno ao nível do solo.

2.4.4.2 Zonas Costeiras

As zonas costeiras são bastante influenciadas pelas brisas marítimas e continentais, as quais surgem devido à diferença de temperatura entre os oceanos ou corpos d'água e o continente.

Durante o dia, a radiação solar aquece mais rapidamente o continente, proporcionando um aumento na temperatura do ar próximo a superfície e a diminuição de sua densidade. Isso faz com que o ar se eleve, diminuindo a pressão perto da superfície, e seja substituído pelo ar mais frio proveniente da superfície oceânica. Esse movimento do ar perto da superfície é denominado brisa marítima. Enquanto isso, o ar que seguiu para altitudes elevadas sobre o continente desloca-se horizontalmente para o oceano e converge em direção à superfície, completando a célula de circulação.

À noite, ocorre o processo inverso. Como o continente se resfria mais rapidamente que o oceano, o ar aquecido tende a se elevar sobre a água e é substituído pelo fluxo de ar mais frio vindo do continente, que é denominado brisa terrestre. Como as diferenças de temperatura entre o oceano e o continente são menores durante a noite, as brisas terrestres são mais fracas.

A presença da brisa marítima proporciona uma inversão no perfil de temperatura da superfície que afeta a estabilidade atmosférica, já que o fluxo de ar vindo

do oceano é mais frio que a atmosfera continental. Isso resulta em uma atmosfera estável e, por conseqüência, na formação de pluma "*fanning*" perto da fonte emissora. À medida que a pluma desloca-se para o interior, encontra uma atmosfera neutra ou instável abaixo da fonte emissora, transformando-se em "*fumigation*", que leva os poluentes para o nível da superfície.

2.4.4.3 Áreas Montanhosas e Áreas com Vales

Os fluxos nas áreas de vales e montanhas são influenciados pelo aquecimento solar e o resfriamento radiativo.

Durante o dia, a radiação incidente nas encostas das montanhas aquece o ar adjacente, que tende a se elevar verticalmente e, por conseqüência, ser substituído pelo ar a partir do vale. Esse movimento do ar vindo dos vales é denominado brisa de vales. À noite, ocorre resfriamento radiativo nas encostas, fazendo com que o ar fique mais frio e desloque-se para baixo, originando as brisas de montanha.

Havendo emissões de poluentes nas encostas das montanhas, as plumas são transportadas pelas brisas de vale e espalhadas horizontalmente acima do cume das montanhas, onde, em vez de se dispersarem, podem formar uma camada com elevada concentração de poluentes.

2.5 Monitoramento da Qualidade do Ar

Sabe-se que a poluição do ar está intimamente ligada ao surgimento de inúmeras patologias e de inúmeros efeitos prejudiciais ao meio ambiente e ao patrimônio histórico e estrutural. Por isso, o conhecimento e o acompanhamento dos níveis de qualidade do ar é uma ferramenta importante para a manutenção do bem-estar da sociedade à medida que contribui para a redução desses danos.

O monitoramento da qualidade do ar envolve a medição e a obtenção de dados que sejam representativos das condições existentes no local, podendo, assim, identificar os poluentes e suas respectivas concentrações, avaliar o desvio da idealidade quando comparados aos padrões legais, bem como acompanhar e contabilizar as alterações nas emissões dos poluentes.

A escolha da metodologia e dos equipamentos utilizados numa rede de monitoramento deve ser baseada nas determinações legais, além de depender dos recursos necessários para aquisição, operação e manutenção das atividades. Para atender aos diversos tipos de planejamento, há diferentes amostradores da qualidade do ar: passivos, ativos, automáticos, sensores remotos e bioindicadores, cujas características estão descritas no Apêndice A. Neste trabalho, foram utilizados amostradores do tipo automáticos.

3 DADOS E METODOLOGIA

A caracterização da qualidade do ar foi realizada através da análise de dados de concentração dos poluentes (ozônio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, partículas menores que 10 μm e hidrocarbonetos metano e não-metano) medidos pelo Laboratório CONSOLIDAR (<http://pindara.cptec.inpe.br/consolidar/index.jsp>), adquirido pelo projeto "Implementação de um Sistema de Monitoramento Atmosférico para o Estudo dos Impactos das Queimadas na Qualidade do Ar e no Clima", iniciado em 2008 com o apoio financeiro da Petrobrás e concluído em fevereiro de 2011. Também participaram desse projeto o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), a Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Rio Claro, o Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet) de Bauru e o Centro de Capacitação e Pesquisas em Meio Ambiente (CEPEMA) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP) em Cubatão.

Em 2009 e 2010, o Laboratório participou de campanhas de coleta de dados nas cidades de Rio Claro, Cubatão e Bauru, e, atualmente, está localizado em Cachoeira Paulista no prédio do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A primeira campanha de monitoramento teve início em 15 de junho de 2009 no Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA), situado no Campus da UNESP em Rio Claro. A campanha de monitoramento em Rio Claro encerrou-se em 15/10/2009, com os equipamentos seguindo para Cubatão, onde permaneceram até 04/12/2009. Em seguida, os equipamentos foram para Bauru, permanecendo em operação até 10/02/2010.

Neste trabalho, são analisados os dados do monitoramento da qualidade do ar provenientes das cidades de Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista. Os dados de Rio Claro foram obtidos entre os meses de junho e setembro de 2009 no CEAPLA. Já os dados procedentes de Cubatão foram coletados no CEPEMA durante os meses de outubro e novembro de 2009. Os dados de Cachoeira Paulista foram os únicos coletados durante o desenvolvimento deste trabalho no período de outubro de 2011 a janeiro de 2012.

Dados meteorológicos correspondentes a cada região monitorada também são

analisados, a fim de se verificar a influência das condições atmosféricas locais na qualidade do ar ambiente.

3.1 Descrição do Laboratório CONSOLIDAR

O sistema de monitoramento da qualidade do ar está instalado em um contêiner com 4,00 m de comprimento, largura de 2,40 m e altura de 2,85 m. Para garantir uma temperatura ambiente adequada, há um sistema de refrigeração de ar com dois condicionadores de ar e um termostato, o qual monitora a faixa ideal de temperatura no interior da estação. Na Figura 3.1, estão ilustradas as partes interna e externa do Laboratório CONSOLIDAR.



Figura 3.1 - Visão externa (esquerda) e interna (direita) do Laboratório.

Na parte superior externa do contêiner, estão presentes os coletores de amostra de ar e de partículas e os sensores meteorológicos. No mastro telescópico, estão instalados sensores que medem velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa do ar, além de um pára-raios como ponto culminante da estação. O sensor pluviométrico está situado em um mastro individual montado sobre o contêiner, estando acessível para manutenção e ajustes, e, no interior da estação, está o sensor de pressão barométrica.

Os analisadores de gases e os monitores de partículas estão instalados em dois "racks", atrás dos quais se encontram os cilindros contendo misturas gasosas

utilizadas como padrão na calibração dos analisadores. Sobre uma mesa, há um monitor, um teclado e um mouse para a operação do sistema de armazenamento e controle dos dados.

No Laboratório CONSOLIDAR, estão presentes monitores para os seguintes poluentes:

- Ozônio (O₃);
- Monóxido de Carbono (CO);
- Óxidos de Nitrogênio (NO_x) - NO e NO₂;
- Dióxido de Enxofre (SO₂);
- Material Particulado menor que 10 μm (PM₁₀);
- Hidrocarbonetos Totais (THC's) - Metano (CH₄) e Não-Metano (NMHC).

Os instrumentos responsáveis pela medição dos poluentes operam baseando-se no princípio de coletarem uma amostra de ar atmosférico e submetê-la a uma condição na qual os gases ou as partículas criarão uma resposta proporcional, que será transformada em um resultado. O princípio de funcionamento de cada analisador é caracterizado pelos seguintes métodos:

- Analisador de Ozônio - princípio da absorção de radiação ultravioleta;
- Analisador de Monóxido de Carbono - princípio de absorção de radiação infravermelha;
- Analisador de Óxidos de Nitrogênio - princípio de quimiluminescência;
- Analisador de Dióxido de Enxofre - princípio de detecção de fluorescência no ultravioleta;
- Monitor de Material Particulado PM₁₀ - princípio de detecção de radiação Beta,
- Monitor de Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano - princípio de detecção por ionização de chama.

As características dos analisadores de gases e dos monitores de partículas utilizados nesse trabalho estão descritas nos itens a seguir, os quais são amostradores automáticos fabricados pela empresa australiana ECOTECH. A descrição dos equipamentos é baseada nas informações cedidas pela JCTM Comércio e Tecnologia Ltda. (JCTM, 2011), representante exclusiva da empresa ECOTECH no Brasil.

3.1.1 Analisador de Ozônio

O analisador de ozônio utilizado consiste no modelo EC 9810B, cujo princípio de funcionamento é baseado na absorção de radiação ultravioleta pelo ozônio.

No equipamento, existe uma lâmpada de mercúrio utilizada como fonte de luz, uma vez que emite radiação no comprimento de onda de, aproximadamente, 254 nm, o qual corresponde ao centro da banda de absorção do ozônio no espectro do ultravioleta, e também um detector de radiação ultravioleta.

Alternadamente, uma amostra de ar contendo ozônio e uma amostra de ar sem ozônio, previamente purificada através de um "*scrubber*" composto de dióxido de manganês, responsável por destruir o ozônio presente, são introduzidas em um tubo de vidro, denominado célula de amostra, contra o qual é projetado um feixe de luz. Baseando-se na Lei de Beer, a qual menciona que a intensidade do feixe de luz decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta na amostra, a relação entre a radiação ultravioleta detectada através da amostra sem e com ozônio fornece uma medida da concentração de ozônio.

Segundo dados do fabricante (ECOTECH, 2009a), a taxa de fluxo de amostragem é de 0,5 L/min e os valores detectáveis pelo analisador de ozônio variam entre 0-39,26 mg/m³, com precisão de 1,96 µg/m³ e limite mínimo de detecção de 0,98 µg/m³.

3.1.2 Analisador de Monóxido de Carbono

O analisador de monóxido de carbono utilizado consiste no modelo EC 9830B, cujo método de detecção é baseado na absorção de radiação infravermelha pelo CO, que corresponde ao comprimento de onda de 4,7 µm.

Para eliminar grande parte das interferências, esse instrumento utiliza um filtro

gasoso contendo um disco giratório de correlação ("*Gas Filter Correlation*" – GFC) associado a um sistema óptico, no qual está contida a amostra a ser analisada. Esse disco de correlação possui duas células armazenadoras de gás, uma contendo alta concentração de CO e a outra contendo nitrogênio.

O instrumento possui uma fonte que gera radiação infravermelha em um amplo espectro, localizada de maneira que é preciso atravessar o disco de correlação, o sistema óptico e um filtro de bandas para atingir o detector de infravermelho. No disco de correlação, as células estão situadas em lados opostos, de forma que, ao se realizar meia rotação, a radiação infravermelha atinja sucessivamente um setor com a célula preenchida com CO, um setor opaco sem célula e um setor com a célula preenchida com N₂.

À medida que a radiação atinge cada setor do disco, um sinal diferente é encontrado pelo detector de infravermelho. Passando pela célula com CO, toda energia no comprimento de onda de 4,7 μm é absorvida no disco e o restante da radiação forma um sinal de referência. Ao atingir a parte sem célula, nenhuma radiação infravermelha emitida pela fonte é transmitida e, logo, obtém-se um sinal de escuridão. Por fim, ao passar pela célula com N₂, toda radiação emitida pela fonte é transmitida para o sistema óptico, proporcionando a detecção de toda energia infravermelha correspondente à concentração existente na amostra (sinal da medida). O resultado dessas variações na absorção de radiação pelo filtro óptico é computado, podendo, assim, obter a concentração de CO presente na amostra de ar.

Segundo dados do fabricante (ECOTECH, 2009b), a taxa de fluxo de amostragem é de 1,0 L/min e os valores detectáveis pelo analisador de monóxido de carbono variam entre 0-229,04 mg/m³, com precisão de 114,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e limite mínimo de detecção de 57,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.3 Analisador de Óxidos de Nitrogênio

O analisador de óxidos de nitrogênio utilizado consiste no modelo EC 9841B, cujo funcionamento é baseado no princípio de quimiluminescência de fase gasosa, isto é, um método no qual a ocorrência de uma reação gera uma molécula energizada que emite luz ao voltar a seu estado de menor energia.

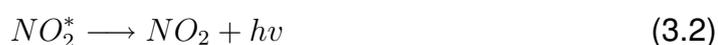
O instrumento possui um duplo canal que direciona a amostra de ar para dois caminhos diferentes: uma via leva a amostra para um conversor catalítico de

NO₂-NO e a outra conduz a amostra direto para o compartimento onde ocorrerá a reação de quimiluminescência.

A amostra que não passa pelo conversor segue diretamente para a câmara de NO, a qual recebe uma descarga de ozônio gerado por uma fonte interna, para que ocorra a oxidação do NO presente (Equação 3.1).



Essa reação dá origem a moléculas de NO₂ excitadas (NO₂^{*}), as quais emitem radiação ao retornarem a seu estado de menor energia (Equação 3.2). A energia que alcança o detector é proporcional somente à quantidade de NO na amostra.



A parcela que foi conduzida ao conversor passa por um leito catalítico de molibdênio (Mo), para que todo o NO₂ presente seja transformado em NO, como mostra a Equação 3.3, sendo que todo NO inicialmente existente na amostra passa pelo conversor sem sofrer reação. Após a conversão, a amostra segue para a câmara de NO_x, na qual ocorrerá o fenômeno de quimiluminescência. Por essa via, a quantidade de energia detectada é proporcional à concentração de NO_x total.



Segundo dados do fabricante (ECOTECH, 2009c), a taxa de fluxo de amostragem é de 0,64 L/min e os valores detectáveis pelo analisador de óxidos de nitrogênio variam entre 0-24,54 mg/m³, com precisão de 0,61 μg/m³ e limite mínimo de detecção de 0,61 μg/m³ para NO e entre 0-37,63 mg/m³, com precisão de 0,94 μg/m³ e limite mínimo de detecção de 0,94 μg/m³ para NO₂.

3.1.4 Analisador de Dióxido de Enxofre

O analisador de dióxido de enxofre consiste no modelo EC 9850B, que baseia seu funcionamento no princípio de detecção de fluorescência no ultravioleta, mecanismo no qual são computados fenômenos resultantes das trocas de energia entre uma molécula gasosa e o ambiente no qual está inserida.

No equipamento, uma lâmpada de descarga de zinco emite uma radiação ultravioleta, que é enviada a um filtro de banda estreita, para que somente a radiação

com comprimento de onda de 214 nm siga para um compartimento, denominado célula de fluorescência. Nessa câmara, essa radiação será responsável por excitar as moléculas de SO₂ presentes na amostra de ar, uma vez que elas têm a capacidade de absorver energia no espectro do ultravioleta entre 200 e 240 nm.

A absorção dessa energia pelo SO₂ resulta na emissão de fótons fluorescentes com comprimento de onda de 340 nm, os quais serão detectados por um tubo foto-multiplicador, cuja medida é proporcional à concentração de SO₂ na amostra.

Segundo dados do fabricante (ECOTECH, 2009d), a taxa de fluxo de amostragem é de 0,60 L/min e os valores detectáveis pelo analisador de dióxido de enxofre variam entre 0-52,35 mg/m³, com precisão de 1,3 µg/m³ e limite mínimo de detecção de 1,3 µg/m³.

3.1.5 Monitor de Material Particulado PM₁₀

O analisador de material particulado PM₁₀ consiste no Monitor de Atenuação Beta Met One BAM-1020, cujo princípio está baseado no uso de uma fonte de radiação Beta e de um detector.

Na parte externa do contêiner, está situada uma "cabeça" de amostragem conectada na parte superior do analisador, a qual é utilizada para coletar a amostra de ar, contendo as partículas no tamanho de interesse, nesse caso, menores que 10 µm, sugadas por uma bomba de vácuo. Por meio de um tubo de aço inox, as partículas são direcionadas para o interior do instrumento, sendo depositadas em uma fita filtrante de fibra de vidro.

No monitor, há uma fonte com elemento Carbono 14 (C¹⁴) que emite radiação com baixa intensidade na forma de raios Beta, a qual é detectada através de um detector de cintilação sensível.

Primeiramente, a radiação é emitida contra uma região limpa da fita, para que seja determinada uma leitura de zero. Em seguida, o monitor avança automaticamente essa região da fita para o bocal de amostragem, no qual as partículas serão depositadas. Após a amostragem, a região "suja" é colocada de volta entre a fonte de radiação Beta e o detector, causando uma atenuação no novo sinal medido. Esse grau de atenuação é utilizado para determinar a massa de partículas presentes na fita e, conseqüentemente, a concentração volumétrica de PM₁₀

no ar.

A vazão de amostragem está em uma faixa de 16,7 a 20,0 L/min e os valores de concentração detectáveis pelo analisador de PM_{10} variam entre 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com um limite mínimo de detecção de 4,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e uma precisão de 8% (ECOTECH, 2009e).

3.1.6 Monitor de Hidrocarbonetos

O analisador de hidrocarbonetos totais (THC's), metano (CH_4) e não-metano (NMHC) consiste no *Synspec Alpha 115*, baseado no método de detecção por ionização em chama.

O monitor é um cromatógrafo a gás, no qual a amostra de ar é direcionada para uma chama gerada por hidrogênio, a fim de haja quebra do composto orgânico e, por consequência, ionização dos átomos de carbono. O detector gera um sinal proporcional à quantidade de átomos de carbono que compõem as moléculas de hidrocarbonetos, podendo, assim, determinar a quantidade de hidrocarbonetos totais presente na amostra.

Para determinar medidas somente de metano, a amostra é enviada a um compacto forno com catalisador, a fim de eliminar os hidrocarbonetos não-metano. Dessa forma, o sinal proveniente da ionização em chama será proporcional à quantidade de metano presente. Para a medição de hidrocarbonetos não-metano, o instrumento faz a diferença entre a quantidade de THC's e de CH_4 .

Os valores de concentração detectáveis pelo analisador de hidrocarbonetos variam entre 0,1-10 ppm para o metano, com limite mínimo de detecção de 0,1 ppm, e, para os não-metano, 0,05-20 ppm, com limite mínimo de detecção de 50 ppb, sendo a precisão das medidas de 0,1 ppb (SYNSPEC, 2011).

3.1.7 Sistema de Calibração

A calibração e a manutenção geral dos analisadores foi realizada pela equipe da JCTM no início de cada período de monitoramento. O laboratório possui um sistema de calibração próprio para os analisadores, exceto para o de ozônio.

O sistema de calibração é composto pelo GasCal 1100, que consiste em um diluidor de gás microprocessado e também uma fonte de ozônio para referência nas verificações de leitura no analisador de ozônio; por uma fonte de ar comprimido,

responsável por fornecer ar com uma determinada pressão e com a menor umidade possível; pelos "scrubbers", que são filtros a base de material inerte para a acomodação de carvão ativado, molecular sieve e purafil, a fim de auxiliar na remoção de umidade e dos gases para a geração de ar "zero"; pelo Oxidante Térmico HTO 1000, o qual é responsável pela oxidação de CO em 100°C e na oxidação catalítica de hidrocarbonetos à 520°C para auxiliar na geração de ar "zero"; e pelos cilindros de gases, os quais possuem uma determinada concentração de gases específicos que passarão pelo processo de diluição.

No laboratório, há dois cilindros de gases adquiridos através da empresa White Martins Gases Industriais: um para ser utilizado na calibração do monitor de hidrocarbonetos e o outro, na calibração dos analisadores de CO, NO_x e SO₂. O primeiro é composto por uma mistura de metano ($322 \pm 6 \mu\text{mol/mol}$)/propano ($107 \pm 3 \mu\text{mol/mol}$) e balanço em ar sintético. No segundo, há uma mistura de SO₂ ($47,3 \pm 0,5 \mu\text{mol/mol}$)/NO ($52,2 \pm 0,6 \mu\text{mol/mol}$)/CO ($47,4 \pm 0,5 \mu\text{mol/mol}$) e balanço em nitrogênio.

De forma geral, o gás contido no cilindro é diluído com o ar "zero", a fim de gerar determinados valores de concentração, os quais serão medidos pelos analisadores. Após essa verificação, é realizada a calibração de cada analisador de forma individual.

Para o analisador de ozônio, é realizada apenas uma verificação do ar "zero" no local e a calibração é feita externamente quando necessário. Em relação aos monitores de material particulado, são realizadas operações de limpeza das "cabeças" de amostragem e do sistema de detecção, além da troca das fitas de fibra de vidro.

Nessas ocasiões, também ocorrem a verificação das bombas, das tubulações e do sistema eletrônico e a troca dos leitos dos "scrubbers" e dos filtros no interior de cada amostrador.

3.2 Caracterização dos Locais de Monitoramento

Nos tópicos seguintes, estão descritas as características dos locais escolhidos para a análise da qualidade do ar. Na Figura 3.2, está ilustrada a localização das cidades de Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista.

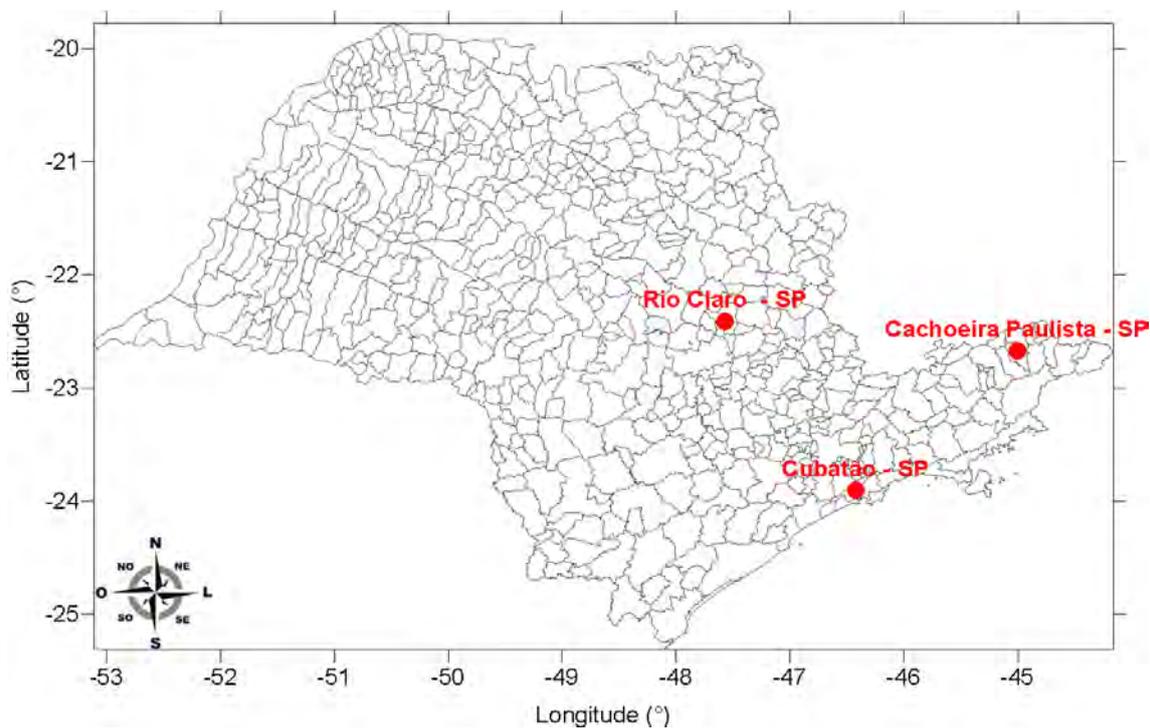


Figura 3.2 - Localização de Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista no estado de São Paulo.

3.2.1 Região de Rio Claro

Os dados da campanha de Rio Claro foram coletados no CEAPLA, uma unidade auxiliar do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP, criada em 1989, a fim de auxiliar no planejamento da gestão de problemas ambientais. Com uma topografia plana, o CEAPLA fica localizado na região leste da cidade, estando o campus da UNESP ao lado da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade (FEENA).

A cidade de Rio Claro está localizada no Centro-Leste do Estado de São Paulo, na microrregião de Campinas, com coordenadas 22°25'S e 47°34'O, e possui uma população de 186.299 habitantes (IBGE, 2010) divididos entre a zona urbana (97,6%) e rural (2,4%).

O clima da região caracteriza-se por apresentar períodos secos no inverno, de junho a setembro, e chuvas no verão, de dezembro a março, com índices pluviométricos anuais em torno de 1400 mm. Os ventos dominantes são provenientes do quadrante sul e sudeste, sendo frequentes as calmarias e escassos os

episódios de ventanias. Apresenta relevo predominantemente plano com cobertura vegetal composta por cerrado, porém restrita a algumas áreas de proteção ambiental (BERRÍOS, 2002; PM RIO CLARO, 2011).

Apresentando um nível de desenvolvimento intermediário em relação aos municípios de Cubatão e Cachoeira Paulista, a motivação da realização da campanha de monitoramento da qualidade do ar em Rio Claro foi devido à existência de grande quantidade de plantações de cana-de-açúcar na cidade e em seu redor (Figura 3.3). Como a tradicional técnica de queima da cana-de-açúcar antecedendo o corte é muito utilizada pelos agricultores paulistas, podem surgir diversos problemas relacionados à qualidade ambiental nas regiões dos canaviais, já que a queima de biomassa está intimamente relacionada à concentração de aerossóis e de gases na atmosfera por representar uma das inúmeras fontes globais desses constituintes (CRUTZEN; ANDREAE, 1990), os quais podem tanto afetar características atmosféricas, como o balanço de radiação (CHANDRASEKAR, 2010), como também contribuir para o efeito estufa (AHRENS, 2008).



Figura 3.3 - Plantações de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2009. Em destaque, está o município de Rio Claro.
Fonte: Adaptada de INPE (2011).

Além do material particulado, a queima da cana contribui para emissão de monóxido de carbono, metano, hidrocarbonetos não metano e óxidos de nitrogênio, gases estes que são importantes precursores do ozônio (CRUTZEN; ANDREAE, 1990; ARBEX, 2001).

A coleta de dados foi realizada entre os meses de junho e setembro de 2009,

período condizente com a colheita da cana na região Centro-Sul do Brasil ocorrida de abril a novembro.

3.2.2 Região de Cubatão

Os dados da campanha de Cubatão foram coletados no CEPEMA, centro de pesquisa sob responsabilidade da USP, que desenvolve estudos dedicados à solução de problemas ambientais. O CEPEMA está localizado às margens da Rodovia Cônego Domênico Rangoni, km 270, na interface entre a Mata Atlântica e uma área fortemente industrializada.

O município de Cubatão está situado na Região Metropolitana da Baixada Santista, microrregião de Santos, nas coordenadas 23°54'S e 46°25'O. Sua população é de aproximadamente 118.797 habitantes 100% localizados na zona urbana (IBGE, 2010).

A região é contornada por colinas e montanhas em forma de U, cobertas pela floresta tropical Atlântica úmida (ALONSO; GODINHO, 1992). Possui uma área serrana, a Serra do Mar, que compreende uma fração do grandioso sistema de escarpas e montanhas que se estende do Estado do Rio de Janeiro até a porção setentrional do estado de Santa Catarina e corresponde à borda do Planalto Atlântico. Também há uma área de planície, que abrange poucos morros isolados e uma grande extensão de planície composta por depósitos marinhos (mangues), fluviais (brejos) ou por antigos depósitos de areia de origem marítima (PM CUBATÃO, 2011).

O clima predominante em Cubatão é o tropical quente e úmido, existindo também variações climáticas de acordo com as características geofísicas do relevo, como o clima da serra, das áreas industrializadas, do sopé da serra e dos manguezais (PM CUBATÃO, 2011).

A origem da cidade está ligada às atividades portuárias, que declinaram após a construção da Estrada de Ferro Santos-Jundiaí. Após esse período, por várias décadas, a alternativa econômica passou a ser a agricultura ao lado da extração de areia e pedras, sendo seguida, a partir dos anos 50, por um forte desenvolvimento industrial. Segundo a Prefeitura Municipal de Cubatão (PM CUBATÃO, 2011), existem atualmente 23 indústrias na cidade, compreendendo um dos maiores polos industriais da América Latina.

Com seu grande parque industrial, Cubatão já enfrentou graves problemas relacionados à qualidade do ar. Altos níveis de poluição observados repercutiram nacional e internacionalmente, ganhando, na década de 80, o título de cidade mais poluída do mundo e adjetivada como "Vale da Morte". Graças à união entre as indústrias, o governo municipal e a comunidade, juntamente com a implantação, em 1983, do Programa de Controle das Fontes Primárias de Poluição em Cubatão, a cidade começou a controlar essa problemática, tornando-se um grande exemplo de que é possível reverter casos graves de degradação ambiental. Em 1992, a cidade ganhou da Organização das Nações Unidas (ONU) o título de "Cidade-Símbolo da Recuperação Ambiental" (SERENZA, 2004; SPITZCOVSKY, 2009).

A motivação da realização da campanha de monitoramento da qualidade do ar em Cubatão estava relacionada ao fato do município possuir uma grande área industrial, sendo uma grande fonte de emissão de poluentes, envolvida por condições meteorológicas e topográficas bastantes desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Na Figura 3.4, estão ilustradas algumas indústrias situadas próximas ao local de monitoramento.

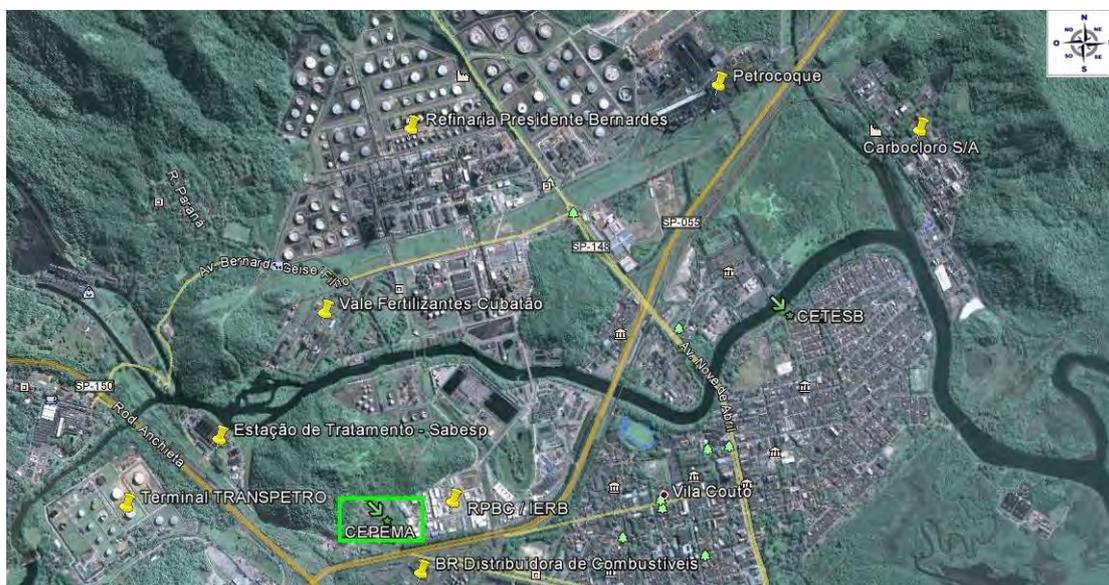


Figura 3.4 - Localização de algumas indústrias (marcadores amarelos) situadas próximas ao CEPEMA (quadrado verde).

Fonte: Adaptada de Google Earth (2012a).

3.2.3 Região de Cachoeira Paulista

Os dados de qualidade do ar em Cachoeira Paulista foram coletados no LIM, uma divisão do CPTEC/INPE responsável por inúmeros sensores e medidores ambientais de pesquisa em todas as áreas da meteorologia. O LIM está localizado a aproximadamente 1 km da Rodovia Presidente Dutra, em uma área influenciada por vegetação.

Cachoeira Paulista é um município do Estado de São Paulo localizado na microrregião de Guaratinguetá, tendo como suas coordenadas 22°40'S e 44°59'O. Possui 30.099 habitantes, divididos entre a zona rural (18,3%) e a zona urbana (81,7%) (IBGE, 2010).

A cidade está situada no Vale do Paraíba às margens da Rodovia Presidente Dutra, principal linha de acesso entre os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, entre as Serras da Mantiqueira e da Bocaina, sendo a maior parte de seu relevo constituído por bacia sedimentar e várzeas e uma parcela menor de escarpas. Seu clima característico é quente e úmido e apresenta pequenas áreas de preservação permanente da Mata Atlântica original (GUIA DO VALE DO PARAÍBA, 2011).

Cortado pelo Rio Paraíba do Sul, o município surgiu no caminho dos tropeiros que seguiam para o Estado de Minas Gerais. Atualmente, sua economia gira em torno do ecoturismo e do turismo religioso, uma vez que é sede da Comunidade Católica Romana Canção Nova (PM CACHOEIRA PAULISTA, 2011).

Sendo Cachoeira Paulista um município de pequeno porte que apresenta um modesto desenvolvimento econômico, o monitoramento da qualidade do ar foi realizado a fim de se avaliar a influência da Rodovia Presidente Dutra, uma fonte contínua de emissões veiculares, em um local no qual não há outras fontes expressivas de poluição. Na Figura 3.5, está ilustrada a localização do Laboratório CONSOLIDAR em relação à Rodovia Presidente Dutra.



Figura 3.5 - Localização do Laboratório CONSOLIDAR (quadrado verde) e da Rodovia Presidente Dutra (quadrado vermelho).
Fonte: Adaptada de Google Earth (2012b).

3.3 Aquisição e Tratamento dos Dados

A seguir, serão apresentados os métodos utilizados para a aquisição e o tratamento das informações que proporcionaram a análise da qualidade do ar no período monitorado.

3.3.1 Dados de Monitoramento dos Poluentes

A estação de monitoramento da qualidade do ar possui um sistema de aquisição e armazenamento de dados denominado WinAQMS (Sistema Windows de Monitoramento da Qualidade do Ar). Este sistema é programado para armazenar os dados de concentração a cada minuto, gerando um total de 1440 valores diários para cada poluente. Com exceção do monitor de material particulado, o qual fornece informações a cada 50 minutos, os dados enviados por minuto ao WinAQMS pelos analisadores de gases e monitores de hidrocarbonetos representam as análises reais do instrumento.

A seleção inicial dos valores considerados válidos é realizada pelo WinAQMS com o auxílio direto do próprio sistema, uma vez que este é capaz de alertar instantaneamente ou historicamente quando há dados inválidos. Esse alerta visual é caracterizado pelo hachuramento dos valores medidos da seguinte forma:

- **Dado bom**: sem hachurar quando considerado dado correto;
- **Dado bom**: sem hachurar quando considerado Alarme Baixo (abaixo de um valor de referência);
- **Dado bom**: hachurado de verde quando considerado Alarme Alto (acima de um valor de referência);
- **Dado ruim**: hachurado de turquesa quando houver amostragem insuficiente;
- **Dado ruim**: hachurado de azul quando não houver amostragem;
- **Dado ruim**: hachurado de amarelo quando o sistema estiver em processo de calibração;
- **Dado ruim**: hachurado de rosa quando o sistema estiver fora de serviço;
- **Dado ruim**: hachurado de vermelho quando houver falha na energia,
- **Dado ruim**: hachurado de preto quando houver falha do instrumento.

O sistema WinAQMS também possibilita que sejam configurados valores de referência, denominados Alarmes e Dados Válidos, os quais auxiliam no processo de seleção. Nesse trabalho, considera-se como Alarme os valores dos padrões nacionais de qualidade do ar para cada poluente (Tabela 2.4), associando-se Alarme Alto aos padrões primários e Alarme Baixo aos padrões secundários. Como Dado Válido, é considerado o valor que se enquadra dentro do intervalo detectável em cada analisador, selecionando como Alto Dado Válido o limite máximo e como Baixo Dado Válido o limite mínimo de detecção.

De posse dos dados considerados válidos, é adotado um critério de representatividade de dados, com o objetivo de se desconsiderar os períodos nos quais ocorreram falhas na medição que prejudicariam a interpretação dos resultados obtidos. Segundo esse critério, dado horário válido equivale à média calculada com, no mínimo, 2/3 dos valores válidos coletados a cada hora e dado diário válido corresponde à média calculada com, no mínimo, 2/3 dos dados horários válidos em cada dia.

Inicialmente, são analisadas as médias das concentrações horárias de todo o período, a fim de se verificar o comportamento geral do poluente ao longo do

dia. Também é analisado o perfil da concentração do poluente a cada minuto no dia em que a concentração atingiu o valor máximo.

As análises da qualidade do ar são feitas considerando as tendências em períodos de curto prazo, de acordo com o tempo de amostragem referenciado na legislação nacional para cada poluente. Para o ozônio e o dióxido de nitrogênio, a concentração diária corresponde ao maior valor de concentração horária medido no dia. Para o material particulado e o dióxido de enxofre, é considerada como valor diário a média das concentrações medidas ao longo de 24h. O valor diário do monóxido de carbono equivale à maior concentração obtida pela média de 8h do dia. De posse desses valores diários, é possível avaliar se a concentração do poluente ultrapassou ou não o padrão nacional de qualidade do ar, bem como calcular o índice de qualidade do ar.

O IQAr para os poluentes controlados por legislação é computado, baseando-se na metodologia utilizada pela CETESB (2011). O índice é calculado em função da concentração média do poluente da seguinte forma:

$$IQAr_p = \frac{IQAr_{max} - IQAr_{min}}{C_{max} - C_{min}} \times (C_p - C_{min}) + IQAr_{min},$$

em que $IQAr_p$ corresponde ao índice de qualidade do ar referente ao poluente "p", C_p é a concentração do poluente "p", C_{max} é a concentração que representa o ponto de inflexão na função com valor imediatamente maior que C_p , $IQAr_{max}$ é o índice correspondente a C_{max} , C_{min} é a concentração que representa o ponto de inflexão na função com valor imediatamente menor que C_p e $IQAr_{min}$ é o índice correspondente a C_{min} . As constantes $IQAr_{max}$, $IQAr_{min}$, C_{max} e C_{min} são obtidas a partir da Tabela 2.8 e podem ser verificadas nas Tabelas 2.4 e 2.5.

Utilizando como concentração do poluente os dados que representam os valores diários, foi calculado o índice de qualidade do ar para cada poluente regulamentado, a fim de se classificar a qualidade do ar de acordo com efeitos que podem ser causados à saúde humana.

3.3.2 Informações Meteorológicas

Para o período de coleta, foram obtidas informações sobre as condições meteorológicas existentes em cada local. As avaliações são feitas considerando-se as variáveis temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, precipitação e radiação solar global.

Os dados de temperatura, umidade relativa e radiação global são utilizados para verificar a influência das condições meteorológicas na formação de poluentes secundários.

As variáveis direção e velocidade do vento auxiliam na avaliação da dispersão dos poluentes. Para este estudo, é utilizada a rosa dos ventos, a qual representa a distribuição da velocidade do vento em frequências de ocorrência em cada direção. Essa representação gráfica possui uma forma circular, podendo apresentar 8 ou 16 seções para representar a direção do vento. Para 16 subdivisões, tem-se: N (norte), NNE (norte-nordeste), NE (nordeste), ENE (leste-nordeste), E (leste), ESE (leste-sudeste), SE (sudeste), SSE (sul-sudeste), S (sul), SSW (sul-sudoeste), SW (sudoeste), WSW (oeste-sudoeste), W (oeste), WNW (oeste-noroeste), NW (noroeste) e NNW (norte-noroeste). Em cada direção, os dados de vento são classificados em faixas de velocidades, representadas por diferentes cores, e a respectiva frequência de ocorrência é expressa em porcentagem e corresponde ao intervalo entre os círculos traçados. Dessa forma, é possível determinar a direção do vento predominante no local de monitoramento através da maior porcentagem de ocorrência observada.

Os dados meteorológicos de Rio Claro, com exceção da radiação, foram provenientes das Leituras Diárias da Estação Meteorológica de Rio Claro localizada no CEAPLA, as quais fornecem informações às 12h, 18h e 24h UTC/GMT, uma vez que a estação meteorológica do laboratório não estava em funcionamento.

Durante o período de monitoramento em Cubatão, não havia estações mediadoras de informações meteorológicas no CEPEMA. Por esse motivo, esses dados foram retirados do Relatório Mensal de Dados Horários disponibilizado pela CETESB através do Sistema de Informações da Qualidade do Ar (QUALAR) (<http://java.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do#>). Os dados de precipitação foram fornecidos pelo Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo (SAISP), sendo enviadas informações referentes a três postos de monitoramento (P25 - Posto Casa 8, P27 - Posto Cosipa e P28 - Posto Portão 40), localizados, respectivamente, a 3,6 km, 6,7 km e 4,2 km de distância do CEPEMA. Os postos P25 e P28 estão localizados em uma área de vegetação, enquanto o posto P27 está situado em uma região urbanizada. Na Figura 3.6, estão ilustradas a localização do CEPEMA e dos postos de monitoramento do SAISP em Cubatão.

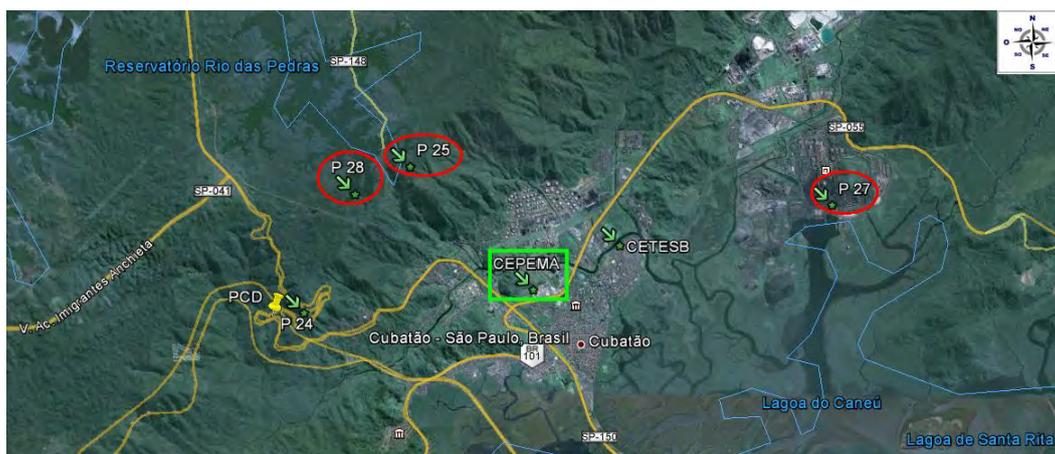


Figura 3.6 - Localização do CEPEMA (quadrado verde) e dos postos de monitoramento do SAISP (P25, P27 e P28 - círculos vermelhos).
Fonte: Adaptada de Google Earth (2012c).

As condições meteorológicas em Cachoeira Paulista são monitoradas por uma Estação Meteorológica localizada no LIM, cujos dados são arquivados a cada 10 minutos.

Para todos os locais, as informações sobre a radiação solar global (médias diárias e mensais) foram obtidas a partir do Acervo de Imagens de Radiação da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do CPTEC/INPE, uma vez que não houve medições desta variável nos locais de monitoramento. Esses arquivos são estimados com o modelo GL (1.2) aplicado a imagens no canal visível dos satélites geostacionários GOES 10 (ano de 2009) e GOES 12 (anos de 2011 e 2012).

O modelo GL é um modelo físico, o qual propõe relações entre fluxos no topo e na superfície baseadas em equações de transporte da radiação, avaliando a irradiância global à superfície a partir da irradiância emergente no topo da atmosfera detectada por satélite. Considerando os parâmetros físicos água precipitável, conteúdo de ozônio e dióxido de carbono, o modelo admite dois intervalos de bandas espectrais largas para a transferência radiativa troposférica: os intervalos do visível e do ultravioleta e o intervalo do infravermelho próximo. Esta versão apresenta desvio médio mensal de $\pm 10 \text{ W/m}^2$ e desvio padrão dos dados mensais inferior a 20 W/m^2 (CEBALLOS; BOTTINO, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através do monitoramento da qualidade do ar são apresentados a seguir e estão agrupados de acordo com o local de estudo. As análises realizadas para cada poluente são feitas separadamente, levando em consideração as diferentes características das espécies monitoradas e a ausência de dados em determinados dias de coleta.

4.1 Monitoramento da Qualidade do Ar em Rio Claro

O monitoramento da qualidade do ar na cidade de Rio Claro foi realizado no período de 25/06/2009 a 16/09/2009. Dos 84 dias medidos, 75 dias foram considerados válidos, porém cada poluente apresentou uma determinada quantidade de dias válidos. Para o CO, foram 62 dias válidos; para o O₃, 35 dias; para o NO, 69 dias; para NO₂, 69 dias; para o SO₂, 69 dias e para o PM₁₀, 56 dias. Durante o monitoramento, o monitor de hidrocarbonetos apresentou alguns erros relacionados ao gerador de hidrogênio, os quais invalidaram a coleta de dados destes poluentes em Rio Claro.

De forma geral, a perda de dados esteve relacionada a problemas de falha de energia, erros na leitura dos instrumentos, permanência dos analisadores em modo de calibração e operações de manutenção no local. Além desses, houve também problemas relacionados à penetração de água no sistema de captação do monitor de material particulado.

As análises das características meteorológicas são feitas para todos os dias monitorados, a fim de se verificar a situação atmosférica local e sua influência na dispersão dos poluentes.

4.1.1 Características Meteorológicas

Segundo informações do Boletim de Informações Climáticas do CPTEC/INPE - INFOCLIMA (INPE, 2012b), no mês de julho/2009, a atuação de sistemas frontais proporcionou chuvas acentuadas que atingiram o Estado de São Paulo, principalmente em torno dos dias 11 e 22, e o ingresso de massas de ar frio com trajetória continental declinou as temperaturas. Em relação ao mês de agosto/2009, a primeira quinzena foi caracterizada por um período de estiagem com atuação de uma massa de ar seco, que resultou em baixos valores de umidade relativa. Porém, a formação de sistemas frontais na segunda quinzena proporcionou chu-

vas intensas. Para o mês de setembro/2009, o avanço de sistemas frontais para o interior da Região Sudeste favoreceu o aumento das chuvas. Nas Figura 4.1, 4.2 e 4.3, estão ilustradas algumas atuações de sistemas frontais no período de monitoramento.

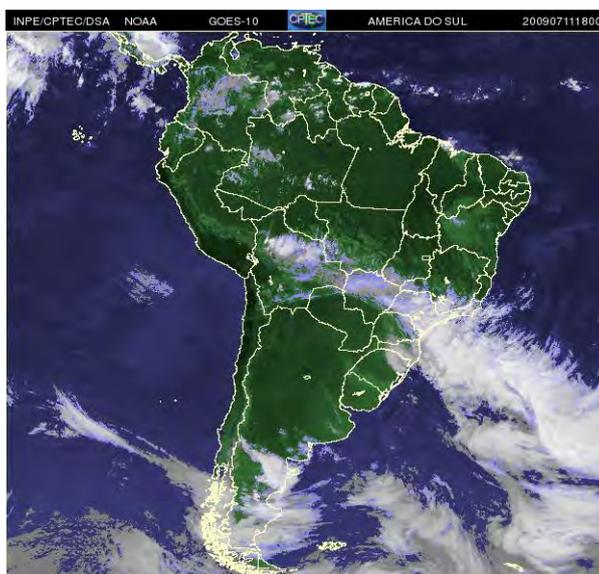


Figura 4.1 - Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 11/07/2009 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)



Figura 4.2 - Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 18/08/2009 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)



Figura 4.3 - Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 09/09/2009 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)

Durante o período de coleta de dados em Rio Claro, a temperatura apresentou média de $20,1^{\circ}\text{C}$, com mínima de $3,4^{\circ}\text{C}$ e máxima de $33,2^{\circ}\text{C}$, com uma considerável amplitude térmica. Em 34 dias de coleta de dados, foram registrados ausência de chuvas e ocorrência de alta porcentagem de calmaria nos horários monitorados, a qual foi considerada como velocidade do vento inferior a $0,5\text{ m/s}$, condições meteorológicas estas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

A rosa dos ventos obtida para o período, ilustrada na Figura 4.4, mostra $77,9\%$ de calmaria e a ocorrência de ventos predominantes na direção nordeste e sudoeste. O vento de maior magnitude, com $7,3\text{ m/s}$, ocorreu na direção SW. Analisando o comportamento médio diário do vento, observa-se que 48% dos dias apresentaram ausência de vento às 9h, 15h e 21h.

Observando o comportamento do vento ao longo do dia, pode-se verificar mudanças nas frequências das direções. No período da manhã, como ilustrado na Figura 4.5, a medida às 9h mostra maior incidência de ventos no quadrante NE, seguido pelo quadrante NW. Apesar da ocorrência de alguns eventos com magnitude de velocidade relativamente alta, a porcentagem de calmaria foi de $86,7\%$.

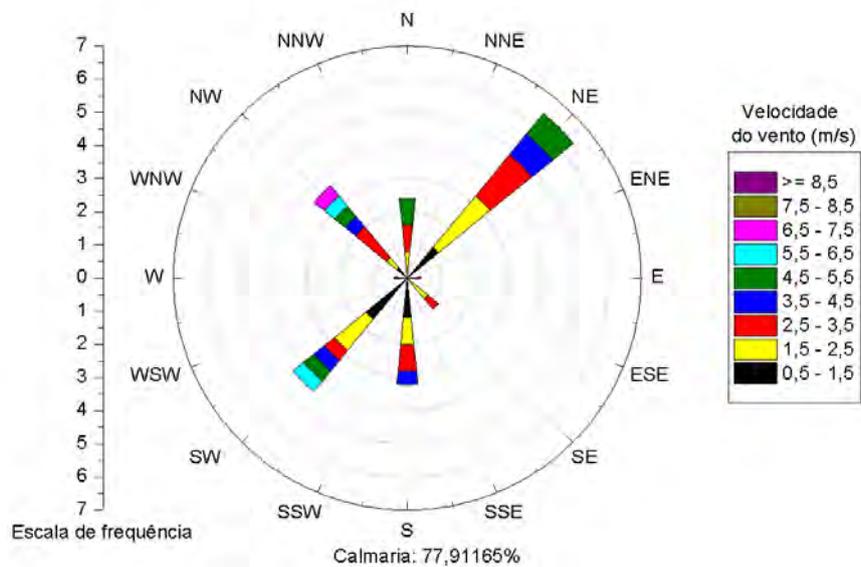


Figura 4.4 - Rosa dos ventos de Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

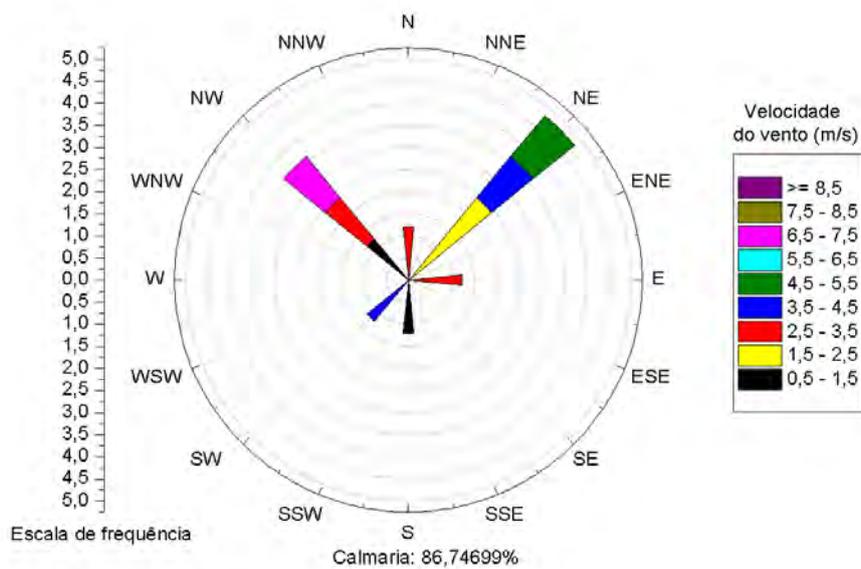


Figura 4.5 - Rosa dos ventos de Rio Claro às 9h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

As observações às 15h, apresentadas na Figura 4.6, mostram uma contribuição de muitos quadrantes, destacando-se novamente a direção NE como a principal, seguida dos quadrantes SW e NW. Esse horário é caracterizado pela maior

frequência de ventos, apresentando calmaria de 57,8%.

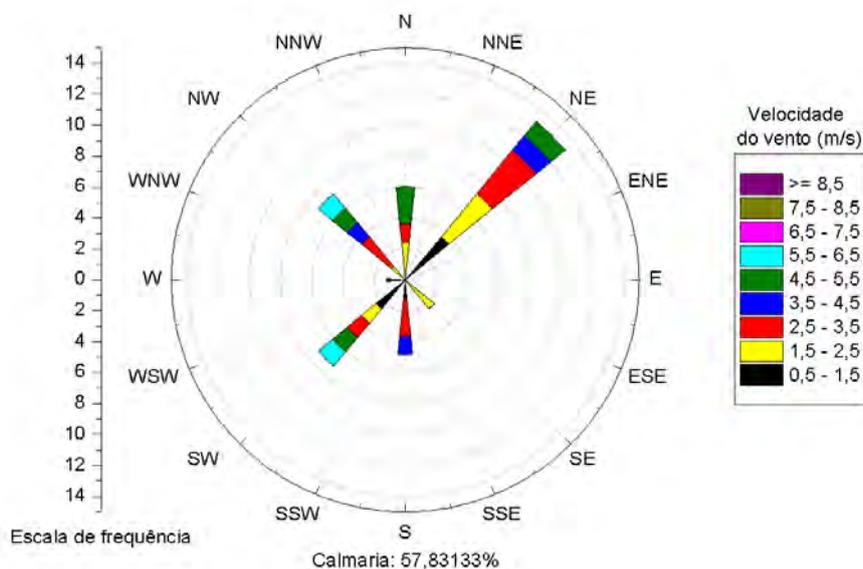


Figura 4.6 - Rosa dos ventos de Rio Claro às 15h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Na Figura 4.7, está ilustrado o comportamento do vento às 21h. Pode-se observar predominância de ventos na direção SW, seguida pelo quadrante S. Nesse horário, encontram-se apenas baixas magnitudes de velocidade do vento e a maior porcentagem de calmaria, 89,1%.

Como a região de Rio Claro possui grande concentração de plantações de cana-de-açúcar, a alta incidência de calmaria à noite é um fator que influencia negativamente a qualidade do ar, uma vez que dificulta a dispersão de poluentes em um período do dia no qual há a prática de queima do canavial realizada por alguns agricultores antes da etapa de corte.

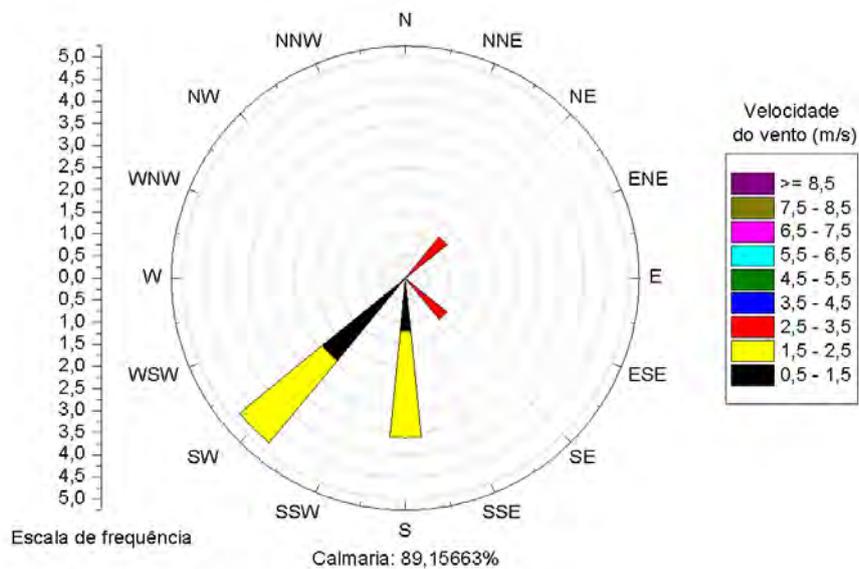


Figura 4.7 - Rosa dos ventos de Rio Claro às 21h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

A precipitação acumulada total foi de 223,8 mm, tendo maior incidência entre a segunda quinzena de agosto e a primeira de setembro. O acumulado diário da precipitação nesse período está ilustrado na Figura 4.8.

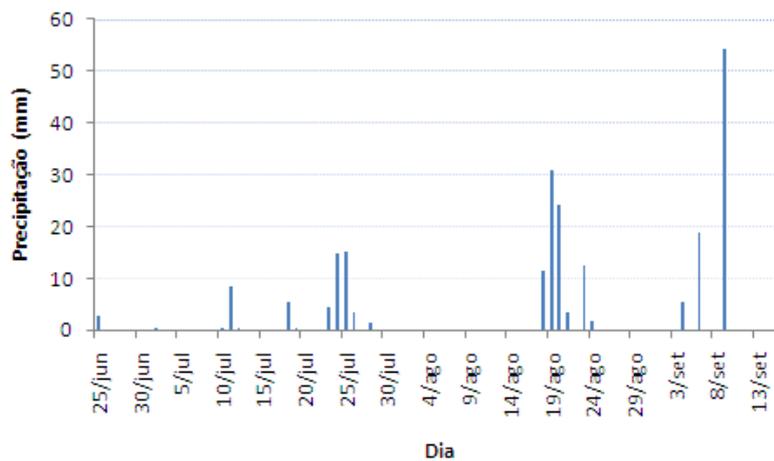


Figura 4.8 - Precipitação acumulada diária em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

A umidade relativa do ar também é um parâmetro importante a ser monitorado, uma vez que está relacionada à ocorrência de reações químicas envolvendo os poluentes, bem como sua baixa ocorrência pode agravar doenças respiratórias e proporcionar desconforto à população. O período apresentou umidade relativa mínima de 19% e máxima de 100%. Na Figura 4.9, está ilustrado o comportamento da umidade relativa às 15h, período do dia no qual os valores de umidade são, geralmente, menores. Pode-se observar que a média, representada pela linha reta, foi de, aproximadamente, 52% e que os intervalos com menores valores coincidem com os períodos de estiagem.

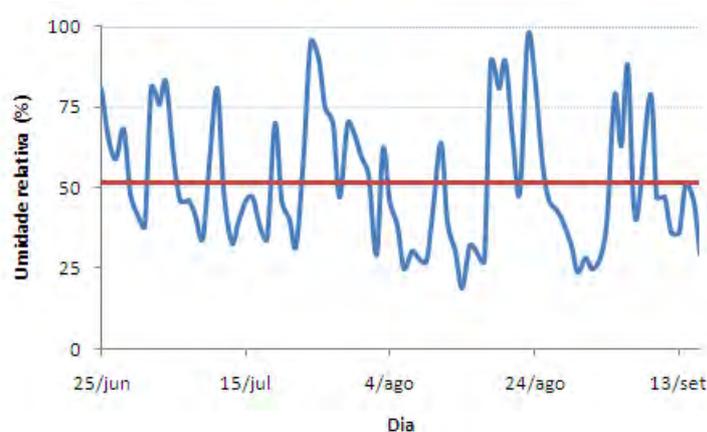


Figura 4.9 - Umidade relativa em Rio Claro às 15h durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

A intensidade de radiação solar apresentou valores médios entre 140 a 160 W/m^2 nos meses de junho/2009 e julho/2009, atingindo médias entre 160 a 180 W/m^2 nos meses de agosto/2009 e setembro/2009. Na Figura 4.10, estão ilustradas as médias da radiação solar diária durante os meses nos quais houve monitoramento em Rio Claro.

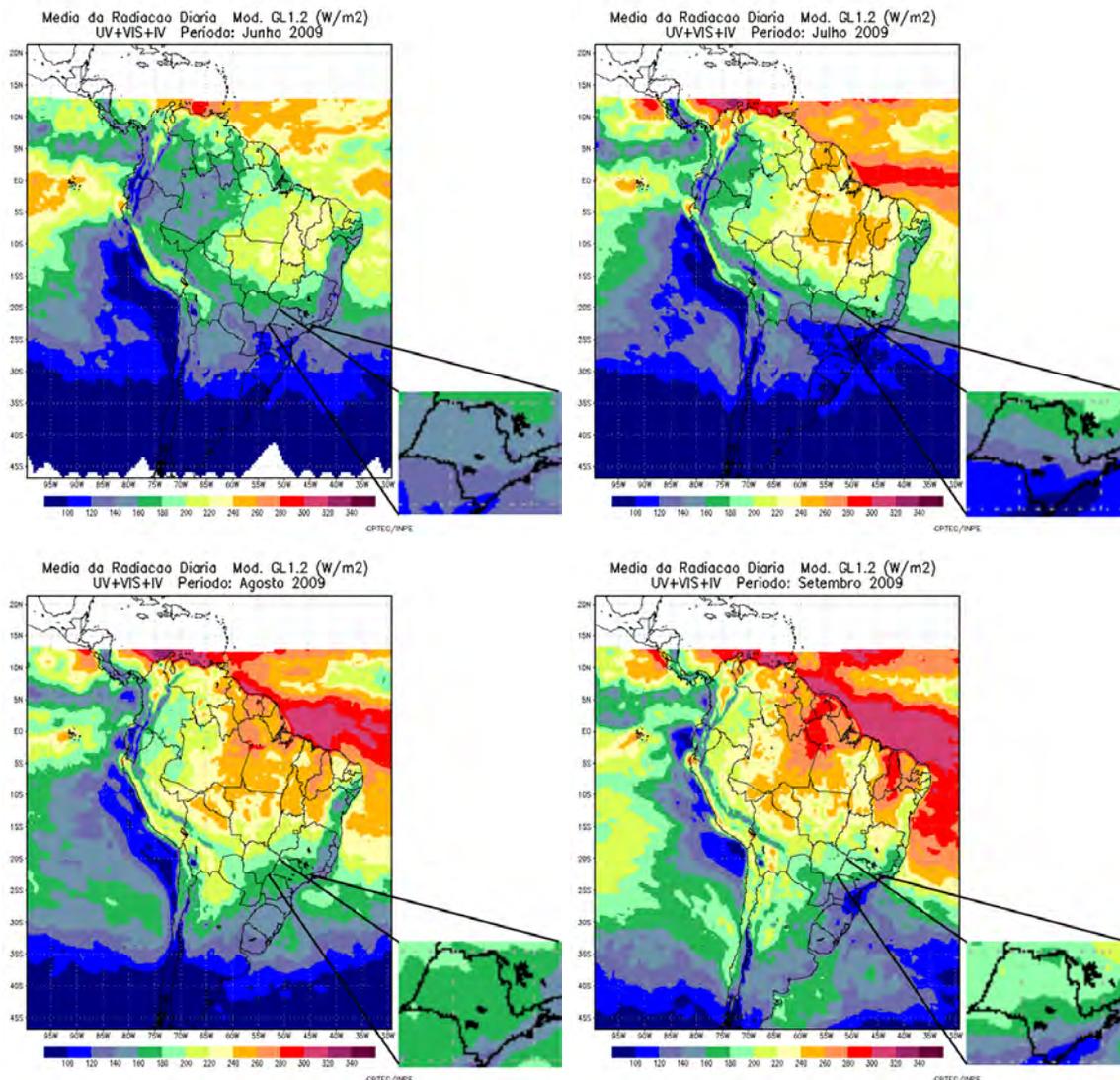


Figura 4.10 - Média da radiação solar diária nos meses de junho/2009, julho/2009, agosto/2009 e setembro/2009.

4.1.2 Análise da Qualidade do Ar

Os resultados provenientes da avaliação do comportamento dos poluentes em Rio Claro durante o período de coleta são apresentados neste item, com exceção dos hidrocarbonetos, uma vez que ocorreu uma série de erros com o monitor, inviabilizando a detecção correta da concentração destes poluentes no ar.

4.1.2.1 Monóxido de Carbono

O monitoramento das concentrações de CO registrou um valor mínimo de $2.241,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e um máximo de $4.443,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A média da concentração horária foi de $3.293,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisando a máxima média de 8h de cada dia, verificou-se que o maior valor do período foi de $4.155,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, inferior ao padrão nacional para o CO ($10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Na Figura 4.11, está ilustrado o comportamento médio da concentração horária de CO, bem como as máximas e mínimas horárias.

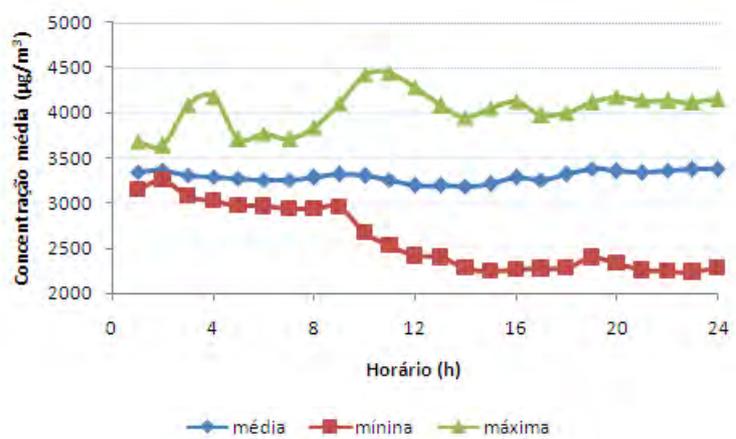


Figura 4.11 - Concentração horária média, mínima e máxima de CO em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Em torno das 8h, o perfil da concentração de CO inicia uma ascensão, atingindo um máximo em torno de 10h. Durante o período da manhã, as altas concentrações podem estar relacionadas ao grande tráfego de veículos no horário usual de início do expediente de trabalho.

À tarde, as temperaturas mais elevadas e a maior presença de ventos proporcionam a formação de condições atmosféricas favoráveis à dispersão, o que resulta em queda nos valores de concentração do CO. Pode-se observar que, a partir das 11h, o perfil adquire comportamento descendente até atingir um mínimo às 15h. Após às 16h, observa-se novamente uma ascensão, com pico às 19h, que pode estar relacionada às emissões veiculares referentes ao tráfego no final da rotina de trabalho.

Durante a noite, as baixas temperaturas e a calmaria dificultam a dispersão dos

poluentes, permitindo que estes permaneçam concentrados na atmosfera. Existe um pico bastante acentuado na madrugada, o qual pode estar relacionado às emissões de CO provenientes do hábito de produtores de cana-de-açúcar de queimar as plantações antes do corte neste momento do dia.

A maior concentração horária de CO ($4.443,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi registrada no dia 07/08/2009 às 11h. Observa-se que as concentrações tendem a aumentar a partir das 8h até atingir o máximo. Esse máximo valor horário pode estar relacionado ao acúmulo no ar de CO proveniente das emissões veiculares, as quais são, geralmente, bastante intensas no período da manhã. Em relação às condições meteorológicas, foi registrado ausência de precipitação neste dia e calmaria às 12, 18 e 24 UTC. Na Figura 4.12, está ilustrado o comportamento da concentração de CO ao longo desse dia.

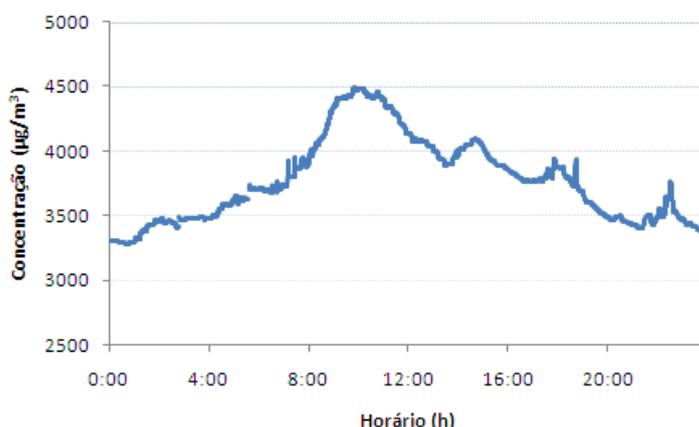


Figura 4.12 - Concentração de CO em Rio Claro ao longo do dia 07/08/2009.

4.1.2.2 Ozônio

Durante o período de coleta, a média das concentrações horárias de O_3 foi de $27,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A mínima encontrada foi de $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a máxima, de $67,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisando o máximo valor horário de cada dia, verifica-se que o padrão de qualidade do ar para esse poluente ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) não foi ultrapassado.

Os comportamentos médio, máximo e mínimo da concentração horária de O_3 estão ilustrados na Figura 4.13. Pode-se verificar um perfil característico desse poluente, apresentando um máximo de concentração entre 13h e 18h. Isso ocorre porque o O_3 é um oxidante fotoquímico cujo ciclo de formação depende

de parâmetros meteorológicos, como temperatura e radiação solar, os quais são elevados nesse período do dia.

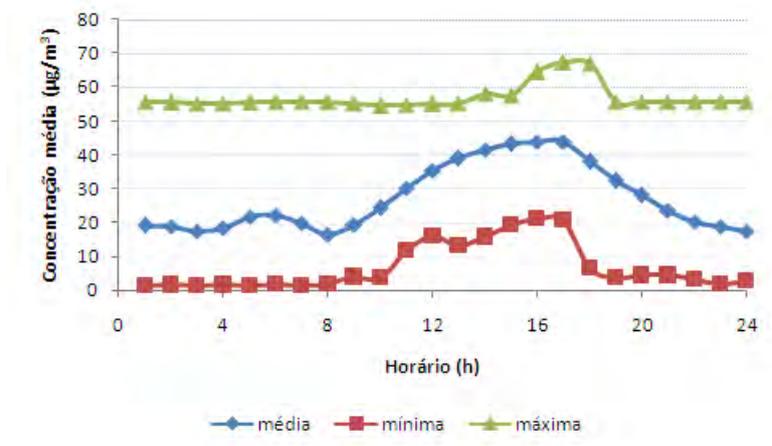


Figura 4.13 - Concentração horária média, mínima e máxima de O_3 em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Como as maiores concentrações de ozônio são registradas no período da tarde, foram elaborados os perfis de concentração horária, de nebulosidade, de velocidade do vento e de temperatura do ar às 15h, a fim de se verificar a influência dessas variáveis meteorológicas no comportamento do poluente no momento do dia em que são registradas as maiores concentrações.

Os perfis de concentração de O_3 e de nebulosidade às 15h são apresentados na Figura 4.14. Observa-se que há um comportamento ascendente da concentração em dias com baixa nebulosidade. A partir do momento em que há aumento de nebulosidade, o perfil de concentração transforma-se progressivamente em descendente.

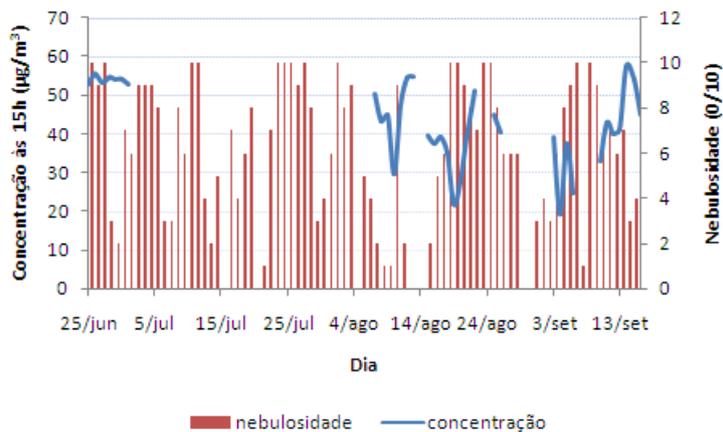


Figura 4.14 - Concentração de O₃ e nebulosidade às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Também foram comparados os perfis de concentração e do vento, como ilustrado na Figura 4.15. Os períodos de calmaria e de ventos fracos apresentam valores mais altos de concentração, característica essa que se inverte em períodos de ventos mais fortes.

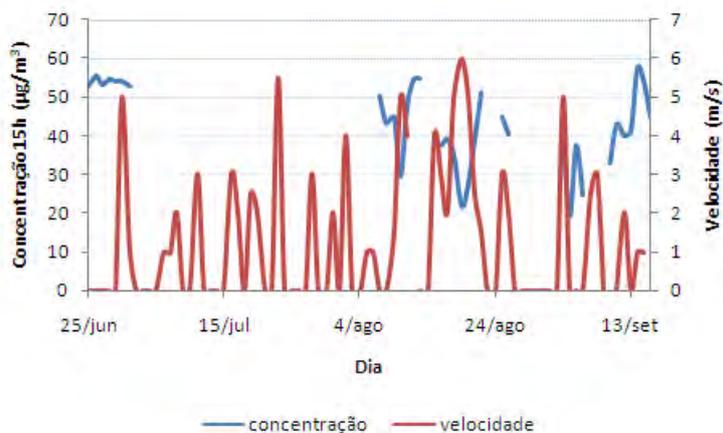


Figura 4.15 - Concentração de O₃ e velocidade do vento às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Comparando o comportamento da temperatura com a concentração de ozônio, como ilustrado na Figura 4.16, observa-se que os períodos com perfis de temperatura descendentes foram condizentes com os períodos nos quais as concentrações de ozônio apresentaram comportamento descendente, havendo aumento progressivo dos valores com a ascensão das temperaturas.

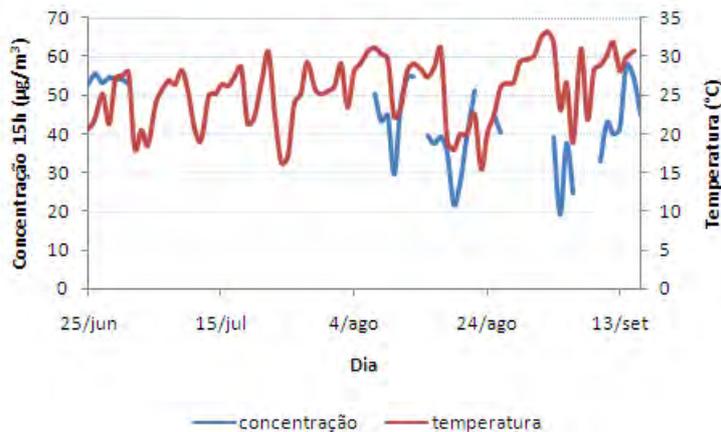


Figura 4.16 - Concentração de O₃ e temperatura do ar às 15h em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Como não houve ultrapassagem do padrão de O₃ durante os dias com amostragem, é feita uma análise do comportamento do poluente no dia em que se registrou a máxima concentração horária (67,2 µg/m³). Verificou-se que essa ocorrência foi registrada às 17h do dia 12/08/2009, conforme ilustrado na Figura 4.17, quando as condições meteorológicas locais eram favoráveis para a formação de ozônio: ausência de chuva, predomínio de calmaria, céu limpo e temperaturas elevadas, com incidência de radiação solar entre 5 a 5,5 kWh/m², conforme ilustrado na Figura 4.18.

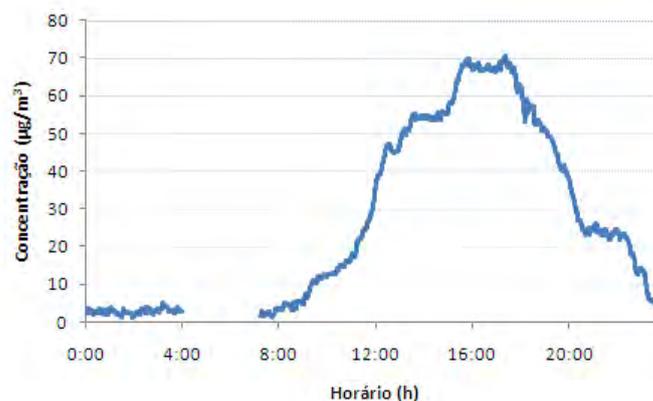


Figura 4.17 - Concentração de O₃ em Rio Claro ao longo do dia 12/08/2009.

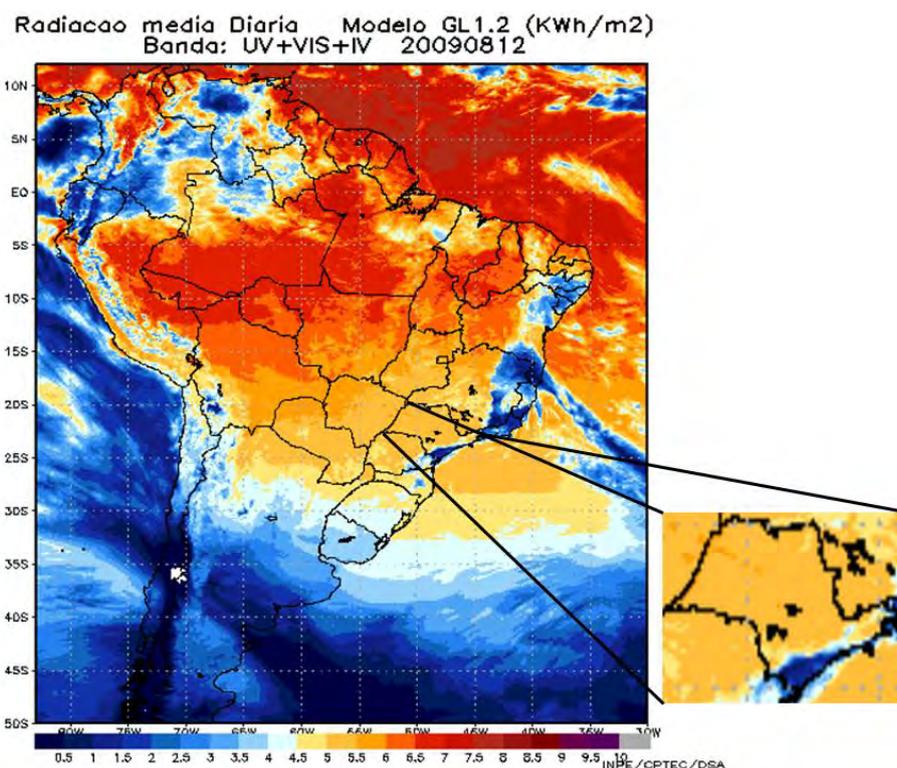


Figura 4.18 - Média da radiação solar em Rio Claro ao longo do dia 12/08/2009.

4.1.2.3 Óxido Nítrico

Para as concentrações horárias de NO, o valor médio encontrado foi de 7,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, variando entre um valor mínimo de 1,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e um máximo de 64,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Não foi possível avaliar se houve ultrapassagem de padrão, uma vez que a legislação nacional não prevê padrões de qualidade do ar para este poluente.

Os perfis horários médio, mínimo e máximo de NO estão representados na Figura 4.19. O comportamento médio mostra um pico de concentração no período da manhã em torno de 9h, coincidindo com o horário do grande tráfego de veículos no início da jornada de trabalho da maioria da população. Durante a tarde, os movimentos convectivos da atmosfera auxiliam na dispersão dos poluentes. As concentrações permanecem menores no final da tarde e à noite, influenciadas pela ocorrência de reações de formação de NO₂.

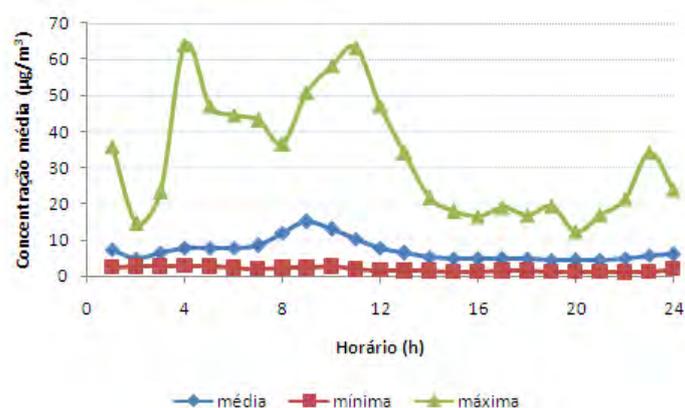


Figura 4.19 - Concentração horária média, mínima e máxima de NO em Rio Claro durante o período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Para o NO, a maior concentração horária ($64,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ocorreu no dia 04/07/2009 às 4h. Na Figura 4.20, está ilustrado o comportamento do poluente ao longo deste dia. Pode-se observar que, durante a madrugada, as concentrações adquirem comportamento ascendente mais acentuado a partir das 3h e, apesar de descenderem em alguns momentos, os valores permanecem mais elevados. Este acúmulo de NO no ar pode estar relacionado à queima dos canaviais que ocorre habitualmente na região no período noturno, aliada a condições meteorológicas geralmente desfavoráveis à dispersão neste momento do dia.

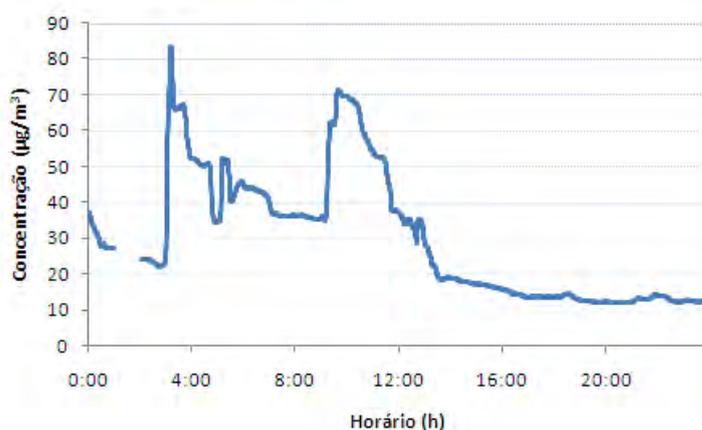


Figura 4.20 - Concentração de NO em Rio Claro ao longo do dia 04/07/2009.

4.1.2.4 Dióxido de Nitrogênio

Para o NO_2 , os valores mínimo e máximo de concentração horária foram, respectivamente, $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $99,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto obteve-se uma média de $19,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando a máxima concentração horária com os padrões primários

($320 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e secundários ($190 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de qualidade do ar para o NO_2 , verificou-se que não houve ultrapassagem.

Na Figura 4.21, estão ilustrados o comportamento médio, mínimo e máximo da concentração horária de NO_2 durante o período de coleta. A partir das 13h, observam-se as menores concentrações de NO_2 , coincidindo com o período do dia de maior concentração de O_3 e maior incidência de radiação solar. Este fato permite verificar a ocorrência local das reações fotoquímicas de formação de ozônio baseadas na fotólise do NO_2 (Equações 2.2 e 2.3).

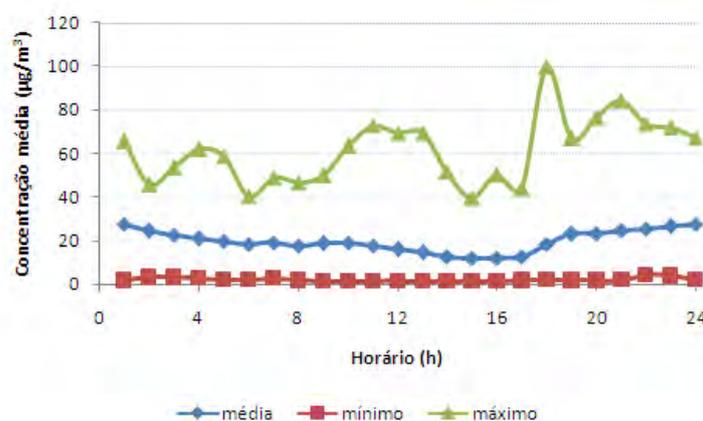


Figura 4.21 - Concentração horária média, mínima e máxima de NO_2 em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

No período noturno, são encontradas as maiores concentrações de NO_2 . Como o NO_2 é predominantemente um poluente secundário, essa característica do perfil pode estar associada à formação desse poluente através das reações que envolvem O_3 e NO (Equação 2.4), uma vez que esses dois precursores de NO_2 apresentam concentrações menores durante a noite. A presença de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão nesse período do dia também contribuiu para elevar a concentração.

A máxima concentração horária de NO_2 ($99,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi verificada no dia 01/07/2009 às 18h. Os perfis de NO_2 e NO ao longo deste dia estão ilustrados na Figura 4.22, através dos quais observa-se também um crescimento brusco na concentração de NO momentos antes. Neste horário, também foram registradas as maiores concentrações de CO ao longo deste dia. Esses picos de concentração coincidem com um período do dia de intenso tráfego de veículos. Aliado a estes fatos, verificou-se também que as concentrações de O_3 apresentaram uma queda significativa neste horário, evidenciando a ocorrência do ciclo de formação

de NO₂.

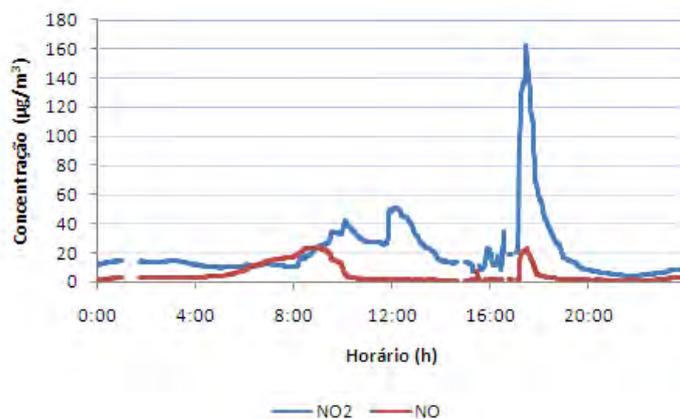


Figura 4.22 - Concentração de NO₂ (perfil azul) e de NO (perfil vermelho) em Rio Claro ao longo do dia 01/07/2009.

4.1.2.5 Dióxido de Enxofre

A média da concentração horária de SO₂ foi de 23,3 µg/m³, sendo 16,9 µg/m³ o mínimo horário e 47,7 µg/m³ o máximo horário. Analisando o maior valor encontrado para a média das concentrações ao longo de 24h (45,5 µg/m³), verifica-se que os padrões primário (365 µg/m³) e secundário (100 µg/m³) de qualidade do ar para o SO₂ também não são ultrapassados.

O perfil médio, mínimo e máximo da concentração horária de SO₂ estão mostrados na Figura 4.23. Observa-se que os maiores valores estão concentrados em torno de 10h, período de grande tráfego de veículos, ilustrando, assim, a queima de combustíveis fósseis como uma grande fonte local de SO₂. O valor horário referente às 2h é bem inferior aos demais, uma vez que o analisador permaneceu em modo de calibração neste horário nos primeiros dias de coleta, período no qual foram registradas as maiores concentrações de SO₂. Por esse motivo, os valores iniciais foram descartados, proporcionando a queda da média horária.

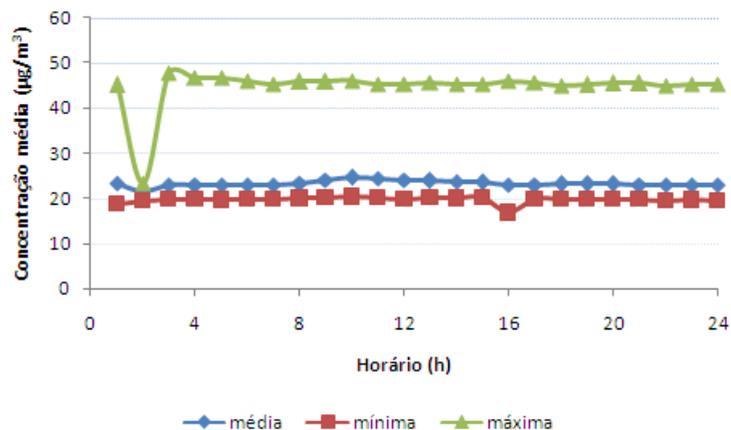


Figura 4.23 - Concentração horária média, mínima e máxima de SO₂ em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

Na Figura 4.24, está representado o comportamento diário da concentração de SO₂ no dia em que foi verificada a maior concentração horária (47,7 µg/m³). Esse máximo valor horário foi obtido às 3h do dia 26/06/2009, em um período no qual as condições meteorológicas de calma, ventos fracos e ausência de chuva eram desfavoráveis à dispersão, favorecendo o acúmulo de SO₂ no ar. Como a cidade de Rio Claro possui um parque industrial que abriga inúmeras empresas químicas e metalúrgicas próximo ao local de monitoramento, é possível que as parcelas de ar com SO₂ tenham sido transportadas a partir dessa região.

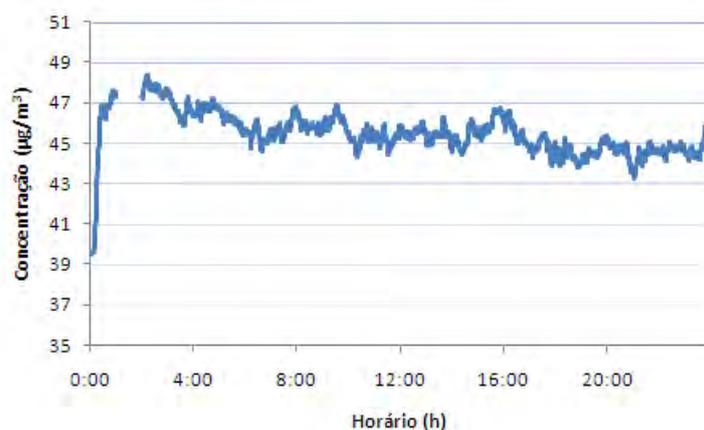


Figura 4.24 - Concentração de SO₂ em Rio Claro ao longo do dia 26/06/2009.

4.1.2.6 Material Particulado PM₁₀

Para o PM₁₀, a média da concentração horária foi de 37,3 µg/m³. Os valores horários mínimo e máximo variaram, respectivamente, entre 10,0 µg/m³ e 120,0 µg/m³. Ao analisar o maior valor referente à média das concentrações ao longo de 24h (66,6 µg/m³), verifica-se que os padrões de qualidade do ar para o PM₁₀ (150 µg/m³) não foram ultrapassados.

Na Figura 4.25, estão ilustradas o comportamento médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de PM₁₀ durante o período de coleta.

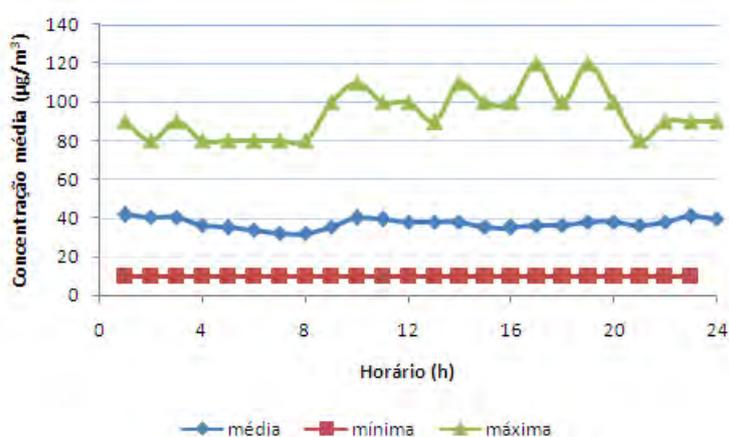


Figura 4.25 - Concentração horária média, mínima e máxima de PM₁₀ em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

No período da manhã, o perfil apresenta uma ascensão, com pico às 10h, que pode ser resultado da liberação de partículas por veículos automotores.

Durante a tarde, os intensos movimentos convectivos do ar, proporcionados pela existência de temperaturas mais elevadas e maior incidência de ventos, resultam na formação de uma atmosfera mais instável, características estas que são favoráveis à dispersão dos poluentes.

Novamente o perfil ascende a partir das 17h, outro momento do dia com intenso fluxo de veículos. A partir das 21h, observa-se um novo aumento da concentração proporcionado pelo predomínio de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão, como menores temperaturas, ausência de ventos e diminuição da altura da camada limite. A presença de altas concentrações também foi verificada durante a madrugada, estando relacionada à atividade de queima dos canaviais da região.

A máxima concentração horária ($120,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi verificada no dia 16/07/2009 às 19h e no dia 23/07/2009 às 17h. Nas Figuras 4.26 e 4.27, respectivamente, pode-se observar o comportamento da concentração de PM_{10} ao longo destes dias. Esses picos de concentração ocorreram em um momento do dia no qual a formação de uma atmosfera com altas concentrações de poluentes é favorecida pelas às emissões provenientes do fluxo de veículos, geralmente alto neste momento do dia, aliada às emissões provenientes da queima de biomassa. Vale ressaltar também que, segundo informações do Banco de Dados de Queimadas do INPE (<http://www.cptec.inpe.br/queimadas>), houve a detecção de alguns focos de queimadas nas regiões vizinhas (Araras e Leme) nestes dias.

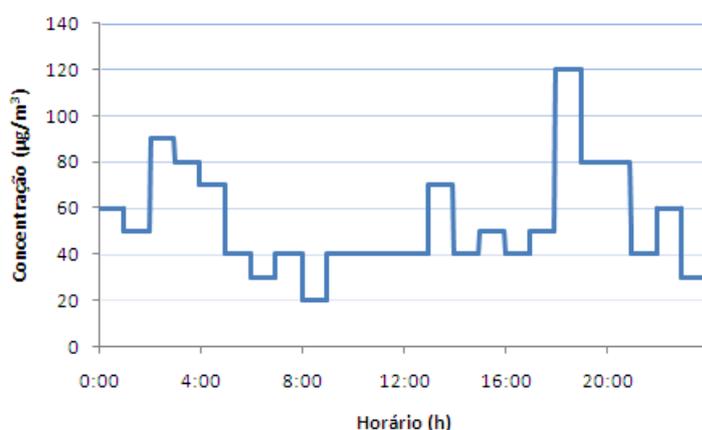


Figura 4.26 - Concentração de PM_{10} em Rio Claro ao longo do dia 16/07/2009.

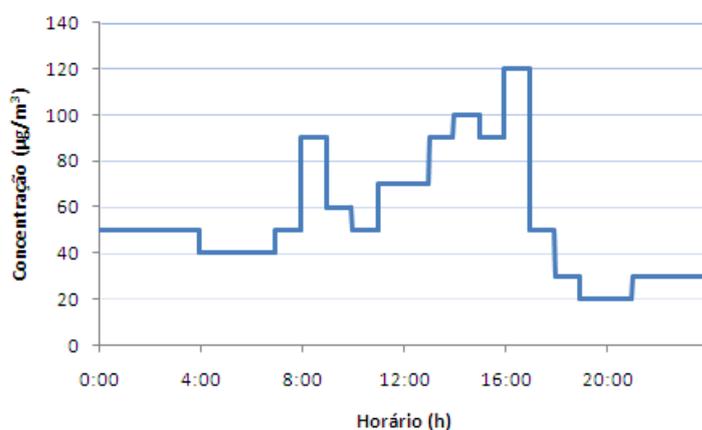


Figura 4.27 - Concentração de PM_{10} em Rio Claro ao longo do dia 23/07/2009.

4.1.2.7 Análise do Índice de Qualidade do Ar

O índice de qualidade do ar foi calculado para cada poluente monitorado por legislação (CO, O₃, NO₂, SO₂ e PM₁₀), a fim de se qualificar o ar ao qual a população estava exposta durante o período de coleta. É importante ressaltar que a classificação do ar obtida é feita com base nos padrões de qualidade de cada poluente individualmente e, portanto, não considera a ação de forma conjunta sobre o ambiente. As análises e a qualificação do ar foram feitas de forma específica para cada poluente, visando à verificação do comportamento da qualidade do ar em relação a cada um deles ao longo do período de monitoramento.

Na Figura 4.28, está ilustrado o valor do índice de qualidade do ar diário obtido para o CO durante o período de coleta, bem como as faixas de classificação da qualidade hachuradas com suas cores características. Pode-se verificar que a qualidade do ar foi considerada "boa" em todos os dias de monitoramento, sendo 40 o máximo valor encontrado para o índice.

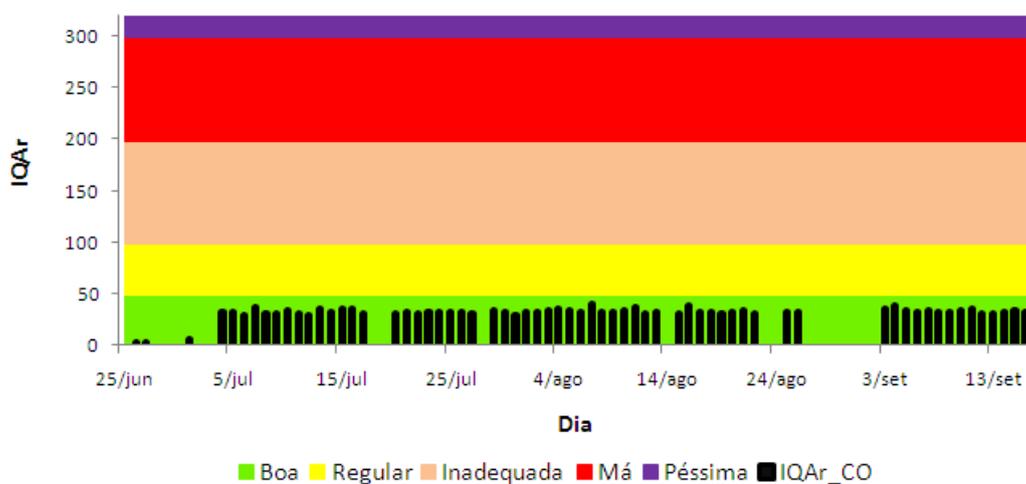


Figura 4.28 - Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao CO.

Em relação ao O₃, a qualidade do ar também foi considerada "boa" em todos os dias de coleta. O IQAr diário desse poluente está ilustrado na Figura 4.29, apresentando um valor máximo de 42.

Para todos os dias de monitoramento, a qualidade do ar em relação ao NO₂ também foi considerada "boa". O IQAr diário máximo atingiu o valor de 50, estando no limite entre a qualidade "boa" e "regular" para este poluente. Na Figura 4.30,

estão ilustrados os valores diários do IQAr para o NO₂.

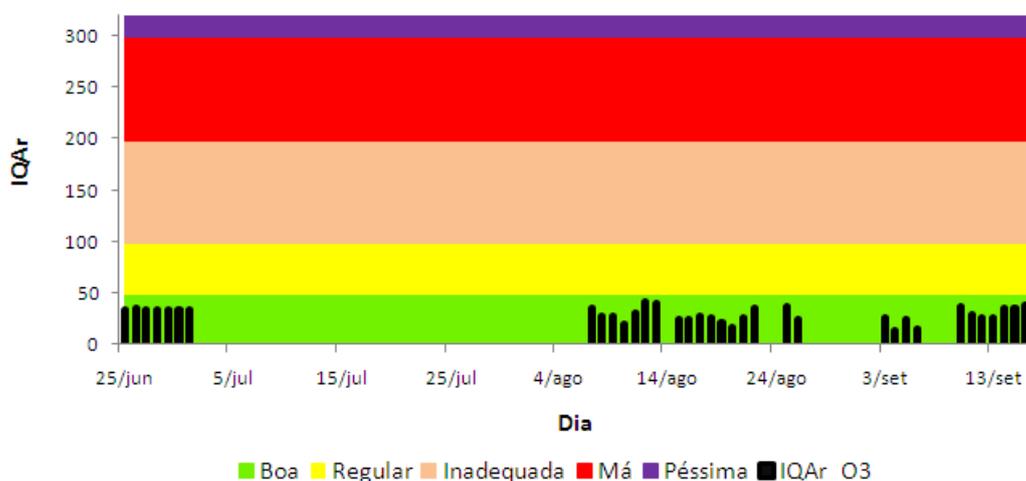


Figura 4.29 - Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao O₃.

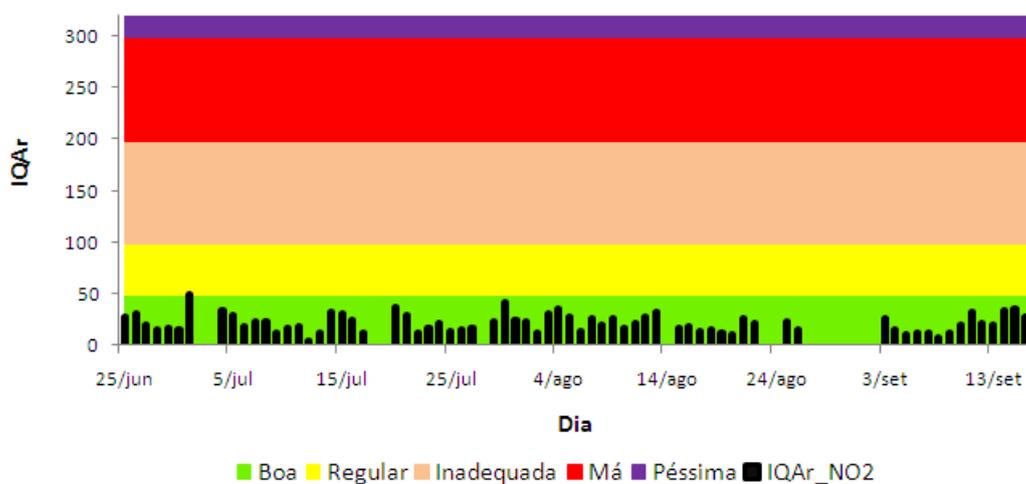


Figura 4.30 - Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao NO₂.

A classificação da qualidade do ar para o SO₂ foi considerada "boa" para todos dos dias monitorados, apresentando um valor diário máximo do índice igual a 28. O IQAr diário para o SO₂ está ilustrado na Figura 4.31.

O único poluente responsável pela classificação do ar como "regular" em 13 dias de monitoramento é o PM₁₀, como ilustrado na Figura 4.32. Para o IQAr, o valor máximo encontrado foi de 59. Analisando o decorrer destes dias, verifica-se a

existência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão. A ausência de chuva diminuiu o processo de remoção das partículas em suspensão, prejudicando a "limpeza" da atmosfera. A predominância de calmaria também pode ter influenciado, uma vez que inviabiliza os processos de transporte a partir do vento, permitindo um acúmulo de partículas no ar.

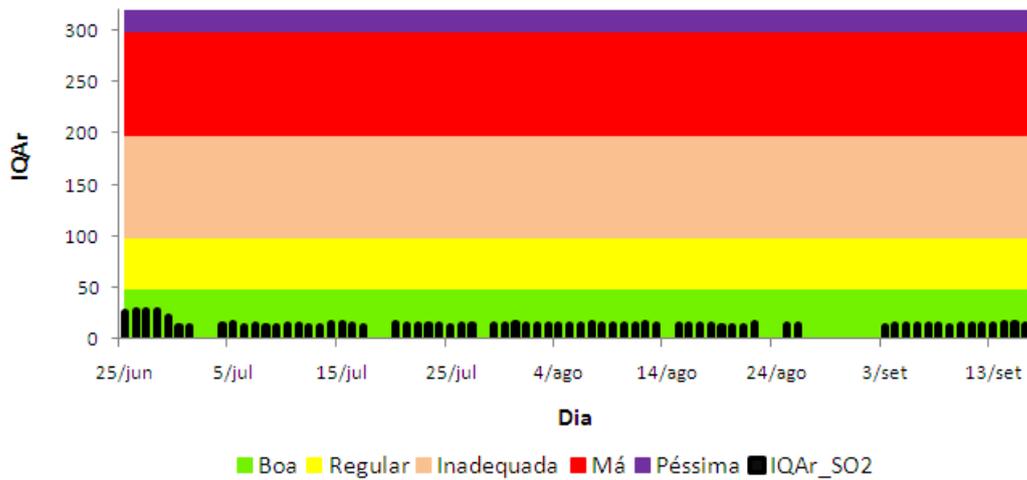


Figura 4.31 - Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao SO₂.

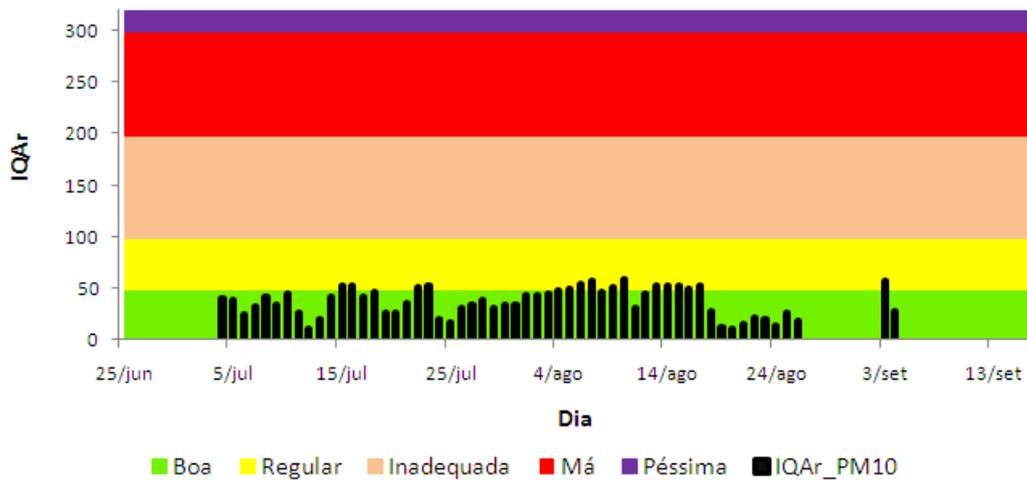


Figura 4.32 - Índice de qualidade do ar diário em Rio Claro em relação ao PM₁₀.

Fazendo uma classificação geral, baseando-se na qualificação em função do pior índice do dia, verifica-se que, dos 84 dias totais, 10,7% permaneceram sem

coleta de dados, 15,5% apresentaram qualidade "regular" enquanto o restante foi caracterizado com qualidade "boa" do ar, conforme observado na Figura 4.33.



Figura 4.33 - Classificação geral da qualidade do ar em Rio Claro no período de 25/06/2009 a 16/09/2009.

4.2 Monitoramento da Qualidade do Ar em Cubatão

O monitoramento da qualidade do ar em Cubatão ocorreu no período de 15/10/2009 a 16/11/2009, totalizando 33 dias. Desse total, 16 dias foram considerados válidos, porém cada poluente apresentou uma determinada quantidade de dias válidos. Para o CO, foram 15 dias válidos; para o O₃, 12 dias; para o NO, 14 dias; para NO₂, 14 dias; para o SO₂, 15 dias; para o PM₁₀, 10 dias; e para os hidrocarbonetos metano e não-metano, 13 dias.

Em Cubatão, a perda de dados esteve relacionada a problemas de permanência dos analisadores em modo de calibração, erros na leitura dos instrumentos e operações de manutenção no local.

Para verificar o perfil meteorológico local no período de monitoramento e sua relação com a dispersão dos poluentes, são feitas análises das características meteorológicas para todos os dias de coleta.

4.2.1 Características Meteorológicas

As informações do Boletim INFOCLIMA (INPE, 2012b) para o mês de outubro/2009 relatam a ocorrência de chuvas intensas associadas à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e ao avanço de sistemas frontais principalmente na segunda quinzena, conforme ilustrado na Figura 4.34. Em relação ao mês de novembro/2009, a formação de áreas de instabilidade provocou chuvas na primeira quinzena. Na Figura 4.35, está ilustrado o canal de umidade formado.

Para o período de monitoramento em Cubatão, a temperatura média obtida foi de 23,9°C, variando entre uma mínima de 18,1°C e uma máxima de 37,6°C. Na Figura 4.36, está ilustrado o comportamento horário médio da temperatura. Pode-se observar que, de forma geral, as mínimas foram registradas entre 5h e 7h, enquanto que as máximas foram atingidas entre 13h e 15h. Verifica-se também que não há grandes variações diurnas de temperatura (média variando entre 21,7°C e 26,9°C), devido à proximidade com o oceano.



Figura 4.34 - Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 27/10/2009 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)



Figura 4.35 - Imagem de satélite do GOES-10 para o dia 09/11/2009 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)

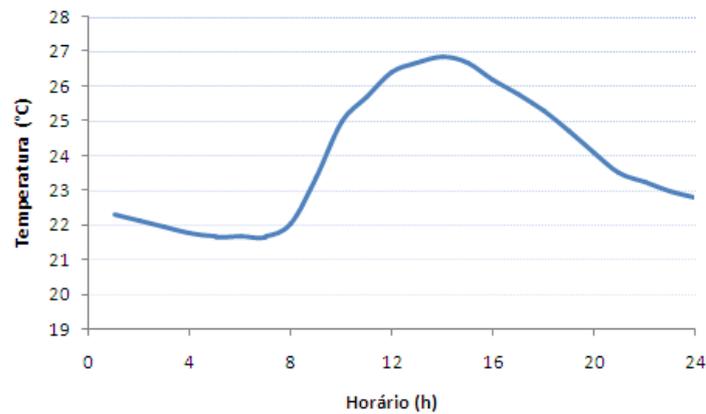


Figura 4.36 - Perfil horário médio da temperatura em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

A média de radiação solar diária apresentou valores mais moderados no mês de outubro/2009, alcançando intensidades entre 200 e 220 W/m² em novembro/2009, conforme mostrado na Figura 4.37.

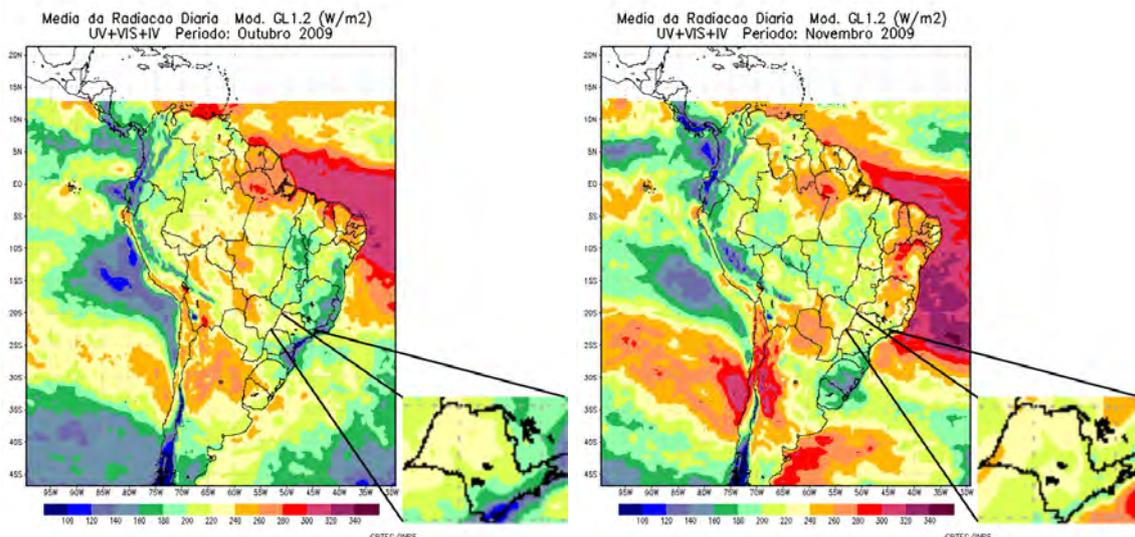


Figura 4.37 - Média da radiação solar diária nos meses de outubro/2009 e novembro/2009.

Com os dados referentes à direção e à velocidade do vento, verifica-se que o período de monitoramento apresentou uma porcentagem de calmaria não muito elevada. Conforme ilustrado na Figura 4.38, a rosa dos ventos obtida para todo o período apresenta calmaria em torno de 41% e predominância de ventos na direção sul-sudoeste. Os valores de velocidade do vento variam de 0,7 a 8,4 m/s,

ocorrendo a magnitude máxima na direção norte-nordeste.

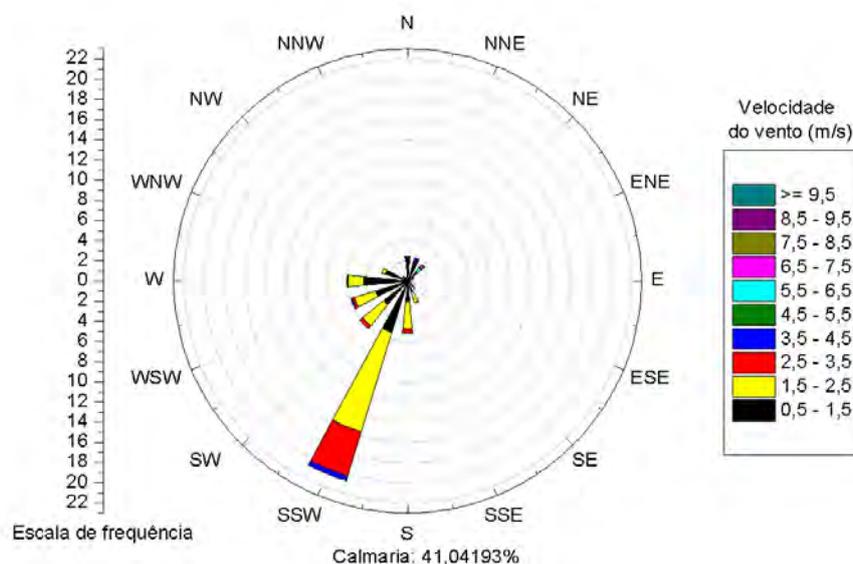


Figura 4.38 - Rosa dos ventos de Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

As mudanças nas frequência das direções do vento podem ser visualizadas analisando o comportamento do vento em cada período do dia.

Durante a madrugada, entre 01:00 e 06:00h, predomina a condição de calma, como mostrado na Figura 4.39, e os eventuais ventos detectados ocorrem em várias direções, porém majoritariamente na direção oeste. Este é o momento do dia mais desfavorável à dispersão dos poluentes.

No período da manhã (entre 07:00 e 12:00h), a porcentagem de calma diminui e predominam os ventos do quadrante SSW. Analisando a Figura 4.40, verifica-se que a velocidade do vento atinge valores mais elevados e que a contribuição das demais direções começa a diminuir.

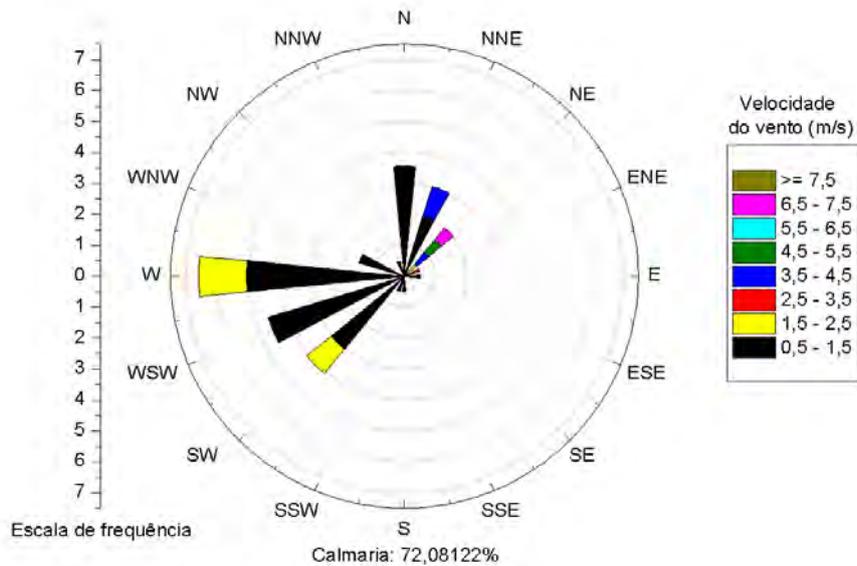


Figura 4.39 - Rosa dos ventos de Cubatão entre 01:00 e 06:00h no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

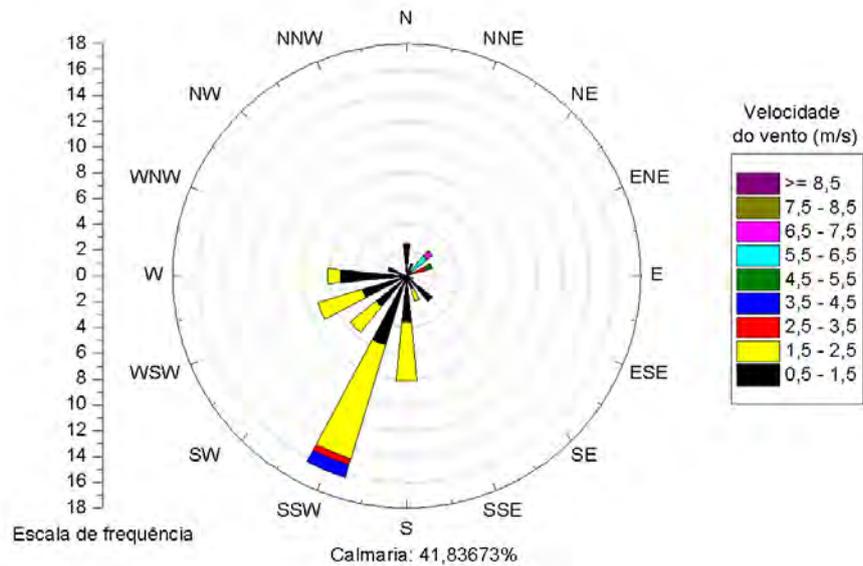


Figura 4.40 - Rosa dos ventos de Cubatão entre 07:00 e 12:00h durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Durante a tarde, no período entre 13:00 e 18:00h, pode-se confirmar a tendência de predominância da direção SSW e praticamente ausência de calma, quando

comparada aos demais períodos do dia. Através da Figura 4.41, também verifica-se a presença de ventos com magnitudes mais elevadas. A presença de ventos, aliada às temperaturas mais elevadas, são características da atmosfera que contribuem para a existência de boas condições para a dispersão e que fazem deste período do dia o mais favorável.

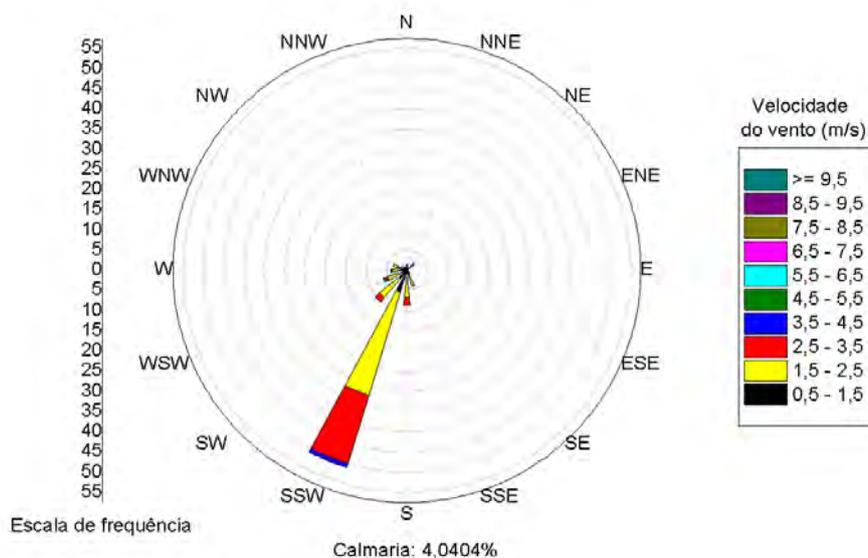


Figura 4.41 - Rosa dos ventos de Cubatão entre 13:00 e 18:00h durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

À noite, entre 19:00 e 24:00h, observa-se um retorno da contribuição de ventos vindo das demais direções, porém os predominates ainda são do quadrante SSW. A porcentagem de calma também aumenta e as velocidades começam a apresentar valores mais baixos, conforme ilustrado na Figura 4.42.

A velocidade média do vento atingiu 1,2 m/s e seu comportamento horário está ilustrado na Figura 4.43. Verificam-se condições bem próximas à calma durante a madrugada e no início da manhã. Um crescimento acentuado pode ser observado a partir das 9h, tornando a atmosfera favorável à dispersão dos poluentes. O perfil atinge um valor máximo às 16h e, em seguida, adquire um comportamento decrescente para o restante do dia.

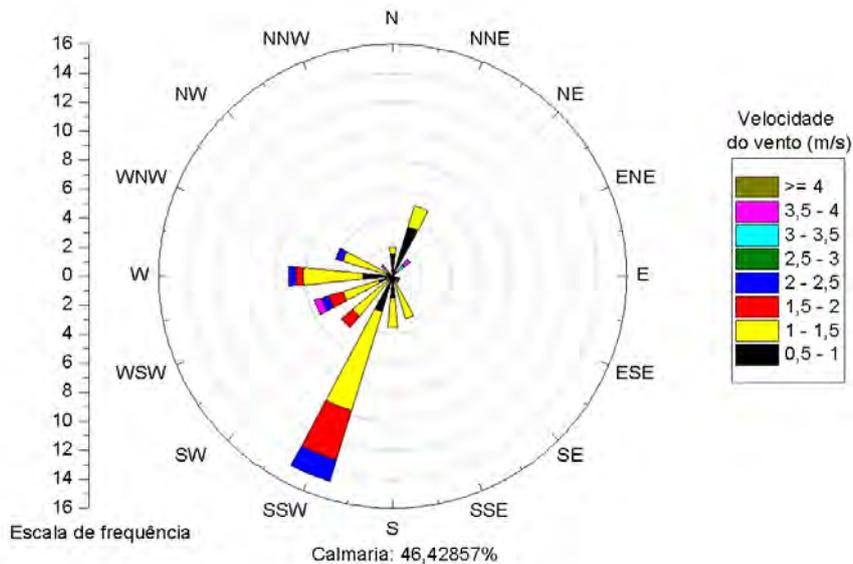


Figura 4.42 - Rosa dos ventos de Cubatão entre 19:00 e 24:00h no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

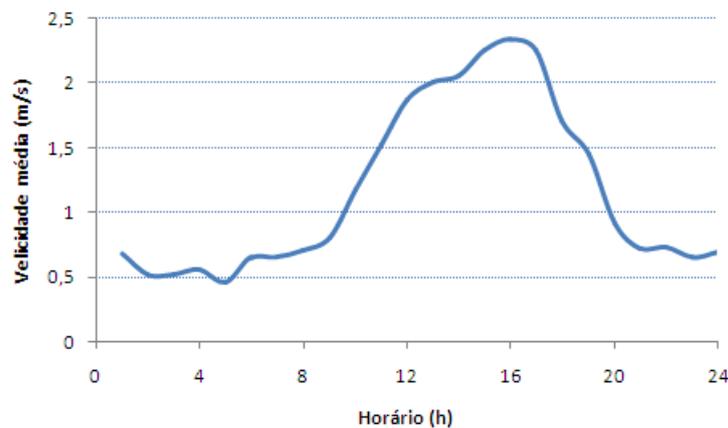


Figura 4.43 - Perfil médio da velocidade do vento em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Observa-se acentuada variação da magnitude do vento durante o dia, comportamento este que sugere a influência da circulação de brisa marítima na região, impulsionada pelo contraste térmico entre o oceano e o continente, o qual é mais intenso durante a tarde.

Em relação à precipitação, cerca de 80% do volume de chuva estavam con-

centrados na segunda quinzena de outubro. Na Figura 4.44, estão ilustrados os acumulados diários de precipitação obtidos a partir dos três postos (P25, P27 e P28) da Rede Telemétrica do SAISP localizados em Cubatão. Pode-se verificar um comportamento bastante semelhante entre os dados pluviométricos, sendo que o acumulado total do período registrado em cada local foi de P25 = 413 mm, P27 = 264,2 mm e P28 = 442,2 mm.

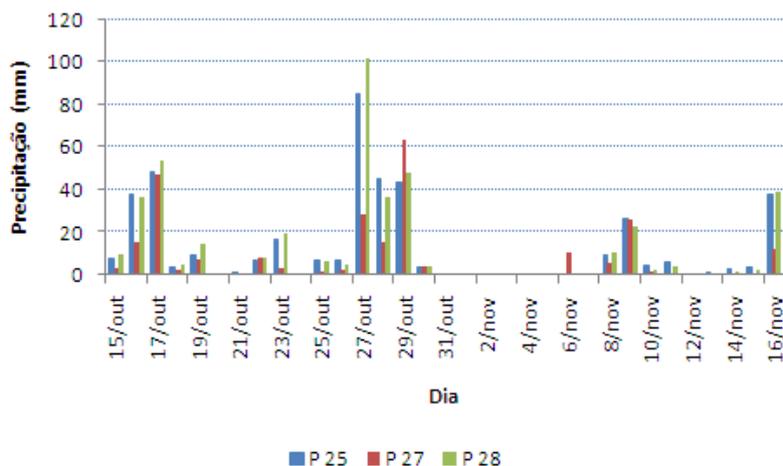


Figura 4.44 - Precipitação acumulada diária em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009 registrada pelos postos P25, P27 e P28.

A umidade relativa do período apresentou um valor mínimo de 41% e um máximo de 100%, resultando em uma média de 93%. O perfil horário médio está ilustrado na Figura 4.45, no qual se verificam valores menores nos horário de temperaturas mais elevadas.

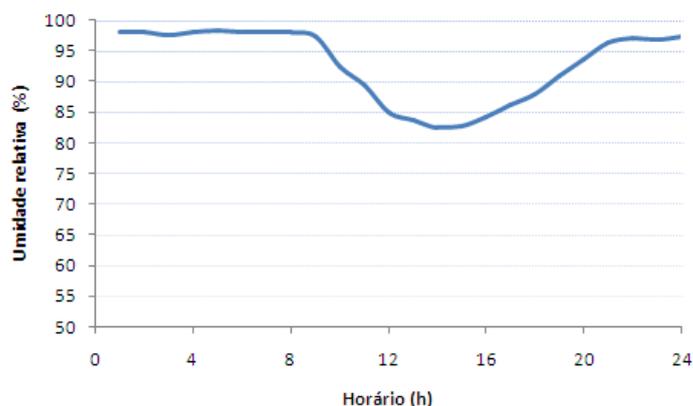


Figura 4.45 - Perfil horário médio da umidade relativa em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

4.2.2 Análise da Qualidade do Ar

Os resultados da avaliação do comportamento dos poluentes em Cubatão são apresentados neste item.

4.2.2.1 Monóxido de Carbono

A média das concentrações horárias de CO em Cubatão foi de $3.292,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, variando entre um valor mínimo de $2.516,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e um máximo de $5.600,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisando a máxima média de 8h de cada dia, verifica-se que o maior valor do período foi de $5.532,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, inferior ao padrão nacional para o CO ($10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

O comportamento médio, mínimo e máximo da concentração horária de CO está ilustrado na Figura 4.46.

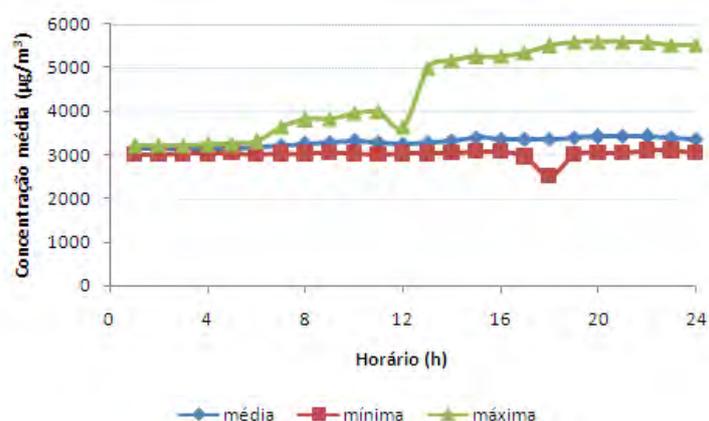


Figura 4.46 - Concentração horária média, mínima e máxima de CO em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

A partir de 6h, o perfil da concentração de CO inicia uma ascensão, atingindo um máximo em torno de 10h. Durante o período da manhã, as altas concentrações podem estar relacionadas ao grande tráfego de veículos devido ao início da jornada de trabalho da população e a alguns congestionamentos que existem na rodovia próxima ao CEPEMA. Após este horário, as concentrações tendem a diminuir, favorecidas pela elevação das temperaturas e da incidência de ventos mais fortes, que proporcionam aumento da convecção na atmosfera.

O início do período da tarde é caracterizado por um novo aumento nas concentrações horárias, que atingem um máximo às 15h. A partir desse horário, o perfil

adquire um comportamento descendente, influenciado pelos ventos mais intensos nesse momento do dia que auxiliam na dispersão dos poluentes.

À noite, porém, as concentrações aumentam novamente, condição esta favorecida pelo acúmulo de CO na atmosfera proporcionado pela liberação, geralmente alta, deste poluente devido ao fluxo de veículos no final da tarde, aliada à presença de ventos de baixa magnitude.

O dia 16/10/2009 apresentou a maior concentração horária de CO ($5.600,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) às 20h. Segundo informações da Ecovias (2011), neste dia, foi registrado grande fluxo de veículos no trecho da Rodovia Cônego Domenico Rangoni próximo ao CEPEMA. Esse intenso tráfego, aliado a condições de vento fraco vindo da direção SSW no final da tarde, proporcionou o acúmulo de CO na atmosfera. Na Figura 4.47, estão ilustrados o comportamento da concentração de CO e da magnitude do vento ao longo desse dia.

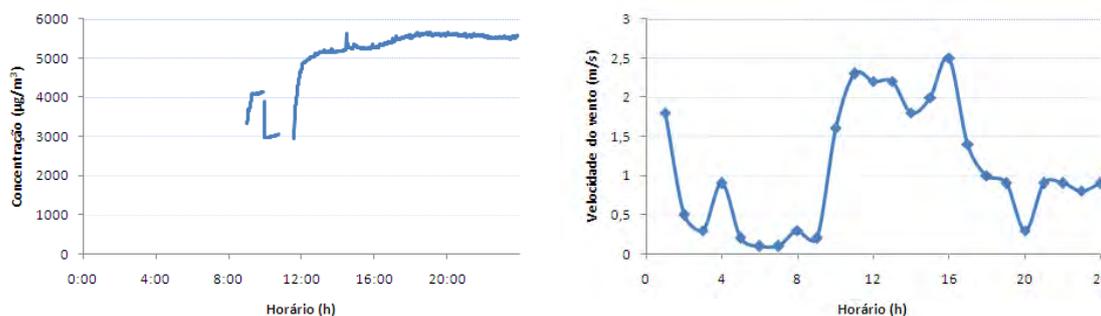


Figura 4.47 - Concentração de CO e magnitude do vento em Cubatão ao longo do dia 16/10/2009.

4.2.2.2 Ozônio

Para o O_3 , a média encontrada para as concentrações horárias durante o monitoramento foi de $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. O valor horário mínimo é de $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o máximo, de $46,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisando o máximo valor horário de cada dia monitorado, verifica-se que o padrão de qualidade do ar para esse poluente ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) também não é ultrapassado.

O comportamento médio das concentrações horárias de O_3 apresenta características diferentes daquelas habitualmente encontradas. O primeiro pico ocorre em torno das 5h e o segundo, entre 12h e 13h, conforme ilustrado na Figura 4.48. Apesar de inusitado, esse perfil apresenta tendências semelhantes às en-

contradas na Estação Cubatão-Centro da CETESB para os mesmos dias, como mostrado na Figura 4.49. Vale ressaltar que os valores de concentração encontrados não são iguais, uma vez que os locais são diferentes, apesar de estarem próximos.

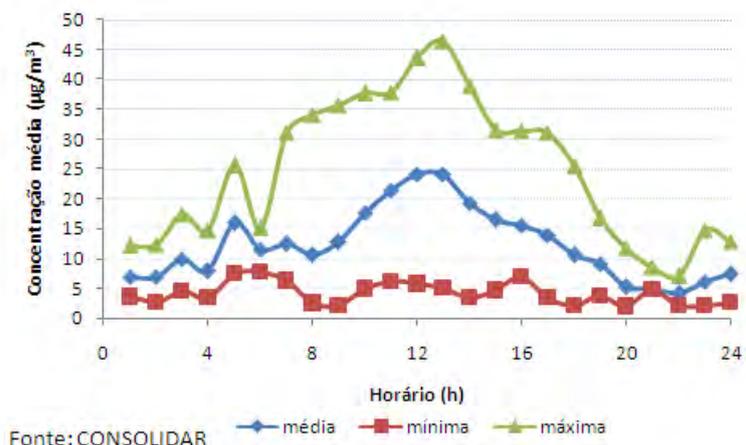


Figura 4.48 - Concentração horária média, mínima e máxima de O₃ em Cubatão para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009: Dados Laboratório CONSOLIDAR

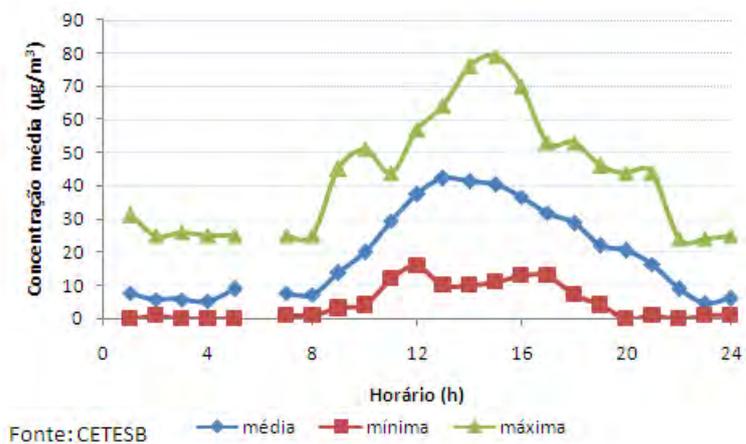


Figura 4.49 - Concentração horária média, mínima e máxima de O₃ em Cubatão nos dias válidos de O₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009: Dados CETESB.

Na Figura 4.48, observa-se que, durante a madrugada, há dois picos no perfil, um às 3h e outro às 5h. Analisando a rosa dos ventos ilustrada na Figura 4.50, observa-se que as concentrações de O₃ aumentam logo após o registro da presença de ventos vindo das direções oeste-sudoeste e norte. Como o Laboratório estava localizado na região próxima ao parque industrial de Cubatão, conforme

ilustrado na Figura 3.4, esses valores mais elevados estão provavelmente relacionados ao ozônio transportado por meio de massas de ar poluídas e formado através das reações entre seus precursores.

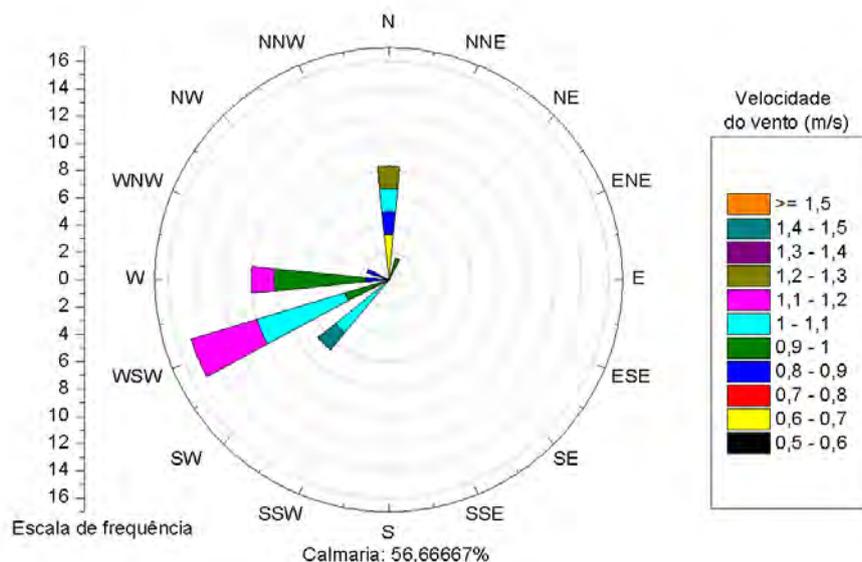


Figura 4.50 - Rosa dos ventos de Cubatão entre 01:00 e 05:00h nos dias válidos de O_3 no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

A partir das 8h, o perfil adquire comportamento ascendente de forma progressiva, atingindo um máximo em torno de 12h e 13h. Analisando a Figura 4.51, verifica-se que as temperaturas mais elevadas nos dias válidos de ozônio foram registradas às 13h, coincidindo com o pico máximo de concentração. Como a intensidade de radiação solar também deveria estar elevada neste momento do dia e a precipitação horária média, ilustrada na Figura 4.52, não foi elevada, a formação de O_3 estava associada à ocorrência de reações fotoquímicas.

Vale ressaltar também que o comportamento do perfil condiz com o mecanismo envolvendo as reações entre O_3 e NO_x . Conforme ilustrado na Figura 4.53, observa-se que os perfis de NO_2 e O_3 apresentam comportamentos opostos. Entre 12h e 13h, o comportamento ascendente do ozônio e o descendente do NO_2 sugerem que a presença de radiação permitiu a ocorrência de fotólise de NO_2 para formação de O_3 (Equações 2.2 e 2.3). Em seguida, os perfis se invertem, sugerindo a ocorrência de reações entre O_3 e NO para formação de NO_2 (Equação 2.4).

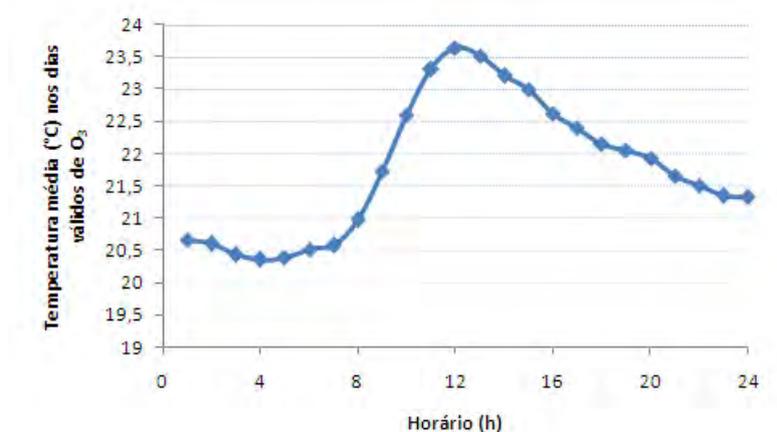


Figura 4.51 - Média horária da temperatura do ar em Cubatão nos dias válidos de O₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

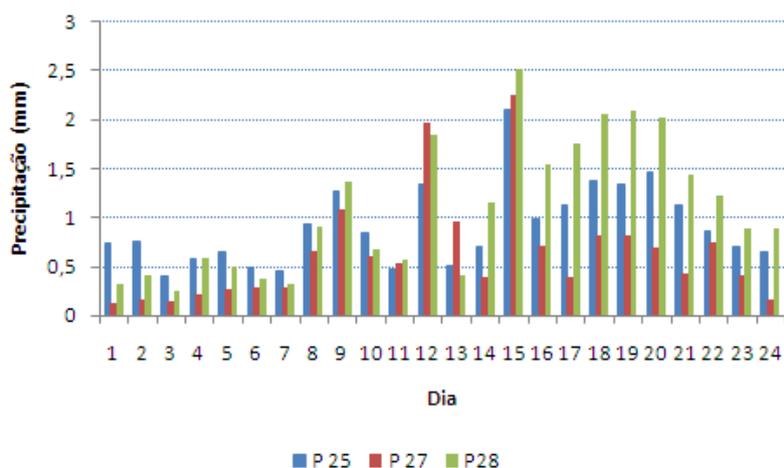


Figura 4.52 - Média horária da precipitação em Cubatão nos dias válidos de O₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Como também não houve ultrapassagem do padrão de O₃ em Cubatão, analisou-se o comportamento do poluente no dia em que foi registrada a máxima concentração horária (46,4 μg/m³). Esse máximo ocorreu no dia 22/10/2009 às 13h, o qual possuía condições favoráveis à formação de ozônio. Verificou-se que as concentrações de NO₂ atingiram valores elevados nas horas anteriores ao pico máximo de O₃, influenciando positivamente na formação local deste poluente. Na Figura 4.54, estão ilustrados os comportamentos da concentração de ozônio e da concentração horária de dióxido de nitrogênio ao longo deste dia. As temperatu-

ras estavam acima da média do período nesse momento do dia e a média diária de radiação solar estava entre 4 e 4,5 kWh/m², conforme ilustrado na Figura 4.55.

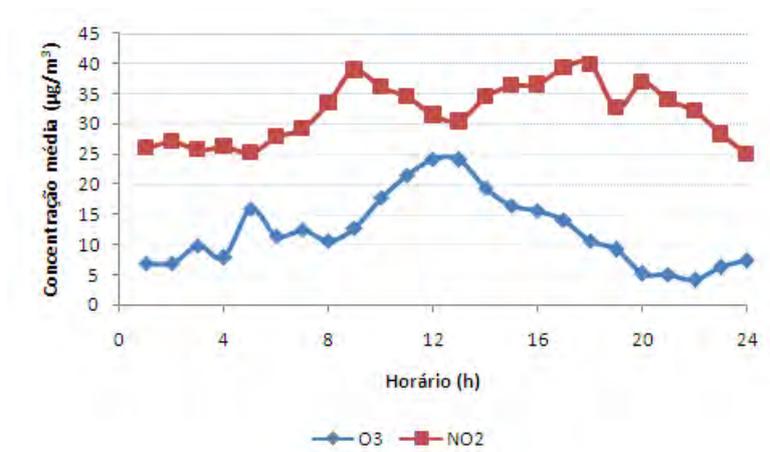


Figura 4.53 - Concentração horária de O₃ e de NO₂ em Cubatão nos dias válidos de O₃ para o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

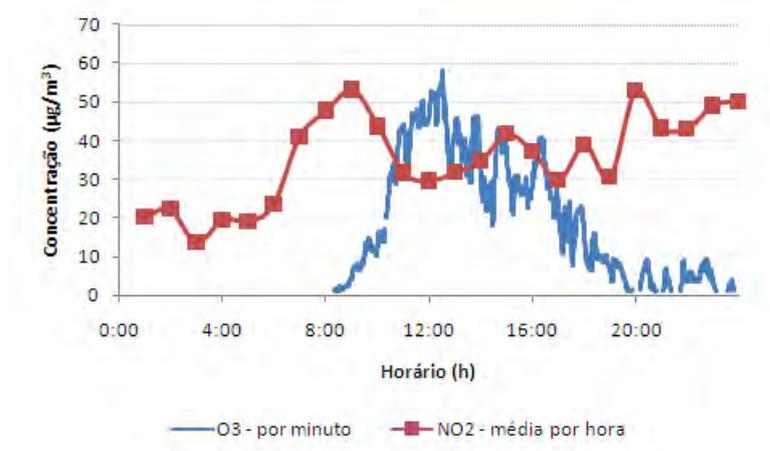


Figura 4.54 - Concentração de O₃ e de NO₂ em Cubatão no dia 22/10/2009.

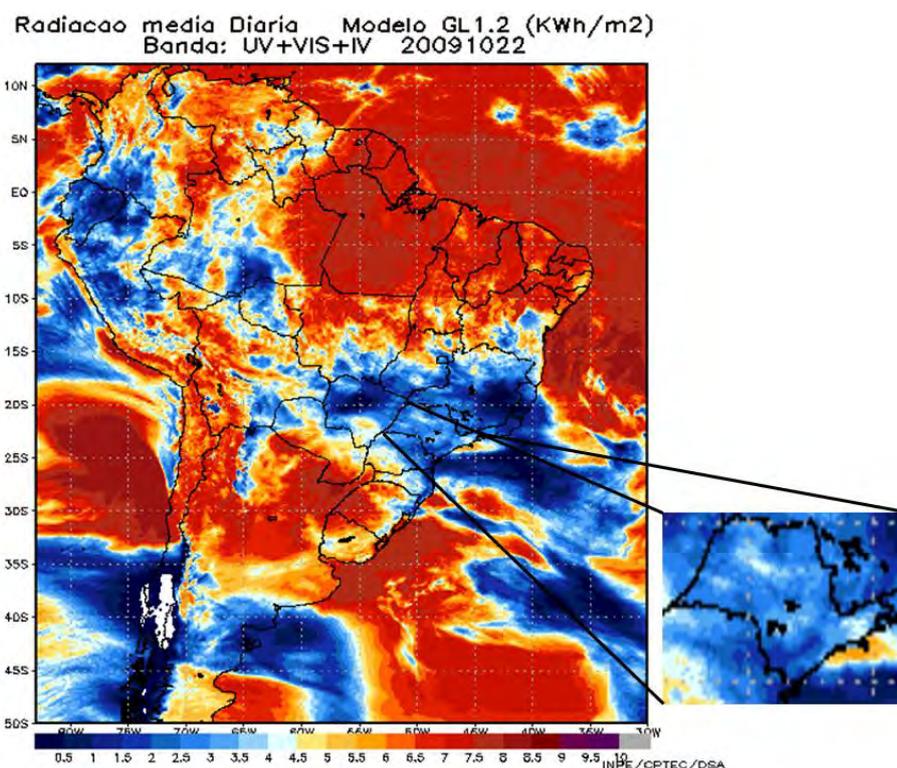


Figura 4.55 - Média da radiação solar em Cubatão ao longo do dia 22/10/2009.

4.2.2.3 Óxido Nítrico

Em relação às concentrações horárias de NO, a média foi de 25,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo o valor mínimo e o máximo, respectivamente, de 2,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 156,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Como o NO é um poluente não regulamentado, não foi possível comparar as concentrações obtidas com um padrão de qualidade do ar.

Na Figura 4.56, estão ilustrados o perfil horário médio, mínimo e máximo de NO em Cubatão. Observa-se um pico de concentração entre 8h e 9h, momento do dia caracterizado pelo aumento do tráfego de veículos, e, durante o período da tarde, não há grandes variações na concentração. O perfil adquire novamente comportamento ascendente a partir das 19h, resultante da combinação entre predomínio de calma e circulação de veículos, geralmente alta no final da tarde, o que proporciona o acúmulo de NO no ar.

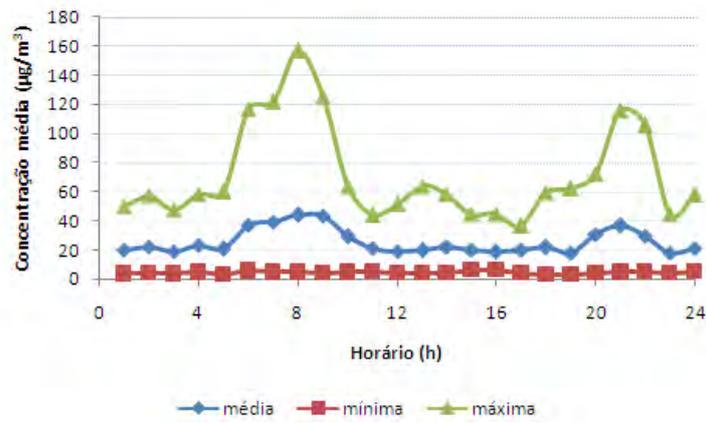


Figura 4.56 - Concentração horária média, mínima e máxima de NO em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

A maior concentração horária de NO ($156,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi encontrada no dia 22/10/2009 às 8h. Segundo informações do Jornal ABCD Maior (2009), na manhã deste dia, ocorreu a "Corrida SP-RJ, o Desafio dos 600 Quilômetros", para a qual o acostamento da Rodovia Cônego Domênico Rangoni precisou ser bloqueado. Este evento pode ter dificultado o trânsito no local, proporcionando lentidão no fluxo de veículos, fato que pode ter influenciado na quantidade de NO presente no ar. Vale ressaltar também que, neste momento do dia, o predomínio de calmaria também contribuiu para o acúmulo do poluente no local. O comportamento da concentração de NO e do vento local neste dia estão mostrados na Figura 4.57.

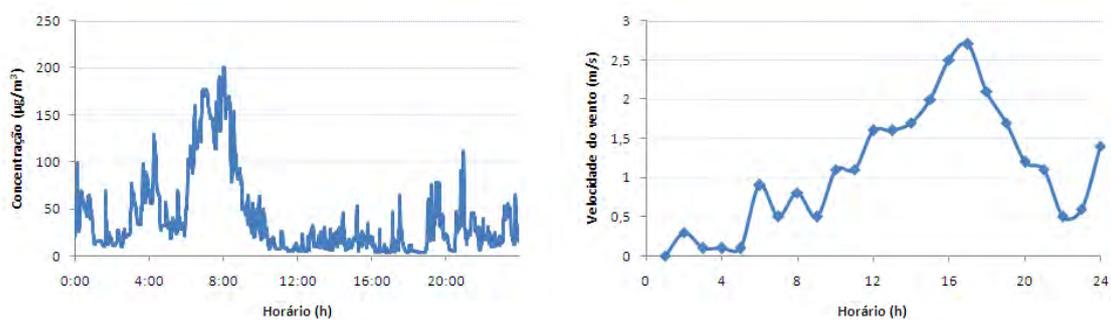


Figura 4.57 - Concentração de NO e velocidade do vento em Cubatão ao longo do dia 22/10/2009.

4.2.2.4 Dióxido de Nitrogênio

A média das concentrações horárias de NO₂ em Cubatão foi de 32,7 µg/m³, enquanto que os valores variaram entre um mínimo de 5,6 µg/m³ e um máximo de 69,8 µg/m³. Verifica-se que o padrão de qualidade do ar para o NO₂ não foi ultrapassado, uma vez que a máxima concentração horária obtida pelo monitoramento foi menor que os padrões nacionais primário (320 µg/m³) e secundário (190 µg/m³).

O comportamento médio, mínimo e máximo da concentração horária de NO₂ estão ilustrados na Figura 4.58.

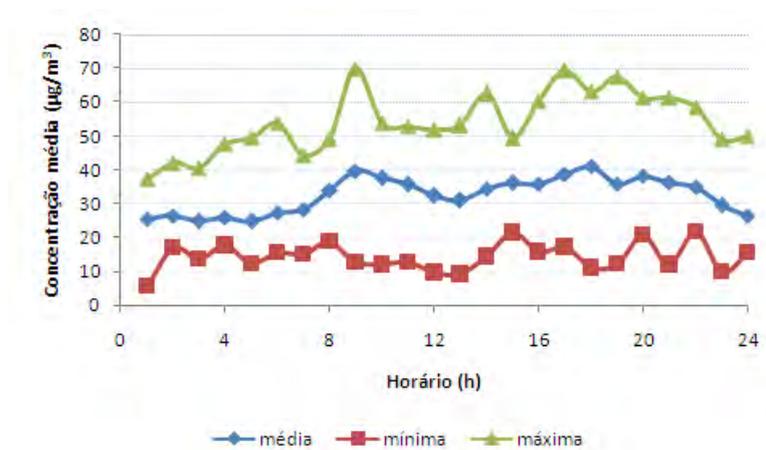


Figura 4.58 - Concentração horária média, mínima e máxima de NO₂ em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

No período da manhã, o perfil adquire comportamento ascendente a partir das 6h, atingindo um máximo às 9h. Como o NO₂ é, majoritariamente, um poluente secundário, este crescimento gradual pode estar relacionado à ocorrência de reações de oxidação entre seus precursores. A partir deste horário, as concentrações começam a diminuir e alcançam um mínimo às 13h, coincidindo com o ciclo de formação de O₃ no local.

Durante a tarde, observa-se que as concentrações adquirem novamente um crescimento gradativo até alcançarem um pico às 18h, influenciado tanto pela ocorrência do ciclo de formação de NO₂, quanto pelo tráfego de veículos geralmente elevado no final da tarde. Nas horas seguintes, o perfil comporta-se de forma descendente. Neste momento do dia, esta queda da concentração pode estar relacionada à diminuição da contribuição das reações na manutenção da

quantidade de NO_2 , a qual fica sob influência inicialmente da queima de combustíveis fósseis e, durante a noite, da predominância de calma e de ventos fracos.

Em relação ao NO_2 , a máxima concentração horária ($69,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ocorreu no dia 21/10/2009 às 9h. Pode-se observar que esses valores mais elevados foram registrados em um momento do dia caracterizado por apresentar alto fluxo de veículos. Vale ressaltar que o período da manhã é propício para a ocorrência de reações no ciclo de formação de NO_2 . Visualizando o comportamento do NO_2 e do NO ao longo do dia, ilustrados na Figura 4.59, é interessante notar que os perfis desses poluentes apresentam tendências opostas em vários momentos durante o dia.

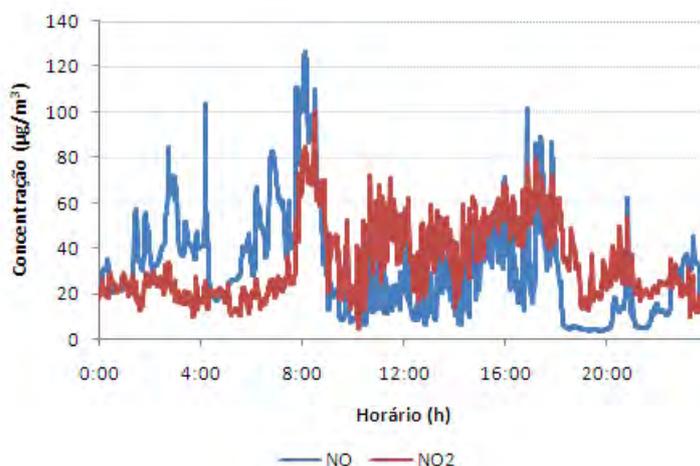


Figura 4.59 - Concentração de NO_2 e de NO em Cubatão ao longo do dia 21/10/2009.

4.2.2.5 Dióxido de Enxofre

Para o SO_2 , os valores horários variaram entre um mínimo de $18,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e um máximo de $117,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obtendo-se um média de $23,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando o maior valor encontrado para a média das concentrações ao longo de 24h ($32,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pode-se verificar que os padrões primário ($365 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e secundário ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de qualidade do ar para o SO_2 não foram ultrapassados.

Na Figura 4.60, estão apresentados o perfil médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de SO_2 . Pode-se observar um comportamento bastante homogêneo, apresentando variações mais acentuadas no período da manhã. A partir das 6h, as concentrações começam a aumentar, atingindo um máximo às

9h.

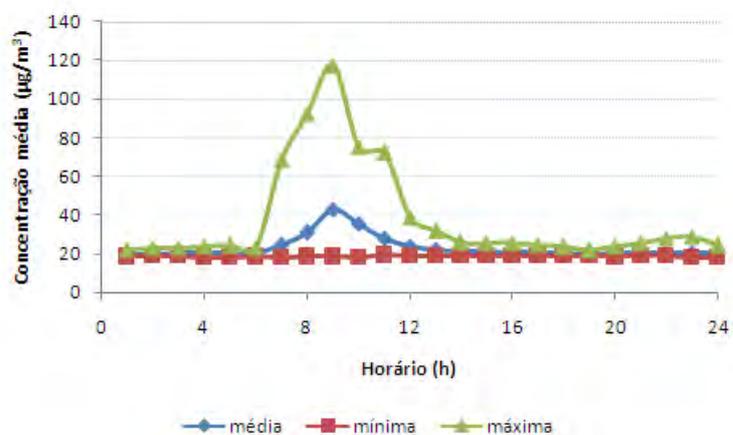


Figura 4.60 - Concentração horária média, mínima e máxima de SO_2 em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Para o período de monitoramento, a evolução do vento em Cubatão entre 6h e 13h é ilustrada na Figura 4.61. Observa-se predomínio de ventos fracos provenientes dos quadrantes N e SSW no intervalo de tempo no qual há aumento da concentração do poluente. Também ocorreram ventos de maior magnitude, porém menos frequentes, vindos da direção NE. Como, segundo a CETESB (2010), em 2009, a emissão de processos industriais e a queima de combustíveis fósseis a partir de fontes estacionárias em Cubatão contribuíram para a liberação de grande quantidade de SO_x , estimada em 15,53 mil t/ano, há indícios de contribuição de emissão de fontes próximas e fontes mais distantes para o acúmulo de SO_2 neste momento do dia. Vale ressaltar que, nas vizinhança do CEPEMA, conforme ilustrado na Figura 3.4, estão localizadas refinarias de petróleo, indústrias de cimento e armazéns de combustíveis, os quais são grandes fontes antropogênicas de SO_2 .

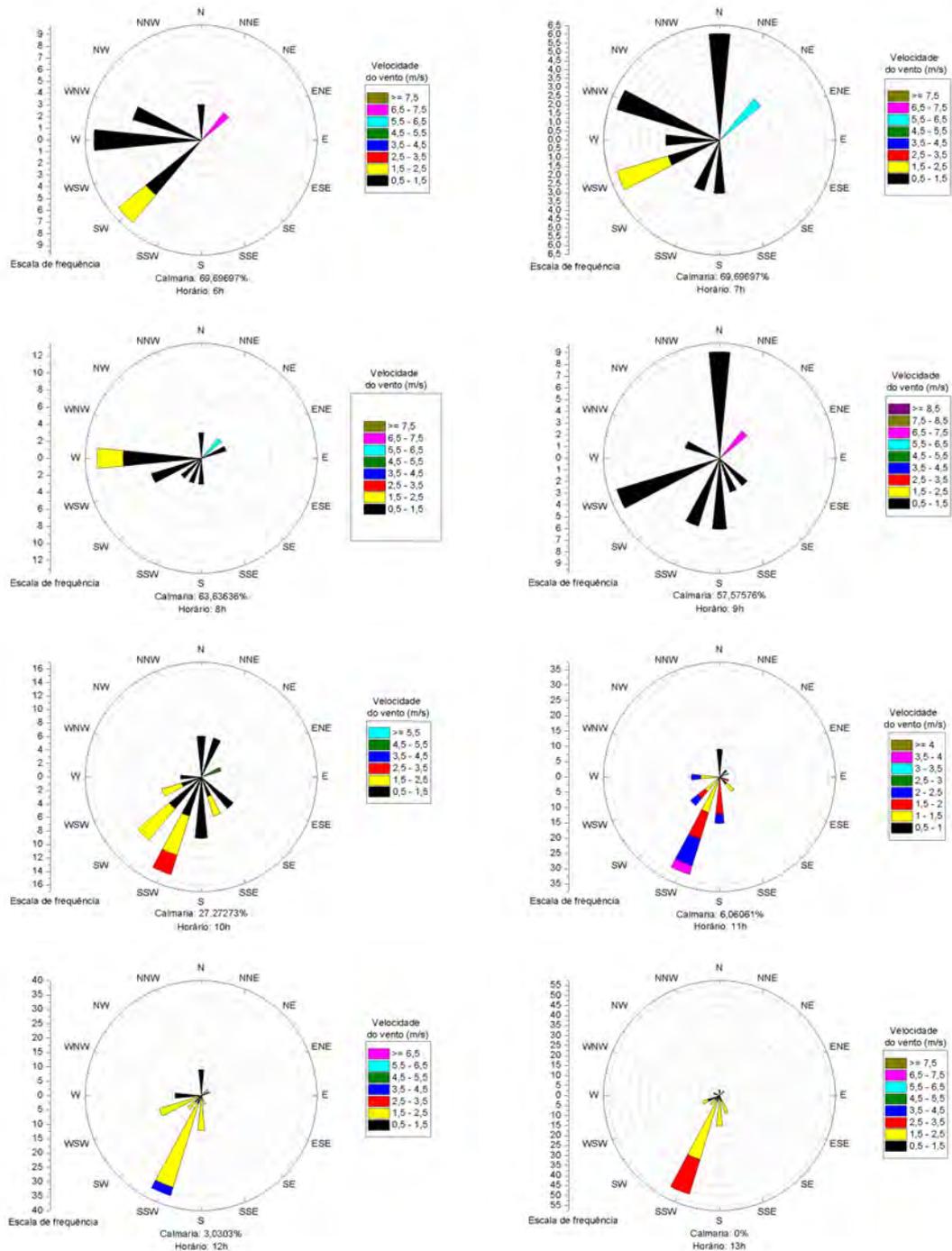


Figura 4.61 - Comportamento do vento entre 6h e 13h em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

A maior concentração horária de SO_2 ($117,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi registrada no dia 18/10/2009 às 9h, momento do dia que coincide com as maiores concentrações médias. Verificou-se o predomínio de calmaria e de ventos fracos vindos da di-

reção WSW nas horas que antecederam este registro, o que sugere a influência das emissões de fontes próximas no acúmulo de SO₂ no ar. Na Figura 4.62, está ilustrado o perfil do poluente ao longo deste dia.

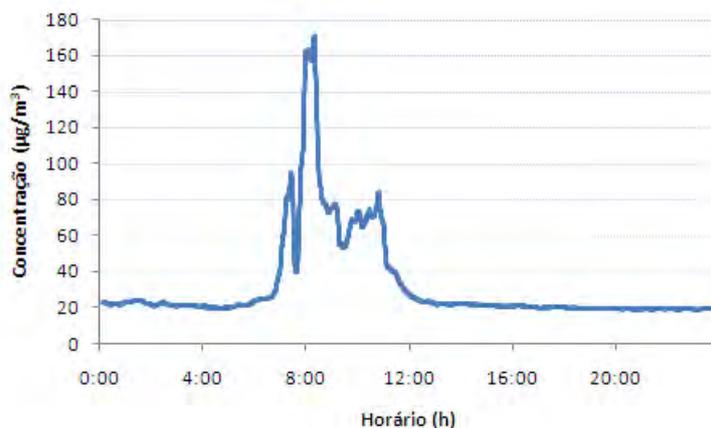


Figura 4.62 - Concentração de SO₂ em Cubatão ao longo do dia 18/10/2009.

4.2.2.6 Material Particulado PM₁₀

A média da concentração horária de PM₁₀ em Cubatão foi de 14,2 µg/m³, sendo os valores mínimo e máximo, respectivamente, de 10,0 µg/m³ e 70,0 µg/m³. Comparando o maior valor referente à média das concentrações ao longo de 24h (20,4 µg/m³) com o padrão de qualidade do ar para o PM₁₀ (150 µg/m³), observa-se que não houve ultrapassagem de padrão.

O perfil das concentrações horárias média, mínima e máxima de PM₁₀ estão apresentados na Figura 4.63. A partir das 7h, o perfil adquire comportamento ascendente, atingindo um máximo às 10h. Esse aumento nas concentrações pode estar relacionado à liberação de partículas pelos veículos em um momento do dia caracterizado pelo grande fluxo de automóveis, aliada às emissões por processos industriais.

Após este horário, inicia-se uma queda nos valores de concentrações, com mínimo às 14h, influenciada pelo aumento das temperaturas e maior ocorrência de ventos, que favorecem a dispersão dos poluentes. Uma pequena ascensão é detectada nas horas seguintes, podendo ser resultado das emissões veiculares e, durante a noite e na madrugada, as concentrações apresentam ligeira oscilação.

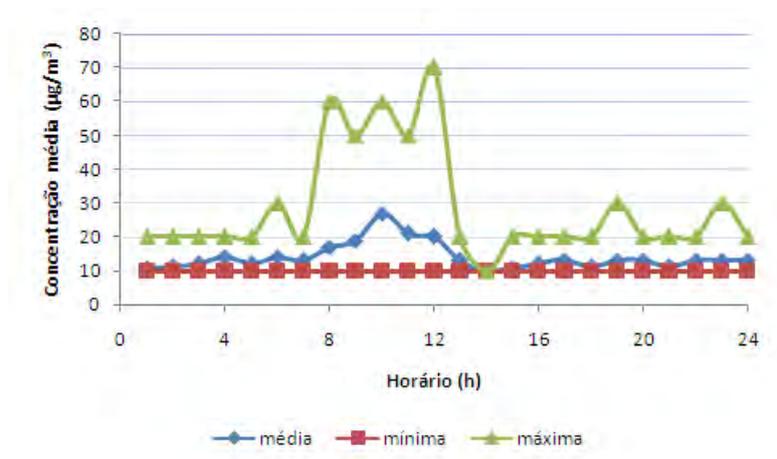


Figura 4.63 - Concentração horária média, mínima e máxima de PM₁₀ em Cubatão durante o período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Para o PM₁₀, a maior concentrações horária (70,0 µg/m³) também foi registrada no dia 18/10/2009, porém, às 12h. Analisando as condições meteorológicas nesse momento do dia, observou-se predomínio de ventos fracos vindos da direção N e ausência de chuva, o que pode ter favorecido o acúmulo de PM₁₀ proveniente da emissão de fontes próximas. O comportamento da concentração ao longo deste dia está ilustrado na Figura 4.64.

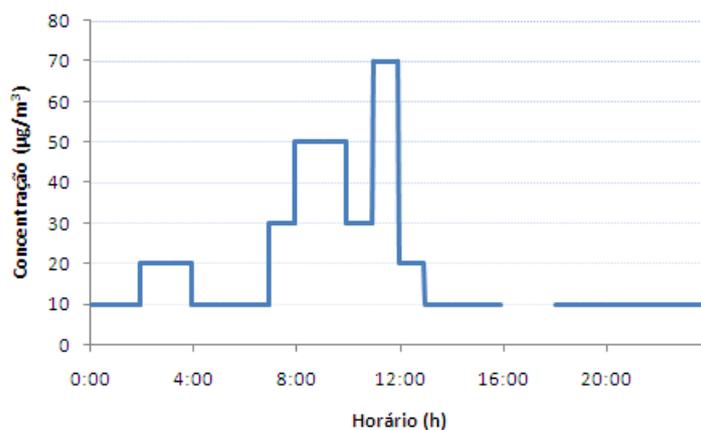


Figura 4.64 - Concentração de PM₁₀ em Cubatão ao longo do dia 18/10/2009.

4.2.2.7 Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano

Em relação ao monitoramento dos hidrocarbonetos, a média das concentrações horárias de metano obtida foi de 3.057,3 ppb, apresentando valor mínimo de

2.676,5 ppb e máximo de 4.304,5 ppb. Para os não-metano, a média foi de 3.505,1 ppb, sendo o mínimo e o máximo, respectivamente, de 1.219,4 ppb e 16.497,3 ppb. Como os hidrocarbonetos não apresentam padrão de qualidade do ar específico, não foi possível avaliar ultrapassagem de idealidade.

O perfil médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de metano e de hidrocarbonetos não-metano estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 4.65 e 4.66. Observa-se que, para ambos, as concentrações mais elevadas foram registradas durante a madrugada e no início da manhã.

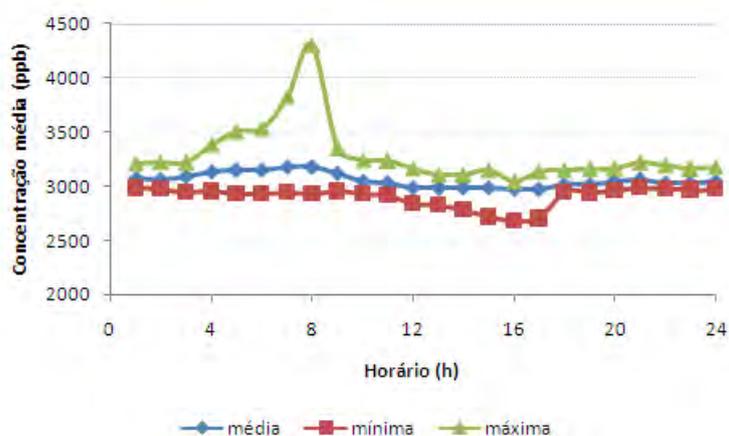


Figura 4.65 - Concentração horária média, mínima e máxima de metano em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

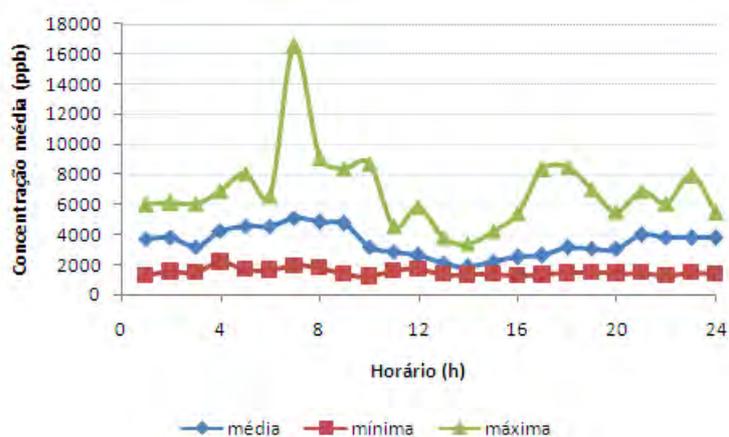


Figura 4.66 - Concentração horária média, mínima e máxima de hidrocarbonetos não-metano em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

Conforme ilustrado pela rosa dos ventos durante a madrugada (Figura 4.39) e pelas rosas que mostram a evolução do vento entre 6h e 13h (Figura 4.61), além do predomínio de calmaria, existem contribuições de ventos de N, onde se localiza a Refinaria Presidente Bernardes Cubatão - Petrobrás, e entre os quadrantes W e WSW, onde está o Terminal da TRANSPETRO, destinado ao recebimento, armazenamento e carregamento de combustíveis e produtos químicos. Com este comportamento, pode-se verificar a grande contribuição dos processos envolvendo petróleo e seus derivados para o acúmulo de hidrocarbonetos no ar.

Durante o final da manhã e a tarde, a presença de ventos de maior magnitude vindos de outras direções e o aumento dos movimentos convectivos da atmosfera auxiliam na dispersão dos poluentes, proporcionando diminuição das concentrações. À noite, o perfil apresenta nova ascensão, indicando que há contribuição de fontes próximas.

A maior concentração de não-metano (16.497,3 ppb) foi registrada no dia 24/10/2009 às 7h, enquanto que, de metano (4.304,5 ppb), foi registrada no mesmo dia, porém às 8h. As condições meteorológicas neste momento do dia eram caracterizadas por ausência de chuva e predomínio de calmaria, favorecendo o aumento da quantidade de hidrocarbonetos no ar emitidos por fontes próximas. Nas Figuras 4.67 e 4.68, estão ilustrados os perfis de metano e não-metano ao longo deste dia.

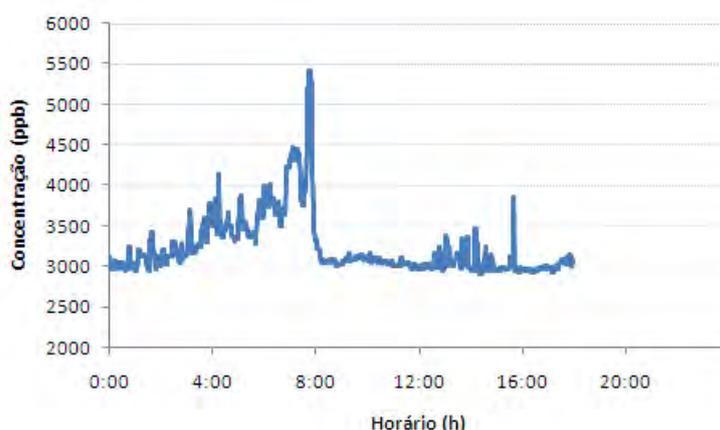


Figura 4.67 - Concentração de metano em Cubatão ao longo do dia 24/10/2009.

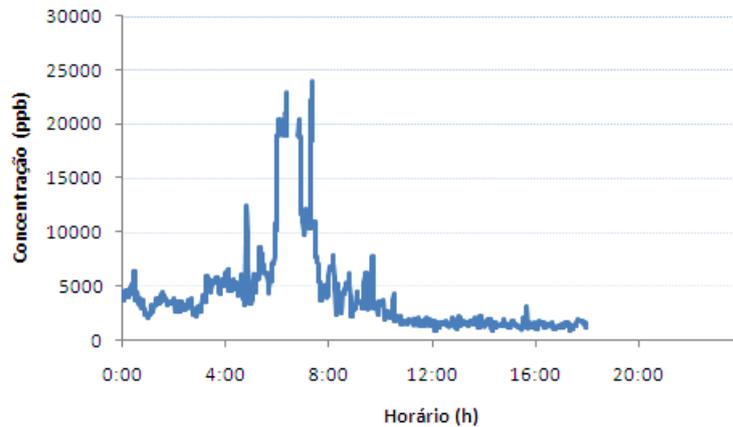


Figura 4.68 - Concentração de hidrocarbonetos não-metano em Cubatão ao longo do dia 24/10/2009.

4.2.2.8 Análise do Índice de Qualidade do Ar

Assim como em Rio Claro, o índice de qualidade do ar também foi calculado para cada poluente monitorado por legislação em Cubatão, a fim de se qualificar o ar ao qual a população estava exposta durante o período de coleta.

Em relação ao CO, a qualidade do ar foi considerada "boa" em quase todos os dias de coleta, com exceção do dia 16/10/2009, no qual é considerada "regular". Neste dia, também é registrada a maior concentração horária de CO do período, influenciada pelo grande fluxo de veículos registrado na rodovia próxima ao CEPEMA. O IQAr diário desse poluente está ilustrado na Figura 4.69, apresentando um valor máximo de 53.

Na Figura 4.70, está ilustrado o valor do índice de qualidade do ar diário obtido para o O₃ durante o período de coleta. Verifica-se que a qualidade do ar foi considerada "boa" em todos os dias monitorados, sendo o índice máximo de 29.

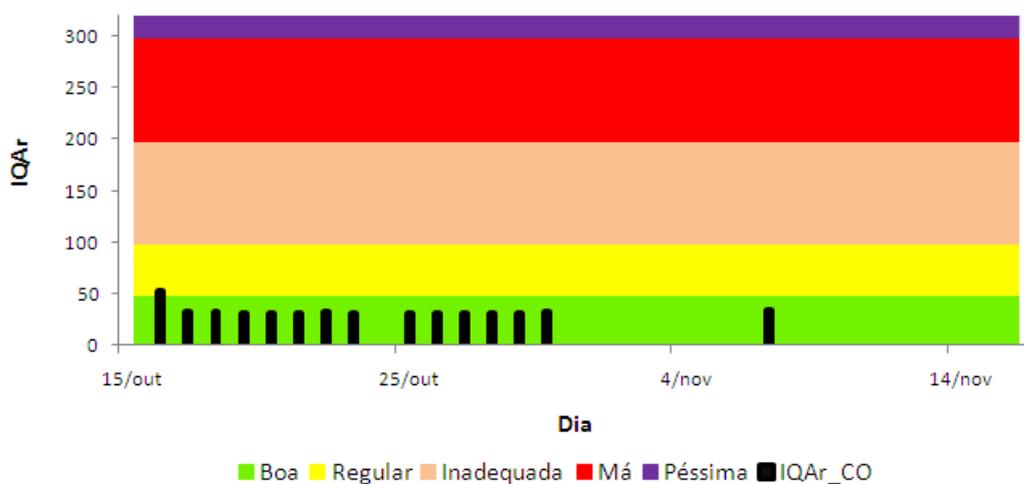


Figura 4.69 - Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao CO.

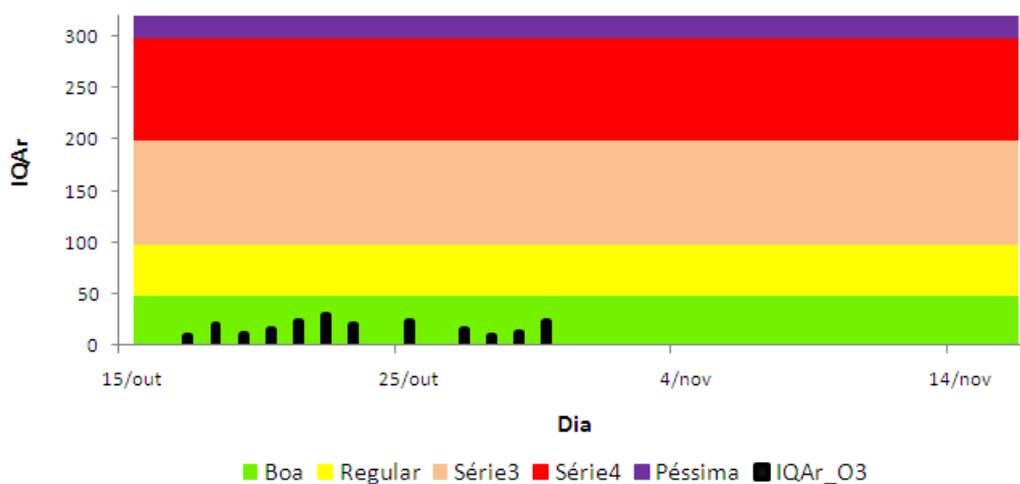


Figura 4.70 - Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao O₃.

A classificação da qualidade do ar para o NO₂ foi considerada "boa" para todos dos dias monitorados, apresentando um valor diário máximo do índice igual a 35. O IQAr diário para o NO₂ está ilustrado na Figura 4.71.

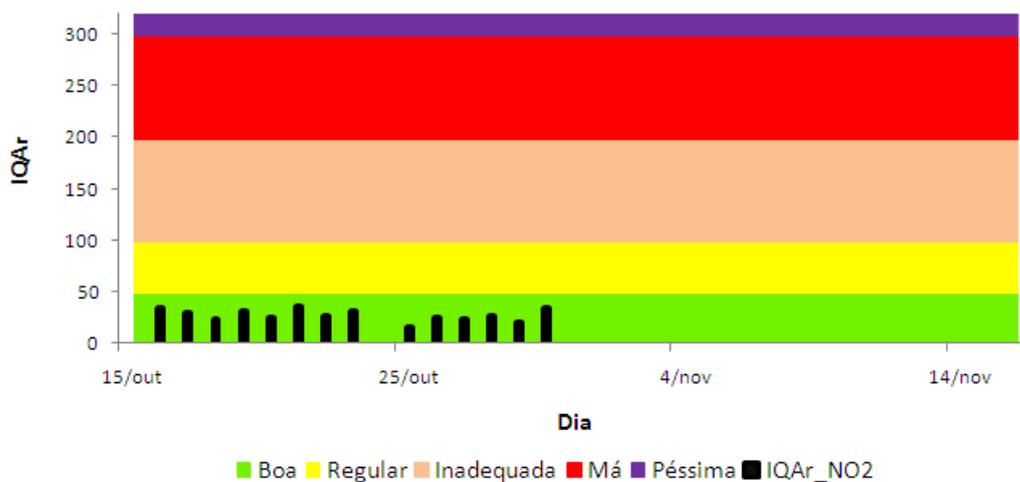


Figura 4.71 - Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao NO₂.

Para todos os dias de monitoramento, a qualidade do ar em relação ao SO₂ também foi considerada "boa". O IQAr diário máximo atingiu o valor de 20 para este poluente. Na Figura 4.72, estão ilustrados os valores diários do IQAr para o SO₂.

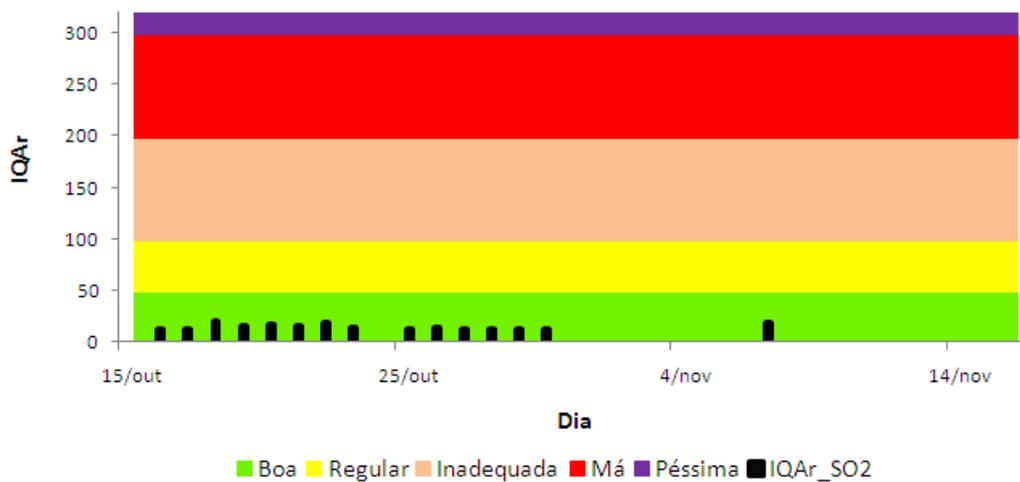


Figura 4.72 - Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao SO₂.

A qualidade do ar em relação ao PM₁₀ também é classificada como "boa" em todos os dias monitorados, apresentando índice diário máximo de 20. Os valores diários do IQAr para o PM₁₀ estão mostrados na Figura 4.73.

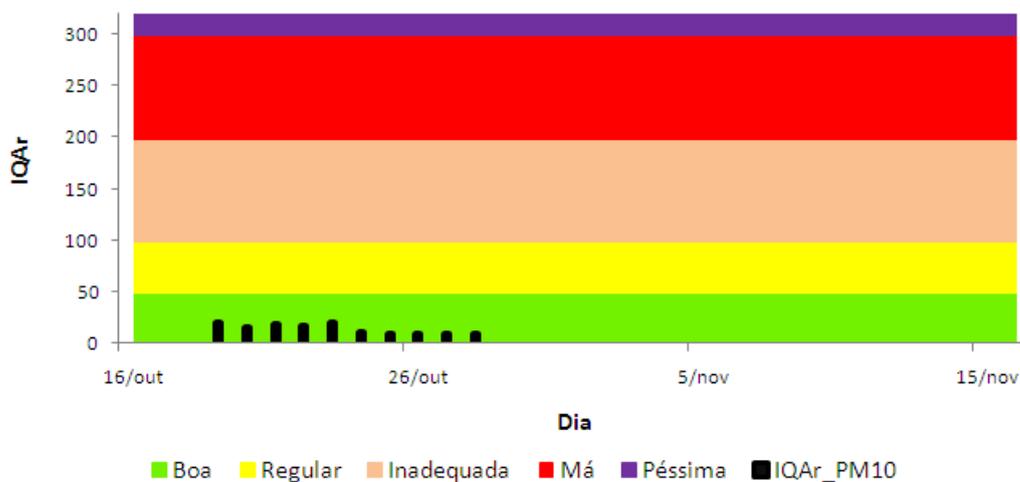


Figura 4.73 - Índice de qualidade do ar diário em Cubatão em relação ao PM₁₀.

De forma geral, baseando-se na qualificação em função do pior índice do dia, verifica-se que, dos 33 dias totais de monitoramento, 3,0% apresentaram qualidade "regular", 45,5% foram caracterizados com qualidade "boa" do ar, enquanto o restante permaneceu sem coleta de dados, conforme observado na Figura 4.74.

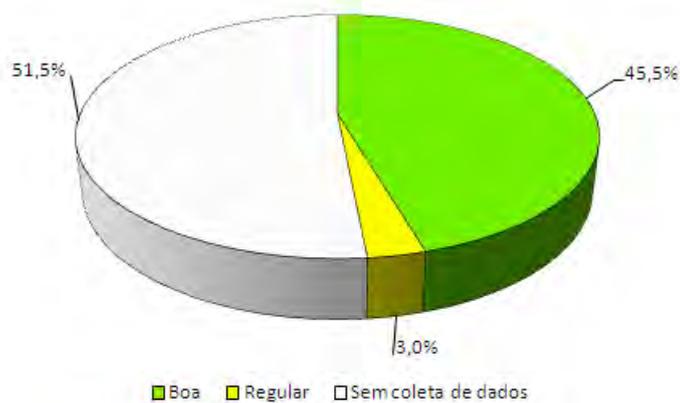


Figura 4.74 - Classificação geral da qualidade do ar em Cubatão no período de 15/10/2009 a 16/11/2009.

4.3 Monitoramento da Qualidade do Ar em Cachoeira Paulista

Em Cachoeira Paulista, o monitoramento da qualidade do ar foi realizado no período de 27/10/2011 a 18/01/2012. Dos 84 dias, 72 dias foram considerados válidos, porém cada poluente apresentou uma determinada quantidade de dias válidos. Para o O₃, foram 71 dias válidos; para NO₂, 72 dias; para o PM₁₀, 51 dias e para o hidrocarboneto metano, 30 dias. Como as concentrações de CO e NO no local de monitoramento foram muito pequenas, abaixo do limite mínimo detectável, as análises de qualidade do ar para estes poluentes foram inviabilizadas. Para os hidrocarbonetos não-metano e o SO₂, as concentrações apresentaram valores acima do limite de detecção em, respectivamente, 16 e 7 dias.

A perda de dados, de forma geral, esteve relacionada a problemas de erros na leitura dos instrumentos, permanência dos analisadores em modo de calibração, falha de energia e operações de manutenção no local. Além destes, houve problemas relacionados ao rompimento da fita filtrante de fibra de vidro do monitor de material particulado e ao equipamento gerador de hidrogênio, responsável pela manutenção da chama ionizante do monitor de hidrocarbonetos.

As análises das características meteorológicas também são feitas para todos os dias monitorados, para verificar o comportamento meteorológico local e sua influência na dispersão dos poluentes.

4.3.1 Características Meteorológicas

Segundo o Boletim INFOCLIMA (INPE, 2012b), o mês de novembro/2011 foi caracterizado pela ocorrência de chuvas provocadas pela atuação de ZCAS e de sistemas frontais, conforme ilustrado na Figura 4.75. Em dezembro/2011, a atuação de vários episódios de ZCAS foi responsável pela ocorrência de chuvas em diversos dias. Na Figura 4.76, está ilustrada a ocorrência de um desses episódios. Em relação ao mês de janeiro/2012, a persistência de ZCAS, ilustrada na Figura 4.77, foi favorecida pelo deslocamento para nordeste de sistemas meteorológicos típicos de verão.

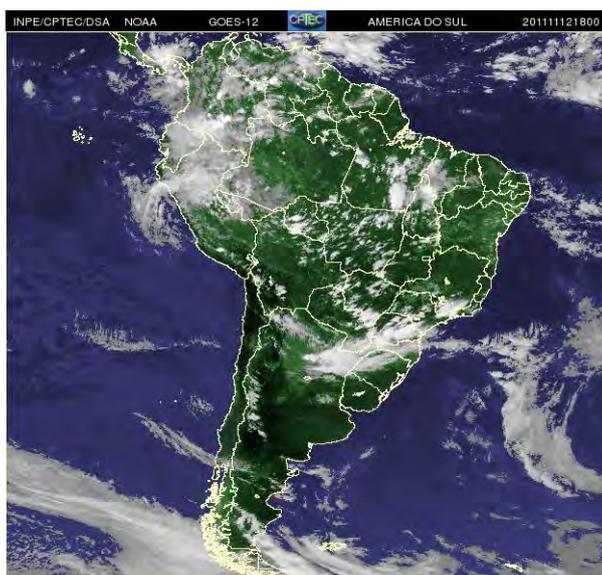


Figura 4.75 - Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 12/11/2011 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)



Figura 4.76 - Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 09/12/2011 às 18:15UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)

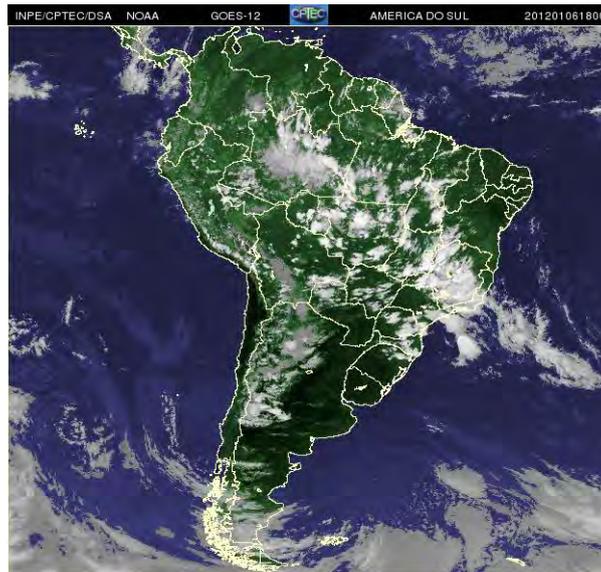


Figura 4.77 - Imagem de satélite do GOES-12 para o dia 06/01/2012 às 18UTC.
Fonte: (INPE, 2012a)

A temperatura média obtida para o período de monitoramento de Cachoeira Paulista foi de 21,8°C, variando entre uma mínima de 10,8°C e uma máxima de 33,7°C. Observando o comportamento horário médio da temperatura, ilustrado na Figura 4.78, verifica-se que as mínimas são registradas por volta das 6h, enquanto que as máximas são atingidas entre 14h e 16h.

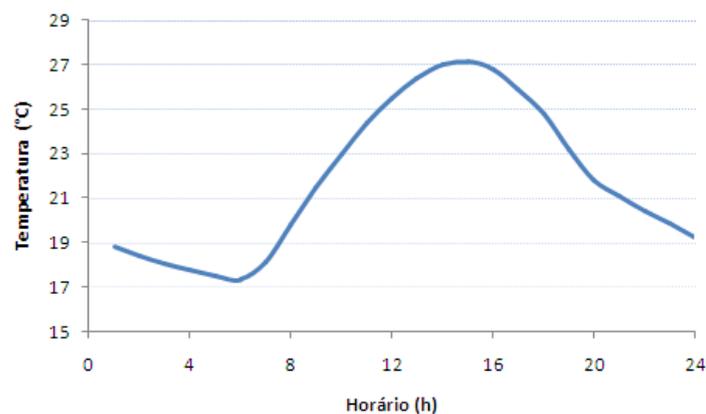


Figura 4.78 - Perfil horário médio da temperatura em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Analisando os dados de direção e velocidade do vento, pode-se verificar pouca ocorrência de calmaria. A rosa dos ventos obtida para todo o período de moni-

toramento, ilustrada na Figura 4.79, mostra calma de 2,3% e predominância de ventos na direção leste-nordeste, seguida da direção nordeste. Os valores de velocidade variaram de 0,5 a 7,5 m/s, estando a magnitude máxima também na direção predominante.

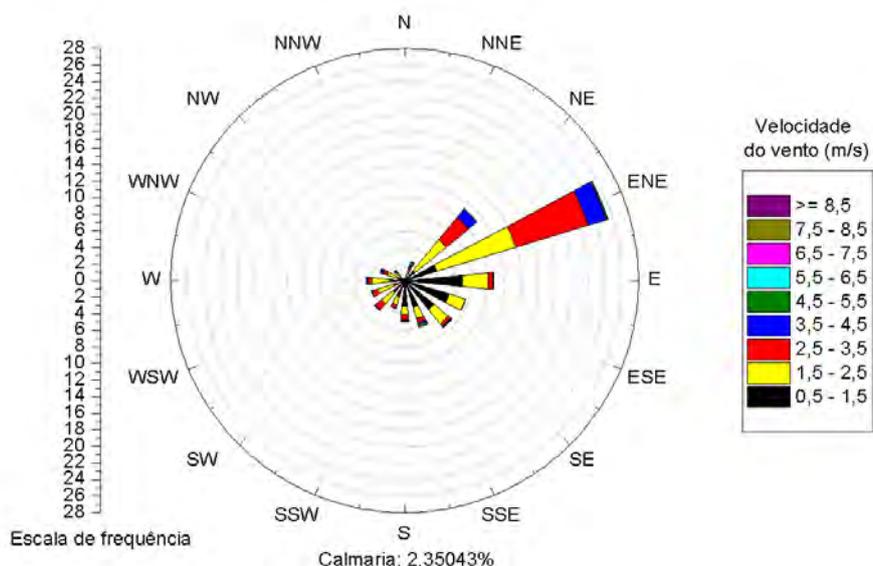


Figura 4.79 - Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

O acompanhamento do perfil do vento ao longo do dia mostra o domínio da direção predominante. Durante a madrugada, ocorre a maior condição de calma entre os intervalos do dia, como mostrado na Figura 4.80, e ventos detectados ocorrem em direções variadas, porém majoritariamente na direção leste-nordeste.

A porcentagem de calma diminui no período da manhã e os ventos mais frequentes permanecem vindos da direção predominante. Analisando a Figura 4.81, observa-se que a magnitude do vento apresenta valores mais elevados e que a contribuição das demais direções diminuiu.

Durante a tarde, os ventos apresentam bastante variação nas direções, com predominância do quadrante ENE e ausência de calma. Através da Figura 4.82, verifica-se a ocorrência de ventos com magnitudes elevadas, que, juntamente com as temperaturas mais elevadas, contribuem para a existência das melhores condições para a dispersão.

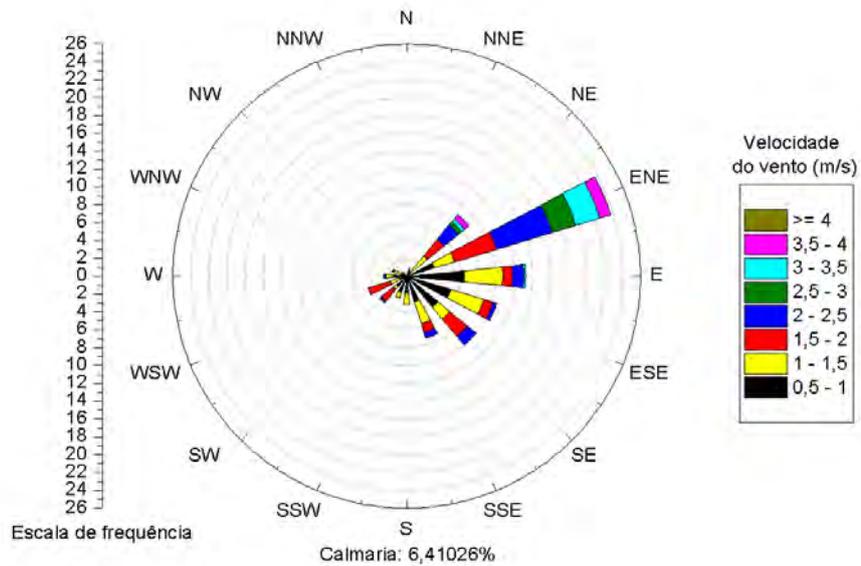


Figura 4.80 - Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 01:00 e 06:00h durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

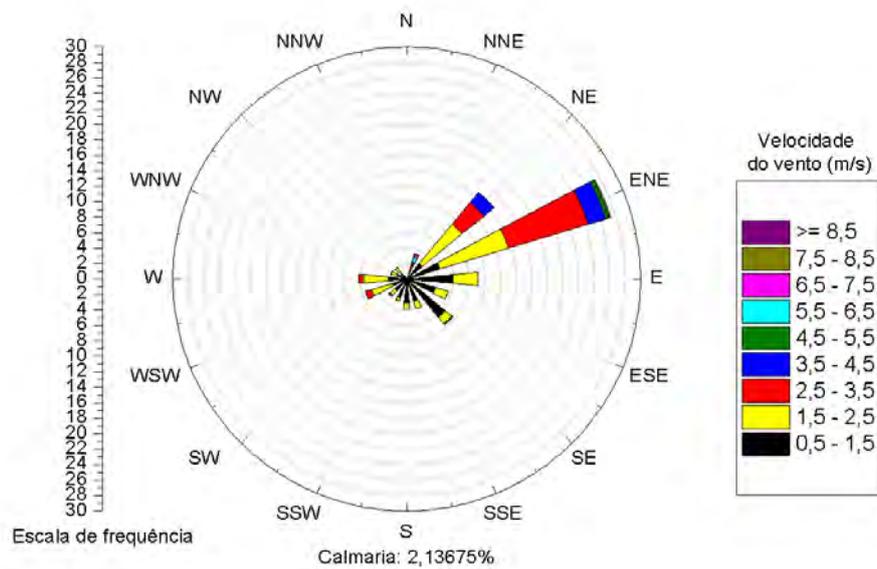


Figura 4.81 - Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 07:00 e 12:00h no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

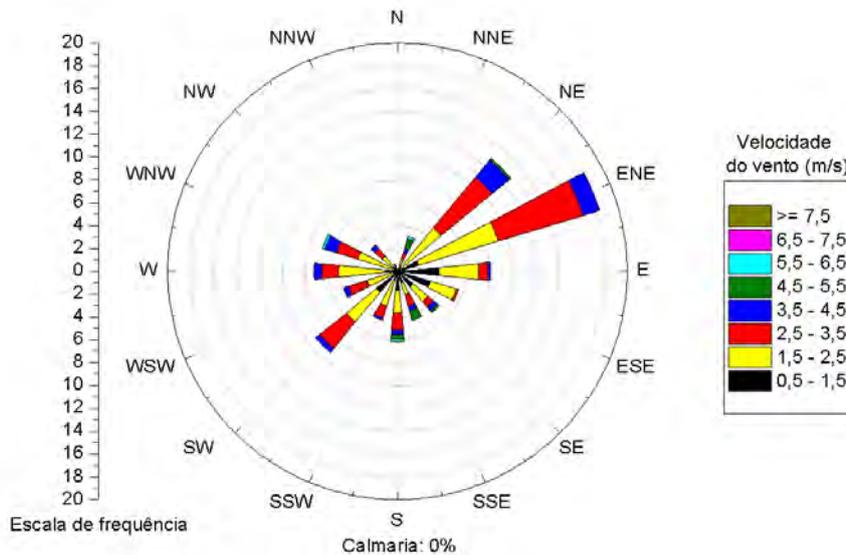


Figura 4.82 - Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 13:00 e 18:00h durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

À noite, observa-se a contribuição menos frequente de várias direções, porém sempre com a predominância da direção ENE. A porcentagem de calma aumenta muito pouco e as velocidades começam a apresentar valores mais baixos, conforme ilustrado na Figura 4.83.

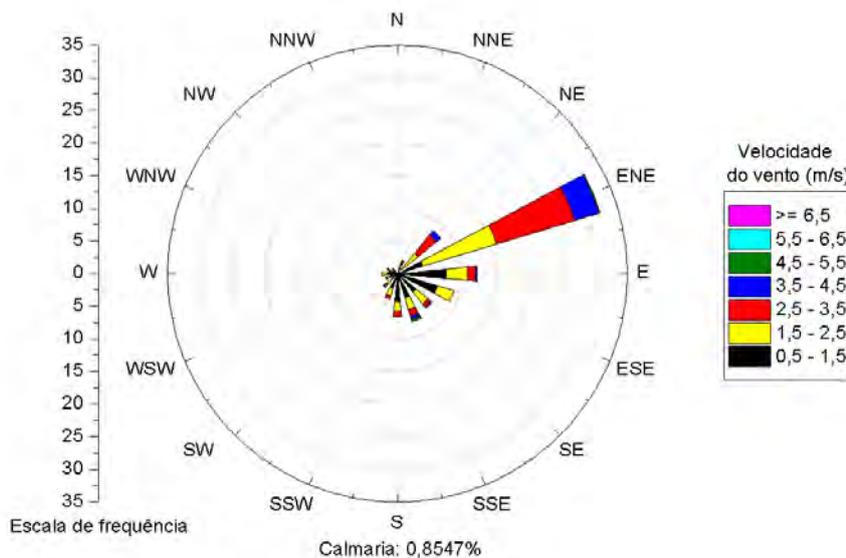


Figura 4.83 - Rosa dos ventos de Cachoeira Paulista entre 19:00 e 24:00h no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

A velocidade média do vento foi de 1,9 m/s e seu comportamento horário está ilustrado na Figura 4.84. Verificam-se, em todos os momentos do dia, velocidades acima de 1,0 m/s, sendo as menores magnitudes alcançadas durante a madrugada e no início da manhã. O perfil adquire comportamento crescente a partir de 7h, favorecendo as condições de dispersão. A ascensão atinge um máximo às 15h, apresentando, em seguida, comportamento decrescente.

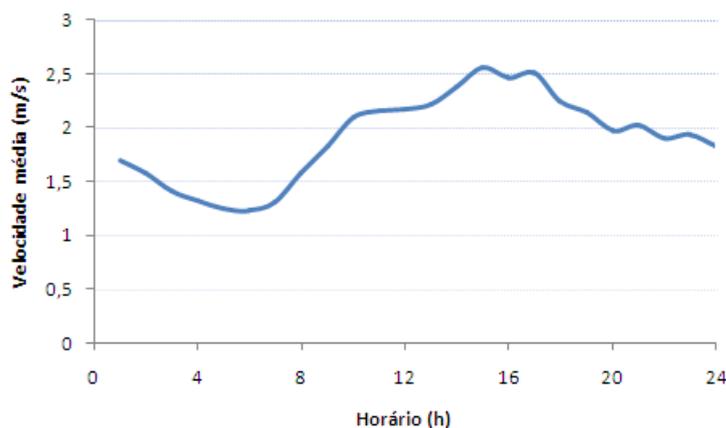


Figura 4.84 - Perfil médio da velocidade do vento em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

A precipitação acumulada do período foi de 384,2 mm e os maiores volumes de chuva ficaram concentrados na primeira quinzena dos meses de dezembro/2011 e de janeiro/2012. A ocorrência de temporais entre os dias 11/11/2011 e 12/11/2011 provocou falhas no sistema de armazenamento de dados da estação, resultando na perda das informações meteorológicas nesses dias. Na Figura 4.85, estão ilustrados os acumulados diários de precipitação obtidos durante o período de monitoramento.

A umidade relativa média do período foi de 75%, variando entre um valor mínimo de 21% e um máximo de 97%. Na Figura 4.86, está ilustrado o perfil horário médio da umidade relativa durante o período monitorado, no qual se pode observar que os menores valores estão concentrados no período da tarde, atingindo o mínimo às 14h.

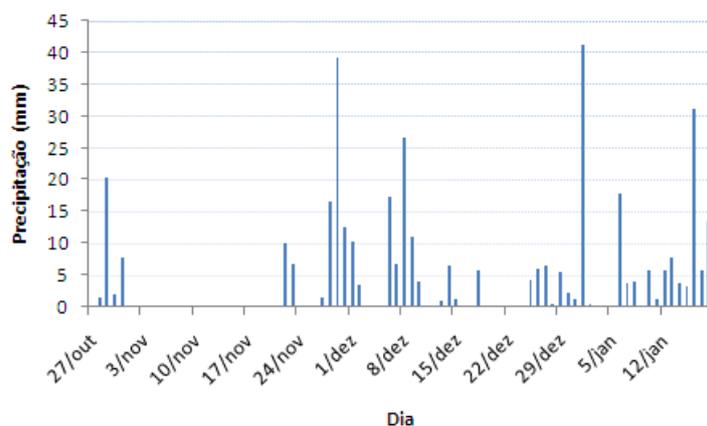


Figura 4.85 - Precipitação acumulada diária em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

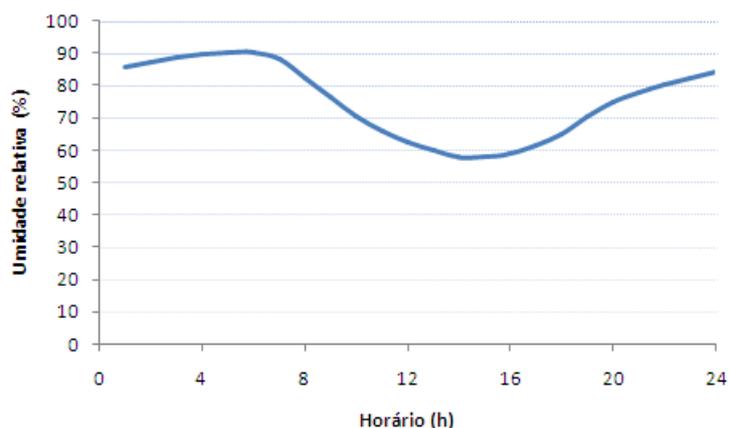


Figura 4.86 - Perfil horário médio da umidade relativa em Cachoeira Paulista no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Durante o mês de outubro/2011, a média da radiação diária apresentou valores em torno de 200 a 220 W/m², aumentando a intensidade nos meses de novembro/2011 e dezembro/2011. Em janeiro/2012, as médias obtiveram valores menores, variando entre 180 a 200 W/m². Na Figura 4.87, está ilustrado a média da radiação solar diária durante os meses de monitoramento em Cachoeira Paulista.

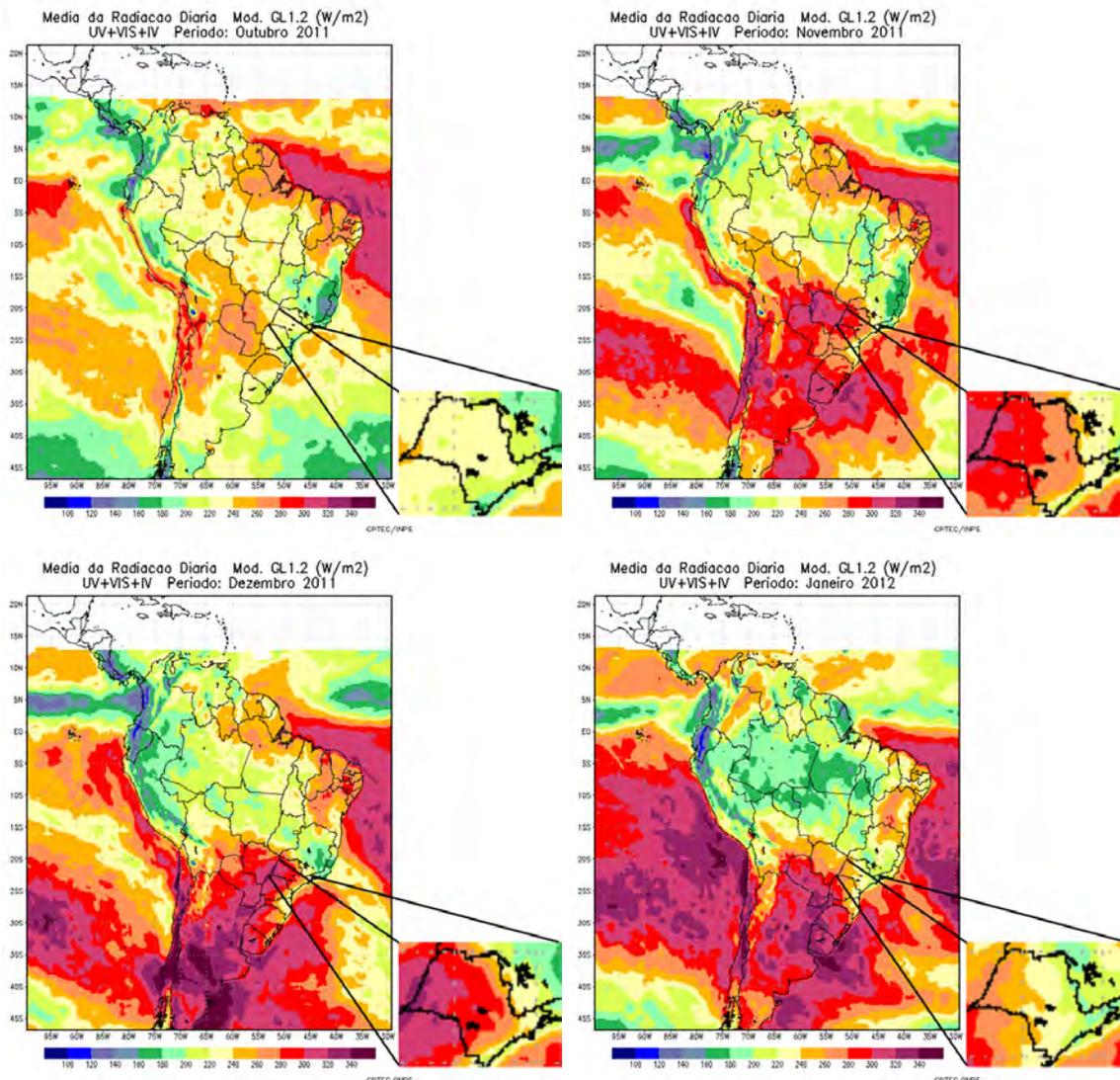


Figura 4.87 - Média da radiação solar diária nos meses de outubro/2011, novembro/2011, dezembro/2011 e janeiro/2012.

4.3.2 Análise da Qualidade do Ar

Para Cachoeira Paulista, os resultados da avaliação do comportamento dos poluentes são apresentados neste item.

4.3.2.1 Ozônio

Em relação ao O_3 , a média encontrada para as concentrações horárias durante o monitoramento foi de $43,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo o valor horário mínimo de $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o máximo de $109,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Verifica-se que o padrão de qualidade do ar para o O_3

não foi ultrapassado, uma vez que a máxima concentração horária obtida pelo monitoramento é menor que o padrão nacional ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

O perfil médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de O_3 estão ilustrados na Figura 4.88, apresentando comportamento característico desse poluente. Verifica-se que as concentrações máximas são obtidas entre 12h e 18h, período do dia no qual são encontradas as condições mais favoráveis para o ciclo de formação fotoquímica do ozônio.

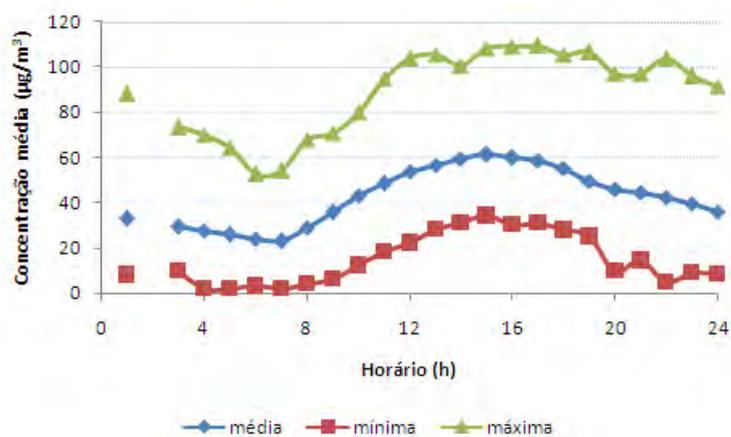


Figura 4.88 - Concentração horária média, mínima e máxima de O_3 em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Como o pico de maior concentração média foi obtido às 15h, o comportamento da concentração de ozônio é comparado com o perfil do vento e da temperatura neste horário, a fim de se verificar a influência das condições meteorológicas na formação do poluente.

Na Figura 4.89, está ilustrado o perfil da concentração e do vento às 15h durante todos os dias monitorados. Observa-se que os períodos de ventos mais fracos coincidem com os valores de concentração mais elevados e, nos momentos de maior magnitude do vento, o comportamento se inverte. Essas características ilustram a influência positiva do vento na dispersão dos poluentes.

Relacionando o comportamento da concentração com o da temperatura às 15h, conforme mostrado na Figura 4.90, verifica-se que os perfis apresentam tendências proporcionais, de forma que os valores de concentração adquirem comportamento crescente (decrecente) à medida que ocorre aumento (diminuição) das temperaturas.

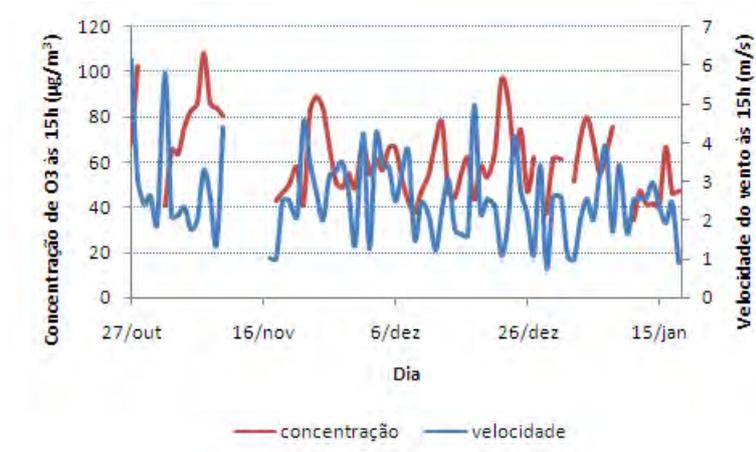


Figura 4.89 - Concentração de O₃ e velocidade do vento às 15h em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

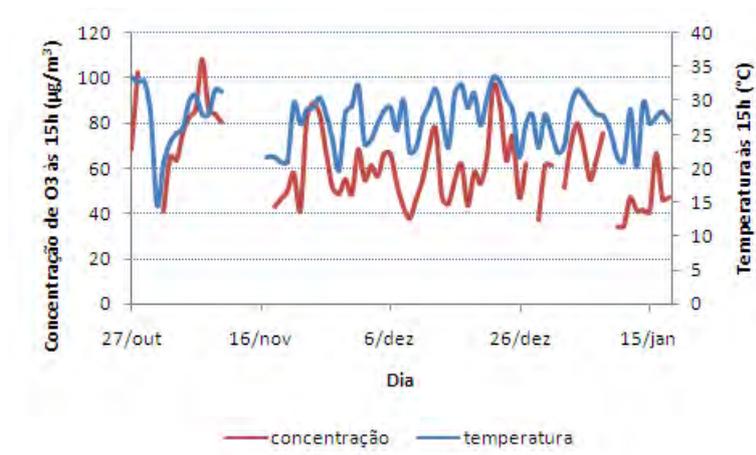


Figura 4.90 - Concentração de O₃ e temperatura do ar às 15h em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Na Figura 4.91, estão ilustrados os perfis horários de O₃ e NO₂. Pode-se observar um comportamento oposto entre as duas curvas, indicando a existência do mecanismo de reações envolvendo esses poluentes. A partir de 7h, as concentrações de ozônio começam a aumentar e atingem um máximo no período da tarde, enquanto que a quantidade de NO₂ vai diminuindo. À medida que a intensidade de radiação solar vai diminuindo com o final da tarde, os perfis se invertem.

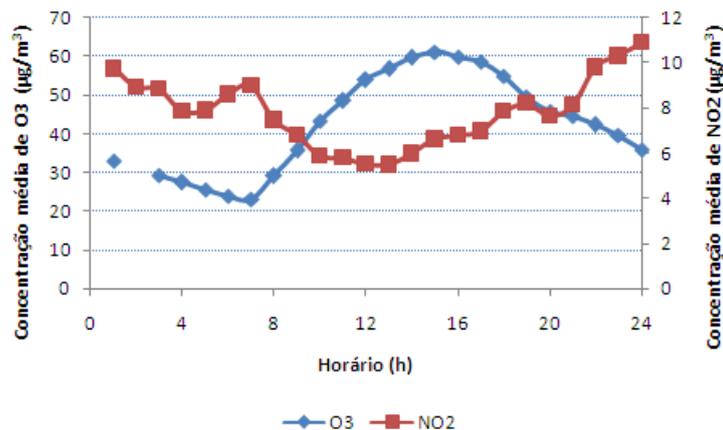


Figura 4.91 - Concentração horária de O₃ e de NO₂ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

A máxima concentração horária ($109,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi registrada no dia 24/11/2011 às 17h. Na Figura 4.92, está ilustrado o comportamento da concentração de ozônio ao longo deste dia. Para esse dia, observou-se que as temperaturas estavam elevadas e acima da média do período, fato que sugere alta incidência de radiação, conforme ilustrado na Figura 4.93, e que as condições atmosféricas eram de vento fraco vindos da direção SWS e ausência de chuva. Verifica-se também que há um pico secundário em torno de 19h, o qual pode estar relacionado a ozônio transportado através de massas de ar poluídas, uma vez que foram medidos, neste momento, ventos provenientes da direção oeste.

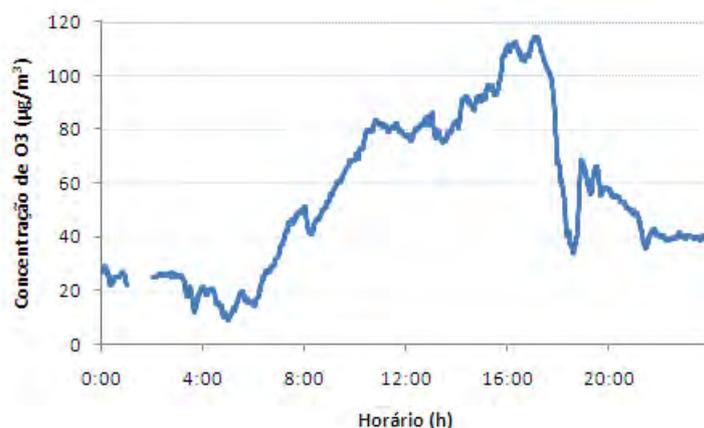


Figura 4.92 - Concentração de O₃ em Cachoeira Paulista no dia 24/11/2011.

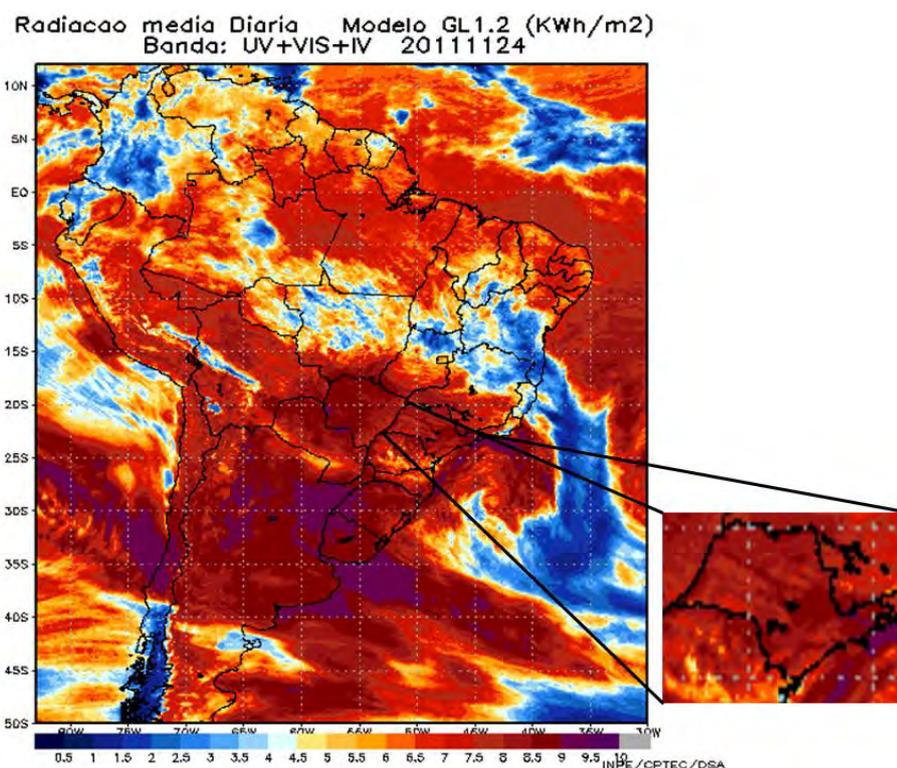


Figura 4.93 - Média da radiação solar em Cachoeira Paulista ao longo do dia 24/11/2011.

4.3.2.2 Dióxido de Nitrogênio

Em Cachoeira Paulista, a média das concentrações horárias de NO_2 foi de $7,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando entre um mínimo de $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e um máximo de $50,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisando o máximo valor horário de cada dia monitorado, pode-se verificar que os padrões nacionais primário ($320 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e secundário ($190 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de qualidade do ar para esse poluente não foram ultrapassados.

Na Figura 4.94, estão ilustrados o comportamento médio, mínimo e máximo da concentração horária de NO_2 no período de monitoramento. O perfil adquire comportamento ascendente no período da manhã, atingindo um máximo às 7h. Esse crescimento pode estar relacionado à ocorrência de reações de oxidação entre seus precursores aliado a condições desfavoráveis de dispersão nesse momento do dia. A partir deste horário, as concentrações começam a diminuir e alcançam um mínimo às 13h, coincidindo com o ciclo fotoquímico de formação de O_3 .

As concentrações iniciam um gradativo comportamento ascendente no período da tarde, que se estende até a noite. Os valores mais elevados de NO_2 no fi-

nal do dia estão sob influência das condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão, as quais permitem maior acúmulo de poluentes no ar.

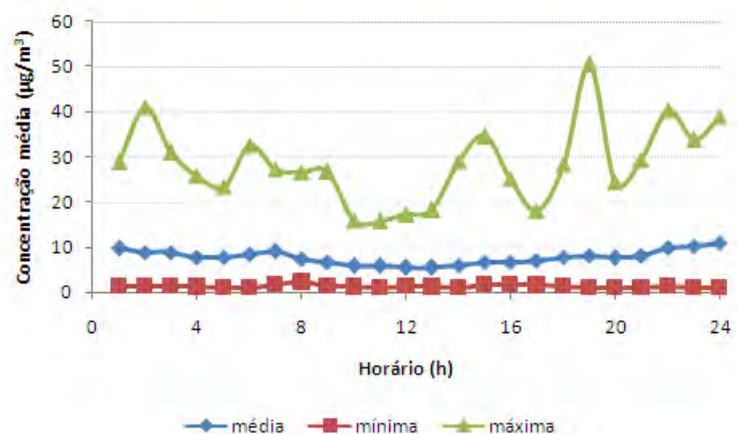


Figura 4.94 - Concentração horária média, mínima e máxima de NO₂ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Para o NO₂, a máxima concentração horária (50,4 µg/m³) foi observada no dia 24/11/2011 às 19h. Na Figura 4.95, está apresentado o comportamento da concentração de NO₂ ao longo deste dia. Neste dia, também ocorreu a máxima concentração de O₃ algumas horas antes, sugerindo, assim, a ocorrência do ciclo de reações de formação de NO₂ (Equação 2.4). Observou-se também que as condições atmosféricas eram de ventos fracos vindos da direção SWS e ausência de chuva, desfavoráveis à dispersão.

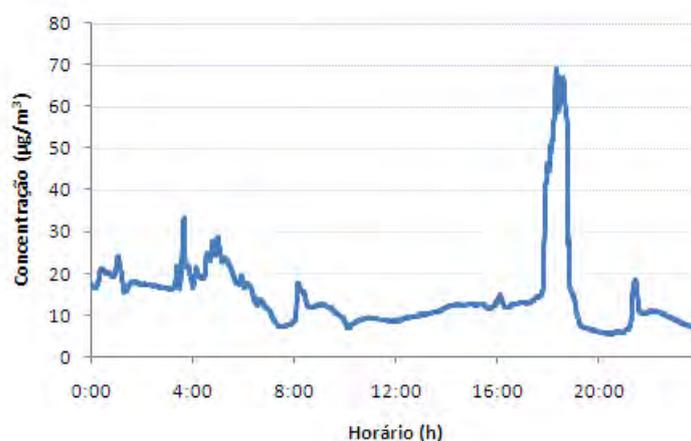


Figura 4.95 - Concentração de NO₂ em Cachoeira Paulista no dia 24/11/2011.

4.3.2.3 Dióxido de Enxofre

As concentrações horárias de SO₂ variaram entre um mínimo de 1,4 µg/m³ e um máximo de 5,0 µg/m³, obtendo-se um média de 2,3 µg/m³. Comparando o maior valor encontrado para a média das concentrações ao longo de 24h (2,8 µg/m³), pode-se verificar que os padrões primário (365 µg/m³) e secundário (100 µg/m³) de qualidade do ar para o SO₂ não foram ultrapassados.

O comportamento das concentrações horárias média, mínima e máxima de SO₂ estão ilustrados na Figura 4.96. As concentrações apresentaram uma pequena variação durante a madrugada e, no período da manhã, pode ser observado um pico em torno de 9h. Em seguida, o perfil decresce e uma nova ascensão é observada a partir de 13h. A tendência crescente dos valores permanece progressivamente até às 17h, seguida de uma brusca ascensão nas próximas duas horas. Observa-se uma rápida queda na concentração em torno de 20h, apresentando pequenas oscilações nas demais horas.

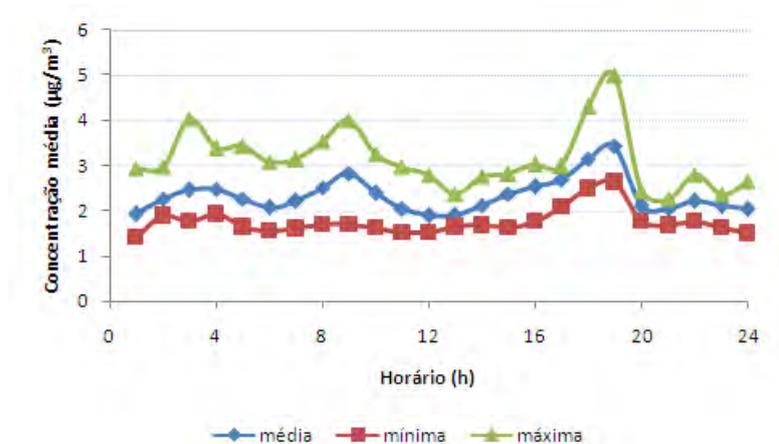


Figura 4.96 - Concentração horária média, mínima e máxima de SO₂ em Cachoeira Paulista nos 7 dias válidos.

De forma geral, observa-se que as concentrações apresentam valores muito pequenos em cada momento do dia no período válido para o SO₂. Dessa forma, como os valores acima do limite de detecção foram obtidos em um período muito pequeno, pode-se verificar que as concentrações obtidas representam uma concentração de fundo.

4.3.2.4 Material Particulado PM₁₀

Em relação ao PM₁₀, a média da concentração horária foi de 12,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, estando os valores horários entre 4,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mínimo) e 51,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (máximo). Ao analisar o maior valor referente à média das concentrações ao longo de 24h (30,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), verifica-se que os padrões de qualidade do ar para o PM₁₀ (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) também não foram ultrapassados.

O perfil médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de PM₁₀ está mostrado na Figura 4.97.

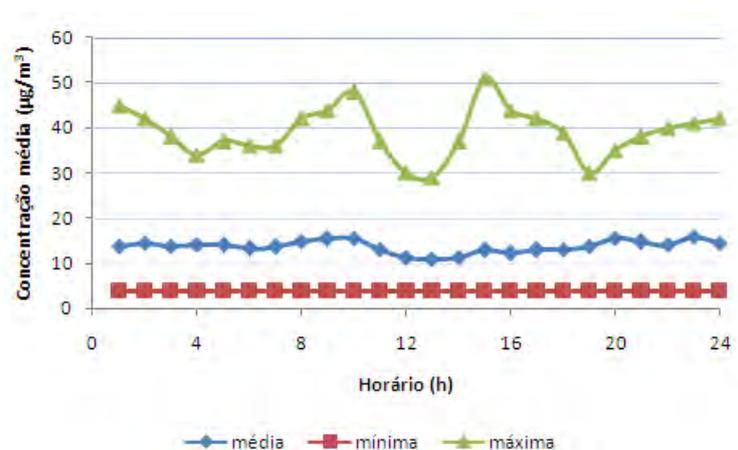


Figura 4.97 - Concentração horária média, mínima e máxima de PM₁₀ em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Durante a madrugada e no início da manhã, as concentrações apresentam-se mais elevadas e com ligeira oscilação, resultado das condições atmosféricas mais estáveis que favorecem o acúmulo de material particulado no ar. Como o local de coleta está localizado a cerca de 1 km de distância da Rodovia Presidente Dutra em um ambiente tipicamente rural, as fontes locais de PM₁₀ podem estar relacionadas à liberação de particulado pelos veículos e à ressuspensão de partículas do solo.

No período da tarde, a magnitude mais elevada dos ventos, aliada às maiores temperaturas, contribui para a maior dispersão do material particulado, resultando em concentrações menores. À noite, a presença de ventos mais fracos e temperaturas menores prejudicam a dispersão, fazendo com que a quantidade de PM₁₀ no ar adquira novamente valores mais altos.

A concentração horária máxima de PM₁₀ (51,0 µg/m³) foi registrada no dia 07/11/2011 às 15h. Analisando o comportamento do vento nesse período do dia, observou-se que foram registradas magnitudes elevadas provenientes das direções oeste e noroeste. Como essa é a posição da Rodovia Presidente Dutra em relação ao local monitorado, o acúmulo de material particulado no ar pode estar relacionado ao transporte de partículas liberadas pelos veículos aliado à poeira suspensa do solo. O perfil de PM₁₀ ao longo desse dia está ilustrado na Figura 4.98.

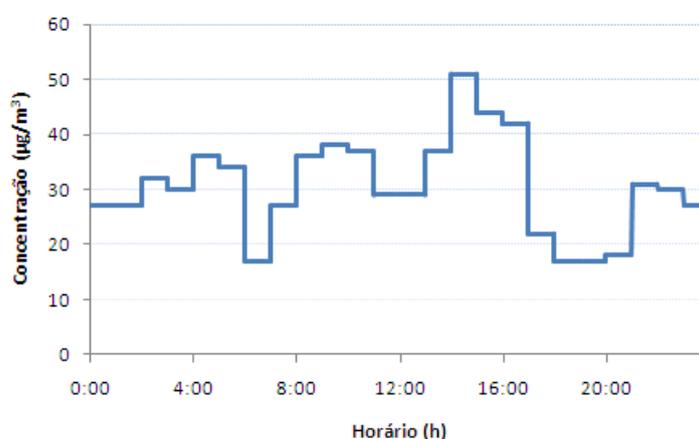


Figura 4.98 - Concentração de PM₁₀ em Cachoeira Paulista ao longo do dia 07/11/2011.

4.3.2.5 Hidrocarbonetos Metano e Não-Metano

Em relação ao monitoramento de hidrocarboneto, a média das concentrações horárias de metano foi de 2.638,2 ppb, apresentando valor mínimo de 1.730,5 ppb e máximo de 3.911,3 ppb. Como os hidrocarbonetos não apresentam padrão de qualidade do ar específico, não foi possível avaliar ultrapassagem de idealidade.

Na Figura 4.99, estão ilustrados o perfil médio, mínimo e máximo das concentrações horárias de metano. De forma geral, observa-se que as concentrações mais elevadas foram registradas durante a madrugada, início da manhã e à noite.

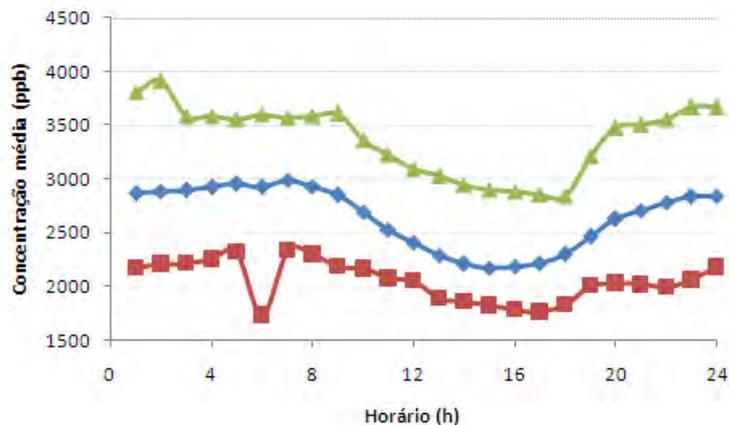


Figura 4.99 - Concentração horária média, mínima e máxima de metano em Cachoeira Paulista durante o período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

Durante a madrugada e no início da manhã, as temperaturas mais baixas e as menores magnitudes dos ventos prejudicam a dispersão, contribuindo também para o acúmulo de hidrocarbonetos no ar. No final da manhã e à tarde, as concentrações adquirem comportamento decrescente devido à presença de ventos de maior magnitude e ao aumento dos movimentos convectivos da atmosfera. No início da noite, as concentrações aumentam novamente, influenciadas pelas condições de maior estabilidade atmosférica.

A maior concentração horária de metano (3.911,3 ppb) foi registrada no dia 08/11/2011 às 2h. Na Figura 4.100, está ilustrado o perfil de metano ao longo deste dia. Observou-se que as condições meteorológicas eram caracterizadas por ausência de chuva e predomínio de ventos fracos vindos do quadrante SWS, favorecendo o acúmulo de hidrocarbonetos no ar.

Para os não-metano, a média foi de 75,2 ppb, sendo o mínimo e o máximo, respectivamente, de 50,5 ppb e 129,2 ppb. Na Figura 4.101, estão apresentados o comportamento horário médio, mínimo e máximo das concentrações desses hidrocarbonetos. Neste ciclo diurno, observa-se que as concentrações apresentam tendência decrescente durante o dia, atingindo os menores valores à tarde, e são mais elevadas no período noturno. Dessa forma, é possível verificar a influência das condições meteorológicas na dispersão desses poluentes, que é favorecida pelas temperaturas e incidência de radiação solar mais elevadas durante o dia.

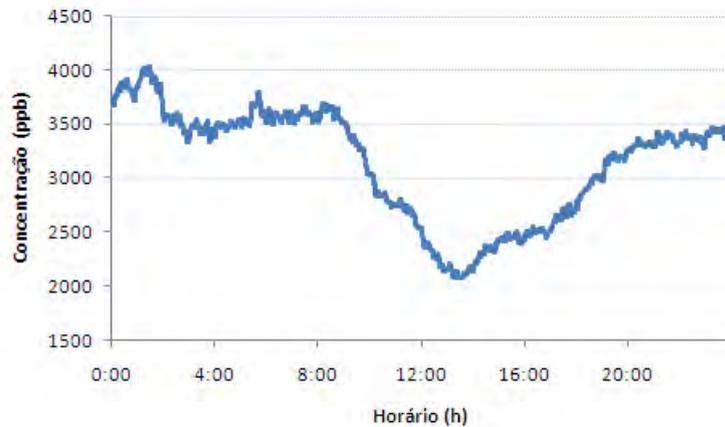


Figura 4.100 - Concentração de metano em Cachoeira Paulista ao longo do dia 08/11/2011.

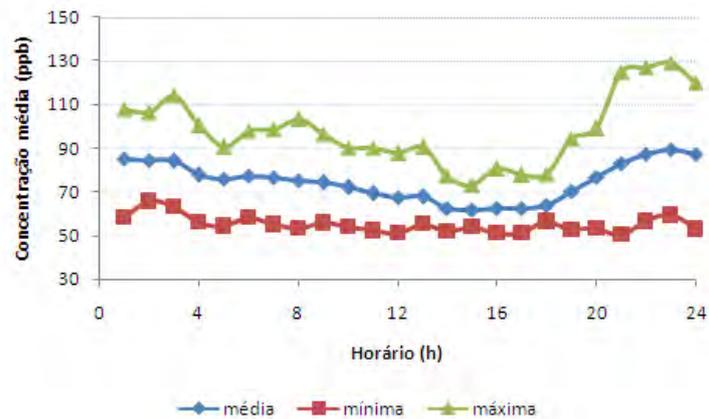


Figura 4.101 - Concentração horária média, mínima e máxima de hidrocarbonetos não-metano em Cachoeira Paulista nos 16 dias válidos.

Com este perfil, verifica-se que as concentrações não apresentam picos nos horários de maior tráfego de veículos. Este comportamento sugere que as concentrações locais tendem a sofrer influência de plumas contendo hidrocarbonetos não-metano vindas da direção leste-nordeste. Na Figura 4.102, está ilustrado a rosa dos ventos em Cachoeira Paulista entre 18h e 23h durante os dias válidos para os hidrocarbonetos não-metano.

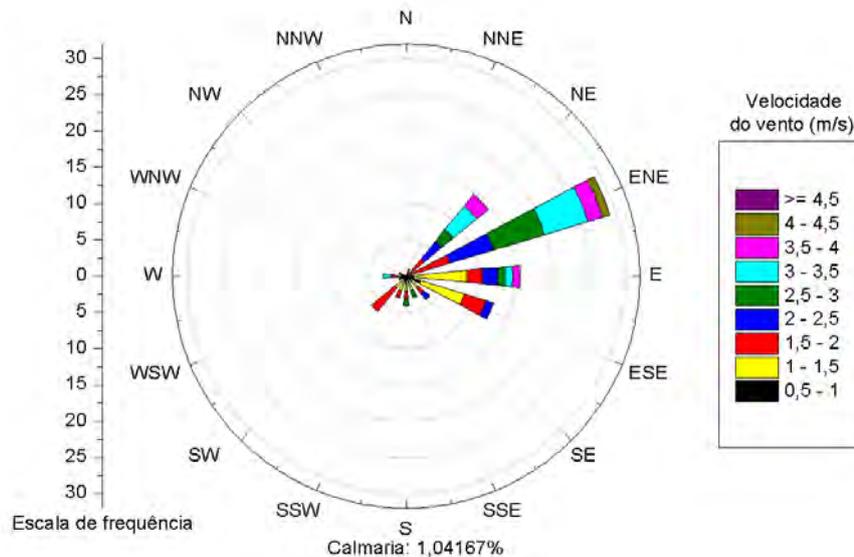


Figura 4.102 - Rosa dos ventos entre 18h e 23h em Cachoeira Paulista nos 16 dias válidos para os hidrocarbonetos não-metano.

4.3.2.6 Análise do Índice de Qualidade do Ar

Para Cachoeira Paulista, o índice de qualidade do ar também é calculado para cada poluente monitorado por legislação, a fim de se qualificar o ambiente durante o período de monitoramento.

Para o CO e o SO₂, as concentrações registradas foram bastante baixas. Assim, a qualidade do ar foi considerada "boa" durante todo o monitoramento.

A classificação da qualidade do ar para o O₃ foi considerada "regular" em 17 dias de monitoramento, apresentando um valor máximo do índice igual a 69. Analisando o decorrer destes dias, verifica-se a predominância de temperaturas elevadas, alta incidência média de radiação solar, além de ausência de precipitação, condições estas que são favoráveis ao aumento da quantidade de ozônio no ar. O IQAr diário para o O₃ está ilustrado na Figura 4.103.

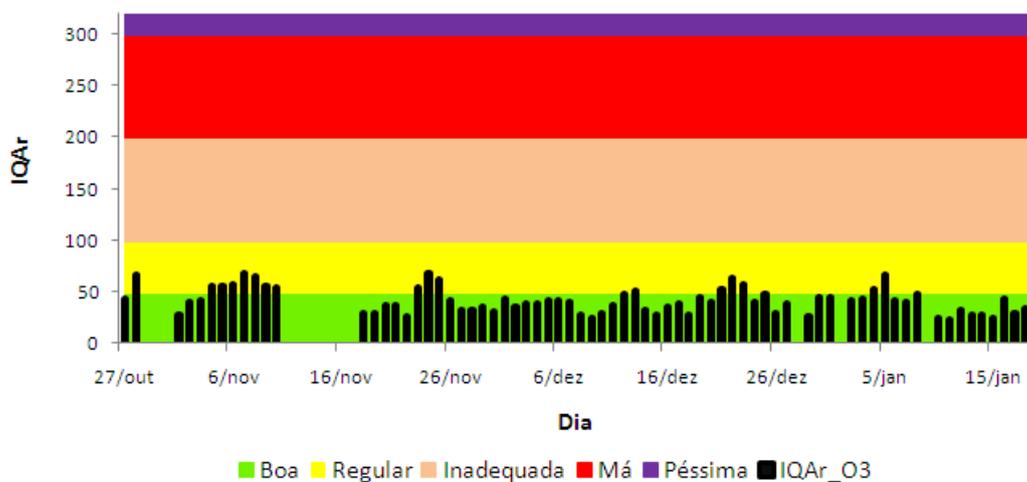


Figura 4.103 - Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao O₃.

Em relação ao NO₂, a qualidade do ar é classificada como "boa" em todos os dias monitorados, sendo o maior valor do IQAr igual a 25. Na Figura 4.104, estão ilustrados os valores diários do IQAr para o NO₂.

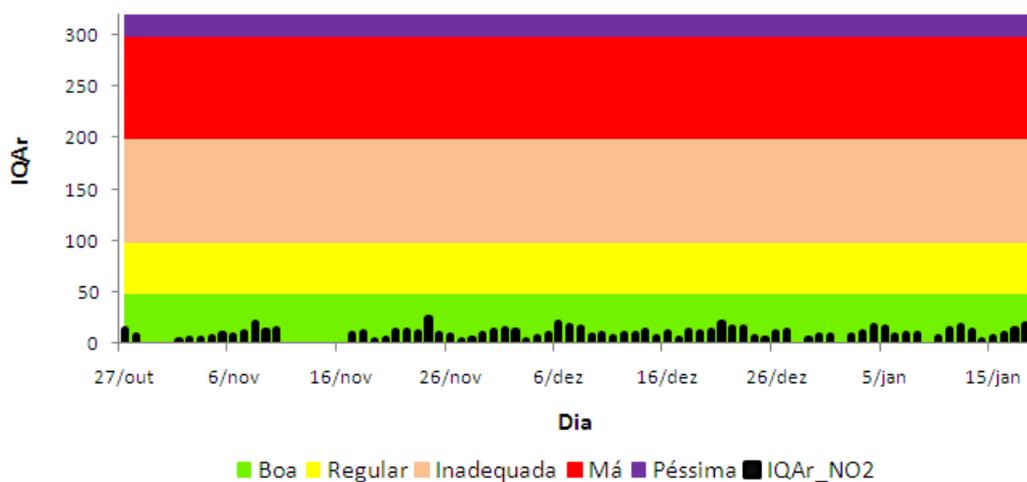


Figura 4.104 - Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao NO₂.

Na Figura 4.105, está ilustrado o valor do índice de qualidade do ar diário obtido para o PM₁₀ durante o período de coleta. Verifica-se que a qualidade do ar foi considerada "boa" em todos os dias monitorados, sendo o índice máximo igual a 31.

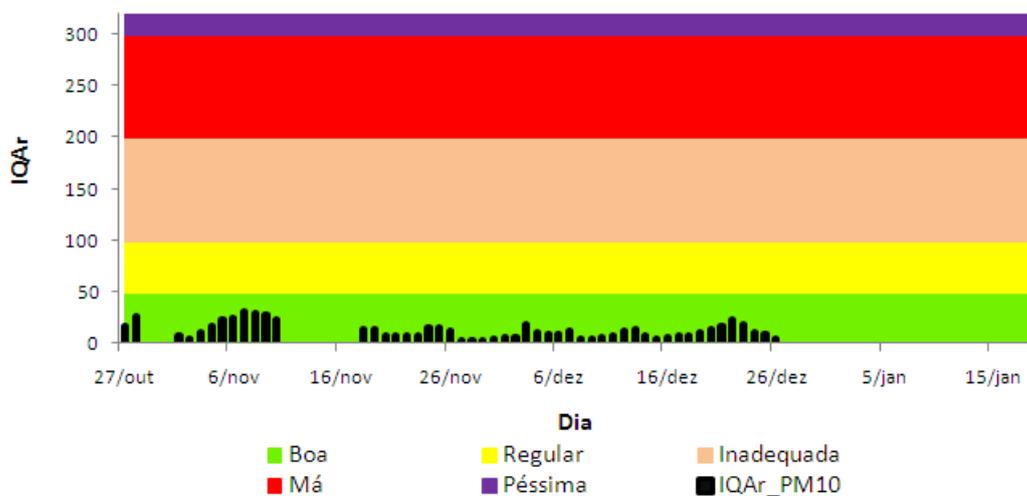


Figura 4.105 - Índice de qualidade do ar diário em Cachoeira Paulista em relação ao PM₁₀.

Baseando-se na qualificação em função do pior índice do dia, verificou-se que, dos 84 dias totais de monitoramento, 65,5% foram caracterizados com qualidade "boa" do ar, 20,2% apresentaram qualidade "regular" e 14,3% permaneceram sem coleta de dados, conforme observado na Figura 4.106.



Figura 4.106 - Classificação geral da qualidade do ar em Cachoeira Paulista no período de 27/10/2011 a 18/01/2012.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento da concentração de poluentes no ar desempenha um importante papel para a manutenção do bem-estar da sociedade, uma vez que possibilita acompanhar os níveis de qualidade do ar local e verificar o comportamento das fontes de poluição atmosférica.

Neste trabalho, foi realizada a caracterização da qualidade do ar através do monitoramento da concentração dos poluentes em Rio Claro, Cubatão e Cachoeira Paulista, três municípios do Estado de São Paulo que apresentam diferentes características de desenvolvimento econômico e fontes de emissão de poluentes. Foram monitoradas as concentrações dos poluentes CO, O₃, NO, NO₂, SO₂, PM₁₀ e hidrocarbonetos metano e não-metano, bem como o comportamento local de variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, precipitação e radiação solar.

As condições atmosféricas locais são importantes para a dispersão dos poluentes. De forma geral, verificou-se que as concentrações apresentaram valores mais elevados durante a madrugada, no início da manhã e durante à noite, devido a temperaturas mais baixas e ao predomínio de calmaria e de ventos fracos. No período da tarde, as temperaturas elevadas e a presença de ventos de maior magnitude intensificam os movimentos convectivos, resultando na formação de uma atmosfera mais instável e, conseqüentemente, na diminuição das concentrações. Poluentes secundários formados a partir de reações fotoquímicas, como o ozônio, apresentaram comportamento inverso, uma vez que a maior incidência de radiação solar durante a tarde impulsiona sua formação, levando ao acúmulo dessas substâncias no ar.

Em relação à cidade de Cubatão, os dados meteorológicos coletados neste trabalho foram comparados com a análise climatológica feita por Valarini (2011) para o período de 1998-2009 e, através desta comparação, foi observado um comportamento semelhante.

Para a cidade de Rio Claro, foi encontrado apenas um estudo climático elaborado por Tavares et al. (1996) referente ao ano de 1995. Em Cachoeira Paulista, algumas variáveis meteorológicas começaram a ser monitoradas no LIM/CPTEC/INPE a partir de 2008 e também há dados meteorológicos coletados através de Plataforma de Coleta de Dados (PCD), os quais estão disponi-

bilizados em <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/> a partir de 2004. Porém, não foram encontradas análises climatológicas da região utilizando esses dados. Dessa forma, não foi possível comparar os dados coletados neste trabalho com uma climatologia para estas duas cidades, sendo assim importante salientar que as análises realizadas em Cachoeira Paulista e Rio Claro são válidas somente para as condições meteorológicas apresentadas nos dias monitorados.

Foi possível verificar também que cidades com níveis de desenvolvimento econômico distintos apresentam diferentes perfis em relação à concentração dos poluentes, uma vez que sofrem influência de diferentes fontes emissoras em suas imediações.

A cidade de Rio Claro, que possui um desenvolvimento intermediário em relação aos outros dois municípios, apresentou níveis de concentração de poluentes possivelmente influenciados pela prática de queima que antecede ao corte nas lavouras de cana-de-açúcar. Foram observados níveis elevados de CO e de PM₁₀, com médias, respectivamente, de 3.179,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 37,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, os quais são fortemente emitidos por esta fonte. Em relação aos demais poluentes, encontraram-se valores médios de 27,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o O₃; 7,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o NO; 20,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o NO₂ e 23,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o SO₂. Os níveis de hidrocarbonetos não puderam ser monitorados devido a erros ocorridos com o amostrador.

Para Cubatão, o município com grande desenvolvimento industrial, as concentrações dos poluentes foram influenciadas pelo fluxo de veículos e pelas atividades industriais existentes nas vizinhanças do ponto de monitoramento. Os níveis médios encontrados para CO e NO, foram, respectivamente, 3.292,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 25,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para os hidrocarbonetos, os valores médios de metano e não-metano foram, respectivamente, 3.057,3 ppb e 3.505,1 ppb. Considerando os outros poluentes, foram observadas concentrações médias de 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o O₃; 32,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o NO₂; 23,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o SO₂ e 14,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PM₁₀.

Sendo o município com maior característica rural e menor desenvolvimento, Cachoeira Paulista apresentou uma atmosfera com os menores níveis de poluentes. As concentrações médias foram 43,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o O₃; 7,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o NO₂; 2,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o SO₂; 12,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PM₁₀; 2.638,2 ppb para o metano e 75,2 ppb para hidrocarbonetos não-metano. Não foi possível monitorar os poluentes CO e NO, uma vez que seus níveis no local estavam abaixo do limite mínimo detectável por seus respectivos analisadores. Também foi possível verificar que a

emissão de poluentes oriunda do fluxo de veículos na Rodovia Presidente Dutra não exerce influência considerável no sítio de coleta devido à direção predominante dos ventos. A influência ocasional da Rodovia pode ser observada em um dos poucos casos de ventos de oeste relacionados a altas concentrações de ozônio.

Para realizar a classificação do ar em cada local monitorado, foi calculado o Índice de Qualidade do Ar para os poluentes monitorados por legislação (CO, O₃, NO₂, SO₂ e PM₁₀). Em Rio Claro, os IQAr dos poluentes estiveram abaixo de 50 (limite máximo para uma qualidade "boa" do ar) em 62 dias de monitoramento, considerando a qualidade do ar como "boa". Em 13 dias, a qualidade do ar foi considerada "regular", uma vez que foram encontrados IQAr para o PM₁₀ na faixa entre 51 e 100. Em Cubatão, foram encontrados IQAr para os poluentes abaixo de 50 em 15 dias monitorados, resultando em uma qualidade do ar classificada como "boa". Apenas em 1 dia, a qualidade do ar em relação ao CO foi considerada "regular", uma vez que o IQAr encontrado para este poluente foi igual a 53. Já em Cachoeira Paulista, o IQAr para o O₃ esteve na faixa entre 50 e 100 em 17 dias monitorados, sendo responsável pela classificação da qualidade do ar como "regular". Em 55 dias, a qualidade do ar foi considerada "boa" em relação a todos os poluentes, já que os IQAr estiveram abaixo de 50.

Baseando-se neste estudo, foram elaboradas as seguintes sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- Realização de campanhas anuais de monitoramento dos poluentes contemplados neste trabalho, a fim de se obter uma caracterização sazonal da atmosfera local;
- Realização de monitoramento de compostos orgânicos voláteis, de forma a se determinar os compostos com maior potencial de formação de ozônio;
- Análise da composição química do material particulado, a fim de se quantificar a concentração dos íons presentes, como NO₃⁻ e SO₄⁻²;
- Análise de produtos de oxidação de NO_x e SO_x, de forma a verificar a conversão desses poluentes em seus respectivos ácidos;
- Elaboração de um estudo climatológico para as cidades de Rio Claro e Cachoeira Paulista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology**: an invitation to the atmosphere. 5. ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2008. 486 p. ISBN 978-0-495-11558-8. 10, 11, 55

ALONSO, C. D.; GODINHO, R. A evolução da qualidade do ar em Cubatão. **Química Nova**, v. 15, n. 2, p. 126–136, 1992. 56

ARBEX, M. A. **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara**. 204 p. Tese (Doutorado em Medicina) — Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2001. 55

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2001. 447 p. ISBN 0-12-059354-8. 36

ATKINSON, R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. **Atmospheric Environmental**, v. 34, p. 2063–2101, mar. 2000. 24

BERRÍOS, M. R. **A construção de um meio ambiente saudável para Rio Claro, SP**. Rio Claro: [s.n.], 2002. 126 p. Disponível em: <http://www.claudiodimauro.com.br/dimauro/userfiles/file/biblioteca/rolando_ambiente.pdf>. 55

BEST, G. **Environmental pollution studies**. Liverpool: Liverpool University Press, 1999. 167 p. ISBN 0-85323-923-1. 16, 17

BOUBEL, R. W.; FOX, D. L.; TURNER, D. B.; STERN, A. C. **Fundamentals of air pollution**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 1994. 574 p. ISBN 0-12-118930-9. 18, 19, 37

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2002. 20 p. Trabalho apresentado no evento Sustentabilidade na Geração e uso de Energia. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=1039&opt=1>>. 16, 17

BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>>. Acesso em: 05 abr. 2011. 30

_____. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. 1988.

Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=308>>. Acesso em: 31 mar. 2011. 15

_____. **Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989**. Dispões sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR. 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81>>. Acesso em: 05 abr. 2011. 30

BRASIL.Casa Civil. **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990**.

Dispões sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. 1990.

Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 05 abr. 2011. 31, 32

BUCCO, M. V. S. **Construção e testes de validação de amostradores passivos para dióxido de nitrogênio e ozônio**. 114 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) — Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010. 155

BUCHHOLZ, S.; JUNK, J.; KREIN, A.; HEINEMANN, G.; HOFFMANN, L. Air pollution characteristics associated with mesoscale atmospheric patterns in the northwest continental Eupore. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 39, p. 5183–5190, 2010. 2

CARNEIRO, R. M. A. **Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica: uma contribuição para a saúde da comunidade**. 169 p. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) — Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo (USP), Ribeirão Preto, 2004. 29, 157



CARRERAS, H. A.; PIGNATA, M. L. Comparison among air pollutants, meteorological conditions and some chemical parameters in the transplanted lichen *Usnea amblyoclada*. **Environmental Pollution**, v. 111, n. 1, p. 45–52, 2001. 157

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. Estimativa de radiação solar por satélite: desempenho do modelo operacional GL1.2. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CBMET, 2004. p. 1–9. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=5&totalRows_Recordset_busca=694&cgid=22>. 63

CHANDRASEKAR, A. **Basics of atmospheric science**. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. 447 p. ISBN 978-81-203-4022-0. 7, 14, 21, 55

CLEMENTE, D. A. **Estudo do impacto ambiental das fontes industriais de poluição do ar no município de Paulínia - S.P. empregando o modelo ISCST3**. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2000. 28, 30

CLINE, W. R. Scientific basis for the greenhouse effect. **The Economic Journal**, v. 101, n. 407, p. 904–919, jul. 1991. 8

COELHO, M. S. Z. S. **Uma análise estatística com vistas a previsibilidade de internações por doenças respiratórias em função das condições meteorológicas na cidade de São Paulo**. 195 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade Estadual de São Paulo (USP), São Paulo, 2007. 16, 17

COMPANHIA ESTADUAL DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO BÁSICO E DE DEFESA DO MEIO AMBIENTE (CETESB). **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2009**. São Paulo: CETESB, 2010. 290 p. 107

_____. **Qualidade do ar**. 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 06 abr. 2011. 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 29, 30, 32, 34, 35, 61

CONCESSIONÁRIA ECOVIAS DOS IMIGRANTES. **Atendimento Ouvidoria Ecovias RA 8799**. 2011. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <luciana.tessarolo@cptec.inpe.br> em 15 dez. 2011. 98

CRUTZEN, P. J. The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere. **Annual Review of Earth and Planet Science**, v. 7, p. 443–472, maio 1979. 24, 26, 27, 28

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, p. 1669–1678, dez. 1990. 55

CRUZ, L. P. S.; CAMPOS, V. P. Amostragem passiva de poluentes atmosféricos: Aplicação ao SO₂. **Química Nova**, v. 25, n. 3, p. 406–411, 2002. 155

_____. Métodos de amostragem e análise para compostos reduzidos de enxofre atmosférico. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1180–1189, 2008. 155

DAVIS, M. L.; CORNWELL, D. A. **Introduction to environmental engineering**. 3. ed. São Francisco: Mc-Graw-Hill, 1998. 919 p. ISBN 0-07-015918-1. 21, 22, 23, 27, 37

ECOTECH - WORD CLASS ENVIRONMENTAL MONITORING. **EC9810B UV absorption ozone analyser**. [S.l.], 2009a. Folder. Disponível em: <<http://www.ecotech.com.au/gas-analyzers/ozone-analyzer>>. Acesso em: 25 abr. 2011. 48

_____. **EC9830B carbon monoxide analyser**. [S.l.], 2009b. Folder. Disponível em: <<http://www.ecotech.com.au/gas-analyzers/co-analyzer>>. Acesso em: 25 abr. 2011. 49

_____. **EC9841B oxides of nitrogen analyser**. [S.l.], 2009c. Folder. Disponível em: <<http://www.ecotech.com.au/gas-analyzers/nox-analyzer>>. Acesso em: 25 abr. 2011. 50

_____. **EC9850B sulfur dioxide analyser**. [S.l.], 2009d. Folder. Disponível em: <<http://www.ecotech.com.au/gas-analyzers/so2-analyzer>>. Acesso em: 27 abr. 2011. 51

_____. **Met One BAM1020 beta attenuation monitor**. [S.l.], 2009e. Folder. Disponível em: <<http://www.ecotech.com.au/particulates/particulates-air-quality>>. Acesso em: 27 abr. 2011. 52

FISHMAN, J.; SOLOMON, S.; CRUTZEN, P. J. Observation and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone. **Tellus**, v. 31, n. 5, p. 432–446, 1979. 24, 27, 28

FREDERICK, J. E. **Principles of atmospheric science**. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, 2008. 213 p. ISBN 978-0-7637-4089-4. 11

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER - RS (FEPAM). **Poluentes**: fontes e efeitos. 2011. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/poluentes.asp>>. Acesso em: 08 abr. 2011. 20, 21, 22, 23, 25, 27

GALLOWAY, J. N.; LIKENS, G. E. Acid precipitation: the importance of nitric acid. **Atmospheric Environment**, v. 15, n. 6, p. 1081–1085, 1981. 27

GOOGLE EARTH. **Localização de algumas indústrias (marcadores amarelos) situadas próximas ao CEPEMA (quadrado verde)**. 2012a. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 27 mar. 2012. 57

_____. **Localização do laboratório CONSOLIDAR (quadrado verde) e da Rodovia Presidente Dutra (quadrado vermelho)**. 2012b. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 27 mar. 2012. 59

_____. **Localização do CEPEMA (quadrado verde) e dos postos de monitoramento do SAISP (P25, P27 e P28 - círculos vermelhos)**. 2012c. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 13 mar. 2012. 63

GUIA DO VALE DO PARAÍBA. Município de Cachoeira Paulista. 2011. Disponível em: <<http://www.guiadovaleparaiba.com.br/Cachoeira/cachoeira.htm>>. Acesso em: 06 maio 2011. 58

HILL, A. C. Vegetation: a sink for atmospheric pollutants. **Journal of Air Pollution Control Association**, v. 21, n. 6, p. 341–346, jan. 1971. 27

HOLLOWAY, A. M.; WAYNE, R. P. **Atmospheric chemistry**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2010. 259 p. ISBN 978-1-84755-807-7. 10, 11, 12, 19

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo populacional 2010**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_sao_paulo.pdf>. Acesso em: 05 maio 2011. 54, 56, 58

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Dados do Município de Rio Claro - SP**. 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/mapa.html>>. Acesso em: 06 maio 2011. 55

_____. **Banco de dados de imagens**. 2012. Disponível em:
<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp>. Acesso em: 25 jun. 2012. 66, 67, 90, 118, 119

_____. **Boletim de Informações Climáticas do CPTEC/INPE (INFOCLIMA)**. 2012. Disponível em: <<http://infoclima1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2012. 65, 89, 117

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001**: the scientific basis. New York: Cambridge University Press, 2001. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Disponível em:
<http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/>. Acesso em: 14 abr. 2011. 25, 26

JACOB, D. J. **Introduction to atmospheric chemistry**. New Jersey: Princeton University Press, 1999. 266 p. ISBN 0-691-00185-5. 24, 25

JACOBSON, M. Z. **Atmospheric pollution**: history, science and regulation. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 399 p. ISBN 0-521-81171-6. 15, 16, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 37, 40

JCTM COMÉRCIO E TECNOLOGIA LTDA. (JCTM). **Sistema de monitoramento da qualidade do ar**: guia rápido de operação e treinamento. Belford Roxo, fev. 2011. 56 p. 48

JONES, J. C. **Atmospheric pollution**. [S.l.]: Ventus Publishing, 2008. 109 p. ISBN 978-87-7681-416-8. 12, 21, 24, 26, 29

JORNAL ABCD MAIOR. **Anchieta tem pontos de lentidão**: obras e corrida provocam trânsito lento na rodovia do ABCD. 2009. Disponível em:
<http://www.abcdmaior.com.br/noticia_exibir.php?noticia=16875>. Acesso em: 14 dez. 2011. 104

KLUMPP, A.; ANSEL, W.; KLUMPP, G.; FOMIN, A. Um novo conceito de monitoramento e comunicação ambiental: A rede europeia para a avaliação da qualidade do ar usando plantas bioindicadoras (EuroBionet). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 4 (complemento), p. 511–518, dez. 2001. 157

- KONDRATYEV, K. Y.; IVLEV, L. S.; KRAPIVIN, V. F.; VAROTSOS, C. A. **Atmospheric aerosol properties: formation, processes and impacts.** Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2006. 573 p. ISBN 978-3-540-26263-3. 13
- LEE, D. S.; KÖHLER, I.; GROBLER, E.; ROHRER, F.; SAUSEN, R.; GALLARDO-KLENNER, L.; OLIVIER, J. G. J.; DENTENER, F. J.; BOUWMAN, A. F. Estimations of global NO_x emissions and their uncertainties. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 12, p. 1735–1749, 1997. 26
- LEVY, H. Normal atmosphere: large radical and formaldehyde concentrations predicted. **Science**, v. 173, n. 3992, p. 141–143, 1971. 28
- LIMIS, P. L.; LAZZARIN, G.; LAZZARIN, A.; SKERT, N. Biomonitoring of trace elements with lichens in Veneto (NE Italy). **The Science of the Total Environment**, v. 255, n. 1-3, p. 97–111, 2000. 157
- LISBOA, H. M.; KAWANO, M. Monitoramento da qualidade do ar. In: LISBOA, H. M. (Ed.). **Controle da poluição atmosférica.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. p. 1–73. Disponível em: <<http://www.lcqar.ufsc.br/adm/aula/Cap4MonitoramentodaQUALIDADEDOAR.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2011. 30, 34, 155, 156, 157, 159, 160
- LOGAN, J. A. Nitrogen oxides in the troposphere: global and regional budgets. **Journal Geophysical Research**, v. 88, n. C15, p. 10,785–10,807, dez. 1983. 26, 27
- LOGAN, J. A.; PRATHER, M. J.; WOFSY, S. C.; MCELROY, M. B. Tropospheric chemistry: a global perspective. **Journal Geophysical Research**, v. 86, n. C8, p. 7210–7254, ago. 1981. 26, 28
- LYRA, D. G. P. d. **Modelo integrado de gestão da qualidade do ar da Região Metropolitana de Salvador.** 255 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2008. 16, 17, 18, 20
- MANAHAN, S. E. **Environmental chemistry.** 7. ed. Florida: CRC Press LLC, 2000. 876 p. ISBN 1-56670-492-8. 7, 8, 11, 12, 13, 14, 20, 22, 26, 27
- MAYER, H.; HOLST, J.; SCHINDLER, D.; AHRENS, D. Evolution of the air pollution in SW Germany evaluated by the long-term air quality index LAQx. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 20, p. 5071–5078, 2008. 2

MONTALI, E. F. **Emissões atmosféricas industriais: uma proposta de indicadores de pressão**. 126 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2010. 21, 22

NAGENDRA, S. M. S.; VENUGOPAL, K.; JONES, S. L. Assessment of air quality near traffic intersections in Bangalore city using air quality indices. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 3, p. 167–173, 2007. 2

NATALI, L. **Utilização dos produtos obtidos por sensoriamento remoto na caracterização da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo**. 126 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008. 156

NORDHAUS, W. D. To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect. **The Economic Journal**, v. 101, n. 407, p. 920–937, jul. 1991. 8

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório da Comissão Mundial sobre o meio ambiente e desenvolvimento - "Nosso futuro comum"**. 1987. Disponível em: <<http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>>. Acesso em: 12 maio 2011. 1

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, n. 5, p. 527–530, maio 1975. 36

PENNER, J. E.; ATHERTON, C. S.; GHAN, S. J.; WALTON, J. J.; HAMEED, S. Tropospheric nitrogen: a three-dimensional study of sources, distributions and deposition. **Journal Geophysical Research**, v. 96, n. D1, p. 959–990, jan. 1991. 26, 27, 28

PREFEITURA CACHOEIRA PAULISTA (PM CACHOEIRA PAULISTA). **Portal da Prefeitura de Cachoeira Paulista - SP**. 2011. Disponível em: <<http://www.cachoeirapaulista.sp.gov.br/main.php?logic=index.principal>>. Acesso em: 06 maio 2011. 58

PREFEITURA MUNICIPAL DE CUBATÃO (PM CUBATÃO). **Portal da Prefeitura de Cubatão - SP**. 2011. Disponível em:

<<http://www.cubatao.sp.gov.br/publico/index.php>>. Acesso em: 06 maio 2011. 56

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO CLARO (PM RIO CLARO). **Portal da Prefeitura de Rio Claro - SP**. 2011. Disponível em: <<http://www.rioclaro.sp.gov.br/index.php>>. Acesso em: 06 maio 2011. 55

RODHE, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. **Science**, v. 248, n. 4960, p. 1217–1219, jun. 1990. 8

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 5.993, de 16 de abril de 1975 de São Paulo**. Altera a denominação e as atribuições da CETESB - Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas e dá providência correlatas. 1975. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/216627/decreto-5993-75-sao-paulo-sp>>. Acesso em: 06 abr. 2011. 34

_____. **Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976 de São Paulo**. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. 1976. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2011. 17, 18

SANTA CATARINA (Estado). **Portaria Ministerial nº 231, de 27 de abril de 1976**. Estabelece padrões de qualidade do ar. 1976. Disponível em: <http://www.mp.sc.gov.br/legisla/fed_ato_port_res/portaria/1950_1979/cme_pf231_76.htm>. Acesso em: 31 mar. 2011. 29

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 1248 p. ISBN 978-0-471-72017-1. 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 36

SERENZA, E. **Programa de controle ambiental de Cubatão entra na segunda fase**. 2004. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/2004/agosto/19_cubatao.htm>. 57

SPITZCOVSKY, D. **Os avanços ambientais da cidade de Cubatão**. Planeta Sustentável, 2009. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/cultura/conteudo_470438.shtml>. 57

SYNSPEC B.V. **Synspec ALPHA 115 - methane/total nonmethane analyser.** [S.I.], 2011. Folder. Disponível em:

<http://www.synspec.nl/pdf/alpha_115MTNMHC.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2011. 52

TAVARES, A. C.; PROCHNOW, C. A. C.; RISSO, L. C.; LAZARINE, J. A.; TOMBOLATO, J. O.; PENATTI, A. P. R. **Atlas climático de Rio Claro - SP.** Rio Claro: UNESP, 1996. 139

THUNIS, P.; BORNSTEIN, R. Hierachy of mesoscale flow assumptions and equations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 3, p. 380–397, 1996. 36

TRESMONDI, A. C. C. L. **Qualidade do ar na área de influência do pólo industrial de Paulínia - SP: 2000 - 2002.** 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2003. 21, 22, 24, 26, 29, 156

TURCO, R. P. **Earth under siege: from air pollution to global change.** New York: Oxford University Press, 1997. 527 p. ISBN 0-19-507286-3. 8, 14, 18, 22, 23, 25, 27, 37

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Air and radiation.** 2011. Disponível em: <<http://epa.gov/air/>>. Acesso em: 01 abr. 2011. 14, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 32

_____. **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).** 2012. Disponível em: <<http://www.epa.gov/air/criteria.html>>. Acesso em: 28 maio 2012. 33

VALARINI, S. **Caracterização do material particulado em Cubatão.** 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011. 139

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia.** Recife: Versão Digital, 2005. 261 p. 7

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey.** San Diego: Academic Press, 2006. 483 p. ISBN 0-12-732951-X. 8, 10, 11, 12, 13, 22, 23, 24, 25, 26, 29

WANG, Y.; JACOB, D.; LOGAN, J. A. Global simulation of tropospheric O₃-NO_x-hydrocarbon chemistry: origin of tropospheric ozone and effects of

nonmethane hydrocarbons. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D9, p. 10,757–10,767, 1998. 25

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air quality guidelines**: global update 2005. Germany: WHO Regional Office for Europe, 2005. 496 p. ISBN 92-890-2196-6. 33, 34

ZANNETTI, P. **Air pollution modeling**: theories, computational methods and available software. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 444 p. ISBN 0-442-30805-1. 20, 21

ZHOU, K.; YE, Y.; LIU, Q.; LIU, A.; PENG, S. Evaluation of ambient air quality in Guangzhou, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 19, n. 4, p. 432–437, 2006. 1

APÊNDICE A - Tipos de Amostradores da Qualidade do Ar

Os amostradores da qualidade do ar podem ser classificados como passivos, ativos, automáticos, sensores remotos e bioindicadores.

A.1 Amostradores Passivos

Os amostradores passivos são instrumento simples e de baixo custo inicial, caracterizados por não utilizar energia elétrica ou baterias em seu funcionamento (BUCCO, 2010). São compostos por um equipamento, que pode ser um tubo, um cartucho ou um disco amostrador, com um suporte absorvente ou adsorvente que fica em contato com o ambiente, no qual a amostra será coletada naturalmente por difusão molecular, necessitando, para isso, de períodos de amostragem mais longos (LISBOA; KAWANO, 2007).

Por não necessitarem de bombas de sucção das amostras, não dependem de calibração de fluxos de ar e necessitam de pouca manutenção. Porém, além de não estarem disponíveis comercialmente para um grande número de componentes atmosféricos, necessitam de análise após a coleta, uma vez que não fornecem concentrações instantâneas, e não possuem boa sensibilidade quando expostos por curto período de tempo (CRUZ; CAMPOS, 2002). Os amostradores passivos também não são indicados como métodos de referência para monitoramento da qualidade do ar pela legislação (CRUZ; CAMPOS, 2008).

Esses amostradores podem ser utilizados para o monitoramento de SO₂, NO₂, O₃, amônia e compostos orgânicos voláteis (LISBOA; KAWANO, 2007).

A.2 Amostradores Ativos

Diferentemente dos passivos, os amostradores ativos necessitam de baterias ou de uma linha de transmissão de energia e de medidores de fluxo de ar para seu funcionamento (CRUZ; CAMPOS, 2008).

Esses dispositivos contam com uma bomba a vácuo, que succiona um determinado volume de ar, que é encaminhado para um meio coletor químico ou físico, no qual o poluente ficará retido através de adsorção, absorção, filtração, difusão ou reação. Nesse método, as amostras também precisam seguir para um laboratório, a fim de determinar a concentração do poluente analisado, que, segundo Lisboa e Kawano (2007), pode ser NO₂, O₃, SO₂ e material particulado.

Segundo Tresmondi (2003), esses amostradores apresentam custo intermediário de investimento inicial, porém, necessitam de elevado consumo de reagentes e demais materiais, além de altas horas de análise.

A.3 Amostradores Automáticos

Os amostradores automáticos são aqueles que operam continuamente e, em geral, estão conectados a um sistema de aquisição de dados para registro das análises. Caracterizam-se por apresentarem alto grau de precisão, porém, demandam alto custo de investimento inicial e manutenção (TRESMONDI, 2003).

Seu princípio de funcionamento está baseado nas propriedades eletro-ópticas do poluente analisado. De forma geral, as amostras são coletadas e enviadas a uma câmara de reação, na qual a propriedade óptica do composto é diretamente medida ou há ocorrência de reação química para detecção por quimiluminescência ou por luz fluorescente. O sinal emitido é medido por um detector, sendo proporcional à concentração do poluente presente na amostra (LISBOA; KAWANO, 2007). Esse é o tipo de amostrador determinado legalmente como método de medição dos poluentes regulamentados e os equipamentos utilizados nesse trabalho encontram-se nessa categoria.

A.4 Sensores Remotos

Os amostradores baseados no sistema de sensoriamento remoto fornecem informações da concentração de poluentes que podem estar mais distantes do equipamento (LISBOA; KAWANO, 2007).

Os sensores medem a radiação eletromagnética emitida, refletida ou espalhada pelo objeto analisado, seja ele um constituinte atmosférico ou a própria superfície terrestre, e podem ser classificados como passivos ou ativos. Os passivos são aqueles que detectam a radiação solar, como os sensores MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) e MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*), os quais auxiliam o monitoramento de aerossóis via satélite. Já os ativos medem a radiação, em um determinado comprimento de onda, emitida pelo equipamento que contém o sensor, como, por exemplo, o LIDAR (*Light Detection and Ranging*) utilizado no estudo de perfis verticais atmosféricos (NATALI, 2008).

A.5 Biomonitoramento

Biomonitoramento ou monitoramento biológico consiste na avaliação da qualidade ambiental de uma determinada área através da análise do efeito da poluição sobre organismos vivos, denominados bioindicadores, os quais podem ser indicadores específicos de um determinado poluente (CARRERAS; PIGNATA, 2001).

Esses indicadores naturais respondem de duas maneiras diferentes. Podem reagir à ação do contaminante absorvendo e acumulando substâncias em seus tecidos, caracterizando-se como organismos resistentes e sendo denominados bioindicadores de acumulação, ou podem sofrer alterações morfológicas, fisiológicas, genéticas e etológicas, sendo considerados organismos sensíveis e denominados bioindicadores de reação (LIMIS et al., 2000).

Dentre os organismos bioindicadores, destacam-se os líquens como sensíveis a gases fitotóxicos e resistentes a metais pesados (LIMIS et al., 2000) e musgos como acumuladores de poluentes atmosféricos (CARNEIRO, 2004). Devido à facilidade do manejo e ao crescimento rápido, plantas cultivadas em hortas e jardins são utilizadas nos experimentos de biomonitoramento. Em relação à sensibilidade de espécies vegetais a poluentes específicos, podem-se citar espécies de horticultura (milho e tomate), ornamentais (lírio e crisântemo) e frutíferas (uva) para estudos com ozônio; feijão, alface, maçã e pêra para estudos com dióxido de enxofre, e alface e azaléia para estudos com dióxido de nitrogênio (LISBOA; KAWANO, 2007).

É importante destacar que esta técnica deve ser utilizada como complemento ao monitoramento da qualidade do ar feito através da análise direta das amostras de ar (KLUMPP et al., 2001; LISBOA; KAWANO, 2007).

ANEXO A - Funções para o Cálculo do IQAr

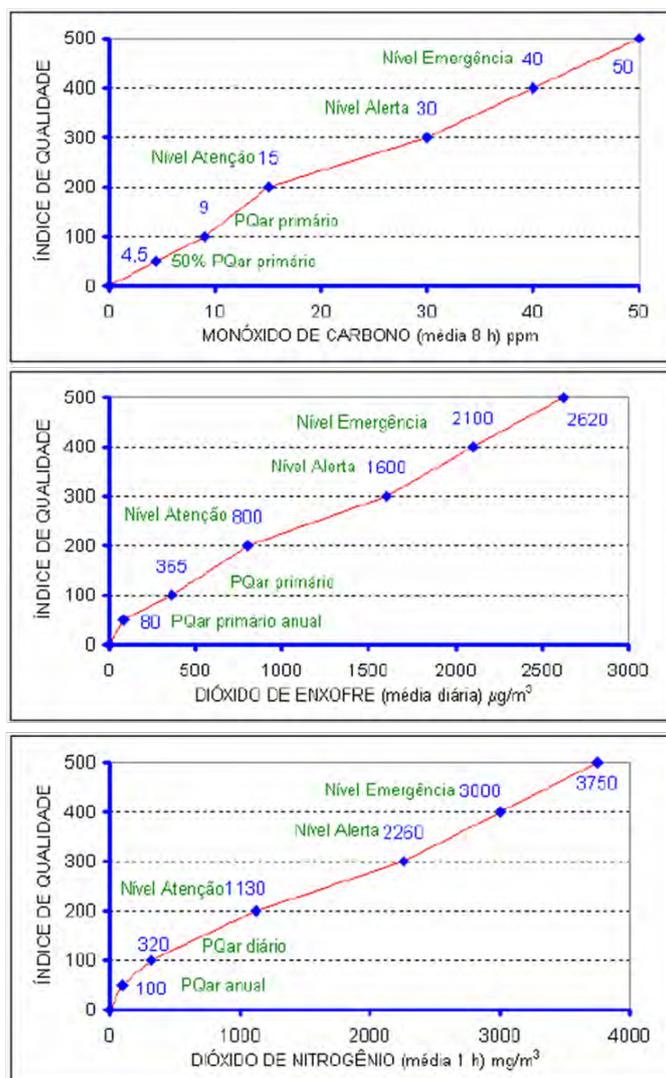


Figura A.1 - Funções para o cálculo do índice de qualidade do ar para CO, SO₂ e NO₂.
Fonte: Adaptada de Lisboa e Kawano (2007).

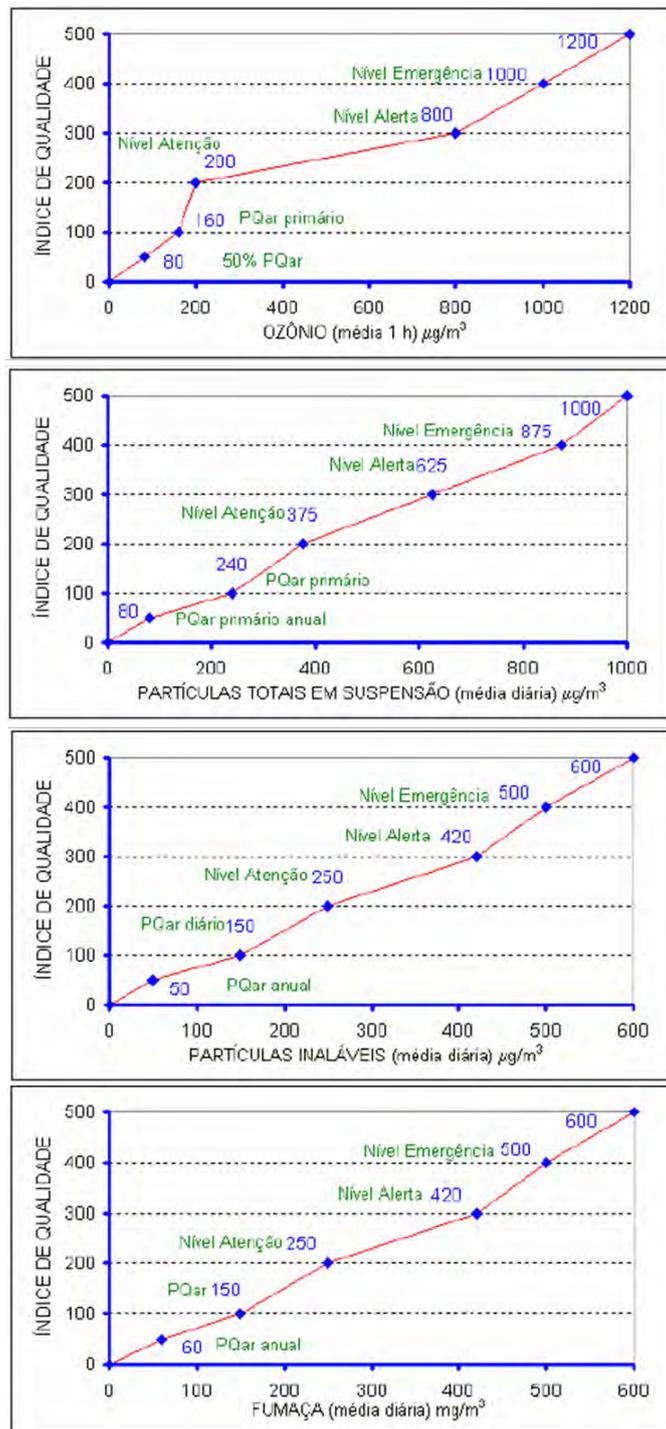


Figura A.2 - Funções para o cálculo do índice de qualidade do ar para O_3 , PTS, PM_{10} e FMC.
 Fonte: Adaptada de Lisboa e Kawano (2007).