

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA E AGRESSIVIDADE DO MEIO EM MARINGÁ- PR  
POR MEIO DO MODELO DE DISPERSÃO AERMOD**

Michely Patrícia de Bitencourt de Oliveira  
M. Sc. Engenharia Química, UEM, 2002  
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes  
Co-Orientador: Prof. Dr. Ed Pinheiro Lima

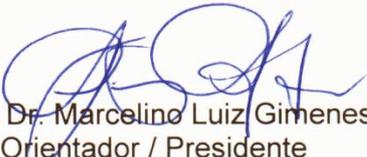
Tese de Doutorado submetida à  
Universidade Estadual de Maringá,  
como parte dos requisitos necessários  
à obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Química, área de  
Desenvolvimento de Processos.

**Maringá**  
Novembro de 2012

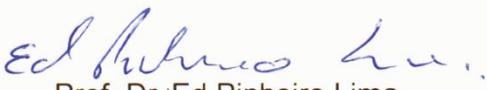
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Michely Patrícia de Bitencourt de Oliveira perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 27 de novembro de 2012.

COMISSÃO JULGADORA



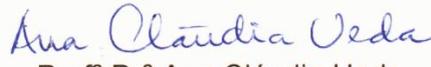
Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes  
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Ed Pinheiro Lima  
Coorientador



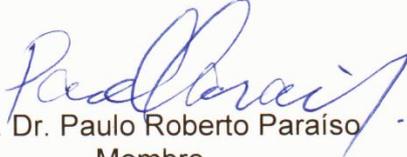
Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini  
Membro



Profª Drª Ana Cláudia Ueda  
Membro



Prof. Dr. Sérgio Henrique Bernardo de Faria  
Membro



Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso  
Membro

OLIVEIRA, MICHELY PATRÍCIA DE BITENCOURT DE  
Estudo da Dispersão Atmosférica e  
Agressividade do Meio em Maringá-PR por  
Meio do Modelo de Dispersão Aermod  
[Paraná] 2012

XVII, 120 p., 29,7 cm (PEQ/UEM, D. Sc.,  
Engenharia Química, 2012).

Tese – Universidade Estadual de Maringá,  
PEQ

1. Emissões Veiculares e Industriais.
2. Agressividade do Meio.
3. Modelo de Dispersão  
I. PEQ/UEM II. Título (série)

*“Se o conhecimento pode criar problemas, não é através da ignorância que podemos solucioná-los.”*

**Isaac Asimov**

## AGRADECIMENTOS

À DEUS PELA FORÇA EM TODOS OS DIAS DESTA JORNADA.

Ao Prof. Dr Marcelino Luiz Gimenes pela confiança, orientação e amizade.

Ao Prof. Dr Ed Pinheiro Lima pela amizade e orientação, independente se é véspera de fim de ano.

Aos meus pais pelo apoio, confiança e orações diárias dedicadas a mim.

Ao meu esposo pelo incentivo, força e por estar sempre ao meu lado.

À minha irmã pela confiança, apoio e amizade.

Ao conselho Nacional Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Ao IAP (Curitiba) e ao SETRAN pelos dados fornecidos.

Ao LACTEC, em especial à Eliseu pela troca de ideias.

Ao DEQ/UEM pela oportunidade em realizar este trabalho.

Aos alunos que participaram da pesquisa.

Aos familiares, antigos e novos amigos do Fórum que torceram por mim.

**ESTUDO DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA E AGRESSIVIDADE DO MEIO EM MARINGÁ-PR  
POR MEIO DO MODELO DE DISPERSÃO AERMOD**

**AUTOR: MICHELY PATRÍCIA DE BITENCOURT DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELINO LUIZ GIMENES**

**CO-ORIENTADOR: PROF. DR. ED PINHEIRO LIMA**

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química;  
Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bl. E46, Sala 09; CEP 87020-  
900 – Maringá – Paraná, Brasil, defendida em 27 de novembro de 2012. 120 p.

**RESUMO**

Maringá é uma cidade em desenvolvimento, com crescimento expressivo da frota veicular e que não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar. Assim, para avaliar a dispersão e quantificação de poluentes atmosféricos provenientes de fontes móveis e fixas distribuídas em Maringá-PR, foi utilizado o modelo de dispersão atmosférica Aermod. O estudo apresenta como objetivos principais: estimar a qualidade do ar na região central da cidade por meio dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>; avaliar a sazonalidade na dispersão de poluentes; e verificar a agressividade do meio à redes elétricas de transmissão. As emissões das fontes móveis ocorrem por veículos leves presentes na região central da cidade e as emissões das fontes fixas ocorrem pela combustão dos combustíveis: lenha, bagaço de cana de açúcar, GLP, óleo BPF e óleo básico neutro. Para o uso do modelo de dispersão foi necessário definir os parâmetros meteorológicos, os parâmetros físicos e operacionais das fontes emissoras, e a distribuição dos receptores, onde são estimadas as concentrações dos poluentes. Em relação à estimação da qualidade do ar, verificou-se que as fontes móveis são as principais emissoras dos poluentes considerados no estudo, destacando-se em termos de poluição do ar a Avenida Duque de Caxias, que representa uma avenida com grande circulação de pessoas e veículos. Os níveis máximos estimados pelo modelo não ultrapassaram os níveis de qualidade do ar, especificados pela Resolução Conama n° 03/1990, com exceção do óxido de nitrogênio para média horária. Verificou-se que os

veículos em fila, parados pela presença dos semáforos são importantes emissores de monóxido de carbono, impactando em aproximadamente 50% da concentração máxima estimada pelo modelo. No estudo da sazonalidade, verificou-se que as estações mais frias do ano são as mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes, com destaque para a estação do outono, para o ano de 2009. Observou-se que as concentrações máximas horárias não ocorreram no horário de pico de emissão do poluente (14:00), ressaltando a influência das condições dispersivas na concentração dos poluentes como por exemplo velocidade do vento e temperatura. E como resultado de agressividade do meio à redes elétricas de transmissão, tem-se que Maringá apresentou corrosividade variando de baixa a média com base em dados obtidos a partir na NBR 14.643, e que variaram em função da concentração de  $\text{SO}_2$ , tempo de superfície úmida e tipo de material considerado. Foi realizada uma análise qualitativa de corrosividade em relação aos poluentes  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  emitidos pelas fontes fixas, verificando-se que o  $\text{NO}_x$  atua predominantemente na região leste enquanto que o  $\text{SO}_x$  na região oeste. Por não existir dados de medidas de poluentes não foi realizada a validação do modelo. No entanto, o mesmo pode ser usado de maneira qualitativa, com intuito de definir regiões onde seria interessante realizar medidas de concentração de poluentes com objetivos de determinar a qualidade do ar ou agressividade do meio.

**STUDY OF ATMOSPHERIC DISPERSION AND ENVIRONMENT AGGRESSION IN MARINGÁ-PR USING AERMOD DISPERSION MODEL**

**AUTHOR: MICHELY PATRÍCIA DE BITENCOURT DE OLIVEIRA**

**SUPERVISORS: PROF. DR. MARCELINO LUIZ GIMENES**

**CO-SUPERVISORS: PROF. DR. ED PINHEIRO LIMA**

Ph. D. Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Colombo Ave., 5790, Bl. E46-09; ZIP CODE 87020-900 – Maringá – Paraná, Brazil, presented on November 27th, 2012. 120 p.

**ABSTRACT**

Maringá is a city in development in the State of Paraná, which presents significant growth of the vehicle fleet but no air quality monitoring network. Thus for evaluating dispersion and quantification of air pollutants from mobile and stationary sources distributed in the city of Maringá, with the use of Aermom atmospheric model. The study's general objectives were: to estimate the air quality in the downtown through pollutants CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>; area assess seasonality in the pollutants dispersion, and to check the environment aggressiveness to the electricity transmission grids. Emissions from mobile sources are proviment from vehicles present in the downtown area and stationary sources of emissions, from fuels combustion: wood, sugar cane bagasse, LPG, oil and neutral base oil GMP. For the use of dispersion model it is necessary to define the meteorological parameters and surface elevation, physical parameters and operational emission sources, and the distribution of receptors, in which were estimated pollutants concentrations. Regarding the objective estimation of air quality, it was found that mobile sources are the major concern of the considered pollutants in the city, especially, Duque de Caxias Avenue, which presents a large circulation of people and vehicles. The maximum estimated levels by the model did not exceed the levels of air quality regulatory standards specified by CONAMA Resolution number 03/1990, except for concentration nitrogen oxides. It was also noted at this stage of the work that vehicles in traffic lights queues are important sources of carbon monoxide, corresponding to approximately 50% of the maximum concentration estimated by the

model. In the study of seasonality, it was found that the colder seasons of the year of 2009 were the most unfavourable to the dispersion of pollutants, especially for the autumn season. It was noted in the study that the maximum hourly concentrations did not occur at the peak emission of pollutant (2:00 pm), highlighting the influence of dispersive conditions in the concentration of pollutants such as wind speed and temperature. As a result of studying the aggressiveness of the environment to power line transmission, Maringá showed up corrosiveness ranging from low to medium based on data obtained from the NBR 14643, which vary depending on the concentration of  $\text{SO}_2$ , surface moist and type of material considered. Therefore, it was conducted a qualitative analysis of corrosivity for pollutants  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$  emitted by stationary sources, verifying that the  $\text{NO}_x$  operates predominantly in the east while the  $\text{SO}_x$  in the western region. Because there is no pollutants measurement data, validation of the model was not performed. However the results can be used in a qualitative way, in order to define regions where it should be interesting to carry out measurements of pollutants with purpose of determining the air quality or the environment aggressiveness.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VIII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS</b> .....	<b>XII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Definição do problema</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Justificativa</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4 Contribuição da pesquisa</b> .....	<b>5</b>
<b>1.5 Organização da tese</b> .....	<b>6</b>
<b>2. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. Poluentes atmosféricos</b> .....	<b>7</b>
2.1.1 <i>Monóxido de carbono</i> .....	<b>8</b>
2.1.2 <i>Material particulado</i> .....	<b>9</b>
2.1.3 <i>Hidrocarbonetos</i> .....	<b>11</b>
2.1.4 <i>Dióxido de enxofre</i> .....	<b>11</b>
2.1.5 <i>Óxidos de nitrogênio</i> .....	<b>12</b>
2.1.6 <i>Ozônio troposférico</i> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Formação dos poluentes atmosféricos em indústrias</b> .....	<b>14</b>
2.2.1 <i>Combustíveis fósseis</i> .....	<b>15</b>
2.2.2 <i>Biomassa</i> .....	<b>17</b>
<b>2.3 Formação dos poluentes por fontes móveis</b> .....	<b>17</b>
<b>2.4 Limites de emissão e padrões de qualidade do ar</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5 Agressividade do meio</b> .....	<b>24</b>
<b>3 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Atmosfera</b> .....	<b>26</b>
3.1.1 <i>Camada limite planetária</i> ) .....	<b>28</b>
<b>3.2 Parâmetros meteorológicos e a dispersão atmosférica</b> .....	<b>30</b>
3.2.1 <i>Direção e velocidade do vento próximo à superfície</i> .....	<b>30</b>
3.2.2 <i>Turbulência</i> .....	<b>31</b>
3.2.3 <i>Pressão e umidade atmosféricas</i> .....	<b>32</b>
3.2.4 <i>Estabilidade atmosférica</i> .....	<b>32</b>
3.2.5 <i>Altura da Camada Limite Atmosférica</i> .....	<b>36</b>
<b>3.3 Modelagem da dispersão atmosférica de poluentes</b> .....	<b>40</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1 Cidade de Maringá</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2 Caracterização das fontes fixas</b> .....	<b>47</b>
<b>4.3 Caracterização das fontes móveis</b> .....	<b>50</b>

4.3.1	<i>Frota veicular no ano de 2009</i> .....	51
4.3.2	<i>Representação da frota veicular</i> .....	53
4.3.3	<i>Parâmetros do tráfego local</i> .....	55
4.3.4	<i>Caracterização da emissão veicular</i> .....	56
<b>4.4</b>	<b>Caracterização dos receptores</b> .....	<b>60</b>
4.4.1	<i>Coefficiente de dispersão para as fontes fixas</i> .....	62
4.4.2	<i>Coefficiente de dispersão para as fontes móveis</i> .....	64
<b>4.5</b>	<b>Parâmetros Meteorológicos</b> .....	<b>65</b>
4.5.1	<i>Representatividade dos parâmetros meteorológicos adotados</i> .....	65
4.5.2	<i>Caracterização das condições meteorológicas</i> .....	67
<b>4.6</b>	<b>Classificação da Agressividade do Meio</b> .....	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Estimação da qualidade do ar</b> .....	<b>73</b>
5.1.1	<i>Monóxido de carbono</i> .....	73
5.1.2	<i>Óxidos de enxofre</i> .....	81
5.1.3	<i>Óxidos de nitrogênio</i> .....	84
5.1.4	<i>Qualidade do ar com base Resolução Conama n° 03/1990</i> .....	87
<b>5.2</b>	<b>Estudo da sazonalidade</b> .....	<b>90</b>
5.2.1	<i>Concentrações estimadas</i> .....	90
5.2.2	<i>Mapas de concentração</i> .....	92
<b>5.3</b>	<b>Agressividade do meio</b> .....	<b>96</b>
5.3.1	<i>Localização das redes elétricas de transmissão</i> .....	96
5.3.2	<i>Estudo da Agressividade do Meio</i> .....	98
5.3.3	<i>Mapas de concentração</i> .....	101
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>104</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>104</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugestões</b> .....	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>108</b>
	<b>ANEXO</b> .....	<b>117</b>

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Número de empresas em função de número de funcionários .....	47
Tabela 2 – Parâmetros físicos e operacionais das fontes emissoras .....	48
Tabela 3 – Taxa de emissão dos poluentes.....	48
Tabela 4 – Fatores de Emissão .....	49
Tabela 5 – Frota cadastrada no ano de 2009 .....	51
Tabela 6 – Frota veicular considerada no estudo .....	52
Tabela 7 – Parâmetros para os cálculos dos fatores de deterioração para o NO <sub>x</sub> .....	57
Tabela 8 – Fatores de Emissão .....	58
Tabela 9 – Variação da taxa de emissão ao longo do dia .....	59
Tabela 10 – Dados dos receptores .....	60
Tabela 11 – Comparação de dados meteorológicos .....	66
Tabela 12 – Parâmetros meteorológicos mensais.....	68
Tabela 13 – Concentração máxima de CO estimada pelo Aermod.....	74
Tabela 14 – Concentração máxima de SO <sub>x</sub> estimada pelo Aermod.....	81
Tabela 15 – Concentrações máximas de NO <sub>x</sub> estimadas pelo Aermod.....	84
Tabela 16 – Concentrações de poluentes estimados e estipulados.....	88
Tabela 17 – Concentrações máximas de CO para cada estação do ano .....	90
Tabela 18 – Parâmetros nos picos de concentração .....	92
Tabela 19 – Concentração máxima de SO <sub>2</sub> estimada pelo Aermod.....	98
Tabela 20 – Agressividade do meio para metais e ligas metálicas.....	100
Tabela 21 – Associação de corrosividade com concentração de SO <sub>2</sub> .....	101
Quadro 1 – Sintomas do envenenamento pelo CO.....	9
Quadro 2 – Concentração de CO e tempo de exposição máxima .....	9
Quadro 3 – Concentrações de MP estipuladas pela OMS .....	10
Quadro 4 – Efeitos na visibilidade, vegetação e materiais provocados por SO <sub>2</sub> .....	12
Quadro 5 – Efeitos à saúde causados pelo SO <sub>2</sub> .....	12
Quadro 6 – Níveis de NO <sub>2</sub> estipulados pela Organização Mundial da Saúde.....	13
Quadro 7 – Tipos de combustíveis industriais.....	14
Quadro 8 – Padrões de qualidade do ar – Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990 ...	19
Quadro 9 – Níveis críticos de poluição atmosférica.....	20
Quadro 10 – Índice de qualidade do ar.....	21
Quadro 11 – Valores de concentrações estipulados pela OMS .....	21
Quadro 12 – Limites de emissão para processos de combustão do bagaço de cana-de-açúcar.....	22
Quadro 13 – Limites de emissão para processos de combustão de derivados de madeira .....	22
Quadro 14 – Limites de emissão de CO para sistemas com potência de até 10 MW ....	22
Quadro 15 – Fatores médios de emissão de veículos leves novos .....	23
Quadro 16 – Categorias de estabilidade de Pasquill .....	34
Quadro 17 – Albedo para algumas superfícies.....	35
Quadro 18 – Relação entre comprimento de Monin-Obukhov e estabilidade .....	36
Quadro 19 – Métodos para a determinação da altura da camada de mistura .....	37
Quadro 20 – Alturas médias mensais máximas da CLC .....	39
Quadro 21 – Fatores de emissão definidos pela CETESB para o NO <sub>x</sub> .....	57
Quadro 22 – Valores da distância média percorrida adotados pela CETESB.....	58
Quadro 23 – Tipo de uso do solo segundo Auer (1978).....	62

Quadro 24 – Tempo de superfície úmida .....	69
Quadro 25 – Classificação para o SO <sub>2</sub> .....	70
Quadro 26 – Classificação para o Cl <sup>-</sup> .....	70
Quadro 27 – Categorias de corrosividade atmosférica para o aço-carbono .....	70
Quadro 28 – Categorias de corrosividade atmosférica para zinco e cobre.....	70
Quadro 29 – Categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio.....	71
Quadro 30 – Padrões de qualidade do ar – Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990 .	88
Quadro 31 – Concentração e tempo de exposição máxima de CO recomendada pela OMS.....	89
Quadro 32 – Valores de concentrações estipulados pela OMS .....	89
Quadro 33 – Classificação da qualidade do ar .....	93
Quadro 34 – Classificação para o SO <sub>2</sub> .....	98
Quadro 35 – Tempo de superfície úmida .....	99
Quadro 36 – Categorias de corrosividade atmosférica para o aço-carbono .....	99
Quadro 37 – Categorias de corrosividade atmosférica para zinco e cobre.....	100
Quadro 38 – Categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da poluição atmosférica em monumentos .....	24
Figura 2 – Representação das camadas da atmosfera.....	27
Figura 3 – Evolução da Camada limite planetária.....	29
Figura 4 – Rosa dos ventos para Maringá no ano de 2009.....	31
Figura 5 – Perfil térmico da atmosfera .....	33
Figura 6 – Perfis de concentração do modelo Gaussiano.....	41
Figura 7 – Sistema de modelagem do Aermod.....	44
Figura 8 – Fluxograma da Metodologia Aplicada para Caracterizar a Região de Estudo .....	46
Figura 9 – Localização de Maringá .....	47
Figura 10 – Distribuição das fontes fixas emissoras .....	50
Figura 11 – Crescimento Populacional e de Frota de Veículos.....	50
Figura 12 – Representação das fontes móveis com as principais vias .....	51
Figura 13 – Distribuição da frota veicular de Maringá no ano de 2009 .....	52
Figura 14 – Arcos de fluxo livre.....	53
Figura 15 – Arcos de fila .....	53
Figura 16 – Fontes lineares representando os arcos totais.....	54
Figura 17 – Fontes lineares representando os arcos de fila .....	54
Figura 18 – Distribuição dos receptores .....	61
Figura 19 – Curvas de nível do terreno de Maringá.....	61
Figura 20 – Divisão da área de interesse para a fonte emissora (C).....	63
Figura 21 – Densidade Populacional de Maringá.....	64
Figura 22 – Rosa dos ventos gerada com base nos dados do SIMEPAR.....	65
Figura 23 – Rosa dos ventos gerada com base nos dados do MM5 .....	66
Figura 24 – Rosa dos ventos de Maringá para o ano de 2009.....	68
Figura 25 – Mapa de concentração com média horária máxima de CO para fontes fixas .....	76
Figura 26 – Mapa de concentração com média máxima de oito horas para o CO para as fontes fixas.....	76
Figura 27 – Mapa de concentração máxima com média horária para o CO para as fontes móveis.....	77
Figura 28 – Mapa de concentração máxima com média de oito horas para o CO para as fontes móveis .....	77
Figura 29 – Mapa de concentração horária máxima para o CO considerando para fontes totais.....	78
Figura 30 – Mapa de concentração com média de 8 horas para o CO para fontes totais	78
Figura 31 – Localização das Vias.....	79
Figura 32 – Perfil de concentração de CO com média horária.....	80
Figura 33 – Perfil de concentração de CO com média de 8 horas.....	80
Figura 34 – Mapa de concentração máxima com média diária para o SO <sub>x</sub> para as fontes fixas.....	82
Figura 35 – Mapa de concentração máxima anual para o SO <sub>x</sub> para as fontes fixas .....	82
Figura 36 – Mapa de concentração diária máxima para o SO <sub>x</sub> para fontes móveis .....	82
Figura 37 – Mapa de concentração anual máxima para o SO <sub>x</sub> para fontes móveis.....	83
Figura 38 – Perfil de concentração diária para o SO <sub>x</sub> da Avenida Duque de Caxias.....	83
Figura 39 – Perfil de concentração anual de SO <sub>x</sub> ao longo da Avenida Duque de Caxias .....	84

Figura 40 – Mapa de concentração para fontes fixas com médias horárias máximas para o $\text{NO}_x$ .....	85
Figura 41 – Mapa de concentração com média anual para o $\text{NO}_x$ para fontes fixas .....	85
Figura 42 – Mapa de concentração horária máxima para o $\text{NO}_x$ para fontes móveis ....	86
Figura 43 – Mapa de concentração anual para o $\text{NO}_x$ para as fontes móveis.....	86
Figura 44 – Perfil de concentração horária máxima para o $\text{NO}_x$ .....	87
Figura 45 – Perfil de concentração anual máxima para o $\text{NO}_x$ .....	87
Figura 46 – Médias horárias máximas.....	91
Figura 47 – Mapa de concentração horária para o verão.....	93
Figura 48 – Mapa de concentração horária para a estação primavera.....	94
Figura 49 – Mapa de concentração horária para a estação inverno.....	94
Figura 50 – Mapa de concentração horária para a estação outono.....	95
Figura 51 – Localização das redes elétricas de transmissão no Google Maps .....	97
Figura 52 – Localização das redes elétricas de transmissão no Aermod.....	97
Figura 53 – Mapa com representação da corrosividade .....	101
Figura 54 – Mapa de concentração anual para o $\text{SO}_x$ .....	102
Figura 55 – Mapa de concentração anual para o $\text{NO}_x$ .....	103

## NOMENCLATURA

$\Delta T_{u-r}$	Diferença entre temperatura urbana e rural
$A_c$	Concentração de $SO_2$
$B$	Concentração de $Cl^-$
BER	Taxa de emissão básica da exaustão
$C$	Concentração de poluente
$C_p$	Calor específico do ar a pressão constante
$\bar{d}$	Diferença média
$d_i$	Diferença entre as temperaturas médias mensais
$D_i$	Diâmetro interno no topo da chaminé
$D_E$	Distância percorrida pelo veículo medida durante a fase estabilizada
$DM_{i,t}$	Distância média anual percorrida
DR1 e DR2	Taxa de deterioração 1 e 2
$E$	Taxa de emissão dos poluentes
$f_v$	fluxo de veículos
FD	Fator de deterioração
FE	Fator de emissão
FEC	Fator de emissão corrigido
$g$	Aceleração gravitacional
$h_e$	Altura da camada limite estável
$H$	Fluxo de calor vertical
$H_c$	Altura da chaminé
$i$	Ano de fabricação do veículo
$I$	Radiação solar
$K_v$	Constante de von Karman
$K$	Coefficiente de dispersão turbulenta
$L$	Comprimento de Monin-Obukhov
$L_A$	Comprimento da arco de fila
$n$	Número de amostras
$n_f$	Número de filas
$n_v$	Número de veículos parados
$NV_{i,t}$	Número de veículos da frota circulante
$NV_{ic}$	Número de veículos a álcool e gasolina C com ano de fabricação $i$
$P_0$	População de referência
$P$	População da área urbana
$R$	Taxa de geração de determinada espécie através de reações químicas
$t$	tempo
$t_v$	Tempo de vermelho
$t_c$	Tempo total do ciclo
$t_s$	Tempo de superfície úmida
$T_0$	Temperatura da superfície do solo
$TE_{vf}$	Taxa de emissão dos veículos em fila
$TE_{vm}$	Taxa de emissão dos veículos em movimento
$T_s$	Temperatura de saída dos gases
$\tau_0$	Tensão de cisalhamento
$v$	Componente da velocidade na direção $y$

$s_d$	Desvio padrão
$S$	Taxa de geração/extinção de determinada espécie no interior do volume de controle em um determinado ponto $x$ no intervalo de tempo $t$
$u$	Componente da velocidade do vento na direção $x$
$u^*$	Velocidade de fricção
$u_{10}$	Velocidade do vento a 10 metros de altura
$v_s$	Velocidade de saída dos gases
$x,y,z$	Distância ao longo dos respectivos eixos coordenados
$Y$	Quilometragem acumulada em mil milhas
$w$	Componente da velocidade na direção $z$
ZML	Emissão a zero milha
$\rho$	Massa específica

## 1. Introdução

Se, por um lado, o desenvolvimento gera crescimento econômico e social, por outro impacta o meio ambiente. Entre os impactos ambientais evidenciados tem-se a poluição atmosférica, que corresponde à presença de substâncias indesejáveis no ar em concentração suficiente para causar danos à flora, à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Episódios decorrentes da poluição atmosférica têm sido relatados ao longo da história: em Londres, foram registrados episódios devido à queima do carvão, sendo que no ano de 1911 ocorreu o primeiro desastre com a morte de 1.150 pessoas; em 1952 morreram 4.000 pessoas e em 1956, 1957 e 1962 o número chegou a aproximadamente 2.500 óbitos (Braga et al., 2005). No Brasil, a cidade de Cubatão na década de 1980 apresentou o auge em emissões atmosféricas, tornando-a suscetível aos problemas decorrentes desta poluição.

A Organização Mundial da Saúde divulgou que morrem anualmente no mundo, três milhões de pessoas decorrentes da poluição atmosférica, superando, inclusive, as mortes devidas a acidentes de trânsito (Roberts, 2003). Segundo o Instituto Ambiental do Paraná (IAP), o Estado tem a função de estabelecer o equilíbrio socioeconômico e a preservação do meio ambiente utilizando para isto os instrumentos de gestão ambiental: licenciamento, monitoramento e fiscalização (IAP, 2009).

Com base no que foi exposto, torna-se necessário estudar, caracterizar e quantificar a poluição atmosférica, principalmente em locais suscetíveis à emissão dos poluentes, como é o caso dos centros urbanos, para que medidas de gestão ambiental sejam realizadas com o intuito de controle e redução dos poluentes. Um exemplo de gestão ambiental foi realizado na cidade de Cubatão, onde medidas de controle de poluição foram estabelecidas a partir de 1983 e implementadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), e tiveram apoio governamental e das empresas locais. O plano de controle ambiental acarretou na redução da emissão de poluentes atmosféricos, com resultados apresentados no relatório: “Resultados dos 25 anos de recuperação Ambiental de Cubatão” (Georgino, 2008; Fiesp, 2012).

A verificação dos níveis de poluentes na atmosfera deve ser realizada por monitoramento de poluentes. Entretanto, na ausência de monitoramento e indisponibilidade de dados de medidas de poluentes é possível estimar a concentração destes por modelagem matemática, e esta possibilidade está relatada no Artigo 75 da

Resolução Sema nº54/2006. Desta forma, no presente trabalho é apresentado um estudo de dispersão e quantificação de poluentes por modelagem matemática e emitidos pelas fontes antropogênicas (atividades industriais e tráfego veicular), tomando-se como estudo de caso a cidade de Maringá-PR, que é uma cidade em desenvolvimento sem dados de medidas de poluentes atmosféricos. Nos tópicos 1.1 a 1.5 da introdução são apresentados, respectivamente, a definição do problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa, a contribuição da pesquisa e a organização da tese.

### **1.1 Definição do problema**

O desenvolvimento das cidades, muitas vezes sem planejamento, acarreta em problemas tais como os vinculados à poluição do ar, provocados principalmente pelo aumento da frota veicular e desenvolvimento das atividades industriais. Aliado a este problema, a maioria das cidades brasileiras não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar e, as que possuem, muitas vezes apresentam número de pontos de medidas limitado. As redes de monitoramento no Brasil apresentam-se concentradas em capitais de Estado, sendo que no Estado do Paraná a rede de monitoramento localiza-se na região metropolitana de Curitiba.

A cidade de Maringá, localizada a noroeste do Estado do Paraná, tem população projetada para 2011 de 362.329 habitantes (IBGE, 2012), com grau de urbanização de 98,20%, e enquadra-se no contexto exposto no parágrafo anterior, ou seja, é uma cidade em desenvolvimento, que não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar, um instrumento de gestão ambiental.

Em relação à poluição veicular, Maringá tem apresentado um crescimento expressivo de sua frota, sendo que, nos últimos anos o crescimento da frota superou o crescimento populacional. Este crescimento acelerado da frota pode indicar que o conjunto das fontes emissoras apresenta características de potencial poluidor. Desta forma a avaliação do impacto causado por estas fontes é necessária e esta preocupação está apresentada no Plano de Controle de Poluição Veicular do Paraná (PCPV, 2010), publicado e elaborado pelo Órgão Estadual do Meio Ambiente, apresentando, entre suas conclusões, a necessidade da expansão da rede de monitoramento da qualidade do ar para outros centros urbanos do Estado.

Destacam-se na poluição veicular os poluentes, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP), em que

## Capítulo 1 – Introdução

a produção por unidade de combustível queimado é superior quando comparados a outros processos de combustão. Isto se deve à fatores como operação com deficiência de oxigênio e pré-aquecimento das misturas ar/ combustível (De Nevers, 2000; Baumbach, 1996). Em particular para CO, a emissão é significativa em situações em que os veículos estão parados em filas formadas nas interseções semaforizadas(Lima, 2010).

Por outro lado, além das fontes móveis, existem as fontes fixas, em que vários são os fatores envolvidos na formação e emissão dos poluentes atmosféricos como, por exemplo, a matéria-prima envolvida no processo e as medidas de controle de emissões. Pode-se citar como poluentes atmosféricos emitidos por estas fontes os poluentes óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e monóxido de carbono (CO), dependendo do tipo de combustível utilizado no processo.

Os poluentes originados de fontes fixas e móveis, em determinadas concentrações, combinados com as condições dispersivas locais, podem afetar uma variedade de receptores, como população, flora, fauna e o meio ambiente em geral em geral. Em relação aos danos à saúde da população, tem-se que a exposição aos poluentes pode causar efeitos nocivos ao sistema respiratório e cardiovascular e, em relação a danos ao patrimônio, podem ocorrer, por exemplo, o processo de corrosão atmosférica.

A corrosão atmosférica é influenciada pela umidade relativa do ar e pela presença de poluentes na atmosfera, que resultam em reações químicas originando a corrosão (Kühl, 1998). Esta ocorre de maneira diferenciada dependendo do tipo de material exposto ao meio, da formação de produtos de corrosão, da absorção de umidade na superfície do material e da presença de poluentes atmosféricos (Syed, 2006). Contaminantes como  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , poeiras, ácidos orgânicos, entre outros, podem ter efeitos sobre a corrosividade de atmosferas específicas (ABNT, 2001). Segundo Syed (2006), entre os poluentes atmosféricos emitidos em ambientes industrializados, os poluentes que favorecem a corrosão atmosférica são óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ).

Entre os materiais danificados pelos poluentes atmosféricos, têm-se as linhas transmissão de energia elétrica, que apresentam em suas estruturas materiais suscetíveis à corrosão atmosférica, com danos ocorrendo principalmente nas ferragens das

## Capítulo 1 – Introdução

estruturas e nos cabos condutores, que são constituídos geralmente de aço e alumínio (Wavrik et al. , 2009).

Resumidamente, a cidade de Maringá apresenta fontes com potencial poluidor, como as fontes veiculares, e não apresenta o instrumento de gestão ambiental, que é o monitoramento. Assim, com base no problema apresentado, será realizado um estudo com o intuito de estimar a concentração e dispersão dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, emitidos por fontes fixas e móveis, presentes na cidade, usando como ferramenta o modelo de dispersão atmosférica AERMOD. De acordo com a legislação brasileira, na ausência de medições de poluentes estes podem ser estimados por modelos matemáticos, podendo simular o transporte dos poluentes na atmosfera. A simulação tem a finalidade de estudar o comportamento de sistemas por meio de modelos, possibilitando a realização de testes em inúmeros cenários. Assim, com a utilização de modelagem atmosférica será estimada a qualidade do ar na região central de Maringá, que não apresenta dados de medidas de poluentes e que apresenta um fluxo intenso de pessoas e veículos, além de avaliar, a agressividade do meio às redes elétricas de transmissão, distribuídas na cidade.

### 1.2 Objetivos

O presente trabalho objetiva estudar a dispersão atmosférica de poluentes emitidos por fontes fixas e móveis, presentes em regiões da cidade de Maringá-PR, avaliando a qualidade do ar na região central da cidade e a agressividade do meio em termos de corrosão atmosférica, usando como ferramenta o modelo de dispersão atmosférica AERMOD.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Avaliar a qualidade do ar na região central de Maringá;
- estudar o efeito da sazonalidade na dispersão e concentração dos poluentes;
- realizar um estudo de agressividade do meio por meio de avaliação de corrosividade atmosférica em redes elétricas de transmissão;
- estimar a concentração máxima dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, emitidos por fontes móveis, presentes principalmente na região central de Maringá e por fontes fixas distribuídas na cidade;
- realizar um inventário das principais fontes fixas emissoras da cidade; e

## Capítulo 1 – Introdução

- avaliar as áreas atingidas pela pluma dos poluentes gerados pelas fontes emissoras;

### 1.3 Justificativa

Este estudo justifica-se pelos fatos:

- Maringá não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar, mesmo apresentando fontes com características de potencial poluidor, especialmente pelo crescimento expressivo da frota veicular;
- com base no estudo é possível estimar a qualidade do ar da cidade na região central, onde o fluxo de pessoas é intenso;
- com o trabalho é realizado um inventário das principais fontes fixas emissoras na cidade, totalizando 13 fontes emissoras;
- a cidade não apresenta um estudo de dispersão dos poluentes provenientes de fontes fixas e móveis.; e
- é possível, por meio da simulação, avaliar a agressividade do meio em termos de corrosão atmosférica.

### 1.4 Contribuição da pesquisa

O estudo apresenta uma metodologia para a estimativa da qualidade do ar e agressividade do meio que pode ser aplicada em cidades que não apresentam rede de monitoramento da qualidade do ar ou como um complemento às que apresentam as redes. Tomou-se como estudo de caso a cidade de Maringá, onde foi possível avaliar a qualidade do ar em relação aos poluentes CO, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, na região central da cidade, uma região importante para aplicar a metodologia pelo fluxo de pessoas e veículos e realizar um estudo de agressividade do meio à redes elétricas de transmissão distribuídas em Maringá. Os resultados de estimação da qualidade do ar são importantes, pois podem possibilitar a realização de projetos de gestão de qualidade do ar e localizar pontos onde seria útil a implantação de redes de monitoramento da qualidade do ar e, com o estudo da agressividade do meio é possível avaliar a corrosividade do meio às redes expostas na cidade e realizar estudos de materiais como uma forma de diminuir os efeitos da corrosão atmosférica aos materiais expostos.

Até o momento, não foram realizados estudos em Maringá considerando as emissões provenientes de fontes móveis e das principais fontes fixas presentes na cidade,

## Capítulo 1 – Introdução

bem como avaliar os efeitos da emissão em materiais, como as redes elétricas de transmissão.

### **1.5 Organização da tese**

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, além da introdução.

Nos capítulos 2 e 3 são apresentadas revisões da literatura, sendo que no item 2 são apresentados conceitos relacionados aos poluentes atmosféricos, especificando as características e condições de formação dos poluentes em fontes móveis e fixas e os efeitos à saúde e ao patrimônio pela exposição aos poluentes atmosféricos. No capítulo 3, são apresentados conceitos relacionados à dispersão dos poluentes, relatando conceitos básicos de camada limite planetária e estabilidade atmosférica, além de apresentar o modelo de dispersão atmosférica Aermod.

O capítulo 4 apresenta a metodologia usada para caracterizar a região de estudo, apresentando a caracterização do terreno, a caracterização das fontes emissoras, a caracterização das condições meteorológicas e a localização dos receptores, onde serão estimadas as concentrações dos poluentes.

O capítulo 5 apresenta os resultados do trabalho em relação à estimativa da qualidade do ar na região central de Maringá, avaliação da influência da variação da sazonalidade na dispersão dos poluentes e estudo da agressividade do meio em relação às redes elétricas de transmissão.

Finalmente, na conclusão, são feitas as considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

## **2. Poluição atmosférica**

A poluição atmosférica corresponde à presença de substâncias indesejáveis no ar, em concentração suficiente para produzir efeitos nocivos à flora, à fauna e ao meio em geral (De Nevers, 2000; Braga et al., 2005), podendo se originar por fontes naturais, como vulcões, florestas (queimadas) ou por fontes antrópicas, como indústrias e veículos automotores (Mota, 1997).

### **2.1. Poluentes atmosféricos**

A Resolução CONAMA n° 03/1990 define poluente atmosférico como “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que torne ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem estar público; danoso aos materiais, à flora e à fauna; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”.

Os poluentes são classificados em primários ou secundários, em que os primários são emitidos diretamente da fonte para a atmosfera e secundários são formados na atmosfera, por meio de reações químicas, a partir dos poluentes primários. Como exemplo de poluentes primários, têm-se material particulado, monóxido e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio. São exemplos de poluentes secundários os oxidantes fotoquímicos, resultantes da reação entre hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio, na presença da luz solar. Neste caso, o ozônio troposférico ( $O_3$ ) é o oxidante fotoquímico que provoca mais danos ao ambiente (Mota, 1997). Altas concentrações de poluentes primários são encontradas próximas às fontes emissoras, no entanto, para os poluentes secundários, as altas concentrações não são facilmente previstas, abrangendo uma área maior que os poluentes primários (IAP, 2009).

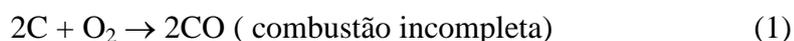
Os poluentes atmosféricos podem ser de origem natural ou então emitidos por fontes antropogênicas, como as atividades industriais, tráfego de veículos e queimadas a céu aberto (IAP, 2009). Os poluentes atmosféricos podem ser emitidos por fontes móveis (transportes aéreos, marítimos e terrestres, em especial os veículos automotores) ou fontes fixas, como as chaminés presentes nas indústrias. Os principais poluentes emitidos pelas indústrias são óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ),

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e material particulado (MP) (Seva e Rick, 2003) e pelos veículos destacam-se o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), NO<sub>x</sub> e MP.

### 2.1.1 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido, além de ser um gás tóxico e inflamável, com ponto de fusão de -213 °C e ponto de ebulição de -190 °C. Pode ser emitido naturalmente para a atmosfera por processos biogênicos (participação de processos vitais), por reações químicas e fotoquímicas e pela ação antrópica (Lenzi e Favero, 2009).

Os processos resultantes da queima incompleta dos combustíveis geram monóxido de carbono, conforme se verifica na Equação (1).



As maiores concentrações do poluente são encontradas nas cidades, principalmente devido às emissões de veículos automotores (CETESB, 2010). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – USEPA, os mais altos níveis de CO no ar ocorrem normalmente nos meses mais frios do ano, quando as condições de inversão térmica são mais frequentes, ficando o poluente próximo ao solo (EPA, 2010).

A exposição ao monóxido de carbono pode causar efeitos adversos à saúde, podendo resultar em morte. Os efeitos são, em grande parte, resultado da formação da carboxihemoglobina (COHb), que prejudica a capacidade do sangue de transportar oxigênio (WHO, 1999). A afinidade do monóxido de carbono pela hemoglobina é cerca de 240 vezes maior que a do oxigênio e, assim, uma pequena quantidade de CO pode saturar uma grande quantidade de hemoglobina (Braga et al., 2010).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) os sinais e sintomas de envenenamento pelo monóxido de carbono estão correlacionados com os níveis de carboxihemoglobina, conforme ilustra o Quadro 1 (WHO, 1999).

Dessa forma, a OMS, no Quadro 2, recomenda os valores de concentração de CO e períodos máximos de exposição média ponderada para que o nível de carboxihemoglobina não exceda o nível de 2,5% (WHO, 1999).

Quadro 1 – Sintomas do envenenamento pelo CO

Níveis de carboxihemoglobina	Sintomas
<10%	Nenhum
10% - 30%	Dor de cabeça Tontura Fraqueza Distúrbios visuais
30% - 50%	Aumento da taxa de respiração e pulsação
> 50%	Convulsão Problemas cardiovasculares Insuficiência miocárdica

Fonte: Baseado em WHO (1999)

Quadro 2 – Concentração de CO e tempo de exposição máxima

Concentração de CO	Tempo de exposição
100 mg/m <sup>3</sup> (87 ppm)	15 min
60 mg/m <sup>3</sup> (52 ppm)	30 min
30 mg/m <sup>3</sup> (26 ppm)	1 h
10 mg/m <sup>3</sup> (9 ppm)	8 h

Fonte: WHO (1999)

### 2.1.2 Material particulado

Material particulado (MP) corresponde a uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas suspensa na atmosfera (CETESB, 2010; EPA, 2010), que pode ser de origem primária ou secundária. As partículas primárias podem ser originadas de veículos automotores, processos industriais e ressuspensão de poeira do solo; como partículas secundárias, tem-se a formação do material particulado a partir de gases como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (CETESB, 2010).

Os particulados não são química ou fisicamente uniformes e, assim, alguns são mais prejudiciais à saúde, às propriedades e à visibilidade do ar que outros poluentes (Amorim, 2004). O tamanho de suas partículas está diretamente ligado ao seu potencial de causar problemas à saúde (EPA, 2010). Suas dimensões podem variar de 0,002  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ , sendo que esta faixa pode ser ampliada para 500  $\mu\text{m}$ , dependendo dos autores (Lenzi e Favero, 2009). Em relação ao seu tamanho, as partículas podem ser classificadas em partículas totais em suspensão (PTS) ou partículas inaláveis (MP<sub>10</sub>), sendo que as primeiras apresentam diâmetro aerodinâmico inferior a 100  $\mu\text{m}$  e as outras, inferior a 10  $\mu\text{m}$  (Amorim, 2004). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos preocupa-se com partículas de tamanho igual ou inferior a 10  $\mu\text{m}$ , pois nesta faixa as partículas causam efeitos graves à saúde. As partículas PM<sub>10</sub> são subdivididas

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

em partículas grossas inaláveis (diâmetro superior a  $2,5 \mu\text{m}$  e inferior ou igual a  $10 \mu\text{m}$ ) e partículas finas (diâmetro igual ou inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  -  $\text{PM}_{2,5}$ ) (EPA, 2010). Segundo a Organização Mundial da Saúde, a fração de  $\text{MP}_{2,5}/\text{MP}_{10}$  é de 0,5 em áreas urbanas de países em desenvolvimento (WHO, 2005). No Quadro 3 são apresentados os níveis de concentração estipulados pela Organização Mundial da Saúde, para que não ocorra efeitos na saúde da população, para o  $\text{MP}_{10}$  e  $\text{MP}_{2,5}$  para médias diária e anual.

Quadro 3 – Concentrações de MP estipuladas pela OMS

MP	Concentração diária ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentração anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$\text{MP}_{10}$	50	20
$\text{MP}_{2,5}$	25	10

Fonte: WHO (2005)

Os efeitos adversos à exposição ao material particulado são amplos, mas são predominantes os efeitos aos sistemas respiratório e cardiovascular. Sendo que os efeitos adversos ocorrem tanto à exposição a curto, quanto a longo prazo. Apesar de toda a população ser afetada pela exposição ao material particulado, existe uma variabilidade individual na exposição e está relacionada com a saúde e com a idade. Assim, é improvável que qualquer norma leve à proteção completa de todas as pessoas contra os efeitos adversos pela exposição ao material particulado (WHO, 2005). Além de ser prejudicial à saúde, a presença do material particulado na atmosfera pode causar danos à edificações, pois estas se depositam nas estruturas, causando manchas, que levam ao desgaste da superfície e efeitos na visibilidade (De Nevers, 2000).

Os particulados na atmosfera podem apresentar os comportamentos: difusão; coagulação; sorção (adsorção ou absorção); varrição; condensação; e precipitação. A difusão refere-se à tendência dos particulados ocuparem o espaço, onde o deslocamento pode se dar, por exemplo, por diferença de concentração. Na coagulação existe a agregação dos particulados, resultando em particulado com maior volume e massa. A sorção corresponde à interação entre duas espécies A e B, sendo que na adsorção existe uma interação superficial enquanto que na absorção uma interação mais profunda, em que existe a interpenetração de uma espécie na outra. A varrição ocorre por meio da chuva que, ao ocorrer, arrasta os particulados, provocando uma limpeza da atmosfera. A condensação é um comportamento semelhante ao da coagulação, mas que conduz a um particulado líquido. Por fim, precipitação ocorre quando as partículas precipitam por ação da gravidade (Lenzi e Favero, 2009).

### 2.1.3 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos podem resultar de processos naturais, tais como a decomposição biológica da vegetação, liberando compostos entre os quais tem-se metano, e de atividades antrópicas, como combustão incompleta de combustíveis, evaporação de compostos orgânicos e incineração de lixo ( Braga et al., 2005; Hinrichis e Kleinback, 2003).

Alguns hidrocarbonetos são extremamente reativos após sua oxidação na atmosfera, tendo papel importante na formação de ozônio e *smog* fotoquímico, que é uma combinação de diferentes poluentes gasosos e particulados (Hinrichis e Kleinback, 2003). Sua participação em reações químicas na troposfera representa a principal importância deste poluente na degradação da qualidade do ar (Vieira, 2009).

Os hidrocarbonetos emitidos por veículos automotores a gasolina sem sistema de controle de emissões são produzidos pela combustão incompleta e sendo que 55% são emitidos no escapamento; 13% a 25% no cárter; 20 a 32% evaporam nas linhas de abastecimento de gasolina, no tanque de combustível e no carburador (Vieira, 2009).

### 2.1.4 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) é um gás incolor, tóxico e não inflamável. Sendo um contaminante comum no ar, podendo ser resultante de atividade vulcânica e processos de combustão que apresentam o enxofre (S) em sua constituição, tais como matéria orgânica de biomassa (lenha e carvão) e material fóssil (petróleo), tendo o homem como seu principal agente de produção (Lenzi e Favero, 2009).

O dióxido de enxofre é um dos poluentes atmosféricos precursores da chuva ácida, sendo responsável pela deterioração de materiais, acidificação de corpos d'água e destruição de florestas (IAP, 2010). É também responsável pela formação de sulfatos secundários que contribuem na formação do material particulado na atmosfera (Guardani e Martins, 2000). A transformação do  $\text{SO}_2$  em outros componentes depende de fatores tais como tempo de permanência no ar, presença de luz solar, temperatura, umidade e adsorção do gás na superfície das partículas (Braga et al., 2010).

A exposição ao  $\text{SO}_2$  na atmosfera tem seu principal efeito sobre o trato respiratório, produzindo irritação e aumento do esforço para respirar (Manahan, 1990). A exposição ao poluente também é prejudicial às plantas, sendo que uma exposição

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

aguda a altos níveis de SO<sub>2</sub> provoca necrose das folhas e uma exposição crônica causa clorose, ou seja, amarelamento ou branqueamento de partes das folhas (Manahan, 1990).

O efeito da poluição atmosférica causado pelo dióxido de enxofre é potencializado quando existe a presença do material particulado. Este efeito é conhecido como efeito sinérgico, sendo que os efeitos adversos do dióxido de enxofre e do material particulado se multiplicam ao invés de se somar (Cardoso e Franco, 2002). Efeitos causados pela exposição do poluente são apresentados no Quadro 4 e no Quadro 5, dependendo da concentração de dióxido de enxofre.

Quadro 4 – Efeitos na visibilidade, vegetação e materiais provocados por SO<sub>2</sub>

Concentração de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Efeitos na visibilidade, vegetação, materiais
50 a 100	Danos crônicos às plantas.
200 a 500	Visibilidade reduzida a 8 km se acompanhada por particulados e 50 % de umidade; Taxa de corrosão de 50% maior se acompanhada por particulados.
500 a 1000	Danos às árvores – 8 horas de exposição média.

Fonte: Adaptado de Cardoso e Franco (2002)

Quadro 5 – Efeitos à saúde causados pelo SO<sub>2</sub>

Concentração de SO <sub>2</sub> (ppm)	Efeitos à saúde
0,035 – 0,07	Aumento das mortes por bronquite e câncer de pulmão; Aumento de doenças respiratórias em crianças.
0,07 – 0,175	Aumento das admissões hospitalares; Aumento dos sintomas de doenças respiratórias.
0,0175 – 0,35	Sintomas acentuados de doenças crônicas do pulmão – 24 horas com 380 µg/m <sup>3</sup> de fumaça.
0,35 – 0,7	Aumento da mortalidade – 24 horas de exposição média acompanhada por particulados.

Fonte: Adaptado de Cardoso e Franco (2002)

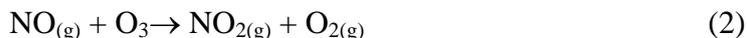
### 2.1.5 Óxidos de nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são provenientes de fontes naturais tais como vulcões, queima de biomassa e atividade bacteriana. No entanto, apresenta como principais fontes de emissão a combustão em caldeira e fornos e os veículos automotores. São considerados contaminantes ambientais, por formarem chuva ácida e *smog* fotoquímico (Cônsul et al., 2004).

Vários são os compostos denotados por NO<sub>x</sub>, com variados estados de oxidação, entre os quais citam-se o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (Hinrichis e Kleinback, 2003). O NO é um gás incolor que, se presente na atmosfera, pode sofrer

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

diversas transformações, como sua oxidação para dióxido de nitrogênio (gasoso), na presença do ozônio, conforme ilustrado a seguir (Lenzi e Favero, 2009):



O  $\text{NO}_2$  é um gás vermelho-marrom, altamente tóxico por inalação. Na atmosfera, pode reagir com o radical hidroxilo (gasoso), formando o ácido nítrico, conforme segue (Lenzi e Favero, 2009):



Em relação aos óxidos de nitrogênio tem-se que (WHO, 2005):

- O  $\text{NO}_2$  é emitido na atmosfera como NO, que é oxidado rapidamente pelo ozônio a  $\text{NO}_2$ ;
- O dióxido de nitrogênio na presença de hidrocarbonetos e luz ultravioleta, constitui a principal fonte de ozônio troposférico e aerossóis de nitrato, que formam material particulado  $\text{MP}_{2,5}$  na atmosfera; e
- A exposição ao  $\text{NO}_2$  causa efeitos adversos à saúde por uma exposição à longo e a curto prazo.

Os níveis de concentração estipulados pela Organização Mundial da Saúde para o  $\text{NO}_2$  são dados no Quadro 6.

Quadro 6 – Níveis de  $\text{NO}_2$  estipulados pela Organização Mundial da Saúde

Concentração com média	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1 hora	200
Anual	40

Fonte: WHO (2005)

### 2.1.6. Ozônio troposférico

O ozônio troposférico é produzido em reações químicas entre  $\text{NO}_x$  e compostos orgânicos voláteis na presença da luz solar, principalmente em áreas urbanas e industriais em regiões propensas a massas de ar estagnado, sendo denominado troposférico quando encontrado na faixa próxima da superfície, e é considerado tóxico. No entanto, na estratosfera tem função de proteção da terra contra raios ultravioletas (CETESB, 2010). Estes poluentes secundários formam a névoa fotoquímica ou *smog* fotoquímico, causando diminuição da visibilidade na atmosfera, e efeitos à saúde, à vegetação e aos materiais.

A inalação de particulados e ozônio em concentrações normalmente encontradas nas regiões urbanas comprimem as artérias, reduzindo o fluxo sanguíneo e o suplemento

de oxigênio para o coração, por isso a poluição atmosférica agrava as doenças cardíacas e respiratórias (Roberts, 2003).

## 2.2 Formação dos poluentes atmosféricos em indústrias

De maneira geral, as indústrias representam um papel importante na alteração da qualidade do ar, por emitir grande quantidade de poluentes para a atmosfera. Como uma forma de controlar suas próprias emissões, estão sendo realizados investimentos devido às seguintes razões (Amorim, 2004):

- Proteção à vida animal e vegetal;
- proteção de bens materiais;
- obtenção de certificados de qualidade ambiental; e
- cumprimento de leis ambientais.

Um inventário de emissão atmosférica é uma ferramenta de gestão ambiental, com os seguintes objetivos (CETESB, 2012):

- Quantificar as emissões de poluentes de forma sistematizada;
- identificar a natureza e a extensão de cargas de poluentes lançadas no ambiente por fontes estacionárias; e
- fornecer informações para prover decisões relacionadas à melhoria da qualidade ambiental e ao gerenciamento ambiental.

Nas indústrias, vários são os fatores envolvidos na formação e emissão dos poluentes atmosféricos, entre os quais se tem a matéria-prima envolvida no processo, a eficiência do processo, o produto fabricado e as medidas de controle de emissões.

Neste item, é relatada a formação de poluentes atmosféricos especificamente a partir de combustíveis industriais. Uma substância é considerada combustível industrial se atender às condições: disponibilidade; preço acessível no local de consumo e aplicabilidade (Ferreira, 1985). Exemplos de combustíveis industriais estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Tipos de combustíveis industriais

Estado Físico	Combustível	
Sólido	Madeira (biomassa)	Lenha
		Serragem
		Cavaco
	Carvão mineral	
	Lodo e resíduos industriais (biomassa)	
	Carvão vegetal	
Coque de carvão		

Estado Físico	Combustível
	Coque de petróleo
Líquido	Petróleo
	Óleos de xisto
	Óleos vegetais (biocombustíveis)
	Biodiesel (esterificação do óleo vegetal)
	Derivados de petróleo
	Álcool (biocombustível)
Gasoso	Gás natural
	Biogás (biocombustível)
	Hidrogênio
	GLP

Fonte: JOSE (2004)

A maioria dos combustíveis industriais é composta de carbono (C), hidrogênio (H) e, em pequenas proporções, enxofre (S). A combinação destes elementos com o oxigênio se dá conforme as reações abaixo (Ferreira, 1985):



Assim, a formação e emissão dos poluentes atmosféricos industriais estão relacionadas, entre outros fatores, com o tipo de combustível utilizado na indústria. A seguir serão descritos alguns dos combustíveis industriais e os poluentes emitidos pela combustão dos mesmos. Os combustíveis estão apresentados em dois grupos: combustíveis fósseis e biomassa.

### 2.2.1 Combustíveis fósseis

Combustíveis fósseis englobam um grande número de compostos orgânicos minerais, podendo se apresentar nos estados sólido, líquido ou gasoso. São exemplos de combustíveis fósseis o carvão mineral, o petróleo e o gás natural.

O carvão mineral é originário da transformação da matéria vegetal de grandes florestas soterradas há milhões de anos, por meio da ação da pressão, temperatura e microrganismos. O carvão se encontra distribuído por toda a crosta terrestre, com incidências superficiais ou profundas e com vários graus de pureza (José, 2004).

A qualidade do carvão é determinada pelo conteúdo do carbono e varia com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos podendo apresentar-se nas formas (ANEEL, 2010a):

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

- Turfa – teor de carbono na ordem de 45%;
- Linhito – teor de carbono de 60% a 75%;
- Hulha – teor de carbono de 75% a 85%;
- Antracilho – teor de carbono superior a 90%.

Além de impactos relativos à mineração, a queima do carvão mineral em indústrias e termoelétricas gera emissão de material particulado e de gases poluentes entre os quais, destacam-se o dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogênio (ANEEL, 2010a).

O petróleo bruto é uma complexa mistura de hidrocarbonetos, que apresenta contaminações variadas de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais. Sua composição varia em função do seu reservatório de origem. Na forma bruta, tem poucas aplicações, sendo utilizado apenas como óleo combustível. No entanto, o petróleo tem grande interesse comercial quando é refinado, obtendo-se seus derivados (Mariano, 2001).

Os principais impactos decorrentes da queima de derivados de petróleo ocorrem pela emissão de poluentes atmosféricos, principalmente os chamados gases de efeito estufa. Entre os quais se destacam dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Além destes, tem-se a emissão de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o material particulado (ANEEL, 2010b).

O gás natural, similar aos demais combustíveis fósseis, é originado da decomposição da matéria orgânica fossilizada há milhares de anos, sendo constituído por uma mistura de hidrocarbonetos, contendo principalmente o metano. O gás natural pode apresentar em sua composição os componentes  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{N}_2$ , que são removidos por serem considerados contaminantes, além de etano, propano e outros hidrocarbonetos de pesos moleculares superiores, os quais são separados por apresentarem altos valores agregados (De Nevers, 2000). Em relação aos outros combustíveis fósseis, o gás natural apresenta baixos índices de emissão de poluentes, além de maior flexibilidade em termos de transporte. Em relação à poluição atmosférica, tem-se a emissão de óxidos de nitrogênio, entre os quais se destacam o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), sendo este último um dos causadores do efeito estufa, além de contribuir para a diminuição da camada de ozônio (ANEEL, 2010c).

### 2.2.2 Biomassa

A biomassa é a matéria orgânica da terra, tendo origem, principalmente, nos resíduos das plantas. No campo da energia, o termo biomassa é usado para descrever todas as formas de plantas e derivados que podem ser convertidos em energia utilizável como madeira, resíduos urbanos e florestais, grãos, talos, óleos vegetais e lodo de tratamento biológico de efluentes.

A energia gerada pela biomassa é conhecida como energia verde ou bioenergia (José, 2004). Segundo Cortez et al. (2008), ao realizar a combustão da biomassa, pode-se resultar nos produtos da oxidação completa:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e como resultado da oxidação incompleta tem-se:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ . Além destes produtos, de acordo com Arbex (2001), a queima de biomassa gera elevadas concentrações de material particulado.

Especificamente, a biomassa bagaço de cana-de-açúcar, pode ser considerada limpa e renovável em relação à emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) sendo, de acordo com Primo et al. (2005), consequência do balanço quase fechado de emissão e sequestro de  $\text{CO}_2$  no ciclo desde o plantio da cana até a queima do bagaço. Apesar desse bom comportamento em relação ao  $\text{CO}_2$ , ainda são emitidos gases de efeito local como monóxido de carbono, material particulado e óxidos de nitrogênio.

### 2.3 Formação dos poluentes por fontes móveis

A formação dos poluentes atmosféricos por unidade de combustível queimado é superior nos processos de emissão veicular quando comparados a outros processos de combustão. Isto se deve aos fatores: operação com deficiência de oxigênio; pré-aquecimento das misturas ar/ combustível; combustão não permanente; e sistema de refrigeração do motor, que impede a queima por igual da mistura comburente (De Nevers, 2000; Baumbach, 1996).

As emissões atmosféricas para estas fontes são provenientes principalmente do tubo de escapamento devido à combustão, e de evaporações originadas no tanque de combustível, no carburador, no sistema de injeção eletrônica e no cárter (Pinto, 2005).

Em relação à formação dos poluentes monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrocarbonetos ( $\text{HC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), material particulado ( $\text{MP}$ ) e aldeído tem-se que (Pinto, 2005):

- A formação de CO ocorre pela combustão incompleta, estando relacionada com a relação ar/combustível;
- a emissão dos hidrocarbonetos se dá principalmente pela evaporação do combustível não queimado;
- óxidos de nitrogênio resultam especialmente da combinação do oxigênio com o nitrogênio presente no ar admitido pelo motor, em condições de alta temperatura e pressão;
- óxidos de enxofre formam-se pela combinação do oxigênio com o enxofre presente no combustível;
- material particulado é formado pela queima incompleta dos combustíveis e de seus aditivos, bem como do desgaste de pneus e freios; e
- aldeídos são formados pela oxidação incompleta dos combustíveis, especialmente no caso do álcool anidro.

#### **2.4 Limites de emissão e padrões de qualidade do ar**

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos definiu padrões de qualidade de ar para os principais poluentes atmosféricos devido a estes poderem prejudicar a saúde da população e o meio ambiente. Entre os poluentes definidos, o ozônio e o material particulado ao nível do solo são os poluentes mais difundidos como ameaça à saúde (EPA, 2010). De maneira similar, a CETESB (2010) apresenta o grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, adotados universalmente e escolhidos devido à frequência de ocorrência de efeitos adversos. Estes poluentes são materiais particulados, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, oxidantes fotoquímicos, como o ozônio troposférico, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.

A concentração destes e dos demais poluentes na atmosfera pode interferir na qualidade do ar de uma região. Sendo assim, a Resolução CONAMA nº 03/90 definiu padrões de qualidade como “as concentrações de poluentes atmosféricos que, quando ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral”. Estes padrões foram definidos para os poluentes: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e ozônio, dados no Quadro 8.

Quadro 8 – Padrões de qualidade do ar – Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/1990

Poluente	Concentração média	Padrão primário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Padrão secundário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Partículas totais em suspensão	geométrica anual	80	60
	24 horas	240	150*
Fumaça	aritmética anual	60	40
	24 horas	150*	100*
Partículas inaláveis (MP <sub>10</sub> )	aritmética anual	50	50
	24 horas	150*	150*
Dióxido de enxofre	aritmética anual	80	40
	24 horas	365*	100*
Monóxido de carbono	8 horas	10.000*	10.000*
	1 hora	40.000*	40.000*
Dióxido de nitrogênio	aritmética anual	100	100
	1 hora	320	190
Ozônio	1 hora	160	160

\* Concentração que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Fonte: Resolução CONAMA nº 3/1990.

Os padrões primários de qualidade do ar referem-se às concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, e os padrões secundários, concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral (CONAMA, 1990). Segundo o Instituto Ambiental do Paraná (IAP, 2009), o padrão primário estipula o nível máximo tolerável de concentração de poluentes atmosféricos que poderiam afetar a população, sem considerar a flora e a fauna e o padrão secundário compreende uma proteção superior, objetivando causar efeito mínimo adverso a uma tipologia mais abrangente de receptores (fauna, flora, materiais, meio ambiente e saúde da população).

Com exceção do ozônio, os padrões de qualidade do ar são apresentados para dois prazos: curto e longo. Para o curto prazo consideram-se os efeitos agudos e irritantes dos poluentes e para o longo prazo os efeitos acumuladores e crônicos (IAP, 2009).

A verificação dos padrões de qualidade do ar é, portanto, fundamental para a gestão de qualidade do ar, sendo que, na ausência de monitoramento, os padrões de qualidade do ar, podem ser verificados por meio de modelos matemáticos de qualidade do ar, desde que aprovados previamente pelo Instituto Ambiental do Paraná, conforme relata o Artigo 75 da Resolução SEMA nº 54/2006:

*“A verificação do atendimento aos padrões de qualidade do ar deverá ser efetuada pelo monitoramento dos poluentes na atmosfera ou, na ausência de medições, pela utilização de modelos matemáticos de dispersão atmosférica”.*

A Resolução SEMA nº 54/2006, também estabelece episódios críticos de poluição atmosférica, sendo determinados pela ocorrência de elevadas concentrações de um ou mais poluentes na atmosfera, resultantes da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes, sendo, portanto, estabelecidos os níveis de qualidade do ar (atenção, alerta e emergência), definidos pelas concentrações e médias apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Níveis críticos de poluição atmosférica.

Poluente	Tempo de amostragem	Nível de atenção ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nível de alerta ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nível de emergência ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Partículas totais em suspensão (PTS)	24 horas	375	625	875
Fumaça	24 horas	250	420	500
Partículas inaláveis (PI)	24 horas	250	420	500
Dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ )	24 horas	800	1600	2100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	17000	34000	46000
Ozônio ( $\text{O}_3$ )	1 hora	400	800	1000
Dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ )	1 hora	1130	2260	3000

Fonte: SEMA nº 54/06, IAP (2009).

Com o intuito de padronizar as concentrações dos poluentes, foram criados os Índices de Qualidade do Ar, obtidos por meio de uma função linear, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar e níveis de atenção, alerta e emergência (IAP, 2009). Para cada concentração foram atribuídos valores adimensionais, sendo que, para o padrão primário foi atribuído o valor 100, para o nível de atenção 200, para o nível de alerta 300 e para o de emergência 400. Os Índices de qualidade do ar atribuídos para cada concentração e poluente estão ilustrados no Quadro 10.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estipula limites para os poluentes atmosféricos e tempos de exposição, apresentados no Quadro 11.

Quadro 10 – Índice de qualidade do ar

Índice de qualidade do ar	Classificação	PTS 24 h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fumaça 24h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PI 24h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO <sub>2</sub> 24h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> 1 h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CO 8 h (ppm)	NO <sub>2</sub> 1h ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0-50	Boa	0-80	0-60	0-50	0-80	0-80	0-4,5	0-100
>50-100	Regular	>80-240	>60-150	>50-150	>80-365	>80-160	>4,5-9	>100-320
>100-200	Inadequada	>240-375	>150-250	>150-250	>365-800	>160-400	>9-15	>320-1130
>200-300	Má	>375-625	>250-420	>250-420	>800-1600	>400-800	>15-30	>1130-2260
>300-400	Péssima	>625-875	>420-500	>420-500	>1600-2100	>800-1000	>30-40	>2260-3000
>400	Crítica	>875	>500	>500	>2100	>1000	>40	>3000

Fonte: CETESB (2009a).

Quadro 11 – Valores de concentrações estipulados pela OMS

Poluente	Exposição média	Concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
MP <sub>2,5</sub>	Anual	10
	24 horas	25
MP <sub>10</sub>	Anual	20
	24 horas	50
Dióxido de enxofre	24 horas	20
	10 minutos	500
Monóxido de carbono	8 horas	10000
	1 hora	30000
Dióxido de nitrogênio	Anual	40
	1 hora	200
Ozônio	8 horas	100

Fonte: baseado em WHO (2005)

Realizando uma comparação entre os valores apresentados pela Resolução CONAMA n° 03/1990, apresentados no Quadro 8, com os valores estipulados pela OMS, ilustrados no Quadro 11, verifica-se que, para alguns poluentes, existe uma maior restrição para os valores estipulados pela OMS em relação à Resolução CONAMA n° 03/1990. Para o poluente MP<sub>10</sub>, nota-se que os valores apresentados pela OMS são inferiores aos estabelecidos pela resolução CONAMA n° 3/1990. O mesmo ocorre para os poluentes SO<sub>2</sub> (24 horas), CO (1 hora), NO<sub>2</sub> (anual e 1 hora padrão primário). A OMS leva em consideração a concentração de MP<sub>2,5</sub>, enquanto que a resolução CONAMA n° 03/1990 avalia a concentração de partículas totais em suspensão. Padrões mais rigorosos de qualidade do ar são justificados pela relação entre poluição atmosférica e danos à saúde, por isso a OMS apresenta limites mais restritivos (IAP, 2009).

Como uma forma de controle das emissões e estabelecimento dos padrões de qualidade do ar, são atribuídos os padrões de emissão para as fontes móveis e fontes fixas. A Resolução CONAMA n° 382 de 2006, estabelece os limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de fontes fixas, em nível nacional.

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

Nesta Resolução os limites máximos de emissão são definidos por poluentes e por tipologia de fontes.

Para exemplificar os limites de emissão, são apresentados os Quadros 12 e 13 com os limites estabelecidos para processos de combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar e derivados de madeira, respectivamente.

Quadro 12 – Limites de emissão para processos de combustão do bagaço de cana-de-açúcar

Potência térmica nominal (MW)	MP <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>
Menor que 10	280 mg/Nm <sup>3</sup>	N.A.
Entre 10 e 75	230 mg/Nm <sup>3</sup>	350 mg/Nm <sup>3</sup>
Maior que 75	200 mg/Nm <sup>3</sup>	350 mg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: CONAMA (2006)

(1) Os resultados são expressos em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.

N.A. – não aplicável.

Quadro 13 – Limites de emissão para processos de combustão de derivados de madeira

Potência térmica nominal (MW)	MP <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>
Menor que 10	730 mg/Nm <sup>3</sup>	N.A.
Entre 10 e 30	520 mg/Nm <sup>3</sup>	650 mg/Nm <sup>3</sup>
Entre 30 e 70	260 mg/Nm <sup>3</sup>	650 mg/Nm <sup>3</sup>
Maior que 70	130 mg/Nm <sup>3</sup>	650 mg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: CONAMA (2006)

(1) Os resultados são expressos em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.

N.A. – Não aplicável.

Para sistemas com potências de até 10 MW, alternativamente aos limites estabelecidos nos Quadros 12 e 13, poderá ser aceito o monitoramento periódico de monóxido de carbono, estabelecido no Quadro 14 (CONAMA, 2006).

Quadro 14 – Limites de emissão de CO para sistemas com potência de até 10 MW

Potência térmica nominal (MW)	CO
Até 0,05	6500 mg/Nm <sup>3</sup>
> 0,05 e ≤0,15	3250 mg/Nm <sup>3</sup>
> 0,15 e ≤1,0	1700 mg/Nm <sup>3</sup>
> 1,0 e ≤10,0	1300 mg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: CONAMA (2006)

Os resultados são expressos em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.

Em relação às fontes móveis, os limites de emissão são estabelecidos pelo PROCONVE Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores. Os fatores de emissão para os veículos novos para os poluentes CO, HC, NO<sub>x</sub> e RCHO estão apresentados no Quadro 15, sendo observado que a ausência de fatores para o

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

etanol a partir de 2007, o que reflete a descontinuidade da produção destes modelos devido à preferência dos veículos flex (CETESB, 2009a).

Quadro 15 – Fatores médios de emissão de veículos leves novos

Ano-modelo	Combustível	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	RCO (g/km)
	Gasolina	54,00	4,70	1,20	0,05
	Gasolina C	33,00	3,00	1,40	0,05
	álcool	18,00	1,60	1,00	0,060
84-85	Gasolina C	28,00	2,40	1,60	0,050
	Álcool	16,90	1,60	1,20	0,180
86-87	Gasolina C	22,00	2,00	1,90	0,040
	Álcool	16,00	1,60	1,80	0,110
88	Gasolina C	18,50	1,70	1,80	0,040
	Álcool	13,30	1,70	1,40	0,110
89	Gasolina C	15,20	1,60	1,60	0,040
	Álcool	12,80	1,60	1,10	0,110
90	Gasolina C	13,30	1,40	1,40	0,040
	Álcool	10,80	1,30	1,20	0,110
91	Gasolina C	11,50	1,30	1,30	0,040
	Álcool	8,40	1,10	1,00	0,110
92	Gasolina C	6,20	0,60	0,60	0,013
	Álcool	3,60	0,60	0,50	0,035
93	Gasolina C	6,30	0,60	0,80	0,022
	Álcool	4,20	0,70	0,60	0,040
94	Gasolina C	6,00	0,60	0,70	0,036
	Álcool	4,60	0,70	0,70	0,042
95	Gasolina C	4,70	0,60	0,60	0,025
	Álcool	4,60	0,70	0,70	0,042
96	Gasolina C	3,80	0,40	0,50	0,019
	Álcool	3,90	0,60	0,70	0,040
97	Gasolina C	1,20	0,20	0,30	0,007
	Álcool	0,90	0,30	0,30	0,012
98	Gasolina C	0,79	0,14	0,23	0,004
	Álcool	0,67	0,19	0,24	0,014
99	Gasolina C	0,74	0,14	0,23	0,004
	Álcool	0,60	0,17	0,22	0,013
2000	Gasolina C	0,75	0,13	0,21	0,004
	Álcool	0,63	0,18	0,21	0,014
2001	Gasolina C	0,48	0,11	0,14	0,004
	Álcool	0,66	0,15	0,08	0,017
2002	Gasolina C	0,43	0,11	0,12	0,004
	Álcool	0,74	0,16	0,08	0,017
2003	Gasolina C	0,40	0,11	0,12	0,004
	Álcool	0,77	0,16	0,09	0,019
	Flex-Gasolina C	0,50	0,05	0,04	0,004
	Flex- álcool	0,51	0,15	0,14	0,029
2004	Gasolina C	0,35	0,11	0,09	0,004
	Álcool	0,82	0,17	0,08	0,016
	Flex-Gasolina C	0,30	0,08	0,05	0,003
	Flex- álcool	0,46	0,14	0,14	0,014
2005	Gasolina C	0,34	0,10	0,09	0,004
	Álcool	0,82	0,17	0,08	0,016
	Flex-Gasolina C	0,45	0,11	0,05	0,003
	Flex- álcool	0,39	0,14	0,10	0,014
2006	Gasolina C	0,33	0,08	0,08	0,002
	Álcool	0,67	0,12	0,05	0,014

## Capítulo 2 – Poluição Atmosférica

Ano-modelo	Combustível	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	RCHO (g/km)
	Flex-Gasolina C	0,48	0,10	0,05	0,003
	Flex- álcool	0,47	0,11	0,07	0,014
2007	Gasolina C	0,33	0,08	0,08	0,002
	Álcool	nd	nd	nd	nd
	Flex-Gasolina C	0,48	0,10	0,05	0,003
	Flex- álcool	0,47	0,11	0,07	0,014
2008	Gasolina C	0,37	0,042	0,039	0,0014
	Álcool	nd	nd	nd	nd
	Flex-Gasolina C	0,51	0,069	0,041	0,0020
	Flex- álcool	0,71	0,052	0,048	0,01524
2009	Gasolina C	0,30	0,034	0,020	0,0017
	Álcool	nd	nd	nd	nd
	Flex-Gasolina C	0,33	0,032	0,030	0,0024
	Flex- álcool	0,56	0,030	0,032	0,0104

RCHO: formaldeído + acetaldeído

nd: não disponível

fonte: CETESB (2009 a).

### 2.5 Agressividade do meio

Os danos causados pela exposição a poluentes atmosféricos são estendidos a materiais como monumentos e construções de maneira geral, sendo que a corrosão de metais é acelerada quando estes estão expostos a ambientes poluídos (De Nevers, 2000). Na Figura 1 é ilustrada a corrosão de uma estátua criada em 1702, presente na entrada do Castelo de Herten, na Alemanha, onde a imagem da esquerda retrata a estátua em 1908 e a da direita em 1969, verificando-se danos acelerados causados no último período de exposição aos poluentes atmosféricos (De Nevers, 2000).



Fonte: De Nevers (2000)

Figura 1 – Efeito da poluição atmosférica em monumentos

Conforme Syed (2006), a corrosão atmosférica ocorre com a formação de um eletrólito na superfície metálica, que se dá com um nível crítico de umidade. Este nível depende do tipo de material exposto ao meio, da formação de produtos de corrosão, da absorção de umidade na superfície do material e da presença de poluentes atmosféricos. Ainda segundo o autor, entre os poluentes atmosféricos emitidos em ambientes industrializados, os poluentes que favorecem a corrosão atmosférica são óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). De acordo com Ponte (2012), as atmosferas industriais são em geral de 50 a 100 vezes mais corrosivas do que as regiões desertas, em especial pela presença de gases de enxofre, os quais atuam como catalisadores no processo de corrosão.

Entre os materiais danificados pelos poluentes atmosféricos, têm-se as linhas transmissão formadas por uma estrutura de ferragens e cabos condutores. Segundo Wavrik et al. (2009), os cabos condutores são constituídos por um arranjo de cabos, geralmente de aço e alumínio, em que o alumínio tem a função de conduzir a corrente elétrica e o cabo central de aço tem a função de dar sustentação. Assim, os problemas de corrosão atmosférica em linhas de transmissão podem ocorrer nas estruturas das ferragens e nos cabos condutores.

### 3 Dispersão atmosférica

Neste item, são abordados conceitos relacionados ao meio de propagação dos poluentes (atmosfera) e parâmetros meteorológicos, que são fundamentais para o estudo da dispersão e estimativa da concentração dos poluentes na atmosfera.

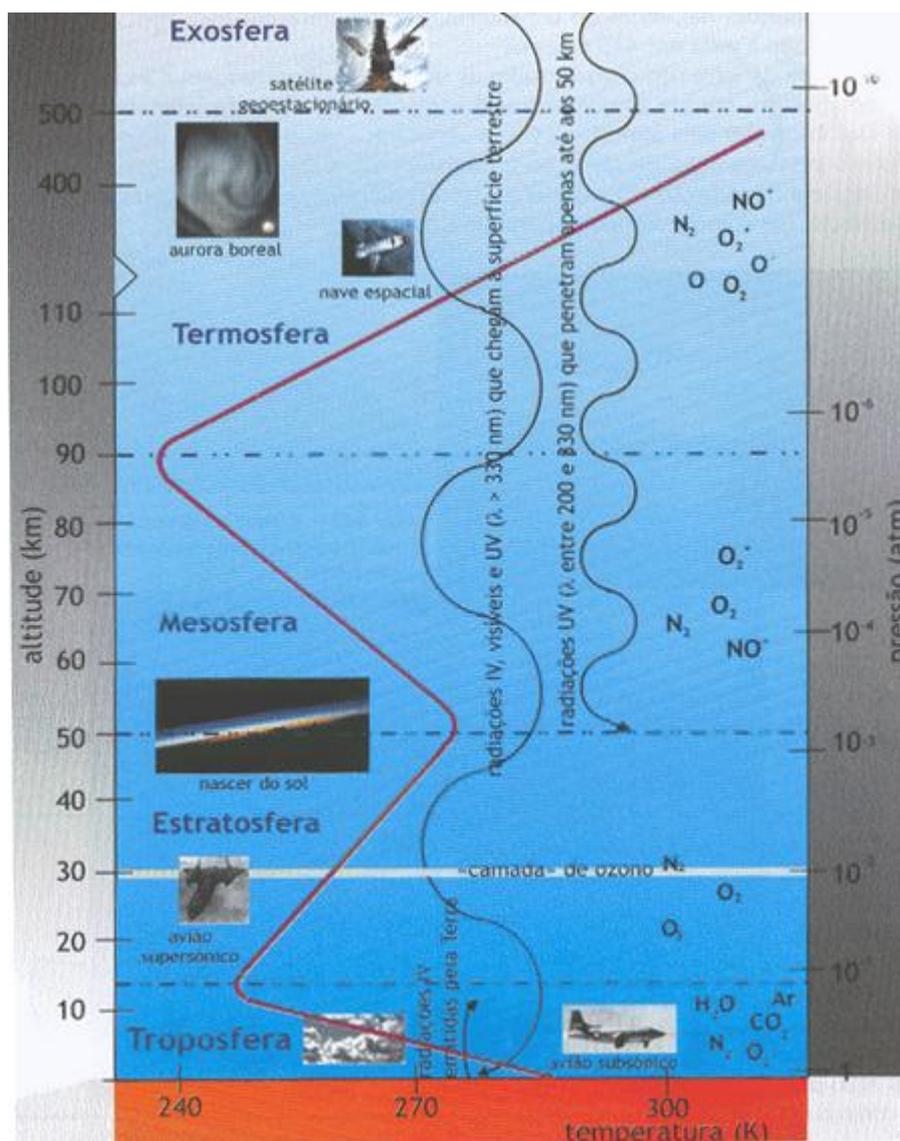
#### 3.1 Atmosfera

A atmosfera inicia-se junto à crosta terrestre, estendendo-se até os rarefeitos gases interplanetários, sendo que a mesma apresenta-se mais densa próxima à superfície terrestre (Vianello e Alves, 2004). Devido à dificuldade de definir seu limite superior, toma-se como referência o limite de 10.000 km para expressar sua extensão (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

Além da densidade do ar diferenciar-se com a altura, a composição gasosa não é a mesma em toda a sua extensão. Nos primeiros 90 km, a distribuição dos componentes gasosos é praticamente uniforme, sendo que nos primeiros 25 km de altura caracteriza-se por ser composta de uma mistura de nitrogênio, oxigênio, argônio e um conjunto de outros gases em proporções relativamente reduzidas, como o dióxido de carbono. A partir deste patamar, tem-se, preferencialmente, uma mistura de nitrogênio e oxigênio. Passados os 90 km, os gases atmosféricos se dispõem separadamente, formando camadas de composições químicas diferentes (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

Outra característica da atmosfera é que apresenta uma distribuição vertical de temperatura diferenciada, sendo em razão desta distribuição dividida em troposfera, tropopausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera, mesopausa e termosfera; em que o sufixo *pausa* refere-se às camadas que apresentam temperatura constante (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007; Vianello e Alves, 2004).

Na Figura 2 é ilustrada uma representação das camadas citadas anteriormente, apresentando esquematicamente suas principais características.



Fonte: A Química e a Atmosfera, 2012.

Figura 2 – Representação das camadas da atmosfera

Entre as camadas representadas na Figura 2, a troposfera é de interesse no estudo, pois interage com a superfície terrestre e produz os fenômenos meteorológicos que afetam a vida sobre a superfície e os fenômenos de transporte dos poluentes.

A troposfera encontra-se em contato com a superfície terrestre, atingindo uma altura de aproximadamente 15 a 18 km no equador, e de 6 a 8 km nos polos, sendo que sua espessura varia também com as estações do ano. Nesta camada, os movimentos atmosféricos verticais e horizontais são intensos e a temperatura cai rapidamente com a altitude, em uma razão média (gradiente) de 6,5° C por quilômetro. A troposfera apresenta aproximadamente 75% da massa total da atmosfera e, praticamente, todo o vapor d'água (Vianello e Alves, 2004). Na baixa troposfera, existe uma camada de

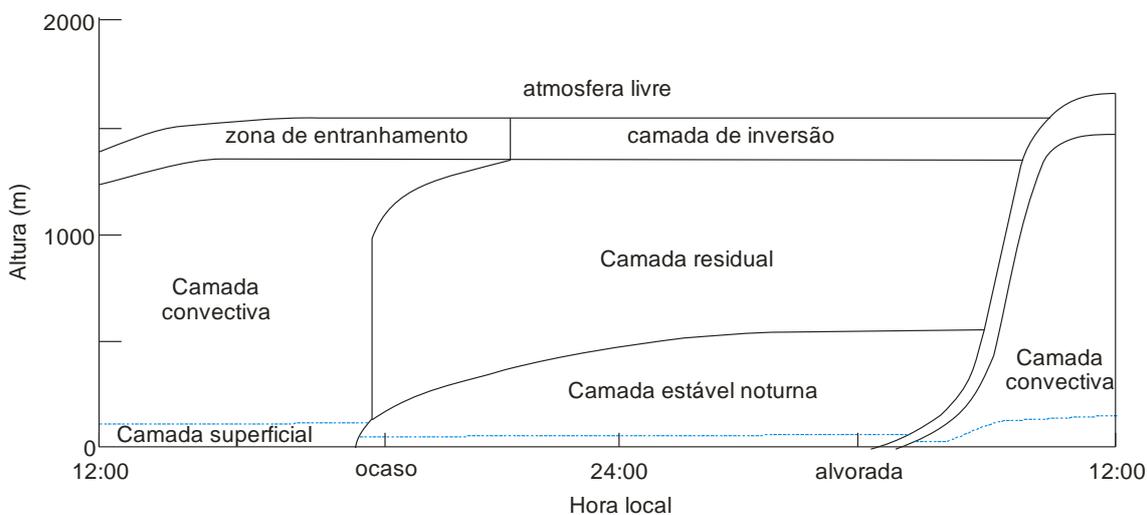
grande interesse nos processos de dispersão dos poluentes denominada camada limite planetária, a qual será discutida a seguir.

### 3.1.1 *Camada limite planetária*)

A camada limite planetária (CLP), também chamada de camada limite atmosférica (CLA) ou camada de fricção é definida como a parte da troposfera que sofre influência direta da superfície terrestre, respondendo às forçantes superficiais com uma escala de tempo de até uma hora. Estes forçantes incluem atrito com a superfície, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluente, e modificação do escoamento induzido pelo terreno (Stull, 1988). Boçon (1998) cita que a atmosfera sente os efeitos da presença do solo, por meio de troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade.

A interação da camada limite atmosférica com a superfície condiciona à camada uma característica turbulenta, ocasionando a dispersão das substâncias emitidas na camada. Dessa forma, é usual adotar o termo camada de mistura para a camada limite planetária (Malheiros, 2004).

A estrutura da CLA sobre o continente é influenciada pelo ciclo diário de aquecimento e resfriamento do solo (Boçon, 1998), sendo diferenciada no ciclo diurno e noturno (Martins, 2010). No ciclo diurno, existe um transporte de calor da superfície terrestre (aquecida pelo sol) para a atmosfera mais fria resultando em um aumento da CLA próximo ao equador. No ciclo noturno, o transporte vertical ocorre em sentido oposto, o que acarreta em uma diminuição da espessura da CLA (Martins, 2010). Desta forma, a CLA apresenta-se diferenciada no ciclo diário conforme ilustra a Figura 3.



Fonte: adaptada de Stull (1988 apud Reis Jr, 2007)

Figura 3 – Evolução da Camada limite planetária

De acordo com Stull (1988), destacam-se na CLA a camada limite convectiva, a camada residual e a camada limite estável noturna.

A camada limite superficial tem contato direto com a superfície e corresponde aos 10% inferiores da camada limite atmosférica (Stull, 1988). Nesta camada, as variações dos fluxos verticais podem ser ignoradas e o fluxo de calor, umidade e movimento são tratados como constantes (Boçon, 1998).

A camada limite convectiva é a região entre a camada limite superficial e o topo da camada limite atmosférica, no período diurno. Nesta camada, o processo de mistura de substâncias e poluentes é expressivo devido à turbulência. Para um dia ensolarado e com ventos fracos, a turbulência é produzida predominantemente por ação térmica, por isso é denominada camada convectiva (Malheiros, 2004).

A zona de entranhamento é a região de transição entre a CLA e a atmosfera livre ao nível de formação das nuvens. Nesta região, pode-se formar uma camada de inversão térmica (Malheiros, 2004).

Com o pôr-do-sol, existe uma modificação na estrutura da CLA, principalmente pela redução do fluxo de calor sensível na superfície. Na camada limite estável noturna, existe uma inversão térmica a partir da superfície, onde as forças de empuxo atuam suprimindo a turbulência ou tornando-a fraca e conseqüentemente reduzindo

sensivelmente sua altura e inibindo a dispersão vertical dos poluentes. Assim, nesta camada, os poluentes são transportados principalmente na horizontal, com pouca mistura vertical, sendo que com o nascer do sol esta camada desaparece (Malheiros, 2004).

A camada residual está posicionada acima da camada limite estável noturna, que pode conservar substâncias emitidas na camada convectiva diurna. Se os poluentes forem emitidos diretamente nesta camada, a pluma sofre dispersão tanto vertical como horizontal (Malheiros, 2004). Com o nascer do sol esta camada é tomada pela nova camada convectiva. A altura da camada de mistura sofre alterações bruscas, pois a quebra da inversão superficial e a junção da camada residual fazem com que a camada convectiva cresça rapidamente, atingindo alturas elevadas.

### **3.2 Parâmetros meteorológicos e a dispersão atmosférica**

A dispersão dos poluentes e, por sua vez, o nível de poluição atmosférica, são influenciados pelas condições meteorológicas. Na revisão são abordados parâmetros meteorológicos que afetam a concentração dos poluentes na atmosfera e consequentemente o nível de poluição do ar como direção e velocidade do vento próximo à superfície, turbulência, pressão atmosférica, umidade, estabilidade e altura da camada limite, os quais serão abordados a seguir.

#### *3.2.1 Direção e velocidade do vento próximo à superfície*

O vento é um fenômeno meteorológico formado pelo movimento do ar na atmosfera, sendo gerado por fenômenos naturais, entre os quais pode ser citado o movimento de rotação da terra (força de Coriolis). Este movimento ocasiona o transporte dos poluentes que são lançados na atmosfera. Segundo Turner (1994), o vento é uma grandeza vetorial caracterizada pela direção e velocidade, podendo ocorrer nas três direções. No entanto, é mais comum considerar somente a componente horizontal do vento. O movimento horizontal na atmosfera é promovido principalmente pelo aquecimento irregular da superfície terrestre, modificado pelo efeito de rotação da terra e influenciado pelos mares e oceanos.

A velocidade do vento é uma quantificação do ar em movimento dada, para propósitos de poluição do ar, em metros por segundo. De acordo com Turner (1994), o resultado da concentração de poluentes na pluma é inversamente proporcional à velocidade do vento. Por convenção, a direção do vento é a direção em que o vento está

### Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

soprando (Turner, 1994), ou seja, um vento sul significa que o vento está soprando do sul para o norte, considerando o observador como referencial fixo. Em uma região, o vento pode soprar em várias direções, mas, no entanto, existe uma direção em que o vento sopra preferencialmente, sendo denominada direção predominante.

A força de Coriolis e as forças dos gradientes de pressão determinam a velocidade e direção dos ventos. A força de Coriolis atua no sentido angular do vento, onde os ventos convergem para a direita, no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul. Na ausência desta força, os ventos convergiriam para o norte ou para o sul (De Nevers, 2000).

O comportamento do vento, reunindo dados de velocidade e direção, é representado pela rosa dos ventos, apresentando os setores preferenciais de predominância do campo do vento, indicando de onde ele está soprando, conforme ilustra a Figura 4.

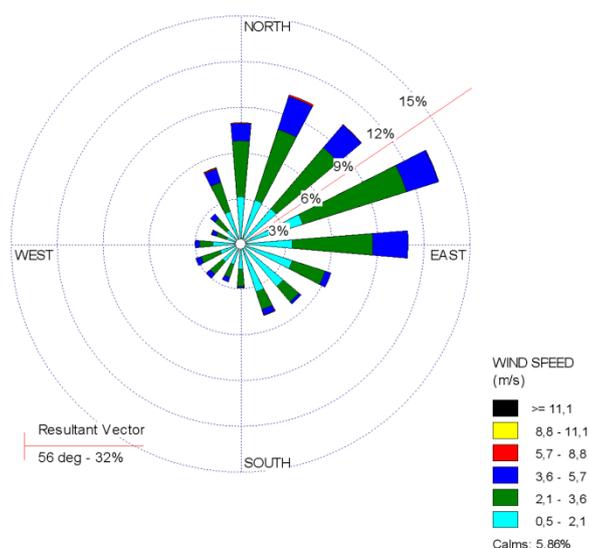


Figura 4 – Rosa dos ventos para Maringá no ano de 2009

A direção e a velocidade do vento afetam o transporte dos poluentes e direcionam os contaminantes industriais, urbanos e marinhos contribuindo para a corrosão atmosférica.

#### 3.2.2 Turbulência

A turbulência corresponde ao movimento irregular do vento, caracterizando giros em todas as direções e, conseqüentemente, dispersando os poluentes. A turbulência pode ser gerada mecanicamente, devido à rugosidade da superfície, ou

termicamente, pelo aquecimento e resfriamento do ar próximo à superfície (Turner, 1994).

### 3.2.3 *Pressão e umidade atmosféricas*

A pressão atmosférica se refere ao peso de uma coluna de ar sobre determinada área da superfície terrestre. A influência da pressão atmosférica na dispersão dos poluentes pode ser avaliada sob dois prismas: ao considerar o gradiente de pressão e a pressão atmosférica local.

O gradiente de pressão entre duas regiões acarreta no descolamento do ar, causando vento e conseqüentemente dispersão os poluentes (Lyra, 2008, apud Ahrens, 1993). A pressão atmosférica local influencia a dispersão dos poluentes, pois, regiões de altas pressões inibem processos de convecção na atmosfera, inibindo também a formação de nuvens precipitáveis, com o inverso ocorrendo para regiões de baixa pressão (CPEA, 2012). A relação entre pressão atmosférica e dispersão dos poluentes se dá, pois, massas de ar de alta pressão são compostas frequentemente por ar frio e pesado aprisionando os poluentes enquanto que massas de ar de baixa pressão são mais quentes e mais leves contribuindo para a dispersão vertical dos poluentes ( Lyra, 2008, apud Ahrens, 1993).

A umidade do ar corresponde à concentração de vapor d'água contida na atmosfera, sendo um parâmetro que varia com o espaço e tempo. Sua determinação é importante, pois, afeta o balanço de radiação, o comportamento da transferência de calor latente, originam os fenômenos de condensação e sublimação e condiciona o conforto climático (Vide, 1999). A umidade relativa indica o grau de saturação da água no ar (%), sendo fortemente influenciada pela temperatura. Nas cidades a umidade relativa é menor quando comparada com o campo, devido ao incremento de temperatura urbana (Barbirato et al., 2007). A umidade relativa aumenta a massa e densidade das partículas, aumentando sua velocidade de queda (Lyra, 2008).

### 3.2.4 *Estabilidade atmosférica*

A estabilidade atmosférica refere-se à capacidade da atmosfera em resistir ou intensificar os movimentos verticais, sendo definida como estável, instável ou neutra, respectivamente, quando, resiste, intensifica ou é indiferente aos movimentos verticais (Menezes, 2006).

Em relação à dispersão atmosférica tem-se que (Menezes, 2006 *apud* Seinfeld e Spyros, 1998):

- Na condição estável, os movimentos verticais estão inibidos e a dispersão dos poluentes é prejudicada, pois, neste caso, as plumas se apresentam confinadas com pouca abertura lateral ou vertical;
- na condição instável, os movimentos verticais são intensificados e neste caso as plumas de poluição se expandem com grande abertura lateral e vertical, favorecendo a dispersão dos poluentes; e
- na condição neutra os movimentos não são favorecidos nem enfraquecidos, representando uma condição de transição entre as outras duas. No entanto, esta condição geralmente favorece a dispersão.

A estabilidade ou instabilidade da atmosfera e a dispersão vertical dos poluentes está relacionada com o perfil térmico de temperatura na atmosfera, acarretando no aumento ou diminuição de sua capacidade dispersiva. Na Figura 5 são ilustrados os possíveis comportamentos do perfil térmico na atmosfera (Braga et al., 2005).

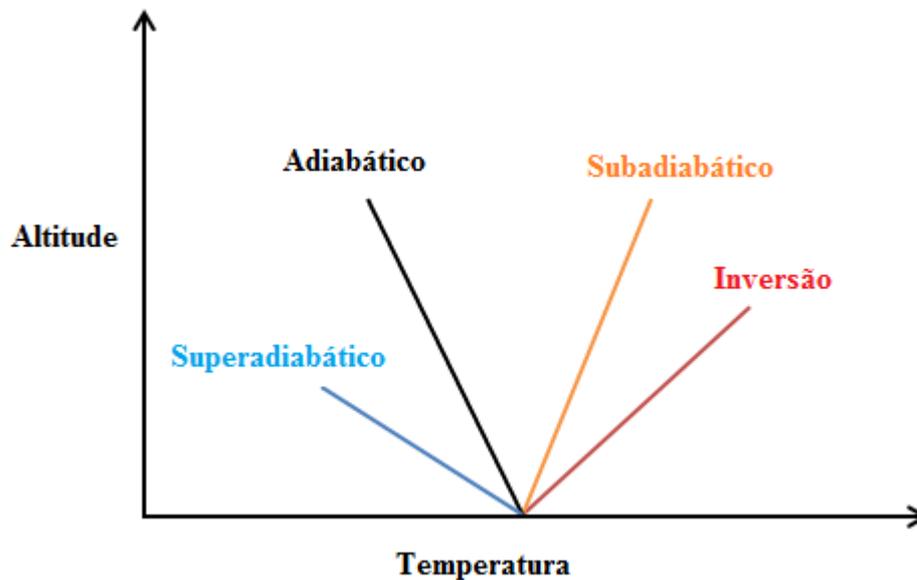


Figura 5 – Perfil térmico da atmosfera

A atmosfera pode apresentar:

- Gradiente de temperatura adiabático seco;
- Gradiente de temperatura superadiabático; e
- Gradiente de temperatura subadiabático.

### Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

em que, no gradiente de temperatura adiabático seco, a temperatura da atmosfera diminui com a altitude em uma razão de  $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , gradiente este apresentado para a troposfera (ilustrada na Figura 2). Se a temperatura diminuir mais lentamente com a altitude, trata-se de um gradiente subadiabático, caso contrário superadiabático.

No gradiente de temperatura superadiabático, a atmosfera é instável e a dispersão é favorecida e, no subadiabático, é estável, desfavorecendo o transporte dos poluentes. A condição mais crítica da atmosfera é quando a temperatura aumenta com a altitude, em uma condição denominada de inversão térmica.

Como apresentado, a dispersão dos poluentes está relacionada com a classe de estabilidade da atmosfera. Segundo Turner (1994), Pasquill em 1961 introduziu um método para estimar a classe de estabilidade incorporando considerações de turbulência mecânica e turbulência térmica. As principais características deste método estão apresentadas no Quadro 16.

Quadro 16 – Categorias de estabilidade de Pasquill

Velocidade do vento (m/s)	Dia			Noite	
	Insolação Forte	Insolação Moderada	Insolação Fraca	Cobertura de nuvens $> 4/8$	Cobertura de nuvens $< 3/8$
$< 2$	A	A – B	B	-	-
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	D	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
$> 6$	C	D	D	D	D

A – fortemente instável

C – fracamente instável

E – fracamente estável

fonte : TURNER (1994).

B – moderadamente instável

D – neutra

F – moderadamente estável

Os níveis de insolação forte, moderada e fraca são dados em função da radiação solar (I), sendo:

- Insolação forte:  $I > 700\text{ (W/m}^2\text{)}$ ;
- insolação moderada:  $350 \leq I \leq 700\text{ (W/m}^2\text{)}$ ; e
- insolação fraca:  $I < 350\text{ (W/m}^2\text{)}$ .

A radiação solar é a principal forma de propagação de energia do sistema superfície-atmosfera. Ela pode ser refletida, absorvida ou transmitida por outro corpo qualquer, de acordo com suas propriedades físicas. Dentre estas propriedades se destaca o albedo que caracteriza a capacidade dos corpos em refletir a radiação solar que sobre eles incide, sendo comumente dado em porcentagem, conforme ilustrado no Quadro 17.

O albedo varia de acordo com a cor e constituição do corpo, sendo máximo nos corpos brancos e mínimo nos corpos pretos (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

Quadro 17 – Albedo para algumas superfícies

Tipo de superfície	Albedo (%)
Solo negro e seco	14
Nuvens cumuliformes	70-90
Neve recém-caída	80
Cidades	14-18

Fonte: Mendonça e Danni-Oliveira (2007).

Dessa forma, as classes de estabilidade de Pasquill podem ser determinadas ao relacionar velocidade do vento com radiação solar durante o dia, e velocidade do vento com cobertura de nuvens durante a noite. Neste caso, é considerada noite o período de uma hora antes do por do sol até uma hora após o nascer do sol (Turner, 1994). Assim, na impossibilidade da determinação classe de estabilidade atmosférica, esta pode ser estimada pelo método proposto por Pasquill (Justin e Rashid, 2006; Franco, 2010). A determinação da estabilidade atmosférica é possível por sondagens adequadas do perfil do perfil de temperatura do ar (CNEN, 1989).

A estabilidade atmosférica pode também ser estimada por meio do comprimento de Monin-Obukhov, que exprime a relação entre o fluxo turbulento de origem mecânica e convectiva, e é usado, como substituto às classes de Pasquill, para avaliar o grau de estabilidade atmosférica, representando fisicamente a altura na qual a turbulência mecânica se iguala à térmica (Moreira et al., 2008).

Em 1954, foi proposta a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov para a camada limite superficial, em que a turbulência, influenciada por forças mecânicas de arraste e fluxo de calor vertical, é dada em função dos parâmetros velocidade de fricção ( $u_*$ ) e comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ), definidos pelas Equações 9 e 10 (Bache e Johnstone, 1992).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (9)$$

$$L = \frac{-\rho C_p T_0 u_*^3}{K_v g H} \quad (10)$$

em que:

$u_*$ : velocidade de fricção;

$\tau_0$ : tensão de cisalhamento;

## Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

$\rho$ : massa específica;

$C_p$ : calor específico do ar a pressão constante;

$T_0$ : temperatura da superfície do solo;

$K_v$ : constante de Von Karman;

$g$ : aceleração gravitacional;

$H$ : fluxo de calor vertical; e

$L$ : comprimento de Monin-Obukhov.

Com base nos valores de  $L$  é possível caracterizar a estabilidade atmosférica, conforme ilustra o Quadro 18 (Boçon, 1998 *apud* Seinfeld, 1986). O comprimento de Monin-Obukhov descreve a altura da atmosfera em que as forças turbulentas mecânicas dominam as forças térmicas (Stull, 1988).

Quadro 18 – Relação entre comprimento de Monin-Obukhov e estabilidade

Estabilidade	$L$ (m)
Muito instável - A	$-100 < L < 0$
Instável - B, C	$-10^5 \leq L \leq -100$
Neutra - D	$ L  > 10^5$ (módulo)
Estável - E	$10 \leq L \leq 10^5$
Muito estável - F	$0 < L < 10$

### 3.2.5 Altura da Camada Limite Atmosférica

A altura da camada limite atmosférica (CLA) corresponde à altura da camada adjacente ao solo onde substâncias emitidas, tais como poluentes, tornam-se dispersos verticalmente por turbulência convectiva em uma escala de tempo de aproximadamente uma hora (Seibert et al., 2000), sendo que a espessura varia com o tempo e com o espaço (Stull, 1988).

Em alturas superiores à altura da CLA, a turbulência é praticamente insignificante, o que torna o escoamento praticamente laminar com baixa velocidade vertical, tornando o transporte das substâncias muito lento (Boçon, 1998). Dessa forma, a altura da camada limite atmosférica fixa o limite máximo para a dispersão dos poluentes atmosféricos (De Nevers, 2000) e, portanto, a estimação ou determinação da altura da camada de mistura é fundamental para a execução de modelos de dispersão atmosférica.

## Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

As observações da CLA podem ser feitas com balões meteorológicos, aviões, torres especiais micrometeorológicas, que podem atingir 200-300 metros de altura, equipadas com sensores capazes de medir variáveis turbulentas que regem a dinâmica da camada, ou ainda com sistemas de sensoriamento remoto, capazes de realizar observações de toda a camada e permitir sua visualização. Outra forma de avaliar a CLA é por meio da modelagem, representando matematicamente as suas características e comportamento físico.

No trabalho de Seibert et al., (2000), é realizada uma revisão e comparação entre os métodos operacionais para a determinação da altura da camada de mistura, sendo apresentados resumidamente no Quadro 19.

Quadro 19 – Métodos para a determinação da altura da camada de mistura

Método	Vantagens	Desvantagens
Radiossondas	Utilizados em estudos climatológicos; Adequado para uso operacional, pois as medidas são transmitidas por redes de comunicação em tempo curto; Compatibilidade com a atmosfera livre.	São realizadas de 2 – 4 sondagens diárias; Perfil do vento a baixas alturas podem acarretar problemas de rastreamento.
Balão amarrado	Velocidade de ascensão pode ser escolhida de acordo com a resolução vertical; É possível medir concentrações de gás traço e turbulência.	Limitado por campanhas de campo; Dificuldade na sincronização da medida do perfil; Faixa de medida limitada, geralmente 500 metros; Não é possível utilizá-lo em altas velocidades do vento ou fortes convecções.
Mastro	Possibilidade de instalação de grande número de sensores; Operação contínua; Boa resolução nas camadas mais baixas.	Custos operacionais e de instalação são altos; Faixa limitada: de 50 a 300 metros; Alta resolução vertical requer um alto número de sensores.
Aeronave	Possibilidade de uso de diferentes sensores; Prevê informação espacial, adequado para estudos em meso-escala.	Alto custo, apenas para campanha de campo; Operação limitada em horas do dia; Restrição à alturas de voo, devido à segurança.
Radar Doppler/ Perfil de vento	Operação baseada em aeronave; Alternativamente RHI/OOI-Scan para estudos em 3D; Taxa alta de amostragem e operação contínua.	Faixa baixa, geralmente não ultrapassa 200 metros; Resolução vertical limitada (50 – 200 metros); Caro; Radares do tempo não trabalham bem em atmosfera limpa; Interpretação nem sempre simples.
Lidar	Possível operação baseada em aeronave; Alternativamente RHI/OOI-Scan para estudos em 3D; Alta taxa de amostragem; Retorno dos sinais originais	Caro; As vezes não é possível utilizá-lo por questões de segurança; Necessário traçador; Faixa de resolução limitada; Interpretação às vezes ambígua.

Método	Vantagens	Desvantagens
	diretamente de poluentes.	
Sodar	Relativamente simples, não é muito caro; Resolução temporal e vertical alta.	Faixa de resolução limitada (500 –1000 metros); Sensibilidade a ruído ambiental; Contaminação de ruído no ambiente; Interpretação requer experiência, algumas vezes é ambíguo.

Fonte: SEIBERT *et al.* (2000)

Assim, como visto no Quadro 19, a altura da camada limite pode ser obtida diretamente por equipamentos especiais ou estimada, neste último caso, por um conjunto de parâmetros secundários não triviais. Em ambos os casos, a dependência de equipamentos e metodologias de monitoramento, associada ao alto custo, pode tornar esta medição ou estimativa inviável para algumas aplicações, principalmente quando o monitoramento é contínuo (Malheiros, 2004).

Alguns trabalhos no Brasil foram desenvolvidos dando ênfase à estimativa deste parâmetro, tais como:

- Melo e Mitkiewicz (2002) – Dispersão atmosférica de poluentes em um complexo industrial siderúrgico; e
- Malheiros (2004) – Avaliação de modelos para a altura da camada limite atmosférica urbana e seus efeitos sobre a qualidade do ar; e

Em uma das etapas do trabalho de Malheiros (2004) é estimada a altura da camada limite para a cidade de Curitiba por um método simplificado, que estima a altura para dois períodos: diurno (camada convectiva) e noturno (camada estável noturna). No primeiro período, aplicou-se o método da parcela, em que se compara o valor da temperatura potencial do ar na superfície com os primeiros 5.000 metros da atmosfera.

Existindo um segmento do perfil em que temperatura seja inferior à temperatura da superfície, uma parcela de ar ao nível da superfície eleva-se adiabaticamente até encontrar uma região em que a temperatura seja maior do que a temperatura da parcela. Se a temperatura superficial for inferior a todo o perfil, isto indica uma atmosfera estável e o método não se aplica. Para esta etapa são necessários dados de radiossondagens e temperatura do ar próximo à superfície. Para o período noturno o autor utilizou um modelo empírico que relaciona a altura da camada limite estável ( $h_e$ ) com a velocidade do vento a dez metros de altura ( $u_{10}$ ), dada pela Equação 11. Esta

## Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

equação foi discutida em Lena e Desiato (1999), sendo considerada uma equação simples e apropriada para a estimativa da altura da camada limite estável noturna.

$$h_e = 125u_{10} \quad (11)$$

Os valores médios mensais obtidos para as alturas máximas da camada limite convectiva para a cidade de Curitiba, em um período compreendido entre 15/03/01 a 05/02/2003, estão apresentados no Quadro 20.

Quadro 20 – Alturas médias mensais máximas da CLC

Mês	Altura média máxima	Dias analisados*
Janeiro	1503	38
Fevereiro	1760	05
Março	1451	13
Abril	1273	23
Mai	967	24
Junho	996	39
Julho	1044	41
Agosto	1304	49
Setembro	1123	50
Outubro	1232	56
Novembro	1351	53
Dezembro	1431	53

Fonte: MALHEIROS (2004).

\* Os dias analisados correspondem a dias em que foi possível aplicar o método da parcela.

No trabalho realizado por Melo e Mitkiewicz (2002), a altura da camada de mistura foi estimada correlacionando a altura de mistura com a variação da temperatura do ar ambiente, próximo à superfície. Para isto, foram tomadas duas alturas associadas a duas temperaturas e, por interpolação linear, foram determinadas as alturas de mistura intermediárias. Uma das alturas foi estimada a partir de um episódio acidental, considerando-se uma altura de 250 metros para uma temperatura de 16° C. A segunda altura foi obtida de uma pesquisa bibliográfica, considerando uma altura de 1500 metros para uma temperatura de 30° C. A partir destes dados, realizaram uma correlação linear entre a temperatura e a altura, e, dessa forma, este último parâmetro foi estimado para os demais dados de temperatura.

Apesar da importância da disponibilidade de dados da altura de mistura no estudo da dispersão atmosférica, existem muitas dificuldades associadas à sua determinação ou estimação, principalmente para cidades brasileiras, onde não existe um controle de parâmetros atmosféricos verticais, tais como o perfil de temperatura.

### 3.3 Modelagem da dispersão atmosférica de poluentes

Os modelos matemáticos de dispersão de poluentes possibilitam estabelecer uma relação entre níveis de emissão dos poluentes na fonte, com as concentrações nos receptores, bem como efetuar previsões de impactos ambientais e determinação de pontos críticos de poluição (Melo e Mitkiewicz, 2002).

Um modelo de dispersão corresponde à descrição matemática do processo de transporte e dispersão dos poluentes que é quantificado em função dos parâmetros das fontes de emissão e dos parâmetros meteorológicos durante um período de tempo específico. O modelo de dispersão atmosférica envolve a resolução repetitiva de equações que contêm a descrição matemática da atmosfera, por meio de um computador e são capazes de (Moreira e Tirabassi, 2004):

- Interpretar os dados experimentais;
- Controlar em tempo real e/ou analisar a qualidade do ar;
- Administrar as liberações acidentais e avaliar as áreas de risco;
- Identificar as fontes poluidoras;
- Avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora; e
- Administrar e controlar o território.

Os modelos de dispersão atmosférica variam em grau de complexidade e podem ser classificados em duas classes principais: Eulerianos e Lagrangianos (Morales 2001), Tadano et al. (2010); Arbage et al., 2006). Nos modelos Eulerianos, são usadas soluções da equação difusão-advecção, descrevendo a variação local da concentração em um sistema de referência fixo em relação à Terra e nos Lagrangianos são simuladas trajetórias de partículas de poluentes em um sistema de referência que se desloca de acordo com o movimento das partículas (Tadano et al., 2010; Arbage et al., 2006). Os modelos Gaussianos são sub-classes dos modelos Lagrangianos (Tadano et al., 2010; De Nevers, 2000) e são mais limitados, no entanto adotados em maior escala, além de serem bem compreendidos e de fácil aplicabilidade. Nos modelos Gaussianos, o perfil da distribuição espacial da concentração dos poluentes emitidos para a atmosfera segue uma distribuição normal probabilística com uma tendência da concentração dos poluentes, quando representada, em forma de um sino, conhecida como curva de Gauss (Menezes, 2006), conforme ilustra a Figura 6.

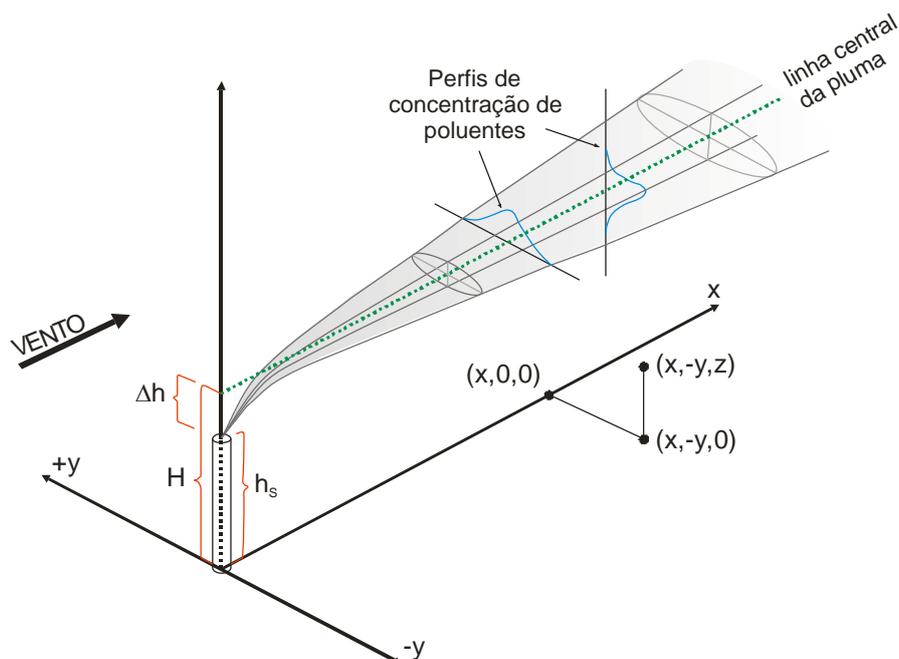


Figura 6 – Perfis de concentração do modelo Gaussiano

As equações de concentração do modelo de pluma Gaussiano são soluções analíticas da equação de conservação de massa de uma espécie química, que governa o transporte de massa de um contaminante na atmosfera (Abboud et al., 2004).

A equação diferencial que descreve o transporte dos poluentes em meio atmosférico é obtida por meio do conceito de conservação de massa, sendo expressa por (Fischer et al., 1979).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + R(C, t) + S(x, y, z, t) \quad (12)$$

em que,

- C: concentração do poluente;
- u: componente da velocidade na direção x;
- v: componente da velocidade na direção y;
- w: componente da velocidade na direção z;
- D: coeficiente de difusão molecular da espécie de poluente;
- R: taxa de geração de determinada espécie através de reações químicas;
- S: taxa de geração/extinção de determinada espécie no interior do volume de controle em um determinado ponto x no intervalo de tempo t;
- x, y, z: distância ao longo dos respectivos eixos coordenados;
- t: tempo.

O primeiro termo da esquerda da Equação 12 representa a variação da concentração em relação ao tempo e os demais termos da esquerda representam a quantidade de poluente que entra/sai por um volume de controle por deslocamento de massa nas três direções x, y e z em razão da velocidade. A primeira, segunda e terceira parcela da direita da Equação 12 representam respectivamente a contribuição dos processos difusivos moleculares, as reações químicas que ocorrem dentro do volume de controle e uma fonte interna de poluentes dentro do volume de controle que pode ser função de processos de deposição (Fischer et al.(1979) citado por Barbon e Gomes (2010)).

Trabalhos relatando o emprego de modelos computacionais no estudo da dispersão dos poluentes em meio atmosférico são verificados, como por exemplo: Melo e Mitkiewicz (2002), Lyra (2008), Lima (2007), Barbon e Gomes (2010), os quais serão descritos resumidamente a seguir.

Melo e Mitkiewicz (2002) usaram o ISCST3 para realizar um estudo de dispersão atmosférica do material particulado total proveniente de fontes pontuais e de área localizadas na região de influência do complexo siderúrgico das Usinas Siderúrgicas – USIMINAS, em Ipatinga-MG.

Lyra (2008), por meio do ISCST3, realizou um trabalho na Região Metropolitana de Salvador com o objetivo de propor uma metodologia de elaboração de projeto de rede de monitoramento da qualidade do ar que pode ser aplicado a outras regiões metropolitanas do país.

Lima (2007) usou o modelo de dispersão CAL3QHC para simular a dispersão de CO, proveniente de fontes móveis presentes em três regiões da cidade de Maringá-PR, uma rotatória implantada na cidade em substituição a um semáforo, um trecho urbano da BR-376 com suas principais interseções e a região central da cidade.

Barbon e Gomes (2010) realizaram um estudo de dispersão dos poluentes provenientes das principais indústrias do município de Araucária por meio do modelo de dispersão atmosférica AERMOD.

Para os modelos citados tem-se que:

O ISCST3 (Industrial Source Complex Short-Term, versão 3) é um modelo Gaussiano em estado estacionário que estima a concentração dos poluentes em uma malha de receptores. No modelo, as fontes de emissão podem ser do tipo ponto, área,

linear e volume e a modelagem pode considerar o terreno plano ou elevado, bem como uma área urbana ou rural. A estabilidade atmosférica no modelo é estimada com base no método de Pasquill. E, para a execução do modelo são necessários parâmetros físicos e operacionais das fontes emissoras; arquivo da dados meteorológicos e a definição da malha de receptores, onde é estimada a concentração do poluente (EPA, 1995b).

O CAL3QHC é um modelo de dispersão para fontes lineares com a capacidade de representar os veículos em movimento e parados nas filas formadas pela presença dos semáforos. Para a estimativa nos dois modos de operação do motor incorpora um modelo de dispersão de fontes linear CALINE3 e um modelo de tráfego baseado no Highway Capacity Manual (HCM) de 1985 para fazer a estimativa de comprimento de fila (FHWA, 2006).

O modelo de dispersão atmosférica Aermód é um modelo recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para fins regulatórios e considerado substituto do ISCST3. O modelo de dispersão atmosférica Aermód é um modelo em estado estacionário, ou seja, as condições meteorológicas não se alteram com o tempo, permanecendo constantes no período de transporte da fonte até o receptor (Turner, 1994). Esta condição é facilmente satisfeita se o receptor está próximo à fonte emissora. Entretanto, para condições de ventos fracos e receptores localizados a longas distâncias esta situação não ocorre.

O modelo é aplicável para áreas urbanas e rurais, terreno plano e complexo e fontes múltiplas (incluindo fontes pontuais, área, linha e volume) (Cimorelli et al., 2004).

Na camada limite estável, o modelo assume uma distribuição da concentração Gaussiana, tanto na horizontal como na vertical, sendo que, na camada limite convectiva, a distribuição horizontal é Gaussiana e na vertical é descrita como uma função de densidade probabilística bi-Gaussiana (Cimorelli et al., 2004). O comportamento da distribuição da concentração na camada limite convectiva foi demonstrada por Willis e Deardorff (1981) e Briggs (1993). Uma das principais melhorias que o Aermód traz para a modelagem da dispersão é sua capacidade de caracterizar a camada limite atmosférica, construindo perfis verticais de variáveis meteorológicas com base em medições e extrapolações de medições usando relações de similaridade (Cimorelli et al., 2004). O sistema de modelagem Aermód consiste de dois pré-

processadores, AERMET e AERMAP e o modelo de dispersão atmosférica, conforme ilustrado na Figura 7.

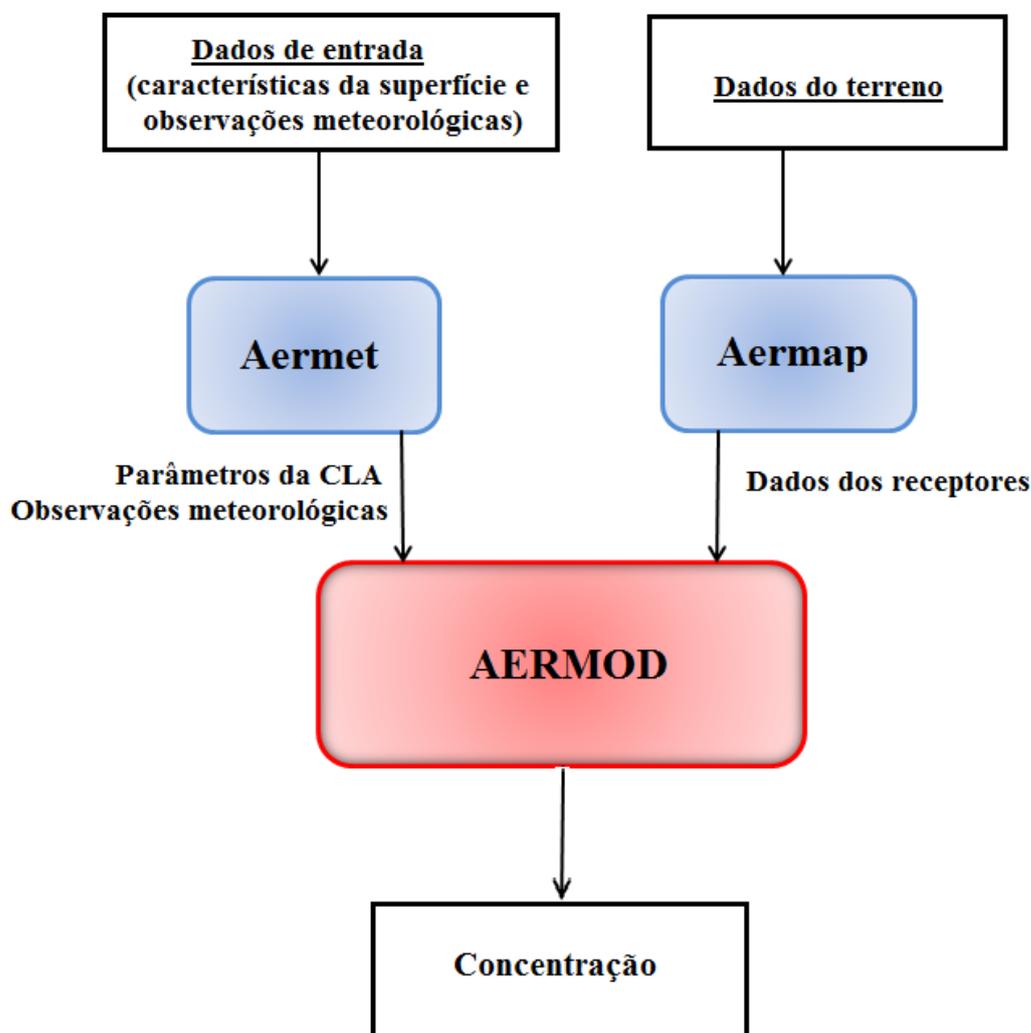


Figura 7 – Sistema de modelagem do Aermod

Os dados de entrada do Aermet são características da superfície na forma de albedo, rugosidade da superfície e razão de Bowen, mais observações meteorológicas como cobertura de nuvens, velocidade do vento, direção do vento e temperatura. O albedo corresponde à medida de reflectividade da superfície (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007) e a razão de Bowen é definida pelo quociente entre o fluxo vertical de calor sensível e o fluxo vertical de calor latente (Sá et al., 1988). A partir destes dados o Aermet estima os parâmetros da camada limite planetária, os quais são passados para a interface interna do Aermod, que caracteriza a camada limite atmosférica, construindo perfis das variáveis meteorológicas velocidade e direção do vento, turbulência, temperatura e gradiente de temperatura (Cimorelli et al., 2004).

### Capítulo 3 – Dispersão Atmosférica

Para a caracterização da camada limite atmosférica, o Aermet fornece ao Aermod, os parâmetros: comprimento de Monin-Obukhov, velocidade de fricção da superfície, comprimento de rugosidade da superfície, fluxo de calor da superfície, velocidade de escala convectiva, altura de mistura mecânica e convectiva, além de medições meteorológicas de vento, temperatura e turbulência (Cimorelli et al., 2004).

No Aermod, a altura de mistura é caracterizada tanto para a camada limite convectiva (CLC) quanto para a camada limite estável (CLE), sendo que, para a primeira camada a altura de mistura depende dos processos convectivos e mecânicos, sendo definida como a máxima altura entre a convectiva e a mecânica, e para a CLE a altura depende exclusivamente do processo mecânico. Se os dados de altura de mistura não estão disponíveis, o modelo estima a altura da camada limite convectiva por meio de um balanço de energia, dependendo da temperatura potencial de manhã e do fluxo de calor superficial, enquanto que a altura de mistura mecânica é estimada em função da velocidade de fricção, comprimento de Monin-Obukhov e força de Coriolis (Cimorelli et al., 2004).

O pré-processador de terreno Aermap com base em dados do terreno selecionado a partir do mapeamento de elevação digital do terreno (DEM – Digital Elevation Model) estima a altura de influencia do terreno para cada receptor e também cria a rede de receptores que é passada para o Aermod, sendo que, para cada receptor, o Aermap passa informações de localização, altura acima do nível do mar e escala específica de altura do terreno (Cimorelli et al., 2004).

## 4 Metodologia

Para atender aos principais objetivos descritos no trabalho que são: estimar a qualidade do ar na região central de Maringá-PR, realizar um estudo da variação da sazonalidade na dispersão dos poluentes e avaliar a agressividade do meio a redes elétricas de transmissão, torna-se necessário caracterizar a região de estudo. A caracterização se dá quanto aos parâmetros: localização da região de interesse, apresentada no tópico cidade de Maringá; caracterização do terreno; das condições meteorológicas locais; das fontes emissoras; e dos receptores. Os parâmetros mencionados serão definidos ou obtidos por metodologias descritas no decorrer dos tópicos 4.1 a 4.6. A metodologia aplicada poderia ser estendida a outras regiões do país, sendo que no presente trabalho foi obtida para um estudo de caso – Maringá, que é uma cidade em desenvolvimento, com fontes caracterizadas com potencial poluidor e que não apresenta dados de medidas de poluentes. Esquemáticamente a metodologia discutida está apresentada no fluxograma ilustrado na Figura 8.



Figura 8 – Fluxograma da Metodologia Aplicada para Caracterizar a Região de Estudo

#### 4.1 Cidade de Maringá

A cidade de Maringá localiza-se a noroeste do Estado do Paraná (Figura 9), a 424 km da capital, Curitiba, nas coordenadas 23°25'00" Sul e 51°57'00" Oeste, sendo cortada pela linha do trópico de capricórnio. Sua área é de 488 km<sup>2</sup> com população projetada para 2011 em 362.329 habitantes (IBGE, 2012), com grau de urbanização em 2010 de 98,20%. A cidade apresenta uma altitude entre 500 e 600 metros em relação ao nível do mar.

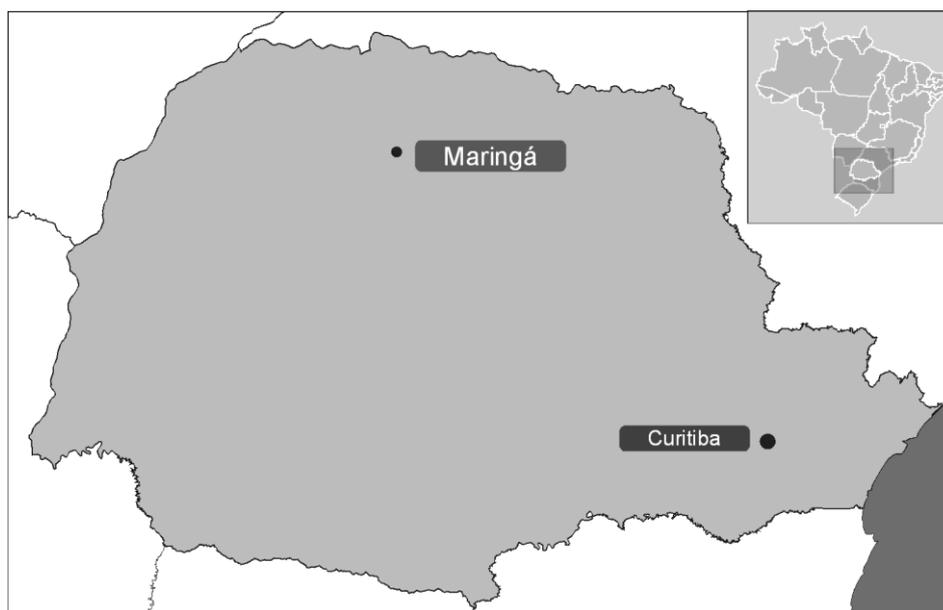


Figura 9 – Localização de Maringá

#### 4.2 Caracterização das fontes fixas

Em relação à atividade empresarial, Maringá apresenta 375 empresas cadastradas na Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP, 2011), na Tabela 1 é apresentada a distribuição destas empresas em função do número de funcionários.

Tabela 1 – Número de empresas em função de número de funcionários

Número de empresas	Número de funcionários
134	0-19
195	20-99
37	100-499
5	500-999
2	1000-1499
2	1500-3000

Fonte: FIEP (2011)

## Capítulo 4 – Metodologia

Das empresas cadastradas não estão disponíveis dados que ilustrem quantas são caracterizadas como potencial poluidor em termos de poluição atmosférica e, poucos dados de emissão foram disponibilizados, sendo que, apenas 13 fontes fixas foram caracterizadas quanto às emissões atmosféricas.

As características físicas e operacionais das fontes emissoras inventariadas na cidade estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3. Os parâmetros considerados e necessários à simulação são: altura da chaminé ( $H_c$ ), diâmetro interno no topo da chaminé ( $D_i$ ), velocidade de saída dos gases ( $V_s$ ), temperatura de saída dos gases ( $T_s$ ) e taxa de emissão ( $E$ ) dos poluentes CO, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>.

Tabela 2 – Parâmetros físicos e operacionais das fontes emissoras

Fonte	Combustível	H <sub>c</sub> (m)	D <sub>i</sub> (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	T <sub>s</sub> (°C)
A1	ÓleoBPF	8,4	0,60	3,50	162,1
A2	Óleo BPF	10	0,45	6,2	182,9
A3	Óleo BPF	8,4	0,60	2,51	162,1
A4	Óleo BPF	10	0,49	4	141,3
B	GLP	10	0,25	15	200
C	Bagaço de cana de açúcar	25	2,26	13	176
D1	Óleo combustível tipo A	11	0,58 <sup>(1)</sup>	9,47	660
D2	Óleo combustível tipo A	11	0,58 <sup>(1)</sup>	10,47	546
E1	Bagaço	19	2,51	17,96	176,5
E2	Bagaço	24	2,51	6,9	171
F1	Bagaço	25	2,26	7,96	167
F2	Lenha de eucalipto	15	1,36 <sup>(2)</sup>	7,38	167
G	Lenha	13	0,90	6,9	167

(1) Diâmetro adaptado com a relação altura/ diâmetro = 19,02.

(2) Diâmetro adaptado com a relação altura/ diâmetro = 11.

Tabela 3 – Taxa de emissão dos poluentes

Fonte	E – SO <sub>x</sub> (kg/h)	E – NO <sub>x</sub> (kg/h)	E - CO (kg/h)
A1	2,330 <sup>(1)</sup>	0,270 <sup>(1)</sup>	0,04
A2	0,011	0,320	0,02
A3	0,076	0,750 <sup>(1)</sup>	0,08
A4	0,047	0,086	0,03
B	0,077	0,390 <sup>(1)</sup>	0,08
C	0,550	4,780	20,86
D1	0,790 <sup>(1)</sup>	0,330 <sup>(1)</sup>	0,68
D2	0,790 <sup>(1)</sup>	0,330 <sup>(1)</sup>	0,91
E1	–	23,980	11,28
E2	–	35,760	33,19
F1	–	7,190	95,76
F2	0,005 <sup>(1)</sup>	0,100 <sup>(1)</sup>	4,37
G	0,038 <sup>(1)</sup>	0,770 <sup>(1)</sup>	20,86

(1) Taxa de emissão com base em fatores de emissão.

Algumas adaptações foram necessárias para apresentação dos parâmetros físicos e operacionais apresentados nas Tabelas 2 e 3, pois, para algumas fontes, não estavam disponíveis os dados diâmetro interno no topo da chaminé e da taxa de emissão dos poluentes. Em relação ao diâmetro da chaminé, foi obtido um fator a partir da relação altura/diâmetro das outras chaminés para estimar os diâmetros indisponíveis.

As taxas de emissão dos poluentes não estavam disponíveis para parte dos dados. Desta forma, para os valores ausentes, os dados foram estimados com base nos fatores de emissão apresentados no documento “*Compilation of Air Pollutants Emission Factors – AP 42*” elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA, 2012) e os valores sugeridos pela CETESB no manual de preenchimento para inventário de emissões das fontes estacionárias do Estado de São Paulo, apresentado em 2009 (CETESB, 2009b). Com base nos fatores de emissão é possível estabelecer uma relação entre a quantidade de poluente emitida e um parâmetro do processo, como consumo do combustível. Na Tabela 4 são apresentados os fatores de emissão usados no trabalho.

Tabela 4 – Fatores de Emissão

Combustível	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Bagaço	0,6 (kg/t)*	-
GLP	2,50 (kg/m <sup>3</sup> )*	0,0125 (kg/m <sup>3</sup> )*
Lenha	0,428 (kg/m <sup>3</sup> )*	0,021 (kg/m <sup>3</sup> )*
Óleo BPF	7,5 (kg/t)**	19 (S) (kg/t)**
Óleo Combustível tipo A	8 (kg/m <sup>3</sup> )*	19,19 (kg/m <sup>3</sup> )*

\*Fatores obtidos da CETESB

\*\* Fatores obtidos do Ap42

A localização e distribuição das fontes fixas emissoras inventariadas na cidade estão representadas na Figura 10.

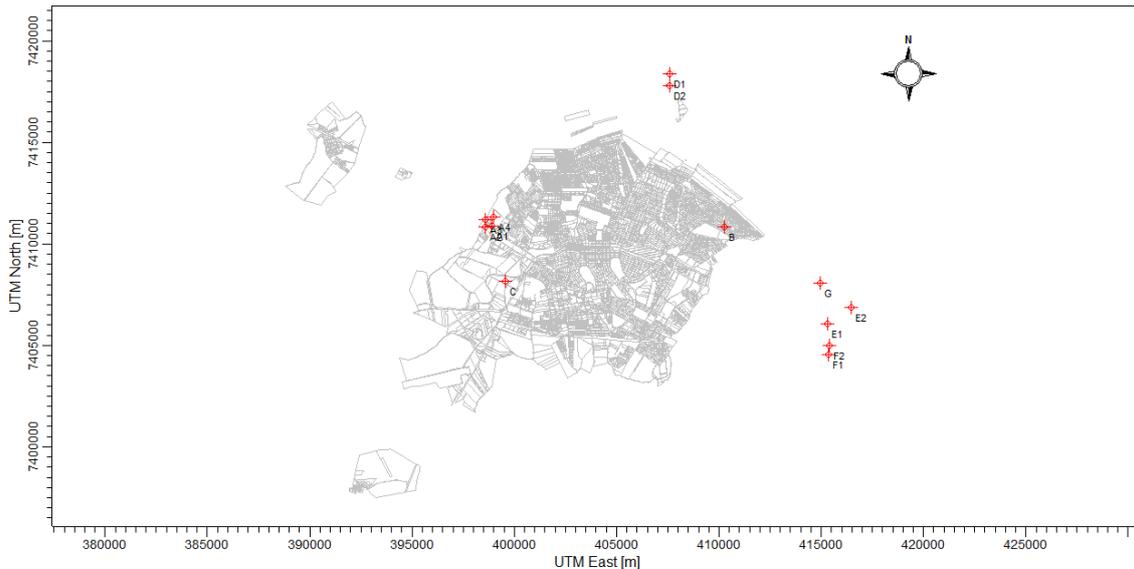


Figura 10 – Distribuição das fontes fixas emissoras

### 4.3 Caracterização das fontes móveis

Em relação às emissões veiculares, verifica-se em Maringá um crescimento expressivo da frota veicular e, conseqüentemente, da poluição atmosférica. Dados apresentados pelo DETRAN (DETRAN, 2011b) e pelo IBGE demonstram que, nos últimos anos, o crescimento da frota veicular na cidade superou o crescimento populacional, fato ilustrado na Figura 11, em que se pode verificar que a relação veículo/habitante teve um aumento nos últimos anos sendo 0,61 em 2008, 0,66 em 2009 e 0,67 em 2010. Assim, Maringá pode ser caracterizada como potencial poluidor, uma preocupação apresentada no plano de controle de poluição veicular do Paraná (PCPV, 2010). O PCPV, publicado em 2010 e elaborado pelo órgão estadual do meio ambiente, apresenta, entre suas conclusões, a necessidade da expansão da rede de monitoramento da qualidade do ar para outros centros urbanos do Estado, entre os quais se tem Maringá.

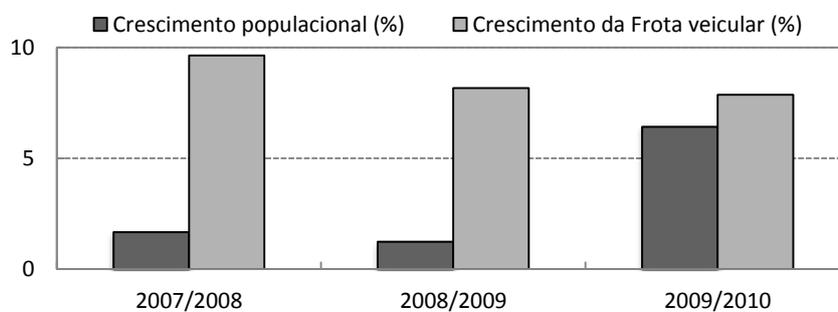
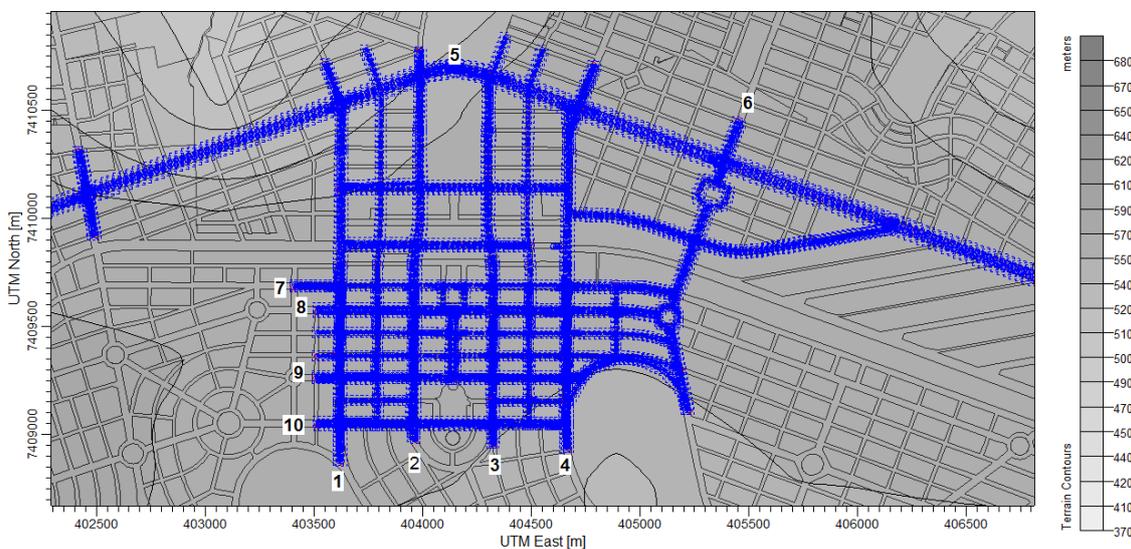


Figura 11 – Crescimento Populacional e de Frota de Veículos

## Capítulo 4 – Metodologia

As fontes móveis consideradas no trabalho representam os veículos leves presentes na região que engloba parte da região central de Maringá e a da Avenida Colombo, com ilustração apresentada na Figura 12.



Vias	
1: Avenida Paraná	6: Avenida Pedro Taques
2: Avenida Duque de Caxias	7: Rua Joubert de Carvalho
3: Avenida Herval	8: Avenida Brasil
4: Avenida São Paulo	9: Avenida XV de Novembro
5: Avenida Colombo	10: Avenida Tiradentes

Figura 12 – Representação das fontes móveis com as principais vias

Como ilustrado na Figura 12, as fontes foram representadas por fontes lineares, a caracterização será apresentada da seguinte maneira: distribuição da frota veicular no ano de 2009 em relação aos combustíveis, caracterização da frota veicular, fatores de emissão e parâmetros do tráfego local.

### 4.3.1 Frota veicular no ano de 2009

A frota de veículos leves em 2009, cadastrada no Detran-PR, com ano de fabricação de 1980 a 2009, com veículos movidos a álcool, gasolina e bi-combustível na cidade de Maringá está apresentada na Tabela 5, com distribuição dos veículos ilustrada na Figura 13.

Tabela 5 – Frota cadastrada no ano de 2009

Combustível	Frota cadastrada
bi-combustível	40.862
álcool	16.169
gasolina	119.101

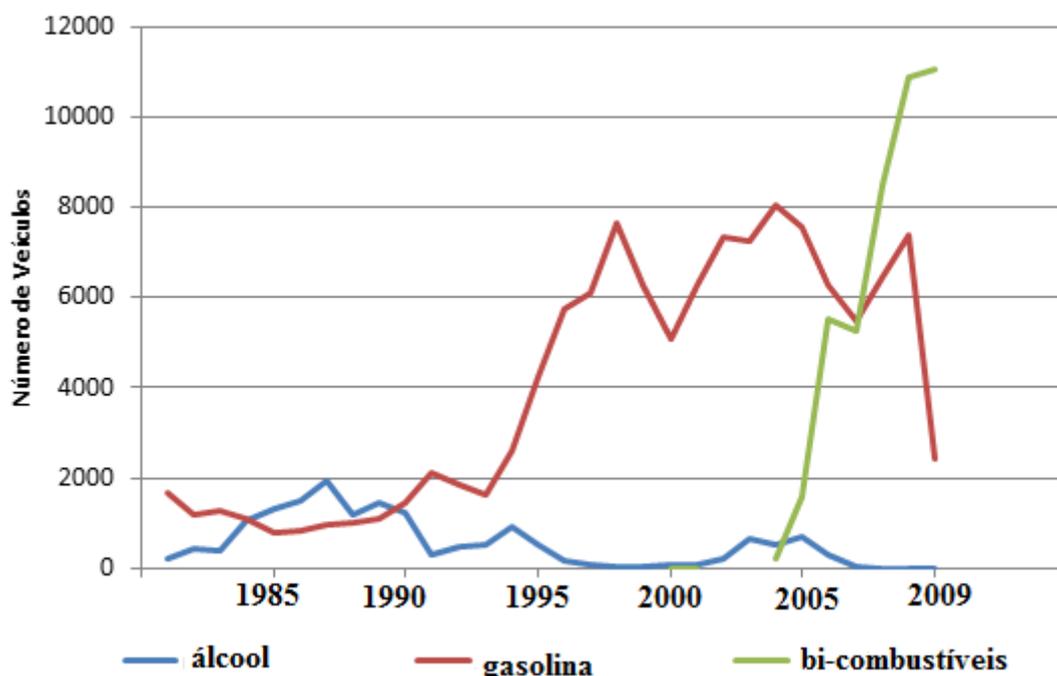


Figura 13 – Distribuição da frota veicular de Maringá no ano de 2009

No ano de 2009, a frota de veículos movida à gasolina foi superior à frota de veículos a álcool, para a maioria dos anos de fabricação. Constatou-se que, não havia veículos a álcool com ano de fabricação em 2008 e 2009 e existiu uma queda no número de veículos movidos a gasolina com ano de 2009 em relação a 2008. A queda relatada para os veículos com ano de fabricação de 2009, em relação a 2008 e a inexistência de veículos movidos a álcool deve-se ao aumento gradativo de veículos bi-combustível na cidade.

A frota veicular considerada para o cálculo do fator de emissão do NOx, apresentada no tópico 4.3.4.1, está apresentada na Tabela 6. Deve-se ter em mente que esta simplificação foi considerada apenas para o cálculo do fator de emissão, pois o fluxo total de veículos na região central da cidade será considerado, independentemente do tipo de combustível utilizado pelos veículos.

Tabela 6 – Frota veicular considerada no estudo

Combustível	Frota cadastrada	Frota considerada
bi-combustível	40.862	0
álcool	16.169	5.517
gasolina	119.101	107.752
Total	176.132	113.269

### 4.3.2 Representação da frota veicular

As fontes emissoras foram representadas por arcos de fluxo livre e arcos de fila, que correspondem respectivamente aos veículos em movimento e aos veículos em fila, parados pela presença dos semáforos. Para a caracterização das fontes lineares, os arcos foram definidos quanto aos aspectos: coordenadas geométricas, que definem o comprimento e a localização do arco, a largura e a altura.

As coordenadas geométricas dos arcos de fluxo livre estão localizadas sobre as interseções e nos pontos inicial e final de cada via, conforme mostrado na Figura 14.

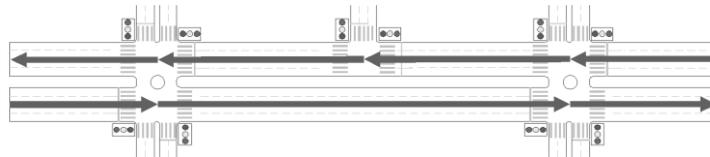


Figura 14 – Arcos de fluxo livre

Para os arcos em fila, as coordenadas geométricas apresentam os pontos inicial e final de maneira diferenciada: o ponto inicial está localizado na linha de retenção do arco, ou seja, a uma distância de três metros do limite da quadra, e como ponto final, um ponto arbitrário, desde que limitado pelo comprimento da quadra (Figura 15). A determinação da coordenada final do arco em fila se dá com a estimativa do comprimento de fila com o auxílio do modelo CAL3QHC (EPA, 1995a).

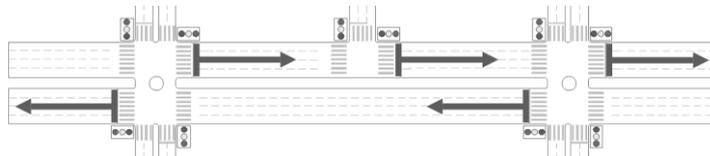


Figura 15 – Arcos de fila

Além do comprimento, os arcos são também caracterizados pela largura e altura. A largura de cada arco de fluxo livre consiste na soma das larguras das faixas de rolamento, adicionados três metros de cada lado, um conceito baseado na forma como o modelo CAL3QHC representa o efeito da turbulência mecânica originada da passagem dos veículos. Para os arcos em fila, considera-se apenas a soma das faixas de rolamento que, no trabalho, adotou-se o valor de 3,2 metros, que é a largura média das faixas de rolamento encontrada na região central. A altura dos arcos foi considerada constante e igual a um metro.

Para o tráfego veicular de 2009, antes da implantação do sistema binário, foram consideradas 398 fontes lineares, sendo 141 arcos de fila e 257 arcos de fluxo livre. As

## Capítulo 4 – Metodologia

distribuições das fontes lineares totais e dos arcos de fila estão apresentadas na Figura 16 e na Figura 17, respectivamente. A representação das fontes lineares na região central na cidade é importante por representar uma região com grande circulação de pessoas e veículos. Os arcos de fila foram considerados devido à importância deste tipo de condição de operação do veículo na formação do monóxido de carbono. A Avenida superior nas Figura 16 é a Avenida Colombo, um trecho urbano da BR-376. Esta avenida foi considerada na simulação pelo fato de representar uma avenida com elevado fluxo de tráfego e que faz interseção com outras avenidas principais que atravessam a região central.

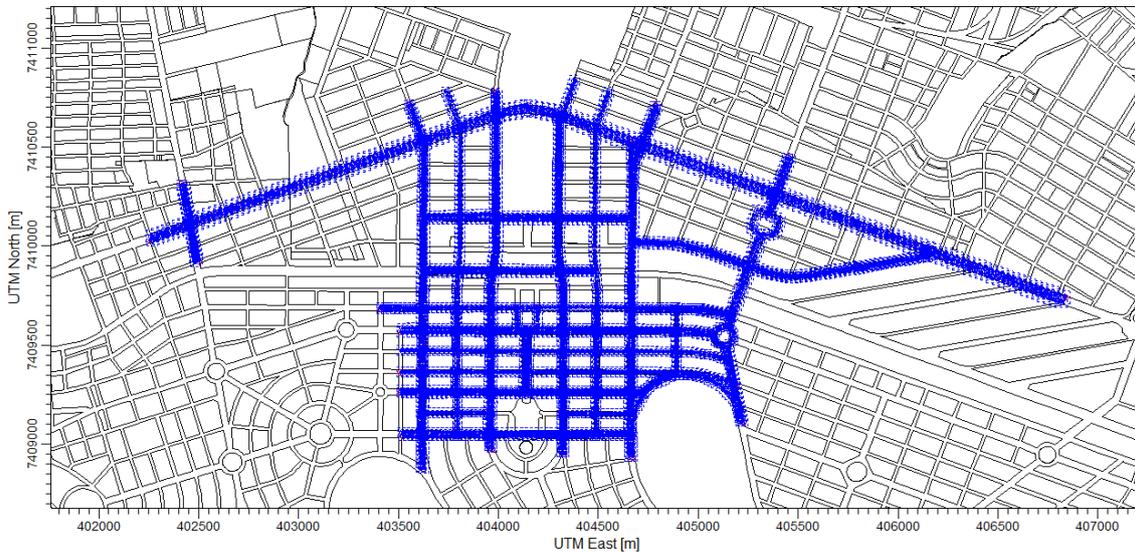


Figura 16 – Fontes lineares representando os arcos totais

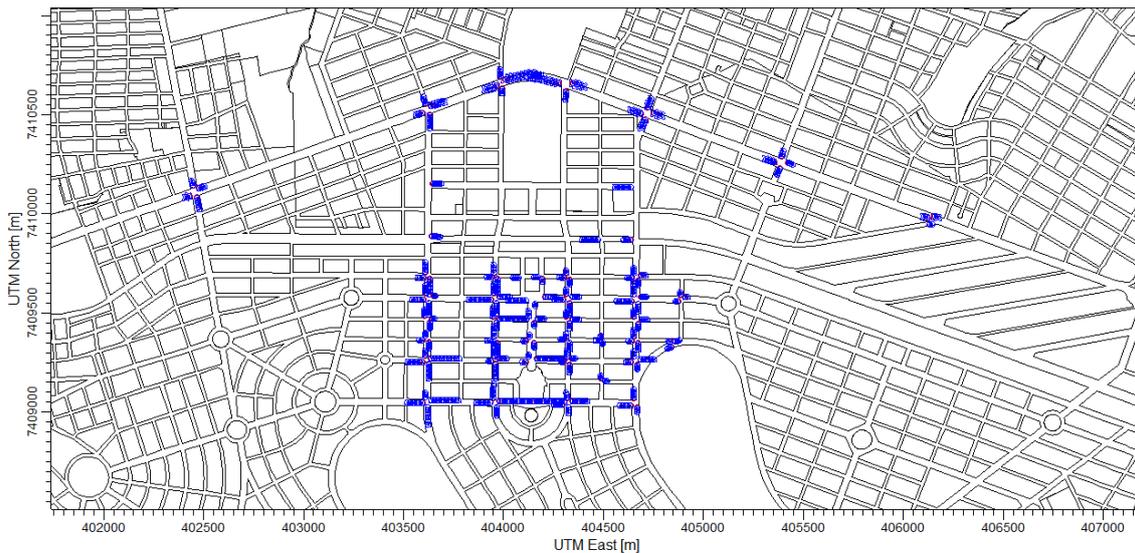


Figura 17 – Fontes lineares representando os arcos de fila

### 4.3.3 *Parâmetros do tráfego local*

Os parâmetros do tráfego local necessários para a realização da simulação no Aermod compreendem os fluxos de tráfego, o tempo de ciclo de cada semáforo da rede, obtido junto à Secretaria Municipal de Transportes – Setran, e o comprimento de fila.

Os parâmetros do tráfego foram obtidos para o ano de 2009, antes da implantação do sistema binário.

Os fluxos de tráfego usados foram obtidos a partir do levantamento realizado na região central da cidade pela Setran, no ano de 1999. Este levantamento consistiu em uma contagem volumétrica horária simples em 50 interseções realizadas no período de 6:00 às 22:00 horas, entre segundas e sextas-feiras e no período de 6:00 às 14:00 horas aos sábados. No trabalho, foram usados os fluxos horários referentes ao período das 13 às 14 horas devido à análise realizada por Demarchi et al. (2004) com a identificação dos maiores números de picos observados nas interseções.

Os dados referentes a 1999 foram então trabalhados e complementados por Lima (2007) obtendo-se dados da frota para o ano 2005. Com base nos dados de 2005, foi necessário projetar os volumes para o ano de 2009, usando o crescimento anual da frota de Maringá de 7 %, que representa um crescimento médio aproximado para a frota de Maringá no período avaliado conforme dados do DETRAN – PR (Detran , 2011a; Detran, 2011b).

O comprimento de fila para os veículos parados pela presença dos semáforos foi estimado usando o algoritmo presente no modelo de dispersão CAL3QHC. Este algoritmo consiste em um modelo de tráfego baseado no Highway Capacity Manual (HCM) de 1985 (FHWA, 2006) que usa as informações do tráfego de duração do ciclo, fluxo de saturação, fluxo de veículos e do tipo de aproximação à montante da interseção, para estimar o comprimento do arco representativo de cada fila. O modelo considera a distância entre veículos de 6 metros (EPA, 1995), um valor próximo ao valor médio de 6,06 m determinado para Maringá por Demarchi et al. (2003). Os dados do ciclo semafórico foram obtidos por meio da Secretaria dos Transportes de Maringá (SETRAN) e o valor adotado para o fluxo de saturação, para a região central de Maringá, foi de 2102 cpe/h/faixa (carros de passeio/hora/faixa de rolamento), determinado em Colella e Demarchi (2005).

#### 4.3.4 Caracterização da emissão veicular

Os poluentes considerados no presente estudo são CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> presentes na emissão de veículos leves presentes na região central de Maringá, considerando os veículos movidos à álcool e gasolina.

Em relação à emissão do monóxido de carbono, foram considerados os veículos em movimento e parados nas filas formadas pela presença dos semáforos. Esta última consideração é necessária, pois, neste modo de operação do veículo a emissão de CO é significativa. Para o NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, foram consideradas apenas as emissões dos veículos em movimento.

A taxa de emissão dos poluentes para os veículos em movimento é dada com base no fluxo de veículos, fator de emissão dos poluentes e comprimento dos arcos, e para os veículos em fila tem-se que a taxa de emissão é função do fluxo veicular, do ciclo semafórico, do número de veículos parados em fila e do número de filas formadas.

São discutidos os fatores de emissão e a taxa de emissão dos poluentes nos itens a seguir.

##### 4.3.4.1 Fatores de emissão

Os fatores de emissão para os poluentes avaliados no presente trabalho foram obtidos de maneira diferenciada. Em relação ao CO, os fatores de emissão adotados para os arcos em fila e em movimento foram os estimados por Lima (2007) com a adaptação do modelo modal CMEM. Para estimar o fator, o autor adaptou o modelo usando um veículo representativo da frota da cidade de Maringá, obtendo o fator de emissão do veículo representativo em qualquer modo de operação do motor.

Para o NO<sub>x</sub>, o fator de emissão para os veículos em movimento foi estimado usando os fatores de emissão da CETESB (Quadro 21), apresentado em seu relatório anual de qualidade do ar e corrigidos, considerando os fatores de deterioração apresentados pelo AP-42. , considerando os veículos cadastrados em 2009 com ano de fabricação de 1990 a 2009. Para o cálculo do fator de emissão para o poluente NO<sub>x</sub>, foi necessário dispor do número de veículos cadastrados em Maringá com ano de fabricação de 1990 a 2009, devido à idade da frota que frequentemente apresenta-se no tráfego do centro da cidade. Para este cálculo, foi considerada apenas a frota veicular a

álcool e gasolina, pois não existe na cidade estimativa do uso de álcool e gasolina para os bi-combustíveis, sendo, portanto, descartados no estudo.

Quadro 21 – Fatores de emissão definidos pela CETESB para o NO<sub>x</sub>

Ano-modelo	FE (g/km) gasolina C	FE (g/km) álcool
90	1,4	1,2
91	1,3	1,0
92	0,6	0,5
93	0,80	0,60
94	0,70	0,70
95	0,60	0,70
96	0,50	0,70
97	0,30	0,30
98	0,23	0,24
99	0,23	0,22
2000	0,21	0,21
2001	0,14	0,08
2002	0,12	0,08
2003	0,12	0,09
2004	0,09	0,08
2005	0,09	0,08
2006	0,08	0,05
2007	0,08	nd
2008	0,039	nd
2009	0,020	nd

Os fatores de deterioração para o NO<sub>x</sub> foram dados com base no AP-42, com procedimento para a seleção dos fatores conforme adotado por Mendes (2004) e Szwacfter (2004). Neste procedimento, os fatores de emissão apresentados pela CETESB são comparados com o valor ZML (emissão a zero milha) do AP-42, conforme ilustra a Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros para os cálculos dos fatores de deterioração para o NO<sub>x</sub>

CETESB		AP-42				
Ano de fabricação	Fator médio (g/km)	Ano de fabricação	ZML (g/mi)	ZML (g/km)	DR1	DR2
1990-1991	1,225	1975-1976	2,44	1,52	0,040	0,040
1992-1996	0,640	1980	1,50	0,93	0,102	0,102
1997-2000	0,243	1994	0,37	0,23	0,083	0,189
2001-2009	0,069	1996+	0,18	0,11	0,083	0,195

Com base nos dados apresentados na Tabela 7, foram calculados os fatores de deterioração para o NO<sub>x</sub> pela Equação 13.

$$FD = \frac{BER}{ZML} \quad (13)$$

em que BER é dado pela Equação 14.

$$BER = \left\{ \begin{array}{l} ZML + DR1.Y, se Y \leq 5 \\ ZML + DR1.5 + DR2.(Y - 5), se Y > 5 \end{array} \right\} \quad (14)$$

## Capítulo 4 – Metodologia

em que, FD, BER, ZML, DR<sub>1</sub> e DR<sub>2</sub> representam (Lima et. al (2009) ):

FD : fator de deterioração;

BER: taxa de emissão básica da exaustão [g/mi];

ZML: emissão a zero milha [g/mi];

DR<sub>1</sub>: taxa de deterioração milhagem acumulada ≤ 50 K milhas [g/mi/10 Kmi]; e

DR<sub>2</sub>: taxa de deterioração milhagem acumulada > 50 K milhas [g/mi/10 K mi].

em que Y é dado por:

$$Y = \begin{cases} \frac{km_{acum}}{1,61.10000}, & \text{se } km_{acum} \leq 100000 \\ 6,21, & \text{se } km_{acum} > 100000 \end{cases} \quad (15)$$

A quilometragem acumulada ( $km_{acum}$ ) é dada com base na distância média percorrida e adotada pela CETESB conforme o Quadro 22.

Quadro 22 – Valores da distância média percorrida adotados pela CETESB

Idade (anos)	Distância média anual (km)	Idade (anos)	Distância média anual (km)	Idade (anos)	Distância média anual (km)
Até 1	22.000	5	14.000	9	13000
2	19.000	6	14.000	10	13000
3	17.000	7	14.000	+11	9500
4	15.000	8	13.000		

A partir dos procedimentos descritos anteriormente foi determinado o fator de emissão para o NO<sub>x</sub>, com resultados explicitados no Anexo. Para o SO<sub>x</sub>, o fator de emissão adotado foi estipulado pela CETESB, em seu inventário de qualidade do ar.

Na Tabela 8 são apresentados os fatores de emissão considerados no trabalho para os poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> para a frota veicular de 2009.

Tabela 8 – Fatores de Emissão

Poluente	Arcos de fluxo livre	Arcos de fila
CO	8,48 g/mi.veic	90,1 g/v.h
NO <sub>x</sub>	0,59 g/km.veic	-
SO <sub>x</sub>	0,4 g/km.veic	-

#### 4.3.4.2 Taxa de emissão dos poluentes

A taxa de emissão para cada arco de fluxo livre ( $TE_{vm}$ ) é dada pela Equação 16, para o CO e pela Equação 17 para os demais poluentes, haja vista as unidades dos fatores de emissão apresentados na Tabela 8. Nota-se que a taxa de emissão é dada com

## Capítulo 4 – Metodologia

base no fator de emissão ( $FE$ ) de cada veículo multiplicado pelo fluxo dos veículos ( $fv$ ) e pelo comprimento do arco ( $L_A$ ).

$$TE_{vm} = fv \cdot FE \cdot \frac{L_A}{1,609} \cdot \frac{1}{3600} \quad (16)$$

$$TE_{vm} = fv \cdot FE \cdot L_A \quad (17)$$

Para a determinação da taxa de emissão dos veículos em fila ( $TE_{vf}$ ) para cada estágio de cada semáforo, deve-se, inicialmente, estimar o número de veículos parados ( $nv$ ) em cada fila. Este número é determinado com base no comprimento de fila estimado no trabalho pelo modelo CAL3QHC. Como a fila só ocorre no tempo em que o veículo está parado, é feita uma ponderação na taxa de emissão, que é a relação entre o tempo de vermelho ( $tv$ ) e o tempo total do ciclo ( $tc$ ) para o respectivo estágio. A taxa de emissão dos veículos em fila é dada pela Equação 18, em que  $nf$  representa o número de filas.

$$TE_{vf} = \frac{FE}{3600} \cdot \frac{tv}{tc} \cdot nv \cdot nf \quad (18)$$

Nas simulações consideradas no trabalho, foi levada em consideração a variação da emissão veicular ao longo do dia por meio de um fator de correção da taxa de emissão. Ao aplicar o fator é possível considerar a taxa de emissão total (fator=1) obtida para os dados no horário de pico ou proporcional a estes valores (fator <1).

Para a determinação do fator de correção da taxa, foi considerada a variação do fluxo diário de duas importantes interseções na simulação, por apresentarem altos fluxos diários, que são as interseções da Avenida Duque de Caxias x Avenida Brasil e Avenida Colombo x Avenida São Paulo. A primeira interseção foi usada para definir os fatores da hora 6 até 20 apresentada na Tabela 9 e a outra interseção para as demais horas. A segunda interseção foi usada também como um complemento para a primeira haja vista que esta não apresentava a variação do fluxo para as 24 horas e apenas para as horas definidas anteriormente.

Tabela 9 – Variação da taxa de emissão ao longo do dia

Hora	Fator
1	0,08
2	0,05
3	0,05
4	0,05
5	0,06
6	0,07
7	0,10

Hora	Fator
8	0,73
9	0,65
10	0,66
11	0,63
12	0,73
13	0,79
14	1,00
15	0,87
16	0,86
17	0,83
18	0,91
19	0,89
20	0,66
21	0,56
22	0,51
23	0,60
24	0,33

#### 4.4 Caracterização dos receptores

A região de estudo foi representada por uma malha com um total de 384 receptores, posicionados a 1,5 metros de altura em relação ao terreno, abrangendo uma área aproximada de 798 km<sup>2</sup>. Os receptores foram distribuídos de maneira diferenciada, com maior concentração na região central onde está concentrada a maior parte das fontes emissoras, e estão ilustrados na Figura 18. A distribuição dos receptores considerou uma malha interna com uma área de 60 x 200 metros com uma distância de 50 metros entre os receptores. A partir desta malha foram tomados receptores com a distribuição apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados dos receptores

Distância da borda da malha interna (m)	Distância entre receptores (m)
500	150
1000	250
2000	1000
3000	2500
14000	2000

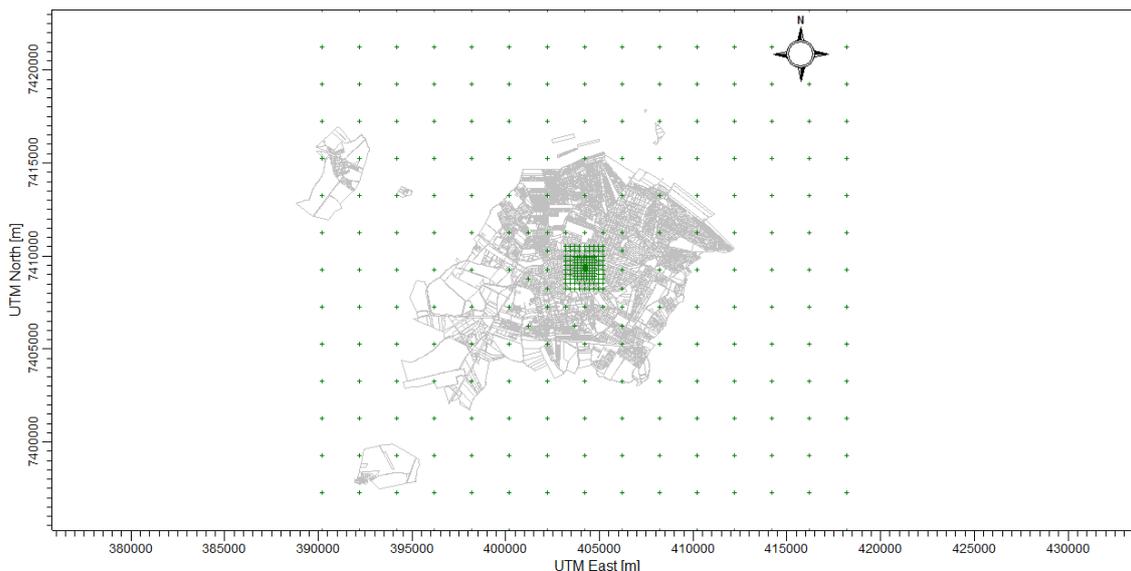


Figura 18 – Distribuição dos receptores

No estudo da dispersão dos poluentes por meio do modelo de dispersão atmosférica Aermod, é necessário caracterizar o terreno adjacente às fontes emissoras, além de definir o coeficiente de dispersão atmosférico entre urbano ou rural. Os coeficientes de dispersão são parâmetros que descrevem o comportamento da difusão dos contaminantes na atmosfera e representam a intensidade da turbulência (Moraes, 2001; Muller e Moura, 2012).

Em relação à caracterização do terreno adjacente às fontes emissoras, o modelo digital do terreno de Maringá foi importado pelo Aermod conforme ilustrado na Figura 19.

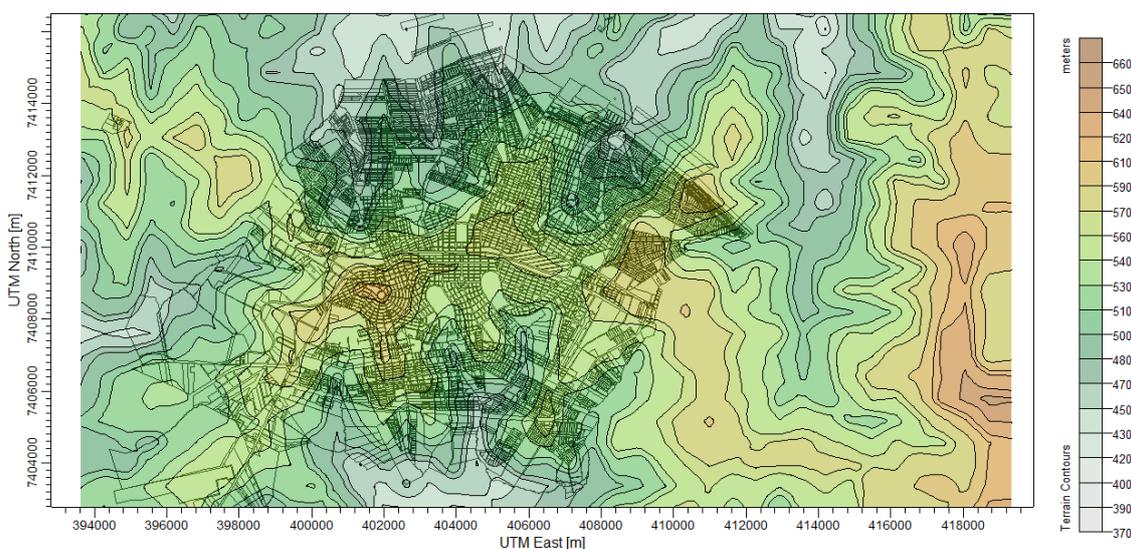


Figura 19 – Curvas de nível do terreno de Maringá

Além da caracterização do terreno, no modelo de dispersão atmosférica Aermod, é preciso definir entre os coeficientes de dispersão rural ou urbano. Estes coeficientes influenciam a dispersão atmosférica no período noturno, pois, para este período a superfície urbana é mais quente que a rural, resfriando em um ritmo mais lento, devido à presença de construções as quais dificultam a saída da radiação térmica e apresentam maior capacidade térmica superficial (EPA, 2012).

No modelo Aermod, a representação do fluxo de calor da superfície é dado em função da diferença de temperatura urbana e rural ( $\Delta T_{u-r}$ ) que, por simplicidade, usa-se o modelo empírico dado por:

$$\Delta T_{u-r} = \Delta T_{max} \left[ \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) + 1 \right] \quad (19)$$

em que:

$$\Delta T_{max} = 12^{\circ}C$$

$P_0$  é a população de referência

$P$  é a população da área urbana

O critério de classificação do coeficiente de dispersão para Maringá foi definido por dois critérios, um para as fontes fixas e outro para as fontes móveis. Cada critério será apresentado no próximo tópico.

#### 4.4.1 Coeficiente de dispersão para as fontes fixas

O critério de classificação do coeficiente de dispersão para as fontes fixas foi dado com base na aplicação do Método de Auer (Auer, 1978), que consiste em dividir a região de interesse em seções, e classificá-las conforme o tipo de uso de solo, observado no Quadro 23. No método, a região de interesse constitui-se de uma área de raio de 3 km, tendo a fonte fixa como ponto central. Se o somatório das áreas das seções classificadas com os tipos de uso de solo I1, I2, C1, R2 e R3 totalizar 50% ou mais, o coeficiente de dispersão será considerado urbano, caso contrário, rural.

Quadro 23 – Tipo de uso do solo segundo Auer (1978)

Tipo	Descrição	Classe
I1	Industrial Pesada	Urbano
I2	Industrial Leve/Moderada	Urbano
C1	Comercial	Urbano
R1	Residencial comum	Rural
R2	Residencial compacto (unifamiliar)	Urbano

Tipo	Descrição	Classe
R3	Residencial compacto (Multifamiliar)	Urbano
R4	Residencial Rural	Rural
A1	Natural metropolitano	Rural
A2	Agrícola	Rural
A3	Sem desenvolvimento (campos/gramados)	Rural
A4	Sem desenvolvimento (bem arborizado)	Rural
A5	Superfícies aquáticas	Rural

Fonte: Auer, 1978.

Para exemplificar a aplicação do método, considere a Figura 20, que apresenta no ponto central a localização de uma fonte fixa emissora, que será denotada no trabalho por C. A área de interesse (circunferência com raio de 3 km contendo a fonte como ponto central) foi subdividida em seções a1... a16, b1...b16, c1...c16 e d1...d16. Cada subseção foi classificada conforme os tipos de uso de solo apresentados no Quadro 23. Após a aplicação do método, observou-se que para a maioria das seções, o tipo de uso de solo é classificado como rural. Adotando-se por tanto para esta fonte o coeficiente de dispersão rural.



Figura 20 – Divisão da área de interesse para a fonte emissora (C)

Assim, o procedimento descrito para a fonte emissora C foi estendido para as demais fontes emissoras, onde se observou comportamento semelhante. Desta forma, verifica-se que a região industrial considerada no estudo apresenta características de coeficiente de dispersão rural, com base no método de Auer.

#### 4.4.2 Coeficiente de dispersão para as fontes móveis

Em relação às fontes móveis, foi aplicado o Método da Densidade Populacional, indicado pelo modelo de dispersão atmosférica Aermód. Neste procedimento, deve-se calcular a densidade média da população por quilômetro quadrado ( $d$ ) para a região de estudo. O procedimento de densidade populacional deve ser usado com precaução e não pode ser aplicado em áreas industrializadas (EPA, 2012).

Para este método, tem-se que,

$$\{d > 750 \text{ pessoas}/\text{km}^2, \text{coeficiente urbano}\}$$

$$\{d \leq 750 \text{ pessoas}/\text{km}^2, \text{coeficiente rural}\}$$

A densidade populacional de Maringá nos últimos anos está apresentada na Figura 21, nota-se que para os períodos apresentados a densidade populacional para a cidade é inferior a  $750 \text{ hab}/\text{km}^2$ , correspondendo a um coeficiente de dispersão rural.

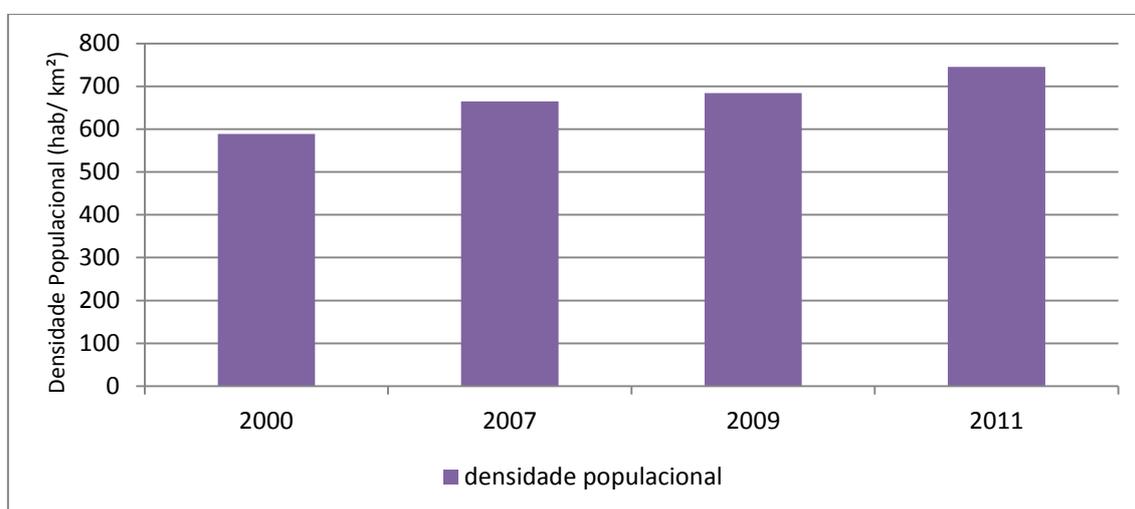


Figura 21 – Densidade Populacional de Maringá

É interessante ressaltar que no modelo Aermód é possível simular considerando características de coeficiente de dispersão diferenciadas para cada fonte, ou seja, é possível definir fontes com coeficiente de dispersão rural e outras, urbana. Para o estudo de caso considerado, as fontes apresentaram as mesmas características em relação ao coeficiente de dispersão, ou seja, rural, tanto para as fontes fixas quanto para as móveis.

#### 4.5 Parâmetros Meteorológicos

No Aermod, são necessários dois arquivos de dados meteorológicos, um de superfície e outro de altitude. Devido à indisponibilidade dos dados para Maringá, como ocorre para a maioria das cidades brasileiras, estes foram obtidos da Lakes Environmental, gerados pelo MM5, para o período de 2005 a 2009.

##### 4.5.1 Representatividade dos parâmetros meteorológicos adotados

Para demonstrar a representatividade dos dados adotados e obtidos pelo MM5, foram realizadas comparações entre estes dados com os dados básicos temperatura, velocidade e direção do vento, disponibilizados pela SIMEPAR, para o ano de 2007. A comparação dos dados meteorológicos foi realizada para o ano de 2007, devido aos dados disponíveis e fornecidos pela SIMEPAR, para este período.

A direção e velocidade dos ventos para Maringá é representada pela rosa dos ventos na Figura 22 e na Figura 23.

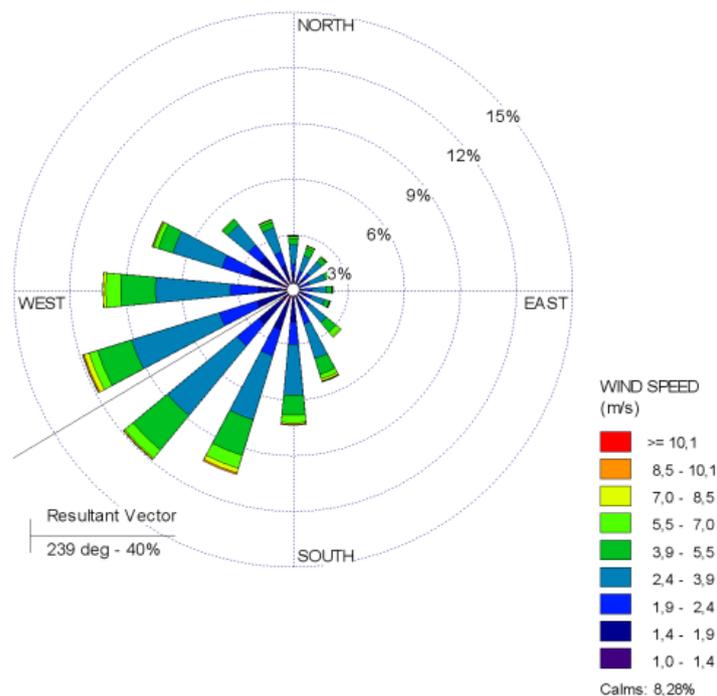


Figura 22 – Rosa dos ventos gerada com base nos dados do SIMEPAR

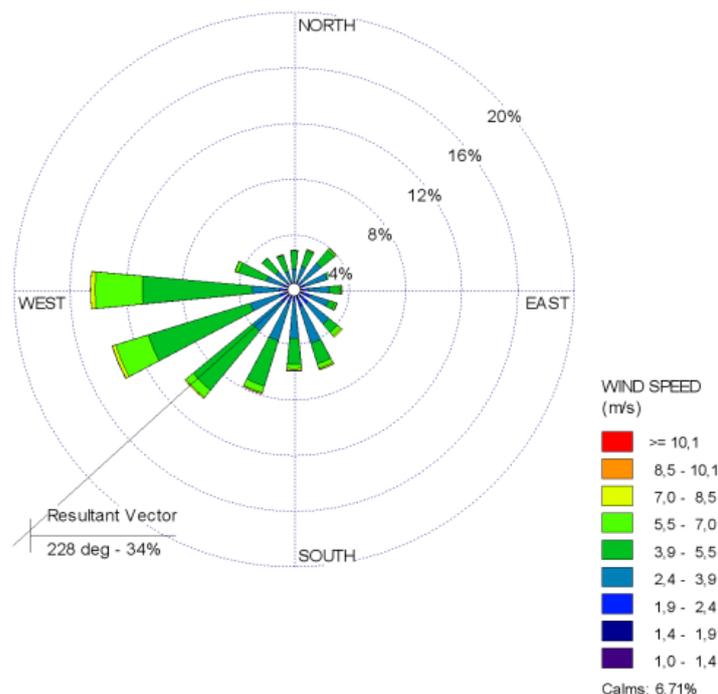


Figura 23 – Rosa dos ventos gerada com base nos dados do MM5

Com base na Figura 22 e na Figura 23, nota-se semelhança entre as rosas dos ventos, onde as duas apresentam ventos com direção predominante da região nordeste para a região sudoeste, com calmarias numa faixa entre 6,5% a 8,5%.

Em relação à temperatura, seus dados médios mensais e a variação percentual dos dados do MM5 em relação aos dados do Simepar, estão apresentados na Tabela 11, sendo que as temperaturas fornecidas pelo Simepar apresentam como altura de referência 10 metros, enquanto que os dados fornecidos pelo MM5 tem como base a altura de 2 metros.

Tabela 11 – Comparação de dados meteorológicos

Período	T (°C)	T (°C)	Variação percentual (%)
	SIMEPAR	MM5	
Janeiro	23,99	26,26	9,43
Fevereiro	24,53	26,80	9,25
Março	25,21	25,98	3,05
Abril	23,38	25,04	7,10
Maió	18,81	20,40	8,45
Junho	20,28	19,86	-2,07
Julho	17,55	16,97	-3,30
Agosto	20,59	20,90	1,50
Setembro	24,65	20,34	-17,48
Outubro	24,43	25,71	5,24
Novembro	23,19	25,57	10,26
Dezembro	24,66	25,92	5,11

Média	22,61	23,31	3,10
-------	-------	-------	------

Ao avaliar a Tabela 11, nota-se que as temperaturas médias apresentadas pelo SIMEPAR foram inferiores às estimadas pelo MM5, para a maioria dos meses, sendo que a diferença mais significativa foi observada no mês de setembro, com uma variação percentual de 17,48% da temperatura fornecida pelo MM5 em relação ao Simepar. Com base nas comparações realizadas para as rosas dos ventos e a temperatura atmosférica, presume-se que não há diferença significativa entre os conjuntos de dados, podendo-se adotar os dados fornecidos pelo MM5 como representativos das condições locais de Maringá. Para a confirmação da não diferença significativa entre os dados de temperatura, foi realizada uma análise estatística, com base no teste t. No teste considerou-se a hipótese  $H_0$  como a condição de que não há diferença significativa entre as médias apresentadas, sendo estabelecido um nível de confiança de 99%. Para este nível de confiança foi obtido o valor crítico, obtido da tabela da distribuição t de Student, que para o caso correspondeu ao valor de -2,718. Para a realização do teste é necessário calcular a diferença média ( $\bar{d}$ ), o desvio padrão ( $s_d$ ) e a variável de teste  $t_{n-1}$ , que será comparada com o valor crítico apresentado, sendo os parâmetros calculados a partir das Equações 20, 21 e 22:

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} \quad (20)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - [(\sum d_i)^2/n]}{n-1}} \quad (21)$$

$$t_{n-1} = \frac{\bar{d}}{(s_d/\sqrt{n})} \quad (22)$$

em que:

$d_i$  – diferença entre as temperaturas médias mensais;

$n$  – número de amostras.

Para os dados de temperatura apresentados na Tabela 11, foi obtido o valor teste de -1,32, que é superior ao valor crítico apresentado. Assim, a hipótese  $H_0$  não é rejeitada e conclui-se, com 99% de confiança, que não há diferença significativa entre as médias apresentadas.

#### 4.5.2 Caracterização das condições meteorológicas

Para o estudo, foram adotados os parâmetros meteorológicos referentes ao ano de 2009 e fornecidos ao Aermod em dois arquivos, um de superfície e outro de altitude.

## Capítulo 4 – Metodologia

Para o ano de 2009, a velocidade e a direção do vento em Maringá estão representadas na rosa dos ventos, ilustrada na Figura 24, em que se tem uma direção predominante em ângulo de 227° (NE-SO) e características ilustradas na rosa dos ventos.

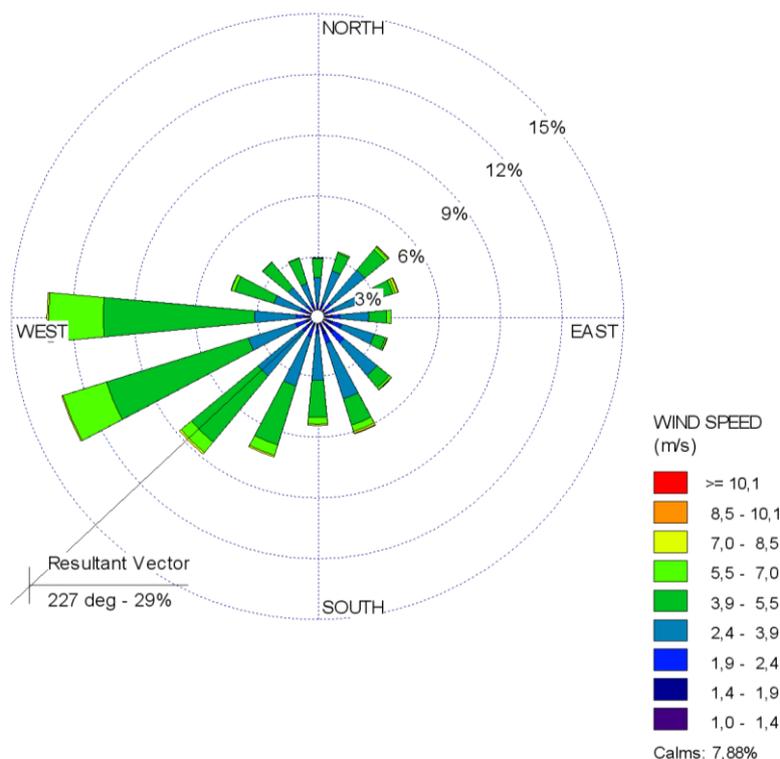


Figura 24 – Rosa dos ventos de Maringá para o ano de 2009

As variáveis meteorológicas mensais referentes a velocidade do vento, temperatura e umidade e pressão atmosférica estão disponibilizadas na Tabela 12. A unidade de pressão no sistema internacional é Pa ( $N/m^2$ ) e a unidade utilizada pelos meteorologistas é milibar (mb).

Tabela 12 – Parâmetros meteorológicos mensais

Mês	Velocidade (m/s)	Temperatura (° C)	Umidade (%)	Pressão (mb)	Pressão (Pa)
Janeiro	3,69	26,02	64,06	958,08	95.808
Fevereiro	3,00	27,49	62,08	957,78	95.778
Março	3,09	26,82	59,56	958,39	95.839
Abril	3,27	23,87	62,17	961,33	96.133
Maiο	3,31	21,10	70,05	962,65	96.265
Junho	3,55	16,08	69,10	965,11	96.511
Julho	3,24	18,26	72,72	964,21	96.421
Agosto	3,85	20,25	66,26	963,92	96.392
Setembro	3,67	23,06	68,39	961,09	96.109
Outubro	3,56	24,29	65,21	958,65	95.865
Novembro	3,51	27,93	65,81	955,90	95.590
Dezembro	3,46	26,65	67,03	956,69	95.669

Maringá apresenta-se cortada pelo trópico de Capricórnio, estando posicionada em uma zona de transição climática, entre o clima tropical e o subtropical. No verão, prevalecem as massas de ar de baixa pressão enquanto que no inverno as de alta pressão (Borsato, 2009). Nota-se na Tabela 12 que as estações mais frias do ano apresentaram pressão média mensal relativamente maior que as estações mais quentes.

#### 4.6 Classificação da Agressividade do Meio

A classificação da agressividade do meio é dada com base na Norma da ABNT NBR 14.643: Corrosão Atmosférica – Classificação da Corrosividade Atmosférica (ABNT, 2001). Em que, a agressividade do meio é dada em termos dos contaminantes  $\text{SO}_2$  e  $\text{Cl}^-$ , além do tempo de superfície úmida, que representa o período em que a superfície metálica fica coberta por uma película de eletrólito.

Na norma, a corrosividade do meio é classificada em cinco categorias variando de  $C_1$  a  $C_5$ , com corrosividade variando respectivamente de corrosividade muito baixa a muito alta. Estas categorias são obtidas com base nas classificações do tempo de superfície úmida ( $t_s$ ) e concentração de  $\text{SO}_2$  e  $\text{Cl}^-$ , conforme ilustram os Quadros 24, 25 e 26. As concentrações de  $\text{SO}_2$  e  $\text{Cl}^-$  na norma são denotadas por  $A_c$  e  $B$ , respectivamente.

Quadro 24 – Tempo de superfície úmida

Categoria	Tempo de superfície úmida Horas/ano (h/a)
$T_1$	$t_s \leq 10$
$T_2$	$10 < t_s \leq 250$
$T_3$	$250 < t_s \leq 2500$
$T_4$	$2500 < t_s \leq 5500$
$T_5$	$t_s > 5500$

O tempo de superfície úmida corresponde ao período em que a superfície metálica fica envolvida por uma película de eletrólito e pode ser estimado satisfatoriamente pelo tempo de superfície úmida calculado, a partir do binômio temperatura e umidade relativa. Sendo que,  $t_s$  é o tempo no ano em que a umidade relativa é superior a 80% e a temperatura maior que  $0^\circ \text{C}$ .

Para a categoria  $T_1$ , não é esperado condensação. Para  $T_2$ , a probabilidade de formação de eletrólito sobre a superfície metálica é baixa. Para as demais categorias têm-se períodos de condensação e precipitação.

Quadro 25 – Classificação para o SO<sub>2</sub>

Concentração de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Categoria
$A_c \leq 12$	A <sub>0</sub>
$12 < A_c \leq 40$	A <sub>1</sub>
$40 < A_c \leq 90$	A <sub>2</sub>
$90 < A_c \leq 250$	A <sub>3</sub>

Quadro 26 – Classificação para o Cl<sup>-</sup>

Concentração de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Categoria
$B \leq 3$	B <sub>0</sub>
$3 < B \leq 60$	B <sub>1</sub>
$60 < B \leq 300$	B <sub>2</sub>
$300 < B \leq 1500$	B <sub>3</sub>

Para os objetivos da norma, as concentrações de SO<sub>2</sub> e Cl<sup>-</sup> são expressas em termos de média anual e os resultados de medidas de curto prazo servem apenas como orientação.

A partir das categorias das concentrações dos contaminantes e do tempo de superfície úmida é possível classificar a atmosfera em termos de corrosão atmosférica para aço-carbono, zinco e cobre e alumínio, conforme se verifica respectivamente nos Quadros 27, 28 e 29.

Quadro 27 – Categorias de corrosividade atmosférica para o aço-carbono

	T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>

Quadro 28 – Categorias de corrosividade atmosférica para zinco e cobre

	T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>

		C <sub>2</sub>				C <sub>4</sub>		C <sub>4</sub>		C <sub>5</sub>				
--	--	----------------	--	--	--	----------------	--	----------------	--	----------------	--	--	--	--

Quadro 29 – Categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio

	T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>

Na NBR 14.643, os contaminantes são mensurados por meio de medições, no entanto, para o presente trabalho a concentração de SO<sub>2</sub> será estimada por meio do modelo de dispersão atmosférica Aermód e a concentração de Cl<sup>-</sup> é considerada insignificante, sendo, portanto, considerada a categoria B<sub>0</sub>, para o último contaminante.

## 5 Resultados e Discussões

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos em relação aos objetivos do trabalho: estimar a qualidade do ar na região central de Maringá; avaliar a influência da variação da sazonalidade na dispersão dos poluentes; e estudar a agressividade do meio em relação às redes elétricas de transmissão.

Para atender aos objetivos, os resultados serão apresentados em três tópicos:

- Estimacão da qualidade do ar;
- Estudo da sazonalidade; e
- Redes elétricas de transmissão.

No tópico estimacão da qualidade do ar, são apresentadas as concentrações máximas estimadas pelo Aermód para três poluentes atmosféricos ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ ), ilustradas em mapas de concentraçao avaliando as áreas atingidas pela pluma dos poluentes e realizada a estimativa da qualidade do ar na região central da cidade, com base na Resoluçao CONAMA n° 03/1990.

No estudo da sazonalidade, são apresentadas as variaçoes das concentrações máximas de  $\text{CO}$  ao longo das estações do ano.

No último tópico, são apresentados resultados referentes à agressividade do meio em redes elétricas de transmissao devido à exposiçao de suas estruturas aos poluentes  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , presentes na atmosfera.

Conforme citado, são obtidos resultados em relação aos poluentes: monóxido de carbono, óxido de enxofre e óxido de nitrogênio. A escolha por estes poluentes foi dada pelas razões: o monóxido de carbono é o principal poluente emitido pelas fontes móveis, presentes na região central da cidade; os três poluentes são indicadores de qualidade do ar citados na Resoluçao CONAMA n° 03/1990, sendo que os demais poluentes (partículas totais em suspensao, fumaça,  $\text{PM}_{10}$  e ozônio) apresentados na resoluçao não estão disponibilizados; e os poluentes  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  apresentam efeitos adversos em relação a materiais como redes elétricas de transmissao.

Para as simulações, foram consideradas as emissões de poluentes provenientes de fontes móveis, presentes na região que engloba parte da área central da cidade e da

Avenida Colombo, e de fontes fixas, inventariadas e distribuídas pelo território de Maringá. As simulações foram realizadas considerando:

- Condições meteorológicas e de emissão de poluentes referentes ao ano de 2009;
- terreno com elevações importadas Aermód;
- coeficiente de dispersão rural;
- concentração de fundo desprezível, por não existir dados de medidas de poluentes; e
- emissão de poluentes variável para as fontes móveis, com pico de emissão às 14:00.

### 5.1 Estimação da qualidade do ar

Neste tópico são apresentados os seguintes resultados:

- Estimação da concentração máxima dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, emitidos por fontes móveis e fixas presentes em Maringá;
- mapas de concentração com a ilustração das áreas atingidas pela pluma dos poluentes; e
- análise da qualidade do ar de Maringá, na região central da cidade, comparando os valores estimados pelo Aermód com a Resolução Conama n° 03/1990, além de comparar os valores estimados com os valores estipulados pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Para melhor organização, os resultados serão apresentados para cada poluente separadamente.

#### 5.1.1 Monóxido de carbono

As simulações realizadas para o CO consideraram as fontes móveis que incluem arcos de fluxo livre e arcos de fila; arcos de fluxo livre, que representam os veículos em movimento; arcos de fila, que representam os veículos parados nas filas formadas pela presença dos semáforos; fontes fixas; e as fontes totais, que representam as fontes fixas e as fontes móveis, simultaneamente. Os resultados obtidos para as concentrações máximas estão apresentados na Tabela 13, com médias indicadas pela Resolução CONAMA n° 03/1990.

Para as simulações que representaram de alguma forma as emissões veiculares, observou-se que os picos de concentração não ocorreram no horário de pico de emissão

(14:00), verificando para estes casos que a concentração máxima ocorreu às 19:00 do dia vinte e quatro de março de 2009. Neste período, as condições meteorológicas apresentavam as características: velocidade 0,5 m/s, temperatura 302,2 K, umidade 52%, pressão atmosférica 956 mb. Além de altura de mistura mecânica de 27 metros. Pode-se concluir que as condições eram desfavoráveis à dispersão, como baixa velocidade e altura de mistura reduzida.

Tabela 13 – Concentração máxima de CO estimada pelo Aermod

Fontes emissoras	Horária ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	8 horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Fontes móveis	15.040,99	5.396,30
Arcos de fluxo livre	8.561,58	3.078,64
Arcos de fila	7.544,05	2.509,12
Fontes fixas	683,81	198,33
Fontes totais (fixas + móveis)	15.043,92	5.401,31

Ao analisar os resultados de concentração de CO, observa-se que não há diferença significativa entre os níveis máximos de concentração estimados ao considerar as fontes móveis e as fontes totais (fixas + móveis). Este resultado deve-se ao fato de que não existiram sobreposições de efeitos entre as fontes emissoras, ou seja, as emissões das fontes fixas não se somaram às fontes móveis, devido às grandes distâncias entre elas. Desta forma, para os demais poluentes, serão apresentados os resultados para fontes móveis e fixas isoladamente, omitindo os resultados das concentrações para fontes totais (fixas + móveis).

Importante verificar que a soma das concentrações das fontes móveis com as fixas é superior se comparado com o resultado de concentração das fontes totais, pois não se estabelece uma relação linear entre os resultados.

Ao comparar os valores das concentrações das fontes móveis com as fixas, verifica-se que os valores estimados para as fontes fixas não ultrapassaram 5% dos valores estimados para as fontes móveis. Este resultado indica que Maringá não é exceção à situação geral encontrada em centros urbanos, ou seja, em relação aos poluentes veiculares, a participação dos mesmos é mais significativa se comparada com as emissões das fontes fixas, tendo a emissão veicular se tornado um problema causador de poluição atmosférica, principalmente nos centros urbanos. Um atenuante das fontes fixas em relação às móveis é que, geralmente, estão localizadas em regiões afastadas dos centros urbanos e seus poluentes são lançados a alturas elevadas.

Para avaliar a influência dos veículos parados em filas na emissão de monóxido de carbono, foram consideradas simulações agrupando as fontes móveis em arcos de fluxo livre, que representam os veículos em movimento, e os arcos de fila, que representam os veículos parados pela presença dos semáforos. Ao analisar os resultados na Tabela 13, tem-se que os veículos em fila contribuíram com aproximadamente 50% e 46% da concentração máxima total estimada pelo modelo, para médias de 1 e 8 horas, respectivamente. Estes resultados ilustram o impacto dos veículos parados em fila, sendo, portanto, determinante sua consideração na estimativa da concentração de CO em vias urbanas.

Apesar de o número de arcos de fluxo livre ser superior ao número de arcos de fila, a diferença entre as concentrações máximas estimadas para os arcos de fluxo livre em relação aos arcos de fila não ultrapassaram a diferença de 20 %, considerando as duas médias avaliadas, isto se deve ao fato de que para os veículos em movimento o efeito da turbulência mecânica, devido à passagem dos veículos, favorece a dispersão dos poluentes, o que não ocorre para os veículos parados em fila.

Nota-se, também, que a soma das concentrações obtidas para os arcos de fluxo livre com os arcos de fila é superior à concentração obtida para os arcos totais, que consideram os dois tipos de arcos, simultaneamente. Este resultado também ocorre pela turbulência mecânica devida ao efeito da passagem dos veículos, além da sobreposição dos efeitos de posicionamento, pela proximidade das fontes representadas.

No trabalho de Lima (2007), usando o modelo de dispersão atmosférica CAL3QHC, verificou-se uma concentração máxima de CO para a região central no ano de 2005 de 4,80 ppm (5.486,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valor inferior ao obtido pelo Aermod para o ano de 2009, que correspondeu à 13,16 ppm (15.040,99). Considerando um aumento da concentração obtida por Lima (2007) de 7% ao ano, como o crescimento médio da frota veicular considerado, tem-se que o valor corresponderia em 2009 a 6,29 ppm, valor também inferior ao obtido pelo Aermod. Concluindo que em relação ao CAL3QHC o valor de concentração obtido pelo Aermod é superestimado. Para avaliar a dispersão dos poluentes, foram obtidos os mapas de concentração para as fontes fixas, fontes móveis e fontes totais (fixas + móveis), ilustradas nas Figuras 25 a 30. As médias consideradas nos mapas de dispersão são as indicadas pela Resolução Conama n° 03/1990 como padrões de qualidade do ar.

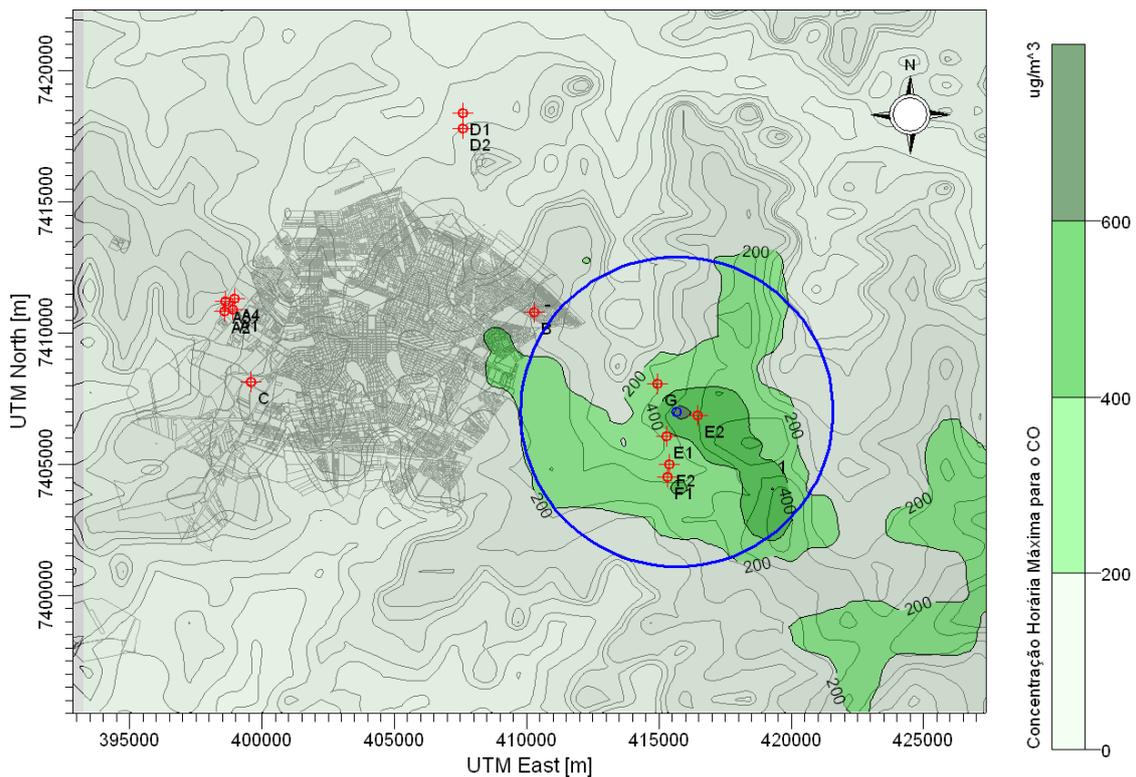


Figura 25 – Mapa de concentração com média horária máxima de CO para fontes fixas

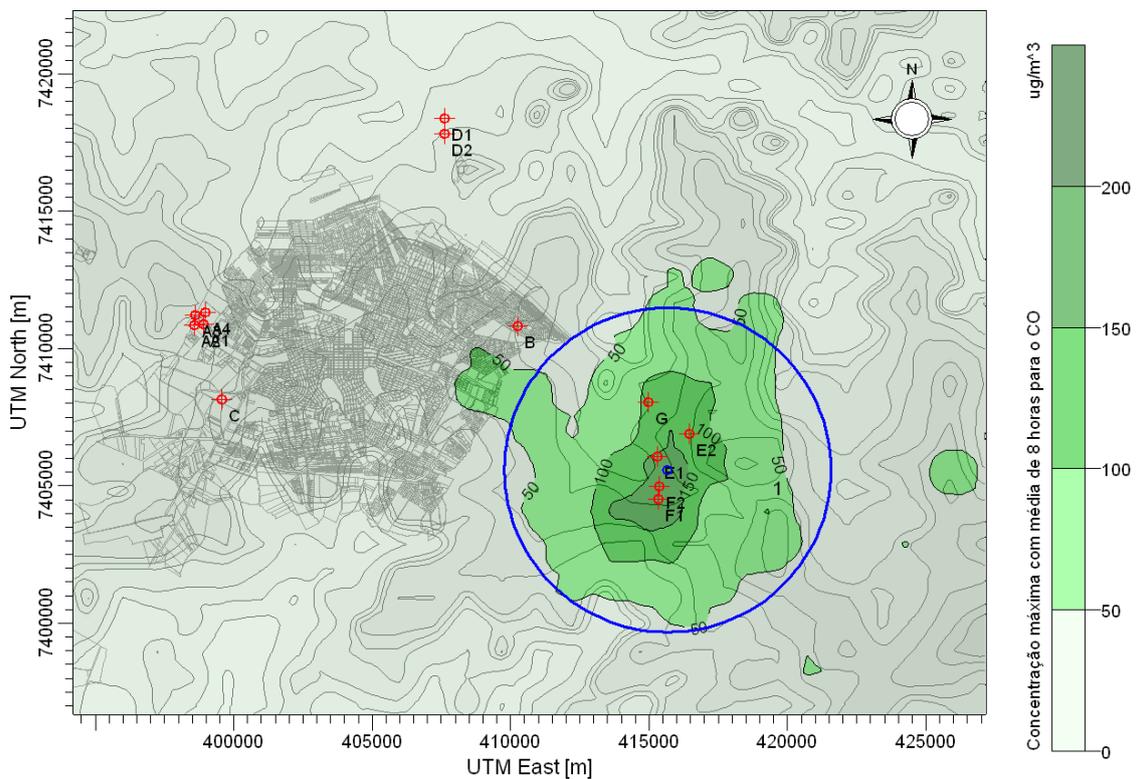


Figura 26 – Mapa de concentração com média máxima de oito horas para o CO para as fontes fixas

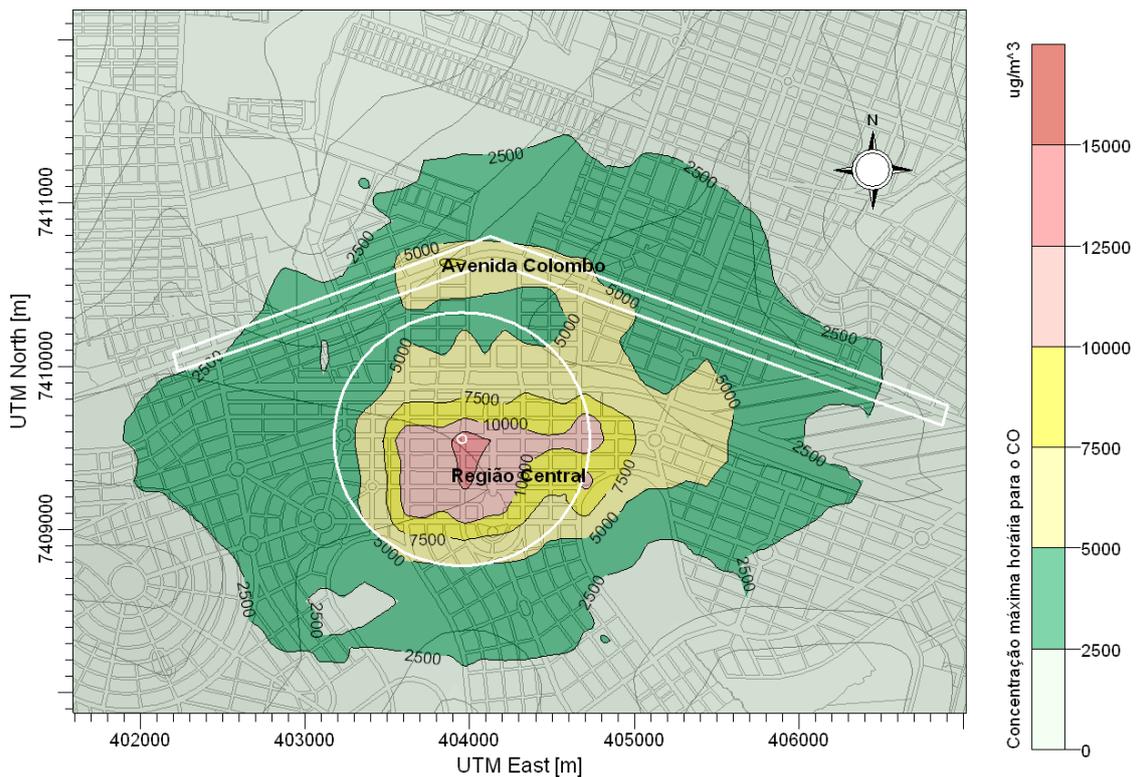


Figura 27 – Mapa de concentração máxima com média horária para o CO para as fontes móveis



Figura 28 – Mapa de concentração máxima com média de oito horas para o CO para as fontes móveis

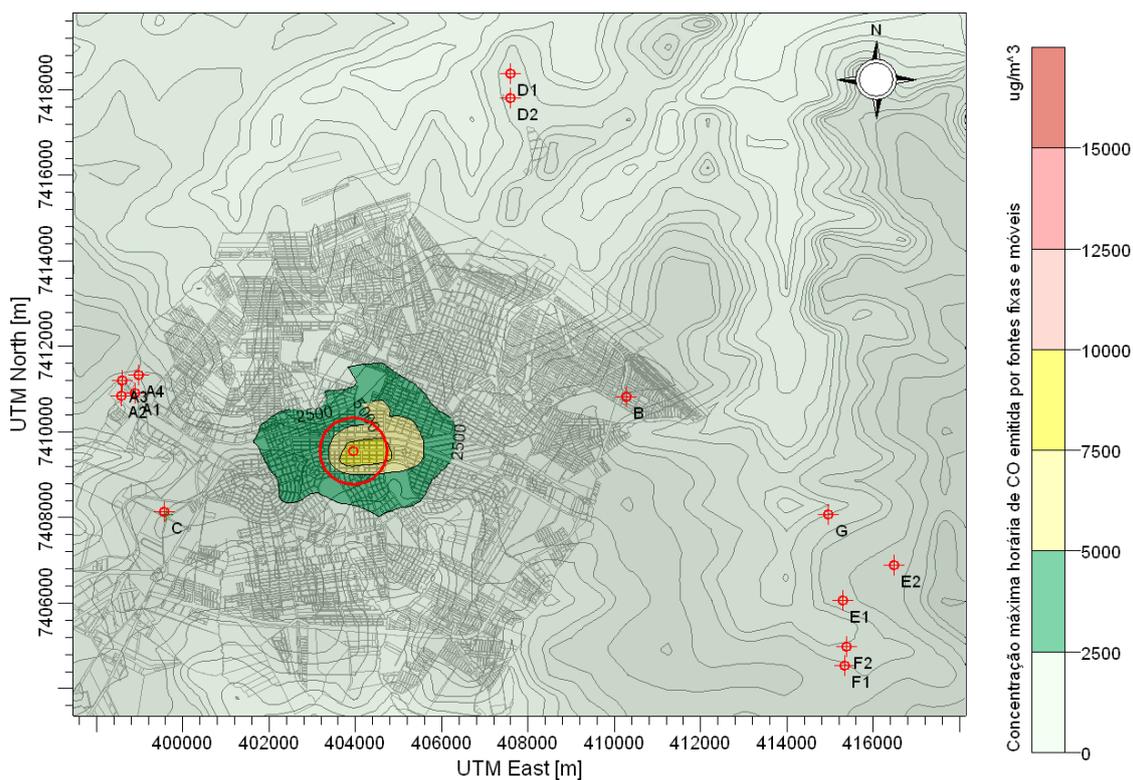


Figura 29 – Mapa de concentração horária máxima para o CO considerando para fontes totais

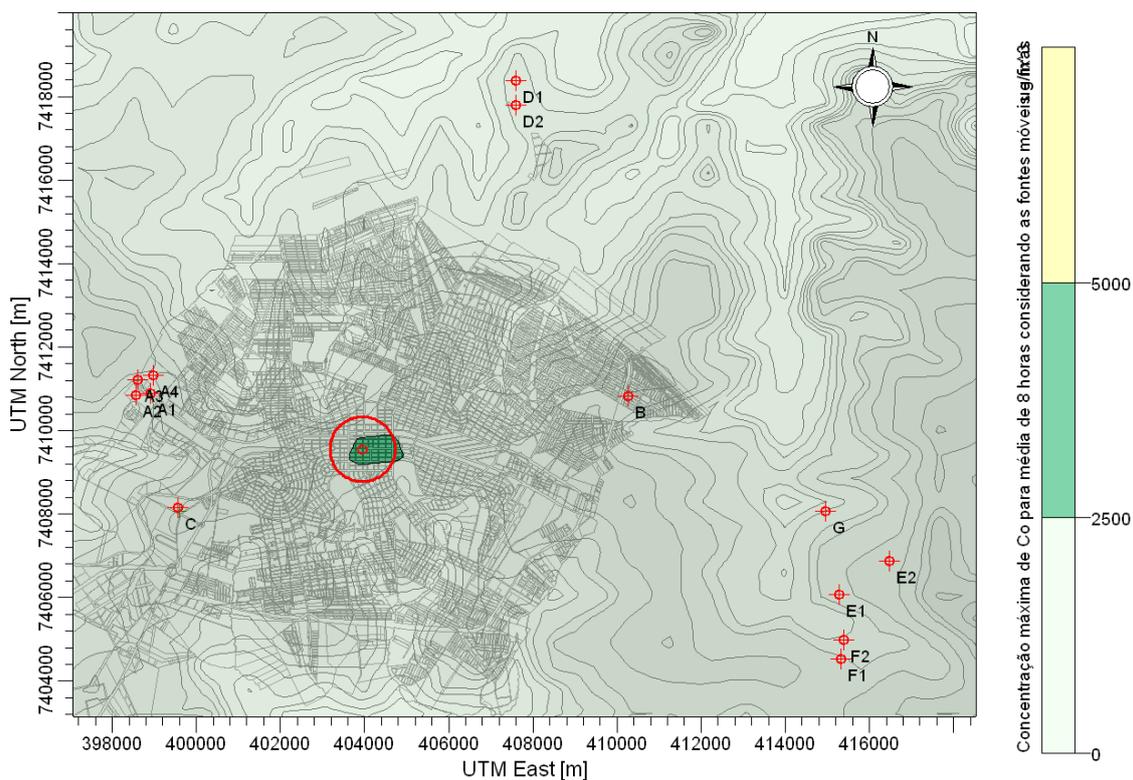


Figura 30 – Mapa de concentração com média de 8 horas para o CO para fontes totais

Nos mapas de dispersão, os centros das circunferências em destaque representam a localização dos receptores que obtiveram as máximas concentrações estimadas pelo Aermod. Para os demais mapas de concentração que serão apresentados no presente

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

trabalho, a localização das concentrações máximas será identificada da mesma forma, sendo omitida esta informação. Para os demais poluentes serão omitidos os mapas de concentração representando as simulações para as fontes conjuntamente (fixas + móveis), devido à diferença de concentração para as duas fontes e as distâncias entre as mesmas. Em relação às fontes fixas, verifica-se que o grupo de fontes formado por E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e G, apresentam as fontes com maior influência em relação à emissão de CO. Estas fontes apresentam como combustíveis bagaço de cana de açúcar e lenha.

Os picos de concentração ocorreram na região central da cidade, especificamente na Avenida Duque de Caxias, que representa uma região de grande circulação de pessoas e veículos. No trabalho de Lima (2007), o autor simulou, por meio do modelo de dispersão CAL3QHC, a dispersão de CO na região central da cidade com base em dados meteorológicos referentes ao ano de 2005 e fluxos de tráfego para o mesmo período, observando também pico de concentração na Avenida Duque de Caxias. A localização da Avenida, assim como as principais vias representadas está ilustrada na Figura 31.

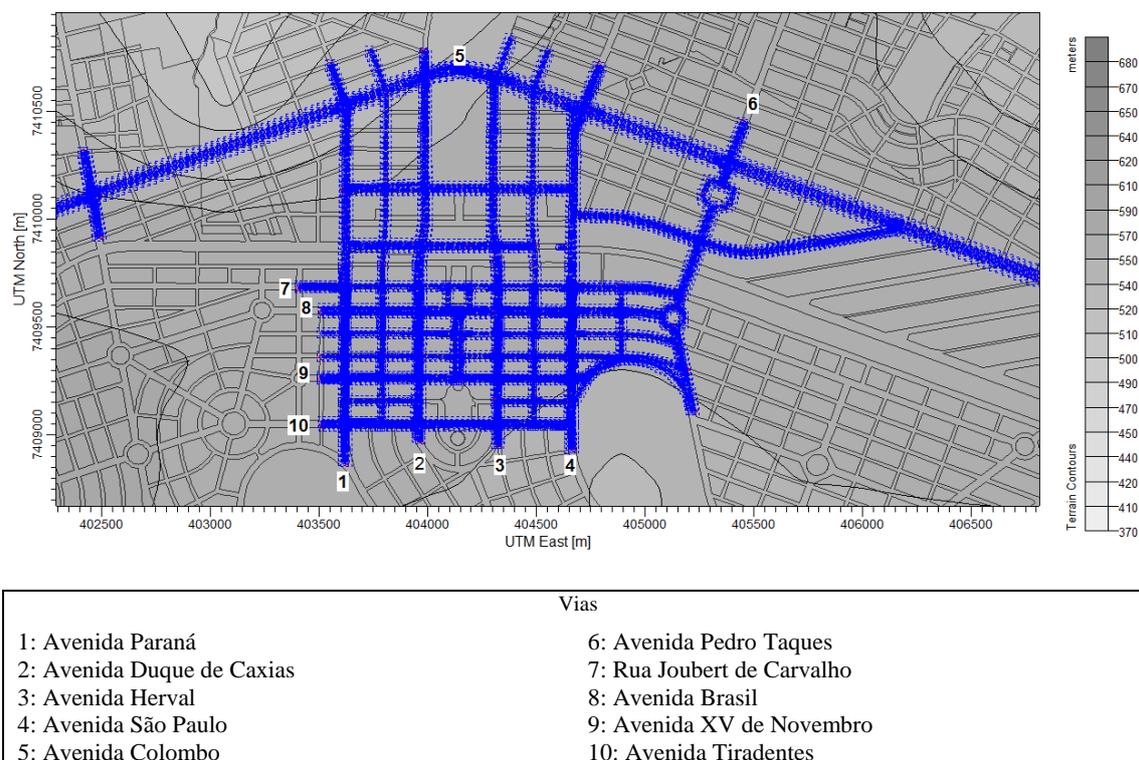


Figura 31 – Localização das Vias

Como forma de avaliar a concentração dos poluentes ao longo da Avenida Duque de Caxias, que apresentou a maior concentração em relação ao poluente CO, foram esboçados gráficos ilustrando o perfil de concentração de CO ao longo da

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Avenida, para médias horária e de 8 horas, respectivamente, conforme as Figuras 32 e 33.

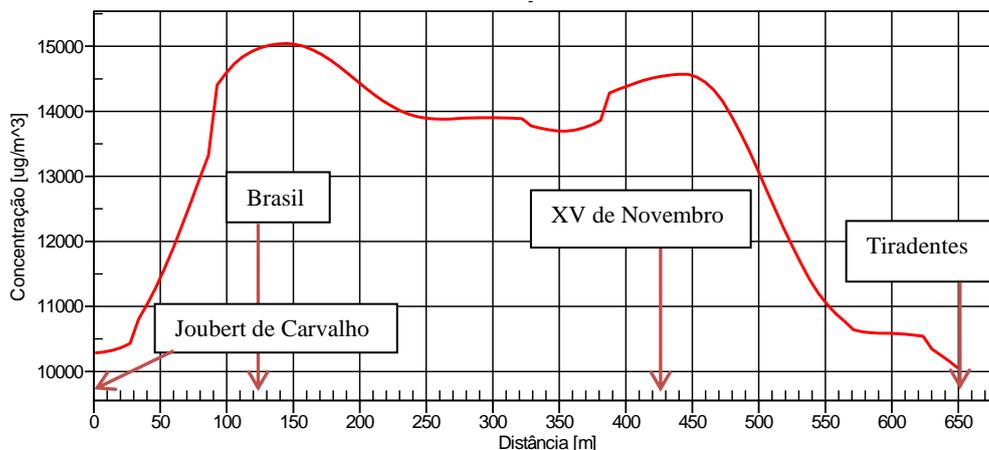


Figura 32 – Perfil de concentração de CO com média horária

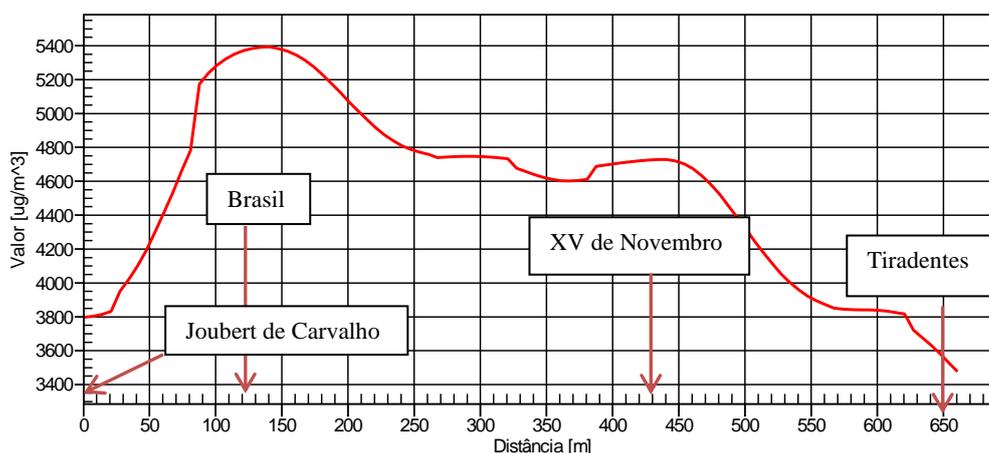


Figura 33 – Perfil de concentração de CO com média de 8 horas

Nas Figuras 32 e 33, as posições 0 m, 125 m, 430 m e 650 m representam respectivamente as interseções da Avenida Duque de Caxias com a Rua Joubert de Carvalho, Avenida Brasil, Avenida XV de Novembro e Avenida Tiradentes. O pico de concentração observado ocorreu próximo à interseção da Avenida Duque de Caxias com a Avenida Brasil (posição 125 m). Este pico é consequência do fluxo de veículos próximo à interseção e também pela presença do semáforo na interseção. As descrições das interseções apresentadas nas Figuras 32 e 33 serão mantidas para os demais perfis de poluentes analisados no trabalho.

## 5.1.2 Óxidos de enxofre

As concentrações máximas estimadas pelo modelo Aermód para os óxidos de enxofre estão apresentadas na Tabela 14, para as fontes móveis e fixas, isoladamente. Não foram realizadas simulações considerando os arcos de fila para o  $\text{SO}_x$  e também para o  $\text{NO}_x$ , como no caso do monóxido de carbono. A contribuição dos arcos em fila só foi analisada para o CO, haja vista que para este modo de operação do veículo, existe deficiência de oxigênio, favorecendo a formação de CO. Os poluentes  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$  precisam de oxigênio proveniente do ar de admissão, sendo que a emissão máxima ocorre quando os veículos estão em movimento. E em relação ao  $\text{NO}_x$ , tem-se ainda que a maior emissão do poluente ocorre quando a combustão ocorre em altas temperaturas, condição que se verifica quando os veículos estão em movimento.

Tabela 14 – Concentração máxima de  $\text{SO}_x$  estimada pelo Aermód

	Diária ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Fontes móveis	85,73	21,54
Fontes fixas	3,66	0,70

Verifica-se com base nos dados apresentados na Tabela 14 que as fontes fixas não ultrapassaram 5% da concentração estimada para as fontes móveis, tanto para a média diária quanto para a média anual. O comportamento do transporte do poluente na região de estudo para as fontes fixas e móveis está ilustrado nas Figuras 34 a 37.

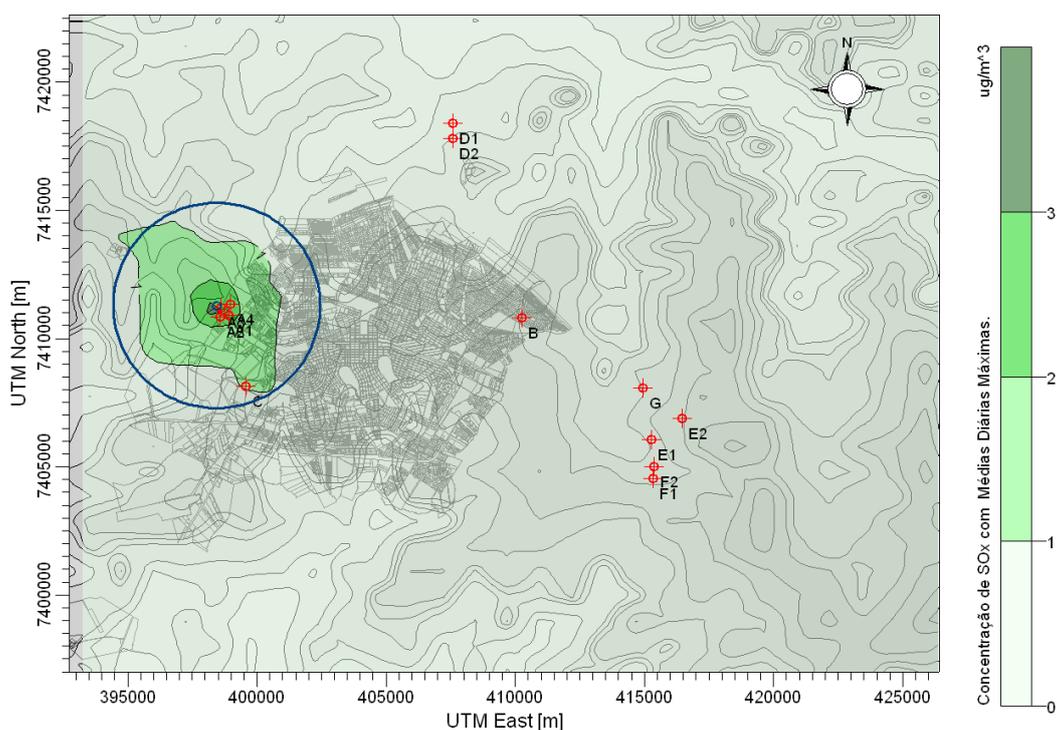
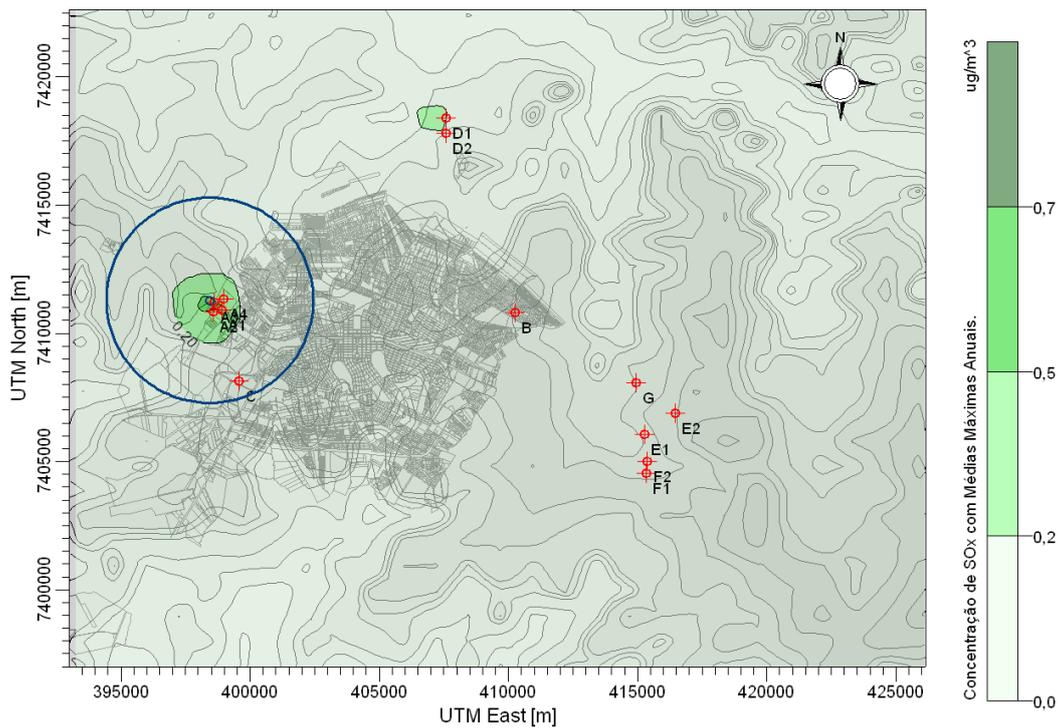
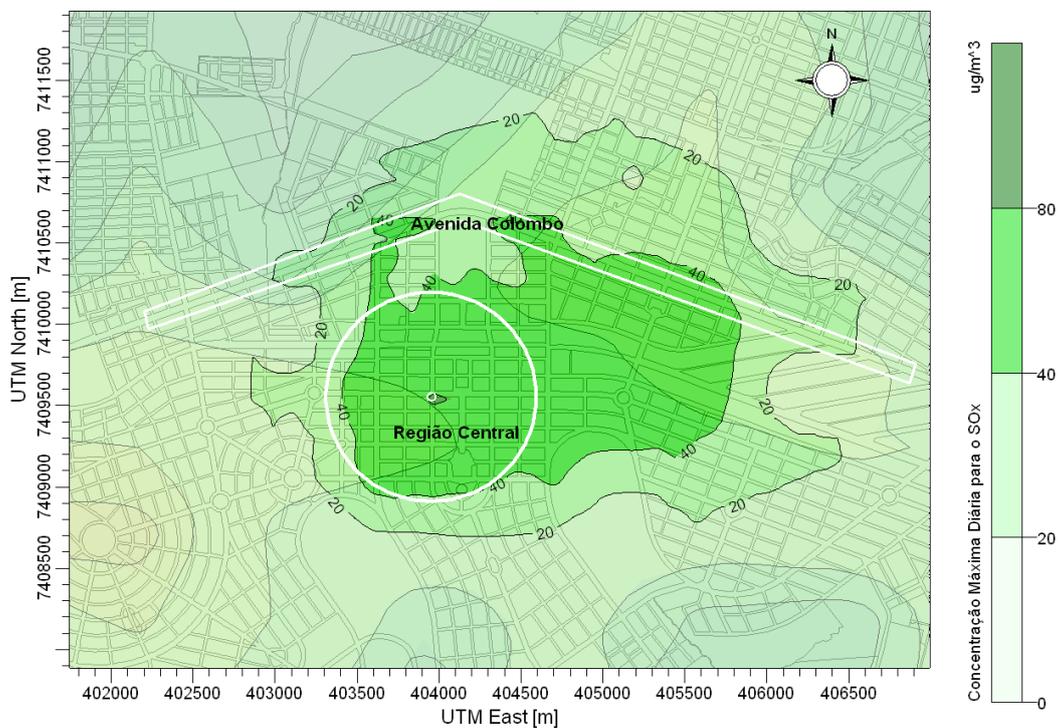


Figura 34 – Mapa de concentração máxima com média diária para o  $\text{SO}_x$  para as fontes fixasFigura 35 – Mapa de concentração máxima anual para o  $\text{SO}_x$  para as fontes fixas

Nota-se que as fontes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $D_1$  e  $D_2$  são mais influentes em relação à emissão do poluente  $\text{SO}_x$ . Estas fontes emissoras apresentam como combustíveis o óleo BPF e o óleo combustível tipo A.

Figura 36 – Mapa de concentração diária máxima para o  $\text{SO}_x$  para fontes móveis

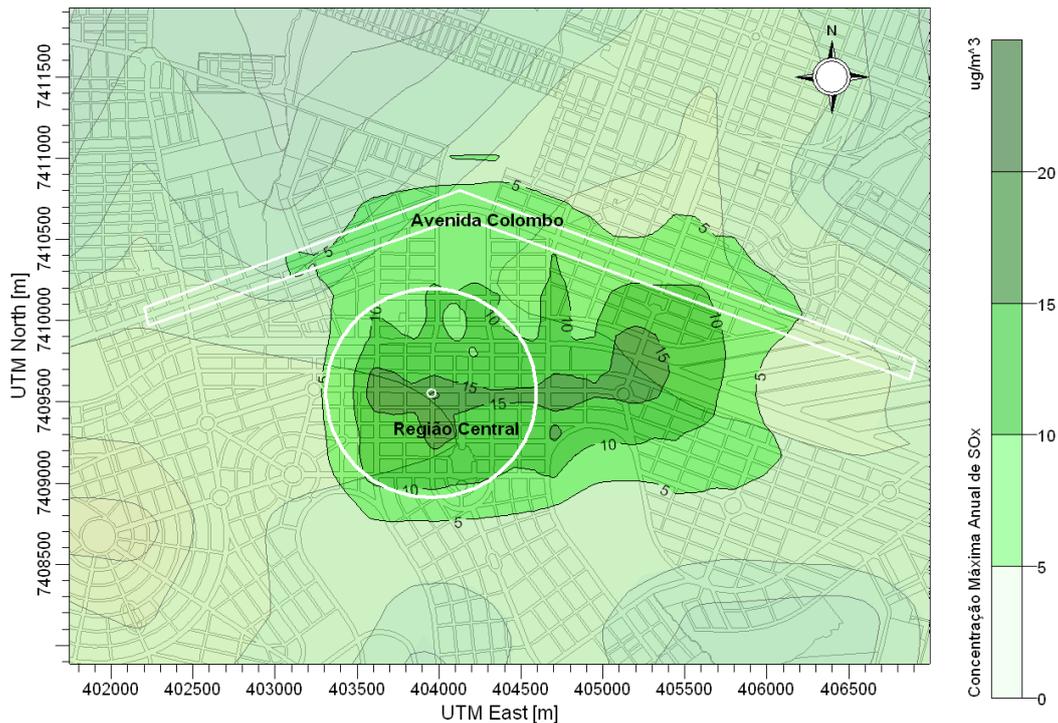


Figura 37 – Mapa de concentração anual máxima para o SO<sub>x</sub> para fontes móveis

Os perfis de concentração ao longo da Avenida Duque de Caxias, para o SO<sub>x</sub>, estão apresentados nas Figuras 38 e 39, com pico de concentração próximo à Avenida Brasil.

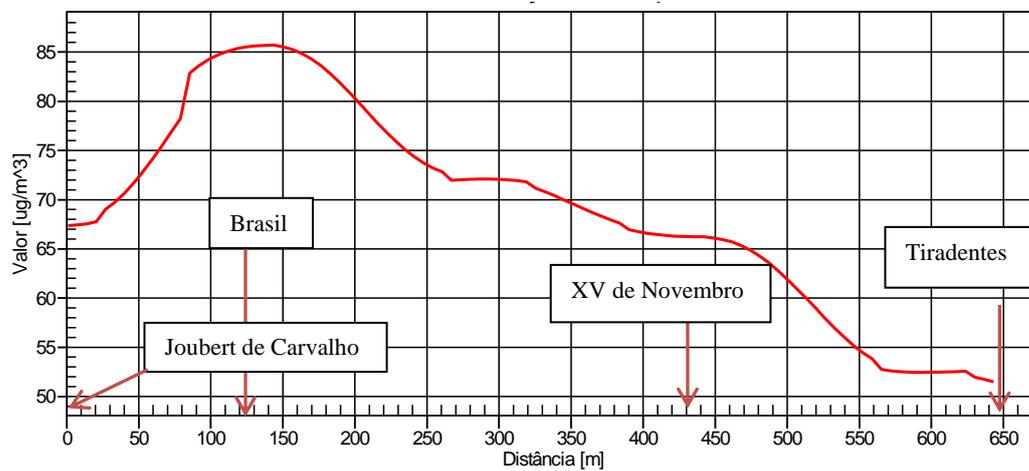


Figura 38 – Perfil de concentração diária para o SO<sub>x</sub> da Avenida Duque de Caxias

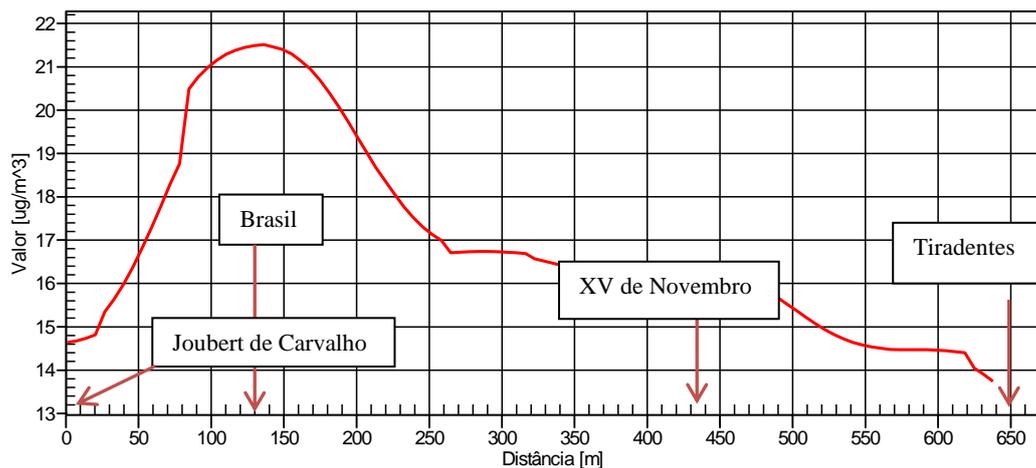


Figura 39 – Perfil de concentração anual de  $\text{SO}_x$  ao longo da Avenida Duque de Caxias

### 5.1.3 Óxidos de nitrogênio

As concentrações máximas estimadas pelo Aermód para o  $\text{NO}_x$  estão apresentadas na Tabela 15. Da mesma forma que para o  $\text{SO}_x$ , não foram realizadas simulações para os veículos em fila e em movimento separadamente, uma vez que, a formação do  $\text{NO}_x$  está mais fortemente relacionada com a presença de nitrogênio no ar de admissão que pela presença no nitrogênio no combustível. Verifica-se, assim como para os demais poluentes, que as fontes móveis apresentam uma emissão mais significativa em relação às fixas. As dispersões atmosféricas estão representadas nos mapas de concentração ilustrados nas Figuras 40 a 43.

Tabela 15 – Concentrações máximas de  $\text{NO}_x$  estimadas pelo Aermód

Tipo de fonte	Horária ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Fontes móveis	960,82	31,28
Fontes fixas	65,04	3,42

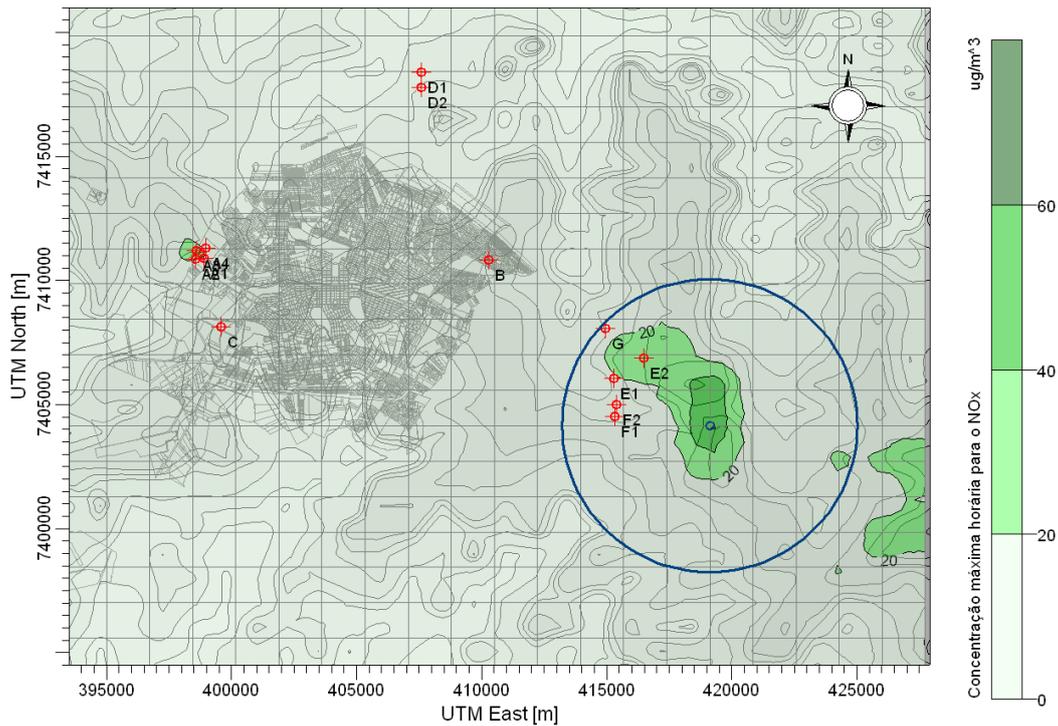


Figura 40 – Mapa de concentração para fontes fixas com médias horárias máximas para o  $\text{NO}_x$

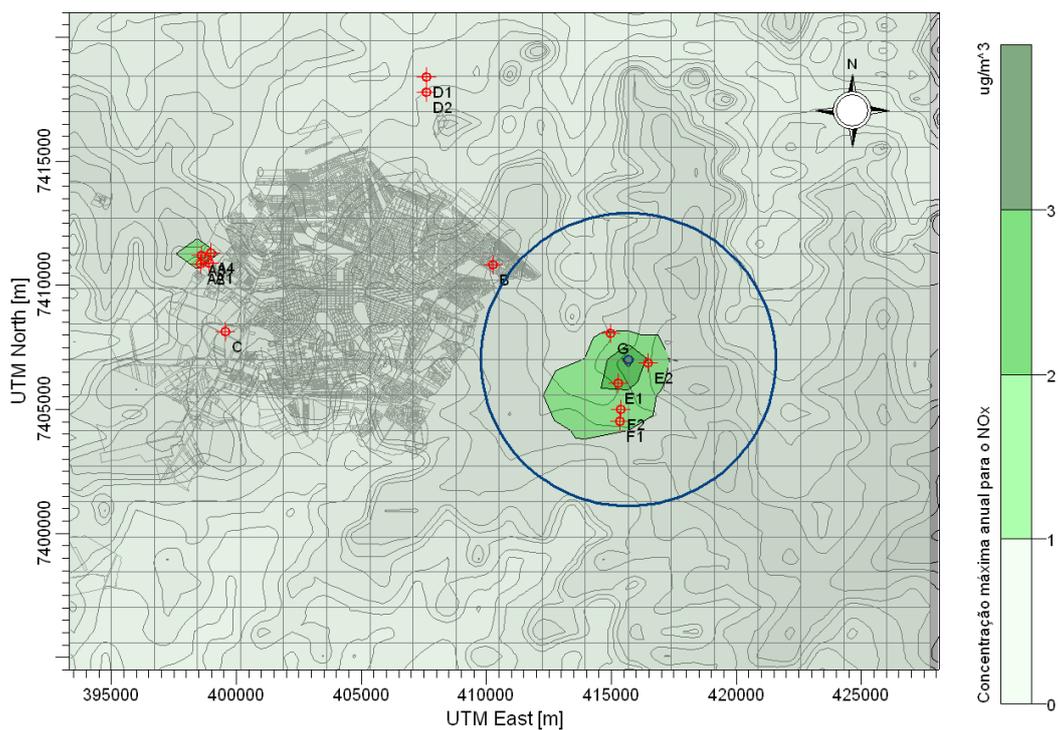


Figura 41 – Mapa de concentração com média anual para o  $\text{NO}_x$  para fontes fixas

As fontes fixas  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $G$  são mais expressivas em relação à emissão de  $\text{NO}_x$ . Nestas fontes são queimados os combustíveis bagaço de cana de açúcar e lenha.

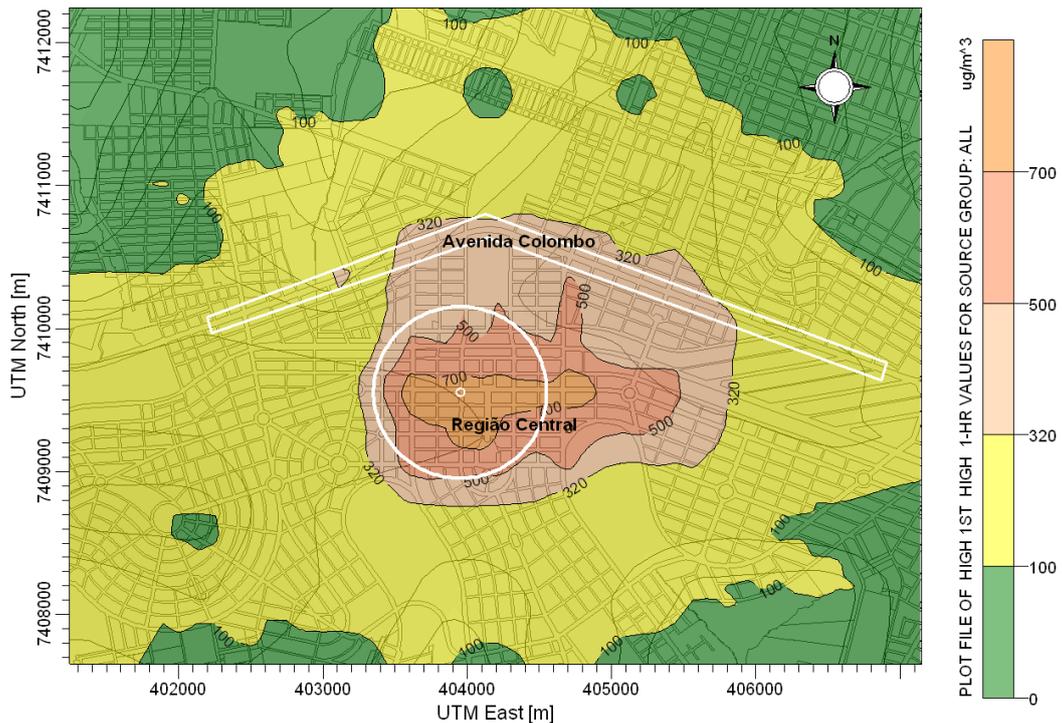


Figura 42 – Mapa de concentração horária máxima para o  $\text{NO}_x$  para fontes móveis



Figura 43 – Mapa de concentração anual para o  $\text{NO}_x$  para as fontes móveis

Entre os mapas apresentados, é preciso uma atenção especial para o mapa de concentração máxima horária (Figura 42) para o poluente  $\text{NO}_x$ , pois praticamente toda a região central apresentou níveis altos de concentração e que ultrapassaram os valores estabelecidos pela resolução Conama nº 03/1990 e também os níveis estabelecidos pela

OMS. Os perfis de concentração ao longo da Avenida Duque de Caxias estão apresentados nas Figuras 44 e 45, notando-se que o pico de concentração encontra-se próximo a interseção da Avenida Duque de Caxias com a Avenida Brasil.

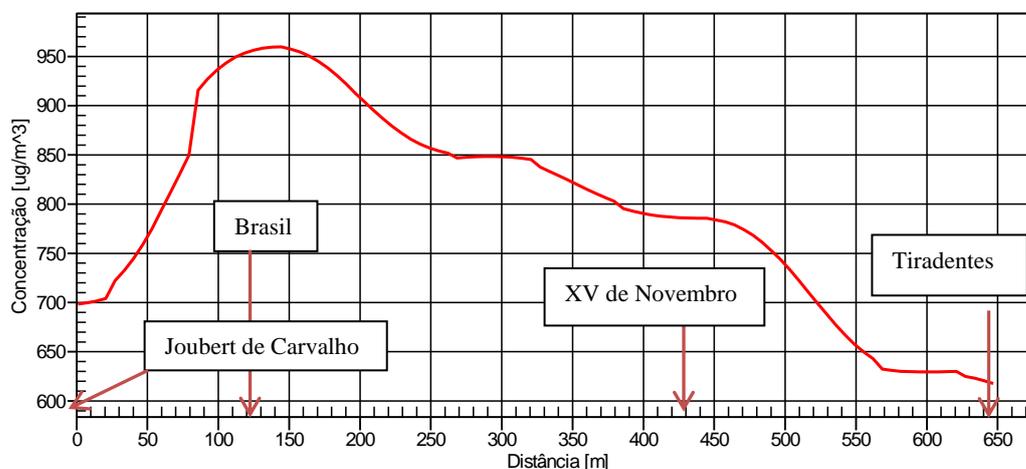


Figura 44 – Perfil de concentração horária máxima para o  $\text{NO}_x$

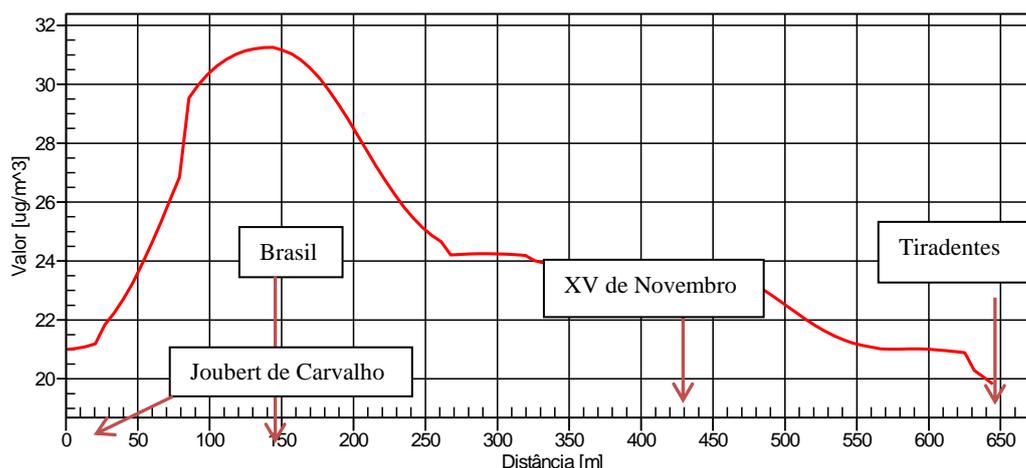


Figura 45 – Perfil de concentração anual máxima para o  $\text{NO}_x$

De maneira geral, as fontes móveis contribuíram para a emissão dos poluentes  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  mais que as fontes fixas, consideradas no estudo.

#### 5.1.4 Qualidade do ar com base Resolução Conama n° 03/1990

A estimação da qualidade do ar na região central de Maringá é realizada ao comparar os valores estimados pelo Aermód, para as fontes móveis, com os valores estabelecidos pela Resolução Conama n° 03/1990. Para facilitar a comparação, os valores obtidos e apresentados anteriormente foram rerepresentados na Tabela 16, além do Quadro 30, que é uma rerepresentação adaptada do Quadro 8 com os valores estipulados pela Resolução Conama n° 03/1990.

Tabela 16 – Concentrações de poluentes estimados e estipulados

Médias	Concentrações estimadas		
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1 hora	15040,99	960,82	
8 horas	5396,30		
24 horas			85,73
Anual		31,28	21,54

Quadro 30 – Padrões de qualidade do ar – Resolução CONAMA n° 3 de 28/06/1990

Poluente	Concentração média	Padrão primário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Padrão secundário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
SO <sub>2</sub>	Aritmética anual	80	40
	24 horas	365*	100*
CO	8 horas	10.000*	10.000*
	1 hora	40.000 *	40.000*
NO <sub>2</sub>	Aritmética anual	100	100
	1 hora	320	190

\* Concentração que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Fonte: Resolução CONAMA n° 3/1990.

Nota-se no Quadro 30 que, os poluentes SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> estão sob a forma de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, isto porque os últimos poluentes são indicadores de qualidade do ar, consagrados universalmente, ocorrendo com maior frequência e vinculados a efeitos adversos ao meio ambiente de maneira geral. Desta forma, para uma comparação direta entre os valores estabelecidos e estimados, considera-se que os poluentes NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, apresentados na Tabela 16, estão sob a forma de SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, visto que NO e SO se oxidam rapidamente quando lançados na atmosfera.

Ao comparar os valores da Tabela 16 com os do Quadro 30, tem-se que as concentrações máximas estimadas para as fontes móveis não ultrapassaram os valores estabelecidos pela Resolução Conama n° 03/1990, com exceção do valor estimado para NO<sub>x</sub>, para média horária, em que a concentração máxima estimada ultrapassou os valores definidos pela Resolução tanto para padrões primários, quanto para secundários. A extrapolação destes valores acarreta em consequências como: afetar a saúde da população (padrão primário) e causar efeito adverso sobre o bem estar da população e danos à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral (padrão secundário). Desta forma, a região central de Maringá apresentou qualidade do ar dentro dos padrões definidos pela Resolução Conama n° 03/1990, com exceção do NO<sub>x</sub>. No entanto, este resultado só poderia ser confirmado, com base em medições de poluentes, que no caso

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

de Maringá não é possível atualmente, uma vez que a cidade não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar, ou estudos quantitativos do poluente na região de estudo.

Para uma complementação na análise dos resultados de qualidade do ar, os valores estimados foram comparados aos valores estipulados pela OMS, que apresenta valores mais restritivos que a Resolução CONAMA n° 03/1990. Para esta análise, considere os Quadros 31 e 32.

Quadro 31 – Concentração e tempo de exposição máxima de CO recomendada pela OMS

Concentração de CO (mg/m <sup>3</sup> )	Tempo de exposição
100 (87 ppm)	15 min
60 (52 ppm)	30 min
30 (26 ppm)	1 h
10 (9 ppm)	8 h

Fonte: WHO (1999)

Quadro 32 – Valores de concentrações estipulados pela OMS

Poluente	Exposição média	Concentração (µg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de enxofre	24 horas	20
	10 minutos	500
Monóxido de carbono	8 horas	10.000
	1 hora	30.000
Dióxido de nitrogênio	Anual	40
	1 hora	200

Fonte: baseado em WHO (2005)

Em relação aos níveis estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) verifica-se que, para todos os poluentes, existiu alguma violação nos valores estabelecidos.

Em relação ao CO, os sinais e sintomas de envenenamento pelo poluente são variáveis em função da concentração de carboxihemoglobina. Desta forma, a OMS recomenda que o nível de carboxihemoglobina não ultrapasse o valor percentual de 2,5%, e, para isto, a concentração de CO e o tempo de exposição máxima, deve corresponder aos valores apresentados no Quadro 31. Considerando uma situação crítica em que o pico de concentração horária obtido para o CO (aproximadamente 15 mg/m<sup>3</sup>) permanecesse constante ao longo do dia, a exposição máxima deveria ser inferior a 8 horas para que o nível de carboxihemoglobina não ultrapasse 2,5 %.

Considerando que todo NO<sub>x</sub> está sob a forma de NO<sub>2</sub>, tem-se que para a média horária existiu extrapolação no valor estipulado de 200 µg/m<sup>3</sup> pela OMS. Em relação ao

SO<sub>x</sub>, considerando-o sob a forma de SO<sub>2</sub>, existiu extrapolação no valor definido pela OMS, para média de 24 horas. Para a concentração de 24 horas observada para o SO<sub>2</sub>, poderia ocorrer danos crônicos às plantas, conforme efeitos adversos apresentados no Quadro 4, ilustrado no item 2.1.4.

## 5.2 Estudo da sazonalidade

A influência da sazonalidade na dispersão dos poluentes é avaliada no presente estudo considerando a emissão de CO por fontes móveis presentes especificamente na região central de Maringá e parte da Avenida Colombo. A escolha por estas regiões de estudo, fonte emissora e tipo de poluente foi dada respectivamente por representar uma região com alta densidade populacional e fluxo de veículos, por ser praticamente o único tipo de fonte emissora presente na região e ser o principal poluente emitido pela fonte considerada.

No item 5.2.1, são apresentadas as concentrações máximas estimadas pelo modelo para cada estação do ano de 2009 e, no item 5.2.2, são apresentados os mapas de concentração avaliando a dispersão dos poluentes para as estações.

### 5.2.1 Concentrações estimadas

As concentrações máximas de CO foram estimadas para médias de 1 e 8 horas, médias definidas pela Resolução CONAMA n° 03/1990, e estão apresentadas na Tabela 17. Verifica-se que os maiores valores de concentração estimados foram obtidos para as estações mais frias do ano. Os resultados estimados não ultrapassaram os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 03/1990, que atribui para médias de 1 e 8 horas as concentrações de 40.000 µg/m<sup>3</sup> e 10.000 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabela 17 – Concentrações máximas de CO para cada estação do ano

Estação	Concentração (µg/m <sup>3</sup> )	
	1 hora	8 horas
Verão	13.386,64	4.622,36
Outono	15.040,99	5.280,04
Inverno	14.163,29	5.396,31
Primavera	14.021,45	3.998,95

Os picos de concentração horária para o CO não ocorreram no horário de pico de emissão (14:00), ressaltando a influência das condições dispersivas na concentração dos poluentes, como por exemplo velocidade do vento, temperatura atmosférica e pressão atmosférica. Nas estações mais frias do ano os ventos são mais brandos com

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

temperaturas mais baixas, inibindo processos de turbulência. Em relação à pressão atmosférica, tem-se que nas estações mais frias do ano prevalecem massas de ar de alta pressão, as quais por apresentarem ar mais frio, inibem processos de convecção, aprisionando os poluentes atmosféricos e consequentemente apresentando concentrações mais elevadas.

Em relação às concentrações máxima horárias, tem-se que os picos ocorreram a 19:00 nas estações de verão, primavera e outono e a 18:00 para o inverno. Para estes horários, as emissões corresponderam a 89% e 91% da emissão máxima.

Na Tabela 17, pôde ser observado que o valor da concentração horária máxima para o outono foi superior ao valor estimado para o inverno. Para uma melhor avaliação e confirmação dos resultados estimados pelo Aermid em relação às concentrações horárias, foram estimadas as 10 maiores concentrações em cada estação e estabelecidas as médias entre os resultados, as quais foram representadas no gráfico da Figura 46.

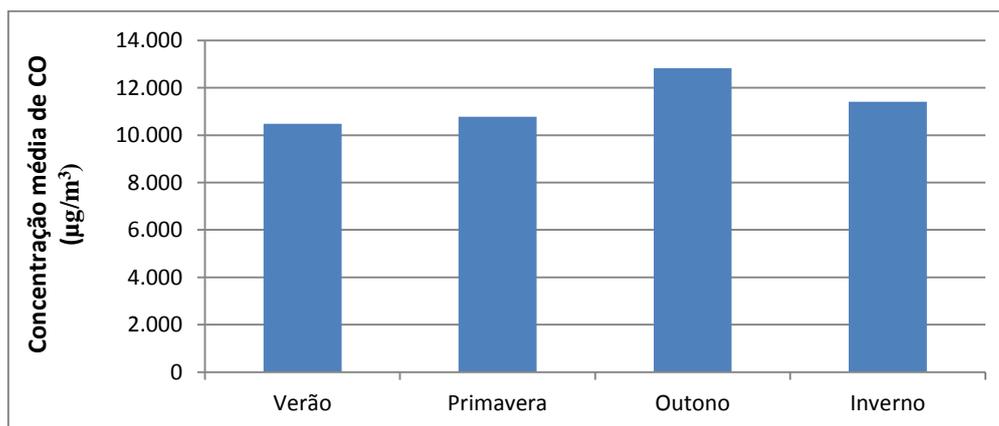


Figura 46 – Médias horárias máximas

O resultado observado anteriormente para a concentração máxima horária foi confirmado para as médias entre as 10 maiores concentrações, ou seja, as concentrações máximas foram superiores para as estações mais frias do ano, sendo que para o ano de 2009, as condições meteorológicas foram menos favoráveis à dispersão atmosférica de CO, principalmente na estação do outono, quando consideradas as médias horárias. Maiores concentrações nas estações mais frias do ano são justificadas pelo fato de que nestas estações as temperaturas são inferiores e as situações de calmarias ocorrem com maior frequência.

Os valores máximos de concentração observados ocorreram, para a maioria dos pontos, no período noturno e com valores de velocidade de 0,5 m/s. Estes dois

parâmetros refletem uma condição dispersiva menos favorável para o poluente, pois, no período noturno, a atmosfera é mais estável devido ao resfriamento da superfície terrestre, diminuindo a altura da camada limite atmosférica e, conseqüentemente, diminuindo a dispersão vertical do poluente. Já a baixa velocidade acarreta em uma menor dispersão horizontal, o que condiz com o que é observado por Turner (1994), em que a concentração da pluma é inversamente proporcional à velocidade do vento.

Para fazer uma comparação específica entre os valores máximos observados para as estações de inverno e outono, considere a Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros nos picos de concentração

Estação	Temperatura média para as 10 maiores concentrações	Velocidade de 0,5 m/s observada nos picos de concentração	Horário para a maioria de picos de concentração
Outono	22,77	90%	19:00 (70 %)
Inverno	22,35	100%	20:00 (50 %)

Ao avaliar os parâmetros temperatura média, velocidade e horário em que ocorreu os picos de concentração, apresentados na Tabela 18, têm-se que: não existiu diferença significativa entre as médias de temperatura para as duas estações; para a maioria dos pontos a velocidade era considerada baixa ( $v=0,5$  m/s) acarretando em uma menor dispersão dos poluentes e conseqüentemente uma maior concentração de CO; e em relação aos horários de pico observados para as estações do outono e inverno, verificou-se que os picos de concentração ocorreram as 19:00 para o outono e 20:00 para o inverno, quando as taxas de emissão correspondiam respectivamente a 89% e 66% da emissão máxima.

Resumidamente, para as estações de outono, em média, as condições meteorológicas menos favoráveis ( $v=0,5$  m/s) ocorreram em momentos de maior emissão atmosférica de CO, comparada com a estação do inverno, acarretando em uma maior concentração de CO no outono quando comparado com o inverno, para as médias horárias.

### 5.2.2 Mapas de concentração

Nesta etapa do trabalho, os mapas de concentração gerados pelo Aermot, tiveram dois objetivos específicos: avaliar as áreas impactadas pela dispersão de CO e representar a qualidade do ar na região de interesse com base em índices, apresentados pela CETESB, no relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo de 2009

(CETESB, 2009 a). Neste relatório, a CETESB classifica a qualidade do ar por meio de índices e cores, em função da concentração de CO, mostradas no Quadro 33.

Quadro 33 – Classificação da qualidade do ar

Qualidade do ar	Cores	Concentração de CO (ppm)
Boa	Verde	0-4,5
Regular	Amarelo	> 4,5 e $\leq 9$
Inadequada	Laranja	> 9 e < 15
Má	Vermelho	$\geq 15$ e < 30
Péssima	Púrpura	$\geq 30$

Para a execução dos mapas de concentração, foram consideradas: conversão da unidade de concentração de ppm, apresentada na Quadro 33, para  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nos mapas de concentração; a dispersão resultante e apresentada nos mapas consideram apenas as fontes representadas no estudo além da inexistência de concentração de fundo, pelo fato de não existirem medidas de concentração de poluente na região de interesse.

Os mapas de concentração para média horária para as estações: verão, primavera, inverno e outono estão apresentados nas Figuras 47, 48, 49 e 50.



Figura 47 – Mapa de concentração horária para o verão

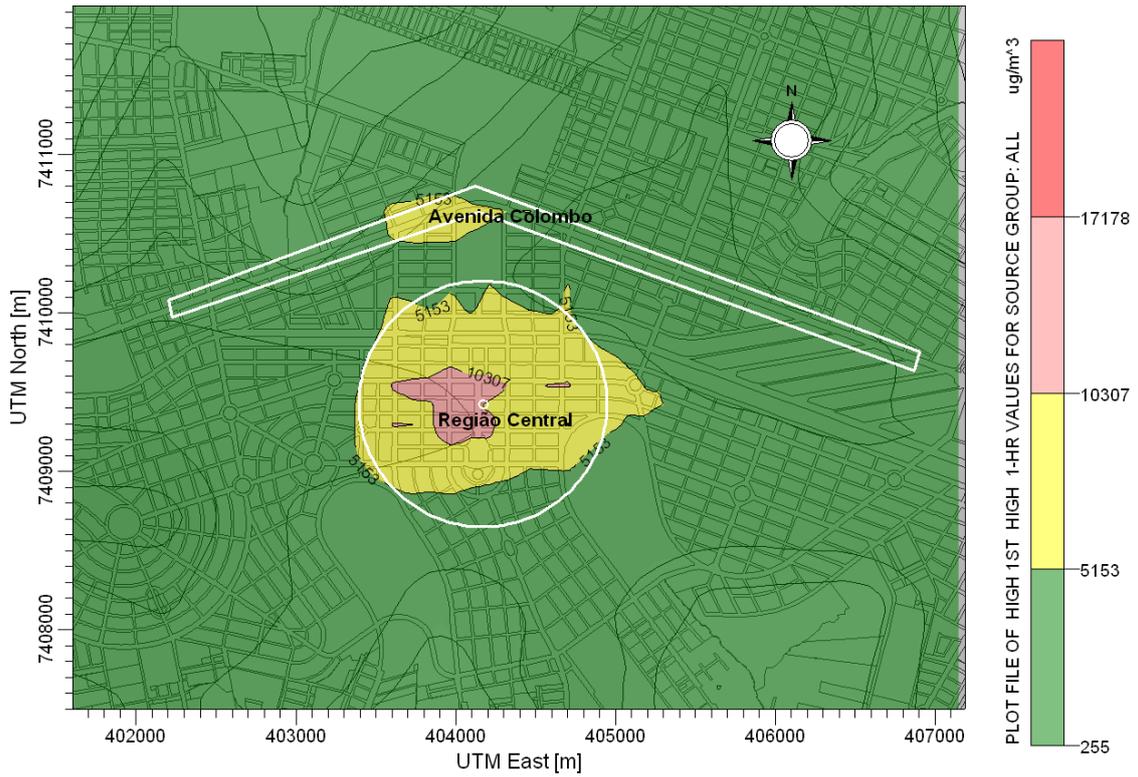


Figura 48 – Mapa de concentração horária para a estação primavera

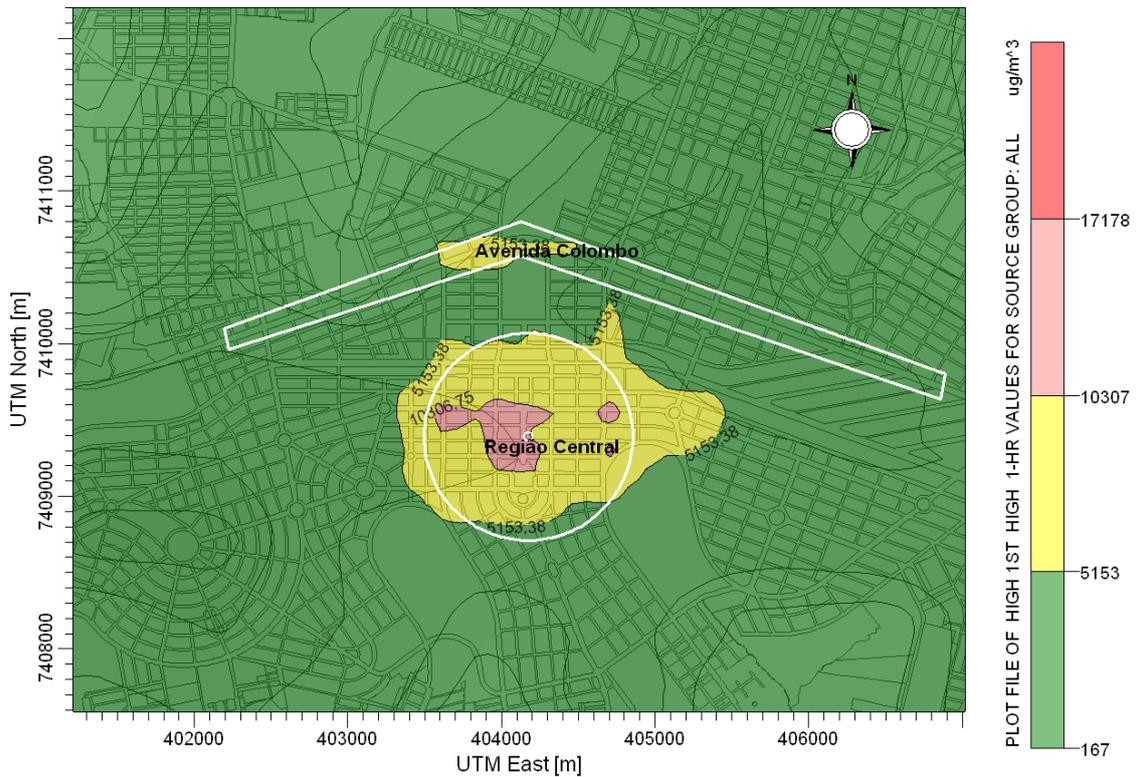


Figura 49 – Mapa de concentração horária para a estação inverno

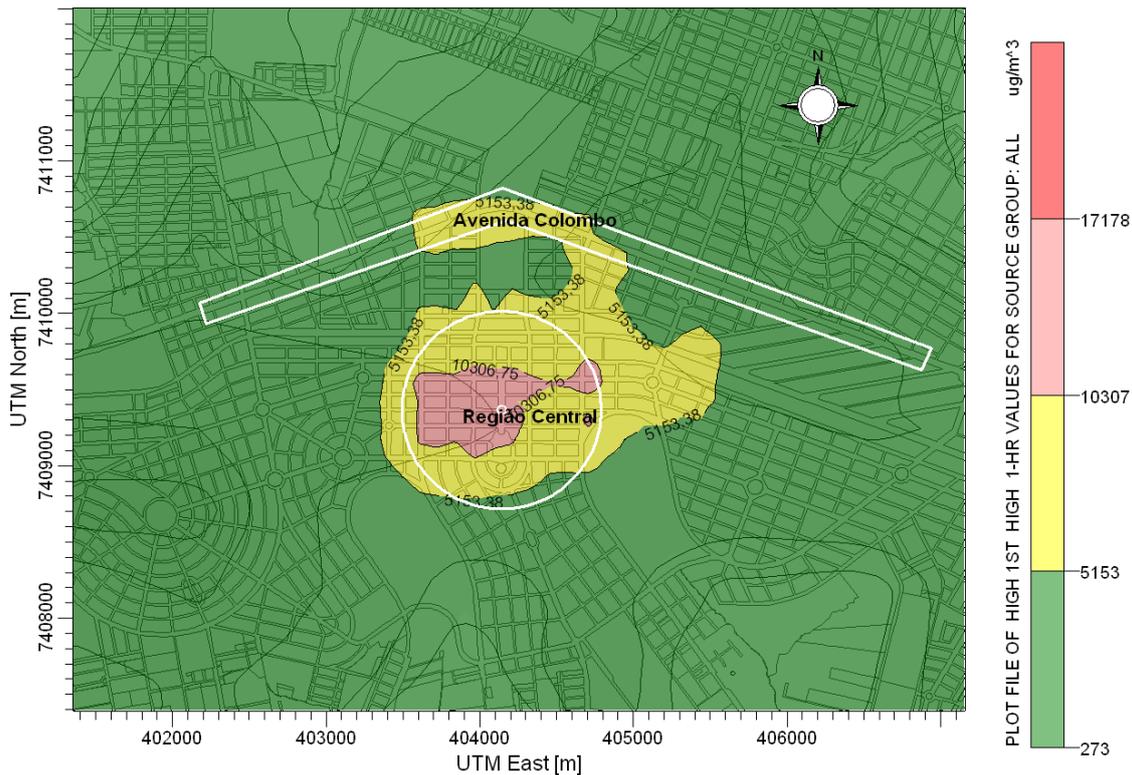


Figura 50 – Mapa de concentração horária para a estação outono

Os mapas de concentração para as quatro estações do ano, ilustraram que, sob determinadas condições meteorológicas e de emissão de CO, foram obtidas concentrações máximas que caracterizaram as regiões com qualidade do ar boa, regular e inadequada. Para a maioria das estações, este pico de concentração ocorreu na Avenida Duque de Caxias. Verifica-se também que a região central é a mais impactada, por concentrar o maior número de fontes emissoras.

Observa-se, visualmente, que a estação de outono impactou áreas de receptores mais distantes, com nível de concentração inadequado. Nesta estação, observou-se também uma ligação entre a Avenida Colombo e a região central por uma região de tom amarelo, ou seja, receptores com nível de concentração considerado regular. Apesar de os mais altos valores de concentração de CO se apresentarem na região central da cidade, notam-se, nos mapas de concentração, regiões com níveis significantes de concentração do poluente em pontos da Avenida Colombo, principalmente nas interseções semaforizadas.

Entre os mapas apresentados, nota-se que as estações mais frias do ano apresentam condições menos favoráveis à dispersão dos poluentes, apresentando mais receptores com níveis de concentração considerados como regular e inadequado, se comparado com os mapas das estações mais quentes. Para as quatro estações do ano,

observou-se que os picos ocorreram na região central da cidade, destacando esta região como crítica em relação à emissão e concentração de CO.

### 5.3 Agressividade do meio

Nesta etapa do trabalho, será apresentado um estudo em que é verificada a agressividade do meio a redes elétricas de transmissão, localizadas e distribuídas em Maringá. Entre os poluentes avaliados, os óxidos de nitrogênio e de enxofre são considerados agressivos a materiais metálicos expostos ao meio ambiente, por propiciarem corrosão atmosférica. No Brasil, a agressividade do meio atmosférico é avaliado em termos do poluente SO<sub>x</sub> e é dado com base na NBR 14.643 da ABNT. Como a NBR não trata o NO<sub>x</sub>, será realizada apenas uma abordagem comparativa com o SO<sub>x</sub>, para as fontes fixas, avaliando a área de influência das plumas dos poluentes.

Para análise quantitativa, o meio será classificado e caracterizado quanto à corrosividade atmosférica, com base na NBR 14.643 da ABNT e os valores de concentração de SO<sub>2</sub> aplicados são os estimados pelo Aermod. Para a análise qualitativa, comparando as áreas de atuação dos poluentes, serão obtidos mapas de concentração para os poluentes com a localização e distribuição das redes elétricas de transmissão.

Os objetivos no estudo de agressividade do meio são:

- Determinar a localização das redes elétricas de transmissão presentes em Maringá;
- determinar a agressividade do meio, comparando os resultados de concentração do poluente SO<sub>2</sub>, estimado pelo Aermod, com a NBR 14.643 da ABNT; e
- apresentar os mapas de concentração dos poluentes SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, incluindo as redes elétricas de transmissão, para as fontes fixas.

#### 5.3.1 *Localização das redes elétricas de transmissão*

As redes elétricas de transmissão georreferenciadas e representadas no Aermod, foram obtidas por meio do Google Maps®. O desenvolvimento desta fase ocorreu mediante as etapas:

- Localização das redes elétricas de transmissão, em que as redes foram observadas e localizadas no Google Maps®, conforme ilustra a Figura 51.

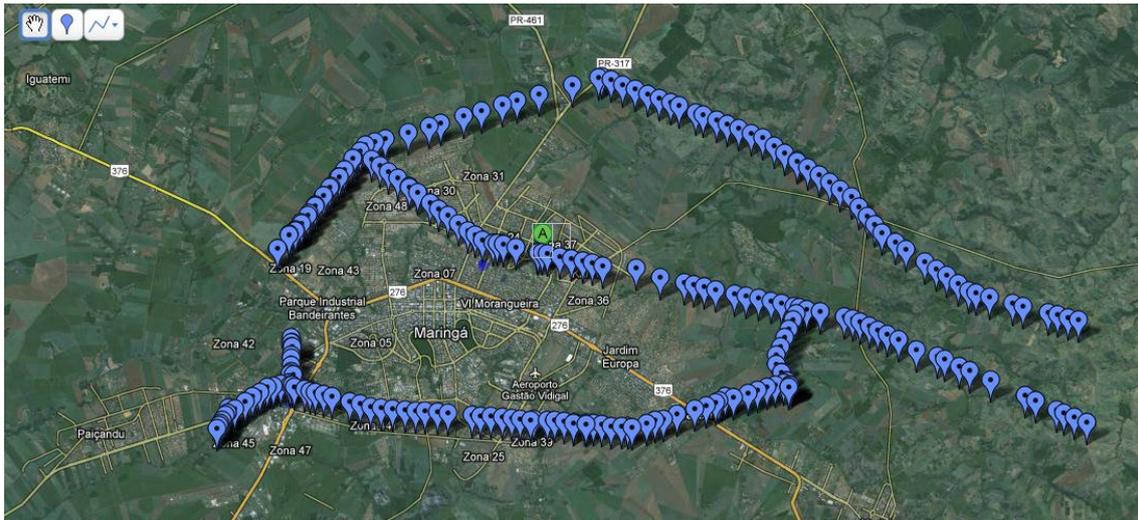


Figura 51 – Localização das redes elétricas de transmissão no Google Maps

- Com base nas coordenadas das redes elétricas de transmissão obtidas na etapa anterior, estas foram representadas no Aermod pontualmente.
- As redes elétricas de transmissão foram então ligadas por meio de linhas representando os cabos de transmissão, obtendo-se finalmente a rede de transmissão em tom laranja, apresentada pela Figura 52.

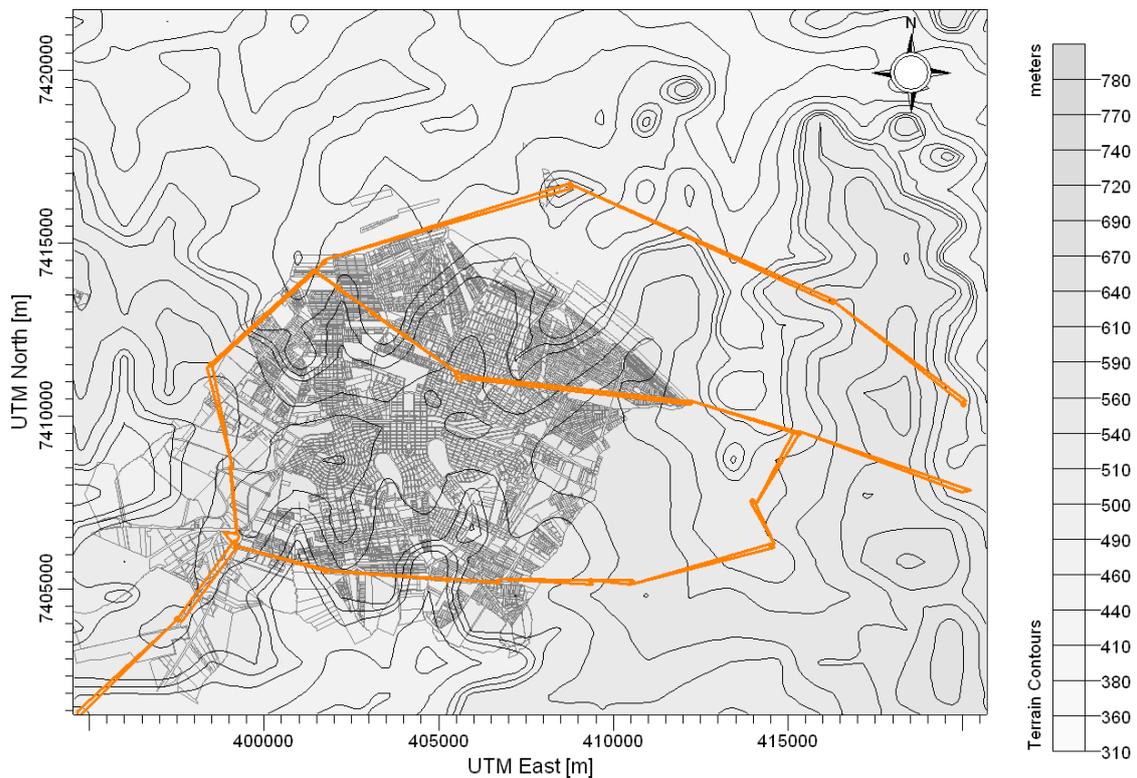


Figura 52 – Localização das redes elétricas de transmissão no Aermod

### 5.3.2 Estudo da Agressividade do Meio

O estudo da agressividade do meio aborda a corrosividade atmosférica, em termos da NBR 14.643, em que a corrosividade é classificada em cinco categorias, variando de muito baixa a muito alta. Na NBR 14.643, para a classificação da atmosfera em termos de corrosividade, torna-se necessário determinar a concentração dos contaminantes SO<sub>2</sub> e Cl<sup>-</sup>, além do tempo de superfície úmida, definido no item 4.7, como o número de horas, no ano, em que a umidade relativa do ar supera o percentual de 80% e a temperatura é superior a 0 °C.

A concentração de SO<sub>2</sub> foi estimada por meio de modelagem, a concentração de Cl<sup>-</sup> foi considerada insignificante, considerando a longa distância do oceano e o tempo de superfície úmida foi dado com base nas condições meteorológicas referentes ao ano de 2009. Outros contaminantes, entre os quais é citado o NO<sub>x</sub>, também apresentam efeito sobre a corrosividade de atmosferas específicas. Entretanto, o poluente não é discutido na referida norma, e será omitido em termos de classificação de corrosividade no estudo.

Na NBR 14.643, a concentração anual de SO<sub>2</sub> é usada para a classificação da corrosividade, sendo que as medidas de concentração em curto prazo servem apenas de orientação. As concentrações estimadas pelo Aermod, para as fontes móveis e fixas, estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Concentração máxima de SO<sub>2</sub> estimada pelo Aermod

Fonte emissora	Concentração anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentração diária ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Fixa	0,70	3,66
Móvel	21,54	84,73

Com base na concentração anual de SO<sub>2</sub>, representada pelo símbolo A<sub>c</sub>, o meio é classificado em categorias variando de A<sub>0</sub> a A<sub>4</sub>, conforme representação das categorias no Quadro 34.

Quadro 34 – Classificação para o SO<sub>2</sub>

Concentração de SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Categoria
$A_c \leq 12$	A <sub>0</sub>
$12 < A_c \leq 40$	A <sub>1</sub>
$40 < A_c \leq 90$	A <sub>2</sub>
$90 < A_c \leq 250$	A <sub>3</sub>



	ou C <sub>2</sub>	ou C <sub>2</sub>						ou C <sub>5</sub>						
--	----------------------	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	--

Quadro 37 – Categorias de corrosividade atmosférica para zinco e cobre

	T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>

Quadro 38 – Categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio

	T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>3</sub>			T <sub>4</sub>			T <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> ou C <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> ou C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> ou C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>

Desta forma, considerando as fontes móveis e fixas, representadas no estudo, Maringá apresenta uma atmosfera com corrosividade baixa (C<sub>2</sub>) a média (C<sub>3</sub>) para os metais e ligas metálicas expostos ao meio, conforme se observa na Tabela 20. Desta forma, as redes elétricas de transmissão localizadas em Maringá estão sujeitas à corrosividade variando de C<sub>2</sub> a C<sub>3</sub>, dependendo da constituição das redes. Para a categoria C<sub>3</sub>, os materiais, presentes nas redes de transmissão, apresentam taxa de corrosão anual (T<sub>c</sub>), variando conforme os valores apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Agressividade do meio para metais e ligas metálicas

Metal	Categoria de corrosividade	Taxa de corrosão dos metais (g/m <sup>2</sup> .a) – categoria C <sub>3</sub>
Aço-carbono	C <sub>2</sub> ou C <sub>3</sub>	200 < T <sub>c</sub> ≤ 400
Zinco e cobre	C <sub>3</sub>	5 < T <sub>c</sub> ≤ 15
Alumínio	C <sub>3</sub>	0,6 < T <sub>c</sub> ≤ 2

O nível de corrosão e, conseqüentemente, o nível de taxa de corrosão dependem, para o presente estudo, da concentração do contaminante na atmosfera e do tempo de

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

superfície úmida a qual o meio está exposto. Com base na taxa de corrosão do metal, pode-se estimar o tempo de vida útil do metal e tomar medidas a fim de evitar ou prevenir a corrosão dos materiais presentes nas redes de transmissão.

### 5.3.3 Mapas de concentração

Neste tópico, são apresentados inicialmente o mapa de concentração anual para as fontes totais de  $\text{SO}_x$  apresentando a distribuição e localização das redes elétricas de transmissão, em seguida são apresentados mapas de concentração para as fontes fixas, considerando a emissão de  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , verificando as áreas de atuação das plumas dos poluentes.

O mapa de concentração apresentado inicialmente para o  $\text{SO}_x$ , é apresentado com base em cores definidas a partir da concentração do poluente na norma, ou seja, variando com base nas categorias  $A_0$  a  $A_1$ , conforme ilustra a Tabela 21.

Tabela 21 – Associação de corrosividade com concentração de  $\text{SO}_2$

Categoria	Concentração anual de $\text{SO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cor
$A_0$	$C \leq 12$	Verde
$A_1$	$12 < C \leq 40$	Amarelo

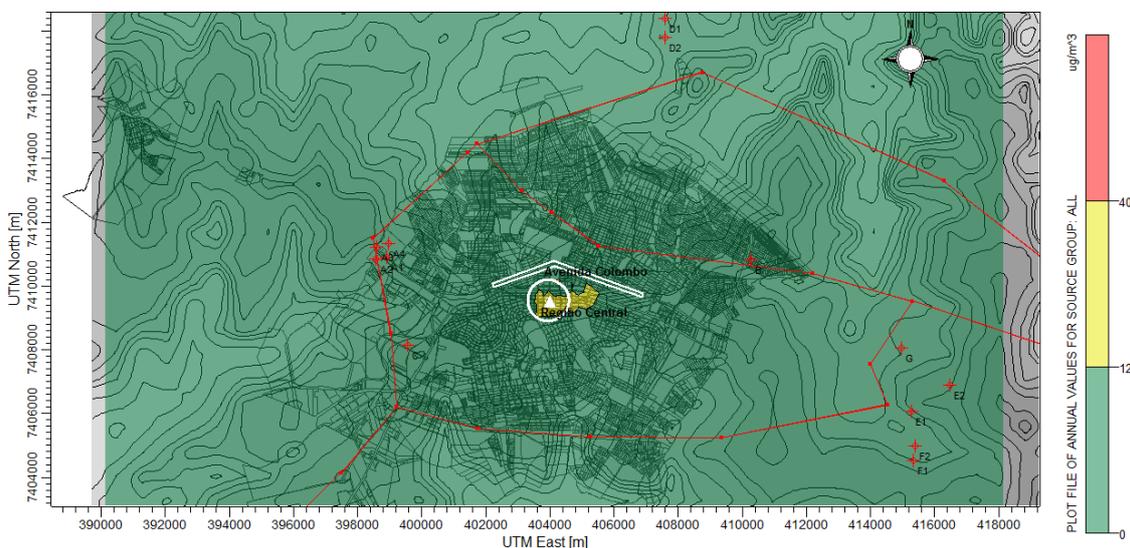


Figura 53 – Mapa com representação da corrosividade

Ao observar o mapa apresentado na Figura 53, nota-se que em Maringá as redes elétricas de transmissão estão expostas a um meio com concentração de  $\text{SO}_2$ , classificado como categoria  $A_0$ , ou seja, mínima em termos da norma NBR 14.643.

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Para esta categoria, foi observada uma corrosividade variando de baixa a média, dependendo da constituição das redes de transmissão.

A região central de Maringá apresenta uma concentração de  $\text{SO}_2$ , considerada de categoria  $A_1$ , no entanto para esta categoria não existe diferença na classificação da corrosividade, ou seja, atribui-se também corrosividade baixa ou média em função do material exposto.

Nota-se no mapa da Figura 53 que as redes elétricas de transmissão estão mais próximas às fontes industriais que em relação as fontes móveis, para as fontes consideradas no estudo.

Assim, para realizar uma análise qualitativa de agressividade do meio às redes elétricas de transmissão, foram simuladas emissões de fontes fixas para o poluente  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , avaliando o comportamento das plumas dos poluentes na redes elétricas de transmissão localizadas próximas às fontes fixas, obtendo-se a Figura 54 e a Figura 55.

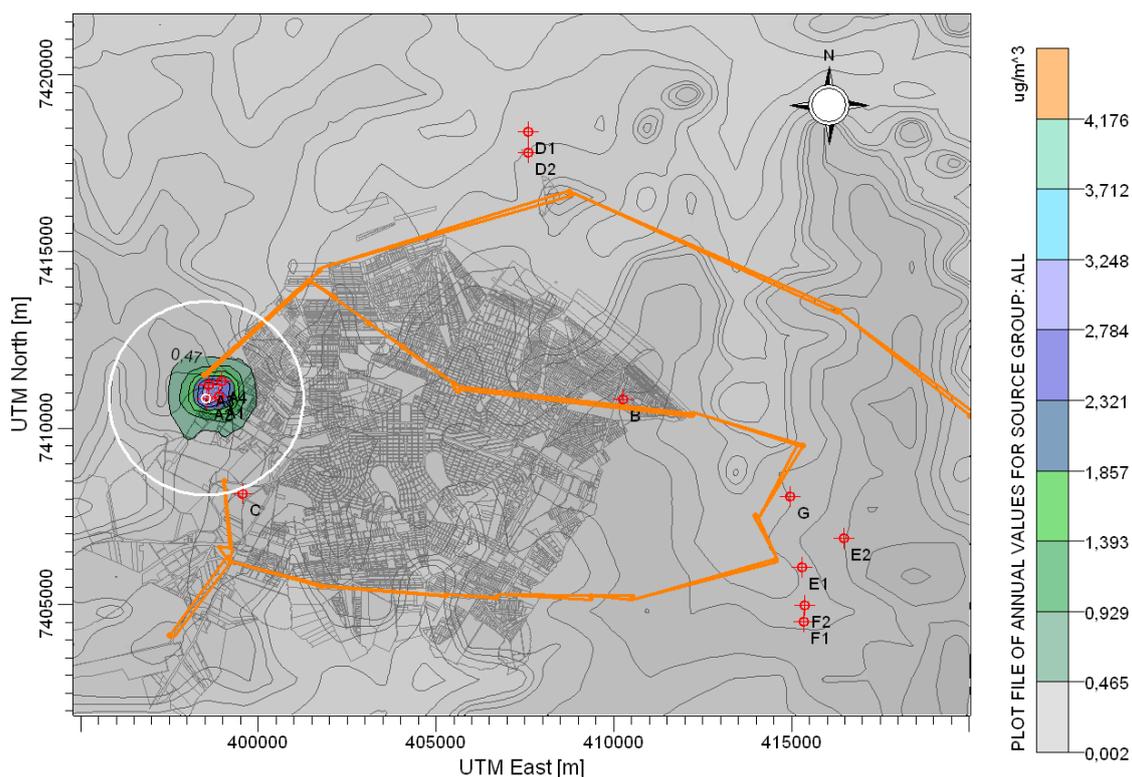


Figura 54 – Mapa de concentração anual para o  $\text{SO}_x$

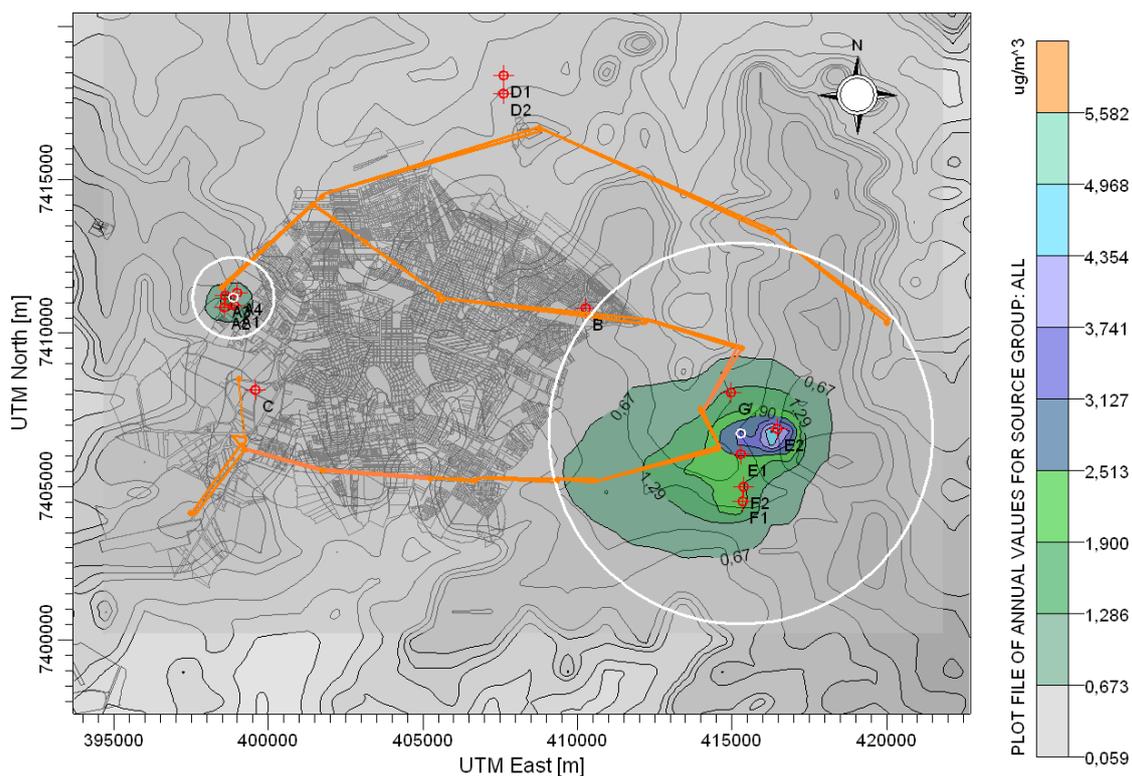


Figura 55 – Mapa de concentração anual para o  $\text{NO}_x$

Por meio dos mapas de concentração, foi possível verificar que o grupo de fontes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ , contribuíram de forma mais expressiva para a emissão de  $\text{SO}_2$ , e para o  $\text{NO}_x$  o grupo  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $G$ . As primeiras fontes utilizam como combustível o óleo BPF, enquanto que o segundo grupo bagaço de cana de açúcar e lenha. Deve-se perceber que todas as fontes contribuíram para a emissão dos poluentes, mas com níveis de contribuição diferenciados, o que acarreta para algumas a falsa impressão nos mapas de isenção de emissão.

As redes de transmissão localizadas nos círculos em destaque na Figura 54 e na Figura 55 sofrem com a exposição de poluentes do meio de maneira diferenciada, ou seja, o  $\text{SO}_x$  atua mais nas redes localizadas na região oeste enquanto que o  $\text{NO}_x$  atua predominantemente na região leste, este resultado deve-se em grande parte pelo combustível utilizado pelas indústrias.

## **6 Conclusões e Sugestões**

### **6.1 Conclusões**

A poluição atmosférica tem se tornado um problema evidenciado em centros urbanos, principalmente devido à emissão veicular. A determinação dos níveis de concentração dos poluentes na atmosfera é fundamental, pois em determinadas concentrações os poluentes podem afetar a qualidade do ar e conseqüentemente causar danos a uma variedade de receptores como a flora, a fauna, os materiais e a população. Na ausência de monitoramento e medições de poluentes a legislação brasileira estabelece a possibilidade de estimar o nível de concentração dos poluentes por meio de modelagem.

Com base no problema exposto foi proposta a tese que abordou um estudo de dispersão e estimativa de concentração dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, emitidos por fontes móveis e fixas, avaliando a qualidade do ar na região de estudo, avaliando a influência da variação sazonal na dispersão do poluente e realizando um estudo de agressividade do meio à redes elétricas de transmissão. O estudo abordado na tese pode ser estendido a qualquer cidade, sendo que como estudo de caso, tomou-se a cidade de Maringá-PR, que é uma cidade em desenvolvimento com crescimento expressivo da frota veicular e que não apresenta rede de monitoramento da qualidade do ar. Para atender aos objetivos do trabalho foi utilizada como ferramenta o modelo de dispersão atmosférica Aermol, que é um modelo regulatório e recomendado Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

No estudo verificou-se que, para as fontes consideradas em Maringá, as fontes móveis são as mais impactantes em relação às fontes fixas. Este cenário tem se repetido em outros centros urbanos, refletindo a importância em se considerar a emissão veicular como potencial poluidor.

Em relação à emissão veicular de CO, foi evidenciada a importância em se considerar na emissão total os veículos em fila, parados pela presença dos semáforos, sendo que para o estudo de caso considerado, verificou-se que os veículos em fila contribuíram com aproximadamente 50% e 46% da concentração máxima de CO

estimada pelo modelo, para médias de 1 e 8 horas, respectivamente. Ilustrando o impacto deste modo de operação do veículo na emissão veicular de CO.

Os níveis de qualidade do ar de uma região são estabelecidos pela Resolução Conama n° 03/1990, sendo que a Resolução Sema n° 54/2006 estabelece que na ausência de medições de poluentes estes podem ser estimados por meio de modelos de dispersão atmosférica. Desta forma foi estimada a qualidade do ar na região central de Maringá por meio de modelagem, para os poluentes CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>. Esta região foi considerada por representar uma área com grande circulação de pessoas e veículos, com características representativas de outros centros urbanos do país. Como resultado verificou-se que as concentrações não ultrapassaram os valores estabelecidos pela Resolução Conama n° 03/1990, com exceção do poluente NO<sub>x</sub>, para média horária, sendo que os picos de concentração para os poluentes avaliados ocorreram ao longo da Avenida Duque de Caxias.

Conclui-se com os primeiros resultados da tese que, em Maringá, para as fontes consideradas, as fontes móveis são as principais causadoras de poluição atmosférica na cidade, apresentando o agravante de estar em uma região de grande circulação de pessoas, afetando-as diretamente, pela altura de emissão dos poluentes.

Para avaliar a influência da sazonalidade na dispersão dos poluentes foi considerada a emissão de monóxido de carbono por fontes móveis, considerando como região de estudo parte da região central da cidade e da Avenida Colombo, que representa uma área com grande circulação de pessoas e veículos. Constatou-se mediante as simulações que as estações mais frias do ano são as mais impactantes na concentração do poluente, devido principalmente às condições meteorológicas influentes, onde foi constatado que o pico de concentração não ocorreu no horário de pico de emissão do poluente. O cenário apresentado para as estações mais frias do ano, com temperaturas mais baixas, situações de calmaria e massas de ar de alta pressão, estabelecem uma atmosfera com níveis de poluentes mais elevados, sendo este cenário propício à problemas respiratórios, principalmente em pessoas suscetíveis a estes danos, como crianças e idosos.

Especificamente, para Maringá, no ano de 2009, foi verificado que a estação do outono foi a mais desfavorável à dispersão do poluente quando comparada com a estação do inverno. Este resultado foi devido ao fato de que as condições

meteorológicas menos favoráveis à dispersão dos poluentes na estação do outono ocorreram em horários de maior emissão de poluente, quando comparadas com a estação do inverno.

Como resultados finais da tese, tem-se o estudo da agressividade do meio à redes elétricas de transmissão, que se deu sob dois prismas: estimativa da corrosividade atmosférica com base na norma NBR 14.643 baseada na concentração de  $\text{SO}_x$  emitida por fontes móveis e fixas e avaliação das redes impactadas pela pluma dos poluentes  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , considerando a emissão das fontes fixas. Com base nos resultados da corrosividade atmosférica verificou-se que Maringá, no ano de 2009, apresentou uma corrosividade variando de baixa a média para os materiais compostos de aço-carbono, zinco, cobre e alumínio, sendo que as redes elétricas distribuídas na cidade estão expostas a estes níveis de corrosão, dependendo da constituição de sua estrutura. Em relação à dispersão dos poluentes, foram obtidos mapas de concentração dos poluentes  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  emitidos por 13 fontes fixas inventariadas na cidade, sendo verificado que o  $\text{NO}_x$  atua predominantemente na redes elétricas presentes na região leste enquanto que o  $\text{SO}_x$  nas redes presentes na região oeste.

A metodologia adotada para estudo da agressividade do meio pode ser implementada em outras localidades do país, sendo possível determinar taxas de corrosão de metais com base os resultados de corrosividade, podendo ser estimado o tempo de vida útil dos metais e com a possibilidade de implementações de medidas a fim de evitar ou prevenir a corrosão dos materiais presentes nas redes de transmissão.

Pelo fato de não existir dados de medidas de poluentes, não foi possível realizar a validação do modelo. No entanto, o mesmo pode ser usado de maneira qualitativa, ou seja, a partir dos resultados do modelo é possível definir regiões onde seria interessante realizar medidas de concentração dos poluentes, principalmente nas regiões onde os danos às redes elétricas devem ser mais acentuados e em regiões com grande circulação de pessoas.

## 6.2 Sugestões

Para pesquisas futuras sugere-se:

- Avaliar a dispersão dos poluentes atmosféricos após a implantação do sistema binário em Maringá;
- Avaliar os efeitos de edificações na dispersão dos poluentes;

- Estender a representação das fontes móveis para outras regiões da cidade;
- Realizar pesquisas com o intuito de obter medidas de concentrações de poluentes, onde foram constatadas as máximas concentrações de poluentes, e realizar a validação do modelo; e
- Sugere-se ainda realizar estudos de corrosão de materiais, especialmente em relação ao NO<sub>x</sub>, obtendo resultados de impacto da concentração do poluente em termos de corrosão atmosférica. Com base nos resultados seria possível obter relações em termos de concentração e corrosão, complementando a norma NBR 14.643.

**Referências Bibliográficas**

A Química e a Atmosfera. 2012. Disponível em: <[http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio\\_Atmosfera.html](http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html)>. Acesso em: 25/10/2012.

ABBOUD, H. J.; SILVEIRA, A. B; SANTOS, J. M.; PEREIRA, M. M. R. E REIS JR., N. C. **Modelagem Matemática da Dispersão de Poluentes Atmosféricos em Regiões Urbanas de Relevo Complexo Baseada nas Equações de Conservação.** In: Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – NBR 14.643: Corrosão Atmosférica – Classificação da Corrosividade de Atmosferas. Rio de Janeiro, 2001, p.11.

AHRENS, A. D. **Essentials of Meteorology: na Invitation to the Atmosphere.** West Publishing Company. New York.. 1993. 374 p.

AMORIM, W. B. **Monitoramento da Concentração do Material Particulado Suspenso na Atmosfera** .2004. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica . **Carvão Mineral.** (2010a). Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf)>. Acesso em: 10/08/2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica . **Petróleo.** (2010b). Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/07-Petroleo\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/07-Petroleo(2).pdf)>. Acesso em: 10/08/2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica . **Gás Natural.** (2010c). Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas\\_Natural\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas_Natural(2).pdf)>. Acesso em: 10/08/2010.

ARBAGE, M. C. A.; DEGRAZIA, G. A.; MORAES, O. L. L. Simulação Euleriana da Dispersão Local da Pluma de Poluente Atmosférico de Candiota-RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n.2, 153-160, 2006.

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 Araquara.** 2001. Tese( Doutorado em Medicina ) - Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo.

AUER, A. H. Jr. Correlation of Land Use and Cover With Meteorological Anomalies. **Journal of Applied Meteorology**, p. 636 – 643, 1978.

BACHE, D. H. e JOHNSTONE, D. R. **Microclimate and Spray Dispersion.** England: Ellis Hrowood Limited, 239 p, 1992.

BARBIRATO, G. M., SOUZA, L. C. L., TORRES, S. C. **Clima e Cidade – a abordagem climática como subsídios para estudos urbanos**. Maceio: Edufal, 164 p, 2007.

BARBON, A. e GOMES, J. Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com o uso do modelo Aermod. **Eng Sanit Ambient**. V 15, n. 2, abr/jun 2010, p 129-149.

BAUMBACH, G. **Air Quality Control**. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha, 1996.

BOÇON, F. T. **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

BORSATO, V. A. **A dinâmica dos Sistemas Atmosféricos e as Termoisoletas de Maringá Paraná – Brasil em 2003**. In: I Simpósio Nacional de Recursos Tecnológicos Aplicados à Cartografia e XVIII Semana de Geografia. Maringá, 21 a 25 de setembro de 2009. P-90-103. ISSN 2175-5965. Disponível em: <<http://www.dge.uem.br/gavich/rectec/2.3.pdf>>. Acesso em: 12/10/2012.

BRAGA, A.; PEREIRA, L.A.A.; SALDIVA, P. H. N. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana**. In: Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: Os Próximos 20 anos. Disponível em: <[http://www.cgu.rei.unicamp.br/energia2020/papers/paper\\_Saldiva.pdf](http://www.cgu.rei.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Saldiva.pdf)>. Acesso em: 06/06/2010.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZAWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRIGGS, A. Plume dispersion in the convective boundary layer. Part II: Analysis of CONDORS field experiment data. **J.Appl.Meteor.**, 32, 1388-1425. 1993.

CARDOSO, A. A. e FRANCO, A. Algumas reações do enxofre. **Química Nova na Escola**. N° 15, maio, 2002.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório da Qualidade do Ar do Estado de São Paulo**: relatório técnico. São Paulo: CETESB, 2009 a.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário de Emissões das Fontes Estacionárias do Estado de São Paulo: Manual de Preenchimento**. 2009 b. Disponível em <[http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/inventariofontes/Manual\\_de\\_Preenchimento.pdf](http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/inventariofontes/Manual_de_Preenchimento.pdf)>. Acesso em: 12/12/2012.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Poluentes**. 2010. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes>>. Acesso em: 06/06/2010.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Sistema de Inventário de Emissões das Fontes Estacionárias do Estado de São Paulo**. 2012. Disponível em <<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/inventariofontes/home2.php>>. Acesso em: 06/08/2012.

CIMORELLI, A. J.; PERRY, S. G.; VENKATRAN, A.; WEIL, J. C.; PAINE, R. J.; WILSON, R. B.; LEE, R. F.; PETERS, W. G.; BRODE, R. W.; PAUMIER, J. O. **Aermod: Description of Model Formulation**. EPA-454/R-03-004, Research Triangle Park, North Carolina, september, 2004.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Programas de Meteorologia de Apoio de Usinas Nucleoelétricas**. 1989. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=122>>. Acesso em: 25/10/2012.

COLELLA, D. A. T e DEMARCHI, S. H. **Calibração do Modelo Fluxo-Velocidade do Simulador Integration a partir de Tempos de Percurso em Vias urbanas**. In: Anais do XIX ANPET: Congresso de Ensino e Pesquisa de Transportes, Recife, Pernambuco, 2005.

CONAMA - Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente, nº 003. Brasília, 1990.

CONAMA - Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente, nº 382. Brasília, 2006.

CÔNSUL, J. M. D; VESES, R. C; BAIBICH, I. M; DALLAGO, R. M. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. **Química Nova**, vol. 27 nº3, São Paulo, May/ June, 2004.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (2008). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

CPEA - Companhia Docas de São Sebastião. **Diagnóstico Ambiental**. Disponível em: [http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento\\_ambiental/Porto/Porto%20S%C3%A3o%20sebasti%C3%A3o%20-%20amplia%C3%A7%C3%A3o/Pdf/Cap\\_5.1\\_Diagn\\_Meio\\_Fisico.pdf](http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Porto/Porto%20S%C3%A3o%20sebasti%C3%A3o%20-%20amplia%C3%A7%C3%A3o/Pdf/Cap_5.1_Diagn_Meio_Fisico.pdf)>. Acesso em 12/10/2012.

DEMARCHI, S. H.; BERTONCINI, B. V.; LIMA, E. P. (2004) **Estimativa de uma Matriz O-D Sintética para a Região Central de Maringá utilizando o QUEENSOD**. In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC. Anais do XVIII ANPET. Rio de Janeiro, RJ: Lagoa, 2004. v. 2, p. 844-855.

DEMARCHI, S. H.; COLELLA, D. A. e BERTONCINI, B. V. **Determinação da Densidade de Congestionamento em Filas de Interseções Semaforizadas**. In: XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ. Anais do XVII ANPET. Rio de Janeiro, RJ: Lagoa, 2003. v. 1, p. 476-488.

DE NEVERS, N. **Air Pollution Control Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed., McGraw Hill, 2000.

DETRAN-PR – Departamento de Trânsito do Paraná. **Evolução da Frota de Veículos Cadastrados no Estado do Paraná, por Município – 2001/2005**. (2011a). Disponível em: <[www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/anuario2005.pdf](http://www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/anuario2005.pdf)>. Acesso em: 30/09/2011.

DETRAN-PR - Departamento de Trânsito do Paraná. **Evolução da Frota de Veículos Cadastrados no Estado do Paraná, por município – 2005/ 2009**. (2011b). Disponível em: <[www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/anuario/2009/anuario2009.pdf](http://www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/estatisticasdetransito/anuario/2009/anuario2009.pdf)>. Acesso em: 30/09/2011.

EPA - CAL3QHC Version 2.0 **A modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations near Roadway Intersection**. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. 1995a.

EPA – Environmental Protection Agency. **Emissions factors & AP 42, compilation of air pollutant emission factors**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>>. Acesso em: 20/01/2012.

EPA – Environmental Protection Agency. **What are the six common air pollutants?**. 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov/air/urbanair/>>. Acesso em: 29/06/2010.

EPA – Environmental Protection Agency. **User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models**, September, 1995b.

FERREIRA, C. M. **Curso de Informação sobre combustíveis e Combustão**. IBP. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1985.

FIEP – Federação das Indústrias do Estado do Paraná. **Cadastro das Indústrias Fornecedores e Serviços. Cadastro on-line**. (2011). Disponível em <[http://www.cadastrindustriais.com.br/pr/pr\\_pesquisa.aspx?opcao=industria&uf=pr&cidade=Maring%C3%A1](http://www.cadastrindustriais.com.br/pr/pr_pesquisa.aspx?opcao=industria&uf=pr&cidade=Maring%C3%A1)> Acesso em 01/07/2011.

FIESP. **Resultados dos 25 Anos de Recuperação Ambiental de Cubatão**. 2012. Disponível em: <[http://www.fiesp.com.br/agencianoticias/2008/07/25/25\\_anos\\_recuper\\_ambiental\\_cubatao.pdf](http://www.fiesp.com.br/agencianoticias/2008/07/25/25_anos_recuper_ambiental_cubatao.pdf)>. Acesso em: 09/09/2012.

FISCHER, H. *et al.* (1979). **Mixing in Inland and Coastal Waters**.. San Diego, CA: Academic Press, 1979.

FHWA **Transportation Conformity Reference Guide** – Section F – Chapter 14. Federal Highway Administration. 2006. Disponível em <[http://www.fhwa.dot.gov/environmental/confomity/ref\\_guid/chap14.htm](http://www.fhwa.dot.gov/environmental/confomity/ref_guid/chap14.htm)>. Acesso em 01/02/2012.

FRANCO, D. M. P. **Utilização de Dados Meteorológicos Reais em Simulações do Modelo de Dispersão ISCST3 na Usina Termoeletrica Piratininga**. Disponível em:

<<http://www.cbmet.com/cbm-files/12-3ff4c833d47d5b1db0902802a33dbbef.pdf>>.  
Acesso em 10/05/2010.

GEORGINO, E. **Planeta Sustentável - Cubatão reduz 98,9% de emissões, aponta estudo.** 2008. Disponível em <[http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/conteudo\\_295665.shtml](http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/conteudo_295665.shtml)>. Acesso em: 09/09/2012.

GUARDANI, M.L. G. e MARTINS, M. H. R. B. **VI – 052 – Monitor Passivo de Dióxido de Enxofre – Construção e Testes de Validação.** In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

HINRICHIS, R. A.; KLEINBACK, M. **Energia e Meio Ambiente.** São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2003.

IAP– Instituto Ambiental do Paraná. **Indicadores de Qualidade do ar.** Disponível em: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=21>>. Acesso em: 10/08/2010.

IAP – Instituto Ambiental do Paraná. **Relatório de Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba:** relatório técnico. Curitiba: IAP, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades – Maringá.** 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=411520>>. Acesso em: 05/07/2012.

JOSÉ, H. J. **Combustão e Combustíveis.** 2004.. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/7082689/ApostilaCombustaoCombustiveis>>. Acesso em: 10/08/2010.

JUSTIN, T. J. L. e RASHID, M. Y. M. **The sensibility of Harp Modelo n Atmospheric Boundary Mixing Heights.** In: 1st International Conference on Natural Resources Engineering & Technology , Putrajaya, Malaysia 2006.

KÜHL, B. M. **Arquitetura do Ferro e Arquitetura Ferroviária em SP: Reflexões sobre a sua Preservação.** São Paulo: Ateliê Editorial: Fapesp: Secretaria de Cultura, 1998.

LENA, F e DESIATO, F. Intercomparison of Nocturnal Mixing Height Estimate Methods for Urban Air Pollution Modeling. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 2385-2393, 1999.

LENZI, E. e FAVERO, L. O. **Introdução à Química da Atmosfera.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LIMA, E. P. (2007). **Análise da Emissão de Poluentes Automotivos na Cidade de Maringá.** 2007. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). - Universidade Estadual de Maringá. Maringá, Paraná.

*Referências Bibliográficas*

LIMA, E. P.; GIMENES, M. L.; LIMA, O. C. M. Estimacão das emissões originadas de veículos leves na cidade de Maringá para o ano de 2005. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 31, n.1., p. 43-50, 2009.

LIMA, E. P.; DEMARCHI, S. H.; GIMENES, M. L. Uso do Modelo de Dispersão de CO na Região Central de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 32, n.3., p. 261-269, 2010.

LYRA, D. G. P. **Modelo Integrado de Gestão da Qualidade do Ar da Região Metropolitana de Salvador**. 2008. 261 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) = Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo.

MALHEIROS, A. L. **Avaliaco de Modelos para a Altura da Camada Limite Atmosférica Urbana e seus Efeitos sobre a Qualidade do Ar**. 2004. Dissertao de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. 4<sup>th</sup>. Ed. New York:Lewis Publishers, 1990.

MARIANO, J. B. . **Impactos Ambientais do Refino do Petróleo**. 2001. Dissertao (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético ) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARTINS, C. A. **Camada limite planetária**. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/pgfisica/alunos/cintya2.pdf>>. Acesso em : 10/06/2010.

MENDES, F. E. **Avaliaco de Programas de Controle de Poluio Atmosférica por Veículos Leves no Brasil**. Tese de doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

MENDONÇA, F. DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e clima do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 206 p. 2007.

MENEZES, P. S. F. **Validaco do Modelo Matemático ISCT3 de Dispersão Atmosférica a partir das Emissões de Dióxido de Enxofre de uma Refinaria**. 2006. Dissertao (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MELO, G. C. B. e MITKIEWICZ, G. F. M. **Dispersion Atmosférica de Poluentes em um Complexo Industrial Siderúrgico**. In: XXVIII Congreso Interramericano de Ingenieria Sanitária y Ambietal, Cancun México, 27 a 31 de octubre, 2002.

MORAES, M. R. **Implementaco de um sistema de modelos para a qualidade do ar**. 2001. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). - Universidade Federal de Santa Maria.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M. R. Meteorologia e Poluio Atmosférica. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n.1, p 1-13. 2008.

MOREIRA, D. e TIRABASSI, T. Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n.2, 2004.

MORAES, M. R. **Implementação de um Sistema de Modelos para a Qualidade do Ar**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

MULLER, C. e MOURA, A. B. D. **Modelagem da Dispersão Atmosférica a partir da Teoria K: Comparação entre Difusividades**. Disponível em: <<http://www.liberato.com.br/upload/arquivos/0131010716410116.pdf>>. Acesso em: 09/12/2012.

PCPV – Plano de Controle de Poluição Veicular. SEMA/IAP. 154 p. 2010.

PINTO, P. M. G. C. **Análise das Emissões Veiculares em Regiões Urbanas e Metodologia para Quantificação de Poluentes**. Dissertação (Engenharia Ambiental). Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2005.

PRIMO, K. R.; SALOMON, K. R.; TEIXEIRA F. N.; LORA E. S. Estudo da Dispersão Atmosférica de Óxidos de Nitrogênio (NOx) Emitidos Durante a Queima de Bagaço em uma Usina de Açúcar. **Biomassa & Energia**, Vol 2, p. 79-90, 2005.

PONTE, H. A. **Fundamentos da Corrosão**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Química. Curitiba. Disponível em : <<http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Fundamentos%20da%20Corrosao.pdf>>. Acesso em: 11/03/2012.

REIS JR., N. C. **Poluição do Ar. 2007**. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~neyval/>>. Acesso em: 08/01/2012.

ROBERTS, B. F. Poluição atmosférica mata três vezes mais que trânsito. **Revista Eco 21**. Ano XIII, número 75, fevereiro, 2003. Disponível em: <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/urbano/artigos\\_urbano/poluicao\\_atmosferica\\_mata\\_tres\\_vezes\\_mais\\_que\\_o\\_transito.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/urbano/artigos_urbano/poluicao_atmosferica_mata_tres_vezes_mais_que_o_transito.html)> Acesso em 10/09/2012.

SÁ, L. D. A.; VISWANADHAM, Y.; MANZI, A. O. Energy Flux Partitioning over the Amazon Forest. **O Theoretical and Applied Climatology**, v. 39, n. 1, p. 1-16, 1988. , 2003. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~seva/apostSevaRick.PDF>> Acesso em 05/05/2009.

SEVA, O. e RICK, A. T. **O Ambiente do Planeta, o Trabalho Humano, a Produção e a Poluição**, 2003. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~seva/apostSevaRick.PDF>> Acesso em 05/05/2009.

SEIBERT, P.; BEYRICH, F.; GRYNING, S.E. ;JOFRE, S.; RASMUSSEN, A.; TERCIER, P. Review and Intercomparison of Operational Methods for the

Determination of the Mixing Height. **Atmospheric Environmental**, v.34, p. 1001-1027, 2000.

SEINFELD, J. H.; SPYROS, P. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air to Climate Change**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. John Wiley & Sons. New York, USA, 1986.

SEMA . Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Resolução nº 054/2006**, 2006. Disponível em: <[http://www.fiepr.org.br/para-empresas/conselhos/meio\\_ambiente/uploadAddress/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20054\[23191\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-empresas/conselhos/meio_ambiente/uploadAddress/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20054[23191].pdf)> Acesso em: 05/05/2012.

STULL, R. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988.

SYED, S. Atmospheric Corrosion of Materials. **Emirates Journal for Engineering Research Science Tecnology**, Saudi Arabia, 11(1), 1-24 (Review Paper), 2006.

SZWACFITER, L. **Opções para o Aprimoramento do Controle de Emissões de Poluentes Atmosféricos por Veículos Leves no Brasil: Uma Avaliação do Potencial de Programas de Inspeção e Manutenção e de Renovação Acelerada da Frota**. Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

TADANO, Y. S.; MAZZA, R. A.; TOMAZ, E. . **Modelagem da Dispersão de Poluentes Atmosféricos no Município de Paulínia (Brasil) empregando o ISCST3**. In: CILAMCE, 2012, Buenos Aires. Mecânica Computacional. Buenos Aires: Imprensa Macagno S. R. L., 2010. V. XXIX. P. 8125-8148. Associação Argentina de Mecânica Computacional, 2010.

TURNER, D. B. **Workbook of Atmospheric Diffusion Estimates**. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Ratón: Lewis Publishers, 1994.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2004.

VIDE, J. M. **Fundamentos de Climatologia Analítica**. Madrid: Editorial Sínteses, S. A., 1999.

VIEIRA, N. R. **Poluição do ar: indicadores ambientais**. Rio de Janeiro: Serviços Editoriais Ltda, 2009.

WAVRIK, J, F. A. G; LOURENÇO, C. R. S. H; SEBRÃO, M. Z; LOURENÇO, P. M; MOREIRA, P. L. F **Corrosão Interna em Cabos Condutores de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Caracterização da Atmosfera e Técnica para Identificação de Falhas**. Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL). Belém- PA. 2009.

*Referências Bibliográficas*

WHO – World Health Organization. **Carbon Monoxide.** (Second Edition). Environmental health Criteria 13, Geneva: WHO, 1999.

WHO– World Health Organization. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.** Global update, 2005. Disponível em; <[http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf)>. Acesso em 10/08/2010.

WILLIS, G. E. e DEARDORFF, J. W. A laboratory study of dispersion in the middle of the convectively mixed layer. **Atmospheric Environmental**, 15, 109-117.1981.

**ANEXO**

Planilha para estimação do fator de emissão do NOx

## Parâmetros do AP-42

<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>ZML (g/mi)</b>	<b>ZML (g/km)</b>	<b>DR1</b>	<b>DR2</b>
Pré-1968	3,44	2,14	0,000	0,000
1968 - 1972	4,35	2,70	0,000	0,000
1973 – 1974	2,86	1,78	0,050	0,050
1975 – 1976	2,44	1,52	0,040	0,040
1977 – 1979	1,79	1,11	0,110	0,110
1980	1,50	0,93	0,102	0,102
1981	0,65	0,40	0,063	0,190
1982	0,64	0,39	0,066	0,190
1983	0,58	0,36	0,067	0,199
1984	0,47	0,29	0,079	0,224
1985	0,47	0,29	0,078	0,210
1986	0,43	0,26	0,082	0,214
1987	0,44	0,27	0,078	0,213
1988	0,48	0,30	0,077	0,204
1989	0,48	0,30	0,080	0,198
1990	0,46	0,29	0,082	0,189
1991	0,47	0,29	0,082	0,188
1992 – 1993	0,47	0,29	0,083	0,186
1994	0,37	0,23	0,083	0,189
1995	0,24	0,15	0,083	0,193
1996 <sup>+</sup>	0,18	0,11	0,083	0,195

Anexo

Ano	Frota - álcool	Idade - veículo-lo	Km média anual	Km média acumulada	Y	AP-42	ZML (g/mi)	ZML (g/km)	DR1	DR2	BER	BER/ZML	FD	FE	FEC
1990	310	20	9500	249000	6,273	1975-1979	2,44	1,52	0,04	0,04	2,69092	1,103	1,103	1,2	1,323403
1991	473	19	9500	239500	6,273		2,44	1,52	0,04	0,04	2,69092	1,103	1,103	1	1,102836
1992	530	18	9500	230000	6,273	1980	1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,5	0,713282
1993	919	17	9500	220500	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,6	0,855938
1994	515	16	9500	211000	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,7	0,998595
1995	146	15	9500	201500	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,7	0,998595
1996	54	14	9500	192000	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,7	0,998595
1997	22	13	9500	182500	6,273	1994	0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,3	0,831565
1998	8	12	9500	173000	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,24	0,665252
1999	81	11	9500	163500	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,22	0,609814
2000	87	10	13000	154000	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,21	0,582096
2001	196	9	13000	141000	6,273	+1996	0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,08	0,374771
2002	648	8	13000	128000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,08	0,374771
2003	516	7	14000	115000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,09	0,421618
2004	699	6	14000	101000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,08	0,374771
2005	302	5	14000	87000	5,403727		0,18	0,11	0,083	0,195	0,673727	3,743	3,743	0,08	0,299434
2006	10	4	15000	73000	4,534161		0,18	0,11	0,083	0,195	0,556335	3,091	3,091	0,05	0,154538
2007	1	3	17000	58000	3,602484		0,18	0,11	0,083	0,195	0,479006	2,661	2,661	0,05	0,133057
2008	0	2	19000	41000	2,546584		0,18	0,11	0,083	0,195	0,391366	2,174	2,174	0,05	0,108713
2009	0	1	22000	22000	1,36646		0,18	0,11	0,083	0,195	0,293416	1,630	1,630	0,05	0,081504

Anexo

Ano	Frota - gasolina	Idade - veículo	Km média anual	Km média acumulada	Y	AP-42	ZML (g/mi)	ZML (g/km)	DR1	DR2	BER	BER/ZML	FD	FE	FEC
1990	2.128	20	9500	249000	6,273	1975-1979	2,44	1,52	0,04	0,04	2,69092	1,103	1,103	1,4	1,54397
1991	1.850	19	9500	239500	6,273		2,44	1,52	0,04	0,04	2,69092	1,103	1,103	1,3	1,433687
1992	1.617	18	9500	230000	6,273	1980	1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,6	0,855938
1993	2.612	17	9500	220500	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,8	1,141251
1994	4.215	16	9500	211000	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,7	0,998595
1995	5.750	15	9500	201500	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,6	0,855938
1996	6.118	14	9500	192000	6,273		1,50	0,93	0,102	0,102	2,139846	1,427	1,427	0,5	0,713282
1997	7.634	13	9500	182500	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,3	0,831565
1998	6.277	12	9500	173000	6,273	1994	0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,23	0,637533
1999	5.063	11	9500	163500	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,23	0,637533
2000	6.288	10	13000	154000	6,273		0,37	0,23	0,083	0,189	1,025597	2,772	2,772	0,21	0,582096
2001	7.321	9	13000	141000	6,273	+1996	0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,14	0,655849
2002	7.254	8	13000	128000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,12	0,562157
2003	8.025	7	14000	115000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,12	0,562157
2004	7.575	6	14000	101000	6,273		0,18	0,11	0,083	0,195	0,843235	4,685	4,685	0,09	0,421618
2005	6.292	5	14000	87000	5,403727		0,18	0,11	0,083	0,195	0,673727	3,743	3,743	0,09	0,336863
2006	5.468	4	15000	73000	4,534161		0,18	0,11	0,083	0,195	0,556335	3,091	3,091	0,08	0,24726
2007	6.439	3	17000	58000	3,602484		0,18	0,11	0,083	0,195	0,479006	2,661	2,661	0,08	0,212892
2008	7.391	2	19000	41000	2,546584		0,18	0,11	0,083	0,195	0,391366	2,174	2,174	0,039	0,084796
2009	2.435	1	22000	22000	1,36646		0,18	0,11	0,083	0,195	0,293416	1,630	1,630	0,034	0,055423