

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
CURSO DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS AMBIENTAIS

JULIANA PILATO RODRIGUES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO APLICADA À
DEFINIÇÃO DE LOCAIS PARA O MONITORAMENTO DA QUALIDADE
DO AR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

JULIANA PILATO RODRIGUES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO APLICADA À
DEFINIÇÃO DE LOCAIS PARA O MONITORAMENTO DA QUALIDADE
DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais do Departamento Acadêmico de Química e Biologia – DAQBI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientadora: Valma Martins Barbosa

Co-orientador: Rafael Geha Serta

CURITIBA

2013

JULIANA PILATO RODRIGUES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO APLICADA À
DEFINIÇÃO DE LOCAIS PARA O MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM PROCESSOS AMBIENTAIS pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – Prof^a. Dr^a. Danielle Caroline Schnitzler
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Membro 2 – Prof^a. Dr^a. Érika Pereira Felix
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Orientadora – Prof^a. Dr^a. Valma Martins Barbosa
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

orientador – Msc. Rafael Geha Serta
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Coordenadora de Curso – Prof^a. Dr^a. Valma Martins Barbosa

Curitiba, 30 de abril de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao Rafael que aceitou assumir a co-orientação, a qual realizou com muita dedicação;

À professora Valma pela orientação e paciência;

Ao Bernardo pela confecção dos mapas;

A Karime, pelas ajudas prestadas sempre que necessário;

Ao meu pai, pelo apoio, incentivo e atenção;

E à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela ótima formação acadêmica que proporcionou.

RESUMO

RODRIGUES, Juliana Pilato. Modelagem matemática da dispersão aplicada à definição de locais para o monitoramento da qualidade do ar. Trabalho de Conclusão de Curso II (Curso de Graduação de Tecnologia em Processos Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Este estudo teve por objetivo indicar locais para o monitoramento da qualidade do ar no município de Maringá, a partir da análise e interpretação dos resultados da modelagem matemática de dispersão de poluentes atmosféricos, com o uso do *software* Aermol, que é um modelo de pluma gaussiana. Em termos de uso do solo e população exposta, as estações de monitoramento da qualidade do ar recebem a seguinte classificação: industrial, comercial, residencial, urbana de fundo, rural, veicular e ambiente fechado. A indicação dos locais foi baseada nessa classificação, contemplando, porém, apenas estação comercial, industrial, residencial e urbana de fundo. Dessa forma, com os resultados da modelagem associados ao levantamento de informações sobre adensamento populacional e distribuição de equipamentos urbanos, foi possível indicar locais com características adequadas a receber cada categoria de estação. Para instalação de uma estação comercial foi indicada a zona 1. Para instalação de uma estação industrial indicou-se a zona 47. Para instalação de uma estação urbana de fundo e residencial, foram indicadas as zonas 27 e 37, respectivamente.

Palavras – chave: Maringá. Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar. Modelo de dispersão.

ABSTRACT

RODRIGUES, Juliana Pilato. Mathematical modeling of dispersion applied to the definition of sites for monitoring air quality. Working End of Course II (Undergraduate Technology in Environmental Processes) - Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2013.

This study aimed to indicate locations for monitoring air quality in Maringá, based on the analysis and interpretation of the results of mathematical modeling of the dispersion of air pollutants, using the *AERMOD software*, which is a Gaussian plume model. In terms of land use and population exposed, the stations monitoring air quality receive the following classification: industrial, commercial, residential, urban background, rural, serve and confinement. The indication of the sites was based on this classification, contemplating, however, only commercial station, industrial, residential and urban background. Thus, the results of the modeling associated with gathering of information about population density and distribution of urban facilities, permitted to indicate sites with characteristics appropriate to receive each category of station. For installation of a commercial station was indicated zone 1. For installation of a industrial station was indicated zone 47. To install an urban background station and residential were indicated the zones 27 and 37, respectively.

Key – words: Maringá. Station Monitoring Air Quality. Model dispersion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Perfil de temperatura da atmosfera | 13 |
| Figura 2 – Perfil de temperatura atmosférica relacionando a variação da taxa de declínio com a estabilidade atmosférica | 21 |
| Figura 3 – Representação do modelo de pluma gaussiana | 29 |
| Figura 4 – Tratamento da pluma na camada limite convectiva pelo aermod | 30 |
| Figura 5 – Localização do município de Maringá | 34 |
| Figura 6 – Mapa de altimetria de Maringá | 34 |
| Figura 7 – Comportamento médio anual da temperatura entre 2006 e 2010. | 36 |
| Figura 8 – Comportamento médio anual da umidade entre 2006 e 2010..... | 37 |
| Figura 9 – Comportamento médio anual da pressão entre 2006 e 2010..... | 38 |
| Figura 10 – Comportamento médio anual da radiação global entre 2006 e 2010..... | 39 |
| Figura 11 – Comportamento médio anual da precipitação entre 2006 e 2010..... | 40 |
| Figura 12 – Rosa dos ventos, 2006 - 2010. | 41 |
| Figura 13 – Mapa de hierarquia de vias | 45 |
| Figura 14 – Contribuição das fontes veiculares e industriais | 47 |
| Figura 15 – Malha de receptores | 48 |
| Figura 16 – Localização das fontes fixas e móveis | 49 |
| Figura 17– Pluma das concentrações máximas horárias de CO para o período modelado (2006 a 2010)..... | 52 |
| Figura 18 – Pluma das concentrações médias de CO para o período modelado (2006 a 2010)..... | 53 |
| Figura 19 – Pluma das concentrações máximas diárias de MPT para o período modelado (2006 a 2010)..... | 54 |
| Figura 20 – Pluma das concentrações médias de MPT para o período modelado (2006 a 2010)..... | 55 |
| Figura 21 – Pluma das concentrações máximas diárias de SO ₂ para o período modelado (2006 a 2010)..... | 56 |
| Figura 22 – Pluma das concentrações médias de SO ₂ para o período modelado (2006 a 2010)..... | 57 |
| Figura 23 – Pluma das concentrações máximas horárias de NO _x para o período modelado (2006 a 2010)..... | 58 |
| Figura 24 – Pluma das concentrações médias de NO _x para o período modelado (2006 a 2010)..... | 59 |
| Figura 25 – Pluma das concentrações máximas horárias de HCT para o período modelado (2006 a 2010)..... | 60 |
| Figura 26 – Pluma das concentrações médias de HCT para o período modelado (2006 a 2010)..... | 61 |
| Figura 27 – Áreas mais impactadas pela poluição atmosférica, obtida pela modelagem. | 62 |
| Figura 28 – Zoaneamento urbano de Maringá..... | 64 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 – Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA Nº 03 de 28/06/90)..... | 27 |
| TABELA 2 – Dados das fontes fixas | 43 |
| TABELA 3 – Estimativas das taxas de emissões | 44 |
| TABELA 4 – Taxas de emissão das fontes móveis..... | 46 |
| TABELA 5 – Informações das zonas inseridas nas regiões mais impactadas indicadas pela modelagem | 63 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 12 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 3.1 ESTRUTURA DA ATMOSFERA..... | 13 |
| 3.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA..... | 14 |
| 3.2.1 Poluentes atmosféricos | 15 |
| 3.2.1.1 Monóxido de carbono..... | 16 |
| 3.2.1.2 Óxidos de nitrogênio | 16 |
| 3.2.1.3 Óxidos de enxofre..... | 17 |
| 3.2.1.4 Ozônio | 17 |
| 3.2.1.5 Material particulado..... | 18 |
| 3.2.1.6 Hidrocarbonetos | 18 |
| 3.2.2 Dispersão de poluentes na atmosfera | 19 |
| 3.2.2.1 Vento | 19 |
| 3.2.2.2 Turbulência..... | 20 |
| 3.2.2.3 Estabilidade atmosférica..... | 20 |
| 3.2.2.4 Albedo | 22 |
| 3.2.2.5 Camada limite planetária | 22 |
| 3.2.2.6 Topografia | 23 |
| 3.3 MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR | 23 |
| 3.3.1 Legislação..... | 26 |
| 3.4 MODELOS DE DISPERSÃO..... | 28 |
| 3.4.1 Aermod | 29 |
| 3.4.1.1 Aermet | 32 |
| 3.4.1.2 Aermap | 32 |
| 4 METODOLOGIA | 33 |
| 4.1 MUNICÍPIO DE MARINGÁ..... | 33 |
| 4.2 DADOS METEOROLÓGICOS | 35 |
| 4.3 LEVANTAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS | 41 |
| 4.3.1 Fontes fixas..... | 41 |
| 4.3.2 Fontes móveis..... | 44 |
| 4.3.2.1 Seleção das vias para modelagem | 45 |
| 4.3.3 Contribuição das fontes veiculares e industrial | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 MODELO MATEMÁTICO | 47 |
| 4.4.1 Cenário modelado..... | 48 |
| 4.5 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO | 49 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 51 |
| 5.1 SIMULAÇÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO | 51 |
| 5.2 SIMULAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO TOTAL | 53 |
| 5.3 SIMULAÇÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE | 55 |
| 5.4 SIMULAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO | 57 |
| 5.5 SIMULAÇÕES DE HIDROCARBONETOS TOTAIS..... | 59 |
| 5.6 SELEÇÃO DAS ÁREAS A PARTIR DOS RESULTADOS DA MODELAGEM..... | 61 |
| 5.6.1 Detalhamento das áreas indicadas e escolha do local..... | 62 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 68 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 69 |

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar ocorre tanto em consequência de processos naturais (atividade vulcânica, decomposição de biomassa entre outros) quanto de atividades humanas.

Quando a população era reduzida e o nível tecnológico era baixo, a intervenção humana não representava grande ameaça, pois a atmosfera era capaz de acionar seus mecanismos de controle, mantendo o balanço necessário. A partir da segunda metade do século dezoito a produção industrial foi intensificada devido as crescentes inovações tecnológicas, acarretando em uma demanda por fontes primárias de energia (fontes naturais e que podem gerar energia de forma direta, por exemplo, carvão mineral e o petróleo), tendo como resultado um aumento do nível de poluição do ar de forma a comprometer os mecanismos regulatórios da atmosfera (PIRES, 2005).

Atualmente o tráfego veicular, aquecedores (em países frios), emissões industriais e as provenientes das centrais de produção de energia são as principais fontes de deterioração da qualidade do ar. As emissões veiculares representam quase a totalidade das emissões de monóxido de carbono e grande parte dos óxidos de nitrogênio (MOREIRA; TIRABASSI, 2004).

Quando emitidos na atmosfera os poluentes sofrem o processo de dispersão, o qual é regido pelas condições meteorológicas, principalmente pela direção e velocidade do vento, turbulência e estabilidade atmosférica (MAYER, 1999).

A preocupação com a poluição atmosférica é de fundamental importância, pois direta ou indiretamente, apresenta impacto sobre a saúde e o bem-estar humano, sobre animais, vegetações, construções, materiais, atmosfera, solos, corpos d' água e outras matrizes ambientais.

Em face do problema da poluição atmosférica, tanto no que tange seu incremento quanto as suas consequências locais e globais, é necessária a implementação de ações de controle. No âmbito nacional, essas ações se concentram nos padrões de qualidade do ar fixados pelas resoluções CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

A verificação do atendimento aos padrões estabelecidos pelas legislações é feita através do monitoramento da qualidade do ar, o qual é realizado para determinar a concentração de poluentes na atmosfera e cujos resultados possibilitam a elaboração de diagnósticos da qualidade do ar e subsidiam ações governamentais para controle de emissão (PAES et al., 2009).

Uma forma bastante convencional de monitoramento da qualidade do ar é através das redes de monitoramento, as quais são constituídas de duas ou mais estações localizadas em uma região, para determinação da concentração de poluentes químicos e medição de parâmetros

meteorológicos. A localização das estações de monitoramento deve permitir representatividade dos dados monitorados (FRONDIZI, 2008). Assim, a seleção do local para sua instalação deve ser cautelosa e precedida de estudo.

O município de Curitiba e Araucária – PR possuem uma rede de monitoramento da qualidade do ar constituída por doze estações de amostragem do ar, das quais oito são automáticas. Há quatro estações automáticas em Curitiba (nos bairros: Santa Cândida, Boqueirão, Praça Ouvidor Pardini e Cidade Industrial) e quatro no município de Araucária.

Além da legislação e monitoramento têm-se os modelos matemáticos de dispersão de poluentes atmosféricos como uma importante ferramenta técnica de gestão da qualidade do ar. Os modelos são programas computacionais que utilizam algoritmos matemáticos para simular o transporte e dispersão dos poluentes, permitindo a descrição dos numerosos e complexos processos que regem esses fenômenos.

O uso desses *softwares* possibilita: verificar se as tecnologias industriais ou propostas de adequação atendem à legislação vigente; dar suporte a planos de redução de emissões de poluentes; prever impactos de empreendimentos; indicar locais para instalação de estações de monitoramento, entre outras finalidades (LYRA, 2008).

Um dos modelos mais utilizados para simulação da dispersão de poluentes atmosféricos, sobretudo os oriundos de fontes fixas (industriais) é o AERMOD. Esse modelo foi desenvolvido pela AERMIC – *American Meteorological Society* (AMS) e USEPA – *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2004).

Já foram publicados diversos estudos de dispersão de poluentes atmosféricos utilizando o AERMOD. Barbon (2008) avaliou, com o uso do AERMOD, a dispersão das emissões atmosféricas provenientes das principais indústrias do pólo industrial de Araucária. Kundu (2011) simulou emissões veiculares e industriais na província de Nova Escócia, no Canadá. Oliveira et al. (2011) utilizaram o AERMOD para estimar as concentrações de monóxido de carbono proveniente de veículos leves na região central de Maringá – Paraná.

Nesse contexto, o presente estudo dedicou-se à modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos sobre o município de Maringá, para indicação de áreas a serem avaliadas para a instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Indicar locais adequados para instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar no município de Maringá, através da interpretação dos resultados oriundos da modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular, para fontes industriais e veiculares, a dispersão dos poluentes: óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), material particulado (MPT) e hidrocarbonetos totais (HCT) de modo a se obter áreas de interesse para o monitoramento;
- Comparar as concentrações máximas obtidas através das simulações, com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/90.
- Avaliar o adensamento populacional e a distribuição dos equipamentos urbanos nas regiões indicadas pela modelagem matemática.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTRUTURA DA ATMOSFERA

O Planeta Terra é coberto por uma camada de ar de aproximadamente 800 quilômetros de espessura que é atraída à Terra por força da gravidade. Mais de 99% de todo esse ar está localizado numa faixa de 40 quilômetros, assim, tem-se 760 quilômetros de uma atmosfera extremamente rarefeita (FILHO, 1996).

A atmosfera da Terra é uma mistura de gases e substâncias particuladas (GODISH, 2003). A distribuição percentual atual de gases é: nitrogênio (N_2), 78,11%; oxigênio (O_2), 20,95%; argônio (Ar), 0,934% e o gás carbônico (CO_2), 0,033%. Há outros gases presentes na atmosfera em menor quantidade: gases nobres (hélio, neônio, criptônio e xenônio); hidrogênio, metano e dióxido de nitrogênio (NO_2). Vapor d' água, sais de cloreto de sódio, material particulado orgânico (polens, bactérias e micróbios), sílica e subprodutos da combustão são outros constituintes da atmosfera (VIEIRA, 2009).

A atmosfera apresenta uma estrutura vertical em camadas, cuja distribuição está condicionada ao perfil vertical da temperatura, o qual é apresentado na Figura 1.

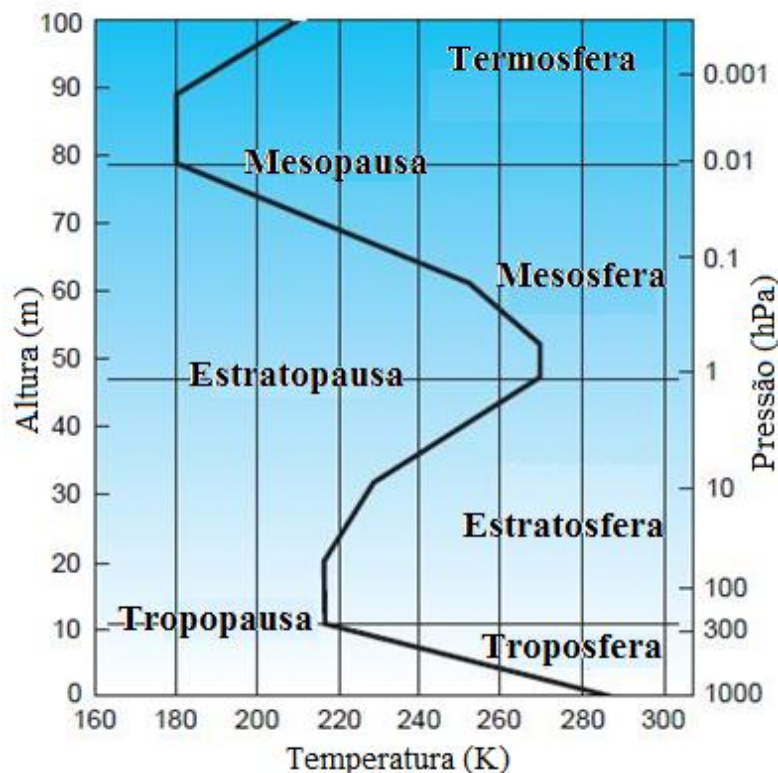


Figura 1 – Perfil de temperatura da atmosfera
Fonte: Wallace; Hobbes (2006, P.10).

A troposfera é a camada mais próxima da Terra, estendendo-se da superfície até uma altitude de 8 a 10 km e contém 75% de toda a massa gasosa da atmosfera. Sua espessura varia com a latitude (VIEIRA, 2009). O aquecimento radiativo da superfície transfere calor às camadas mais inferiores da atmosfera, assim, na troposfera ocorre diminuição da temperatura com a altitude devido ao aumento da distância a partir da superfície aquecida (GODISH, 2003).

Devido ao intenso movimento de energia térmica, associado ao aquecimento da superfície terrestre, a troposfera é relativamente instável. Essa instabilidade resulta nas mudanças diárias de temperatura, cobertura de nuvens e precipitação (GODISH, 2003).

Há duas regiões distintas na troposfera: a camada limite planetária, que se estende até aproximadamente 1 km de altitude e, a troposfera livre (SEINFELD; PANDIS, 2006). Acima da troposfera tem-se a tropopausa, camada na qual não há mudanças de temperatura e é precedida pela estratosfera, a qual atinge uma altitude de aproximadamente 50 km. A estratosfera se caracteriza por um aumento da temperatura com o incremento da altitude, devido a absorção de radiação ultravioleta por moléculas de ozônio, assim, a temperatura é maior no topo da camada devido a maior eficiência de absorção de radiação nessa região. Trata-se de uma camada com pouca mistura convectiva e, portanto, relativamente estável (GODISH, 2003).

Acima da estratosfera, separada pela estratopausa, tem-se a mesosfera que é a camada mais fria, caracterizada pela diminuição da temperatura com o aumento da altitude e rápida mistura vertical (SEINFELD; PANDIS, 2006).

A última camada, acima da mesopausa, é a termosfera. Ela se estende até a extremidade da atmosfera a uma altitude de aproximadamente 100 km. Essa camada apresenta aumento da temperatura com a altitude devido a absorção de radiação de pequeno comprimento de onda pelas moléculas de N_2 e O_2 (GODISH, 2003).

3.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Poluição atmosférica é definida segundo a Resolução nº 054/2006 da SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – como:

Degradação da qualidade da atmosfera resultante de atividades que direta ou indiretamente: prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Há basicamente duas categorias de fontes poluição do ar: as fontes naturais e as fontes antropogênicas. A primeira inclui: atividade vulcânica, decomposição de plantas e animais, dispersão de pólen e esporos, emissão de substâncias em fase gasosa pelo solo e superfície da água (GODISH, 2003). Na segunda categoria estão presentes as atividades industriais, geração de energia, uso de veículos, queimadas agrícolas, entre outras.

3.2.1 Poluentes atmosféricos

Segundo a definição da Resolução nº 003 de 1990 do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – poluente atmosférico é qualquer forma de matéria ou energia lançada na atmosfera cujas características, quantidade, concentração e tempo estejam em desacordo com os níveis estabelecidos e, que tornem ou possam tornar o ar impróprio à saúde, danosos aos materiais, fauna e flora; inconveniente ao bem estar público e prejudicial à segurança.

Com relação a sua origem, os poluentes são classificados como primários e secundários. Os poluentes primários são emitidos diretamente pelas fontes de emissão, enquanto os secundários são formados na atmosfera através de reações químicas entre os poluentes e outros constituintes da atmosfera (CETESB, 2008).

Os poluentes presentes no ar podem sofrer alterações em sua estrutura. A mais frequente forma de alteração é a interação química entre dois constituintes, formando novas espécies, cujas características podem ser similares ou diferentes das substâncias de origem. Outra forma de alteração é por reação fotoquímica, quando a radiação solar possui energia suficiente para “quebrar” as ligações químicas das moléculas (SEINFELD; PANDIS, 2006).

A remoção de poluentes e/ou gases da atmosfera ocorre através de reações químicas e processos físicos, por atividade biológica, por deposição e absorção por oceanos e solo. O tempo de vida das moléculas de gás introduzidas na atmosfera pode variar de poucos segundos a milhões de anos, dependendo da eficácia dos processos de remoção (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Há um grupo de poluentes universalmente consagrados como indicadores da qualidade do ar, devido a sua maior ocorrência na atmosfera e seus efeitos adversos. São eles: material particulado, dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), e ozônio (O₃) (CETESB, 2008).

3.2.1.1 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido. Ele é emitido por fontes naturais e antropogênicas e é produzido na atmosfera pela oxidação do metano e outros hidrocarbonetos não metanos (GODISH, 2003). É encontrado principalmente nas cidades, devido à combustão incompleta de combustíveis, tanto pela indústria quanto pelos veículos automotores (IBRAM, 2010).

O CO é um gás tóxico para homens e animais. Quando inalado, difunde-se rapidamente pelas membranas alveolares, capilar e placentária. Cerca de 80 a 90% do gás absorvido se liga com a hemoglobina, por possuir de 200 a 250 vezes mais afinidade com ela do que o gás oxigênio. Forma-se o complexo carboxihemoglobina, o que provoca redução da capacidade de transporte de oxigênio do sangue e prejudica a liberação de oxigênio da hemoglobina. Essas são as principais causas da hipoxia tecidual (baixo teor de oxigênio nos tecidos) para exposição a pequenas concentrações de monóxido de carbono. Concentrações elevadas causam déficit neurológico e podem levar a óbito por asfixia (WHO, 1999).

3.2.1.2 Óxidos de nitrogênio

Óxidos de nitrogênio é a designação dada à soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (SEINFELD; PANDIS, 2006).

O NO é um gás incolor, inodoro, insípido e relativamente não tóxico. Suas fontes naturais incluem: oxidação fotoquímica da amônia, processos de nitrificação e desnitrificação no solo. As atividades humanas que geram NO são o uso de veículos, queima de combustíveis fósseis em estações de geração de energia elétrica, caldeiras industriais e incineradores municipais (GODISH, 2003).

O NO₂ é um gás cuja coloração varia de amarelo a castanho em função de sua concentração na atmosfera. Apresenta um odor forte e é relativamente tóxico e corrosivo. O NO₂ é formado na atmosfera por reações fotoquímicas de oxidação, principalmente pela oxidação de NO (GODISH, 2003).

Quando inalado, o dióxido de nitrogênio, dada sua solubilidade em água, atinge porções periféricas do pulmão (CANÇADO *et al*, 2006). Causa irritação aos olhos e mucosa nasal e pode provocar enfisema pulmonar, além de aumentar a susceptibilidade às infecções respiratórias (IBRAM, 2010).

O NO_2 é precursor do ozônio, pois é fotolizado pela luz solar, gerando óxido nítrico e oxigênio atômico. Esse último reage com o gás oxigênio, gerando ozônio. Uma vez formado, o ozônio reage com NO , regenerando o NO_2 (SEINFELD; PANDIS, 2006).

A reação do NO_2 com a água presente no ar forma o ácido nítrico (HNO_3), que é um dos principais componentes da chuva ácida (IBRAM, 2010).

3.2.1.3 Óxidos de enxofre

Os óxidos de enxofre são emitidos para o ar por vulcões, indústrias, veículos entre outras fontes. São também formados na atmosfera como resultado da oxidação de compostos reduzidos de enxofre (GODISH, 2003).

O enxofre é uma das principais impurezas presentes nos derivados de petróleo (gasolina e óleo diesel) e no carvão mineral. Sua queima durante a utilização de combustíveis fósseis produz dióxido de enxofre (SO_2), que é um gás tóxico para os seres humanos. Sua inalação, mesmo em concentrações bastante reduzidas, provoca espasmos passageiros dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares. Em concentrações superiores ao limite legislado, promove um aumento da secreção mucosa nas vias respiratórias superiores, redução do movimento ciliar do trato respiratório, inflamações graves da mucosa e pode aumentar a incidência de rinite, faringite e bronquite (IBRAM, 2010).

O SO_2 , assim como os óxidos de nitrogênio, é precursor da chuva ácida, pois, quando lançado na atmosfera é oxidado a ácido sulfuroso, o qual, em contato com a umidade atmosférica gera o ácido sulfúrico. A partir do SO_2 formam-se também sulfatos secundários, que contribuem para formação do material particulado na atmosfera (MORENO *et al.*, 2006).

3.2.1.4 Ozônio

Na estratosfera o ozônio é formado pela fotólise do gás oxigênio (O_2), da qual é gerada uma molécula de oxigênio atômico, que reagirá com uma molécula de gás oxigênio, formando O_3 (JACOB, 1999). Outra fonte de O_3 é a fotólise do dióxido de nitrogênio.

Na estratosfera o ozônio é um gás essencial, uma vez que ele é responsável pela absorção da radiação solar cujos comprimentos de onda estão compreendidos entre 240 e 290 nm (UV-C – ultravioleta C) (SEINFELD; PANDIS; 2008).

Ao nível do solo, todavia, o ozônio em elevadas concentrações é um gás tóxico para humanos e para a vegetação, pois oxida tecidos biológicos (JACOB, 1999). Para um longo tempo de exposição, os efeitos tóxicos do ozônio em humanos compreendem mudanças na função pulmonar, capacidade de resposta das vias aéreas aumentada, bem como inflamação das mesmas (WHO, 1999).

Na troposfera ele é gerado fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e sobre compostos orgânicos voláteis. É o principal componente da névoa fotoquímica (CETESB, 2008). Pode também ser transportado da estratosfera para troposfera (JACOB, 1999).

3.2.1.5 Material particulado

Material particulado é a denominação dada a um conjunto de poluentes constituído de poeira, fuligem, fumaça e gotículas de líquidos. A composição desse poluente é altamente variável, apresentando partículas de diferentes fontes, tamanhos e propriedades (VALLERO, 2008).

O material particulado é emitido no ar diretamente por fábricas, usinas de geração de energia, queima a céu aberto, por veículos, atividades agrícolas (aração, cultivo etc.), construções, mineração e incêndios florestais (VALLERO, 2008).

As partículas menores que 100 μm são denominadas partículas totais em suspensão. Partículas com diâmetro inferior a 10 μm recebem a denominação partículas inaláveis, as quais são classificadas como inaláveis grossas (diâmetro entre 2,5 e 10 μm) e respiráveis (diâmetro menor que 2,5 μm). A dimensão da partícula está relacionada ao seu potencial em promover danos à saúde. Partículas de diâmetro inferior a 2,5 μm depositam-se nos alvéolos pulmonares (WHO, 1999) e têm sido associadas ao aumento de doenças respiratórias e diminuição do funcionamento pulmonar (VALLERO, 2008).

Partículas com diâmetro entre 10 e 2,5 μm são retidas nas vias aéreas superiores, atingindo brônquios e bronquíolos (WHO, 1999).

3.2.1.6 Hidrocarbonetos

São gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis bem como de emissões biogênicas. São irritantes dos olhos, nariz, pele e

trato respiratório superior. Vários hidrocarbonetos, como o benzeno, são mutagênicos e cancerígenos (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2012).

3.2.2 Dispersão de poluentes na atmosfera

Nas matrizes ambientais, o transporte de substâncias ocorre devido a combinação da advecção e difusão. Na advecção as partículas da pluma de contaminantes são transportadas de um ponto a outro devido ao movimento do fluido. A difusão, por sua vez, é de natureza randômica, ou seja, as moléculas descrevem um movimento aleatório e, o transporte de partículas ocorre de regiões de altas concentrações para regiões de baixas concentrações. A combinação dos processos de advecção e difusão é chamada dispersão (SOCOLOFSKY; JIRKA, 2005).

Os poluentes lançados na atmosfera, seja ao nível do solo ou a partir de fontes elevadas, são imediatamente sujeitos as condições externas, tais como pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento. Esses parâmetros meteorológicos associados às características topográficas exercem grande influência na velocidade de dispersão de poluentes (PIRES, 2005).

A dispersão de poluentes na atmosfera é de fundamental importância para a renovação do ar ambiente, pois possibilita que as substâncias assumam valores de concentrações aceitáveis para a vida humana (BARBON, 2008).

Assim, a qualidade do ar está condicionada à interação entre as fontes de emissão de compostos atmosféricos e as condições meteorológicas.

Os principais parâmetros que influenciam na dispersão de poluentes são descritos a seguir.

3.2.2.1 Vento

Os ventos são caracterizados por sua velocidade e direção. Eles resultam das diferenças de pressão que são causadas por aquecimento desigual da superfície da Terra. A velocidade do vento é afetada pela pressão horizontal, gradiente de temperatura e fricção, a qual é proporcional a rugosidade da superfície (GODISH, 2003).

A direção inicial de transporte de poluentes a partir de sua fonte é determinada pela direção do vento, a qual é bastante variável, apresentando grandes alterações em períodos de tempo relativamente curtos. A velocidade do vento, por sua vez, influencia na diluição da pluma de poluentes e no tempo de viagem do poluente até o receptor (VARELLO, 2008).

Para fontes de emissão contínua a diluição da concentração dos poluentes começa no ponto de lançamento. A diluição da pluma é inversamente proporcional a velocidade do vento. Em áreas urbanas a dispersão é dificultada devido a alta rugosidade da superfície (presença de construções que atuam como obstáculos ao fluxo do vento e, portanto, a dispersão) (GODISH, 2003).

3.2.2.2 Turbulência

A turbulência é o movimento altamente irregular do vento, caracterizada por vórtices circulares de diferentes dimensões e que ocorrem em várias direções (VARELLO, 2008).

Os vórtices turbulentos são produzidos por forças mecânicas e térmicas. A turbulência mecânica é induzida pelo movimento do vento acima e ao redor de estruturas e da vegetação. A velocidade do vento e rugosidade da superfície aumentam a turbulência mecânica. A turbulência térmica, por sua vez, é resultado do aquecimento ou resfriamento do ar próximo a superfície da Terra (GODISH, 2003).

O efeito da turbulência, tanto mecânica quanto térmica, é aumentar a mistura atmosférica e conseqüentemente, a dispersão dos poluentes, resultando em uma concentração menor (GODISH, 2003).

3.2.2.3 Estabilidade atmosférica

A estabilidade atmosférica está relacionada ao grau de equilíbrio de uma parcela de ar, cujo movimento vertical depende de sua temperatura, pressão e densidade (LYRA, 2008).

O gradiente de temperatura da atmosfera é responsável pelo gradiente de densidades entre as massas de ar, o qual por sua vez gera um movimento vertical na atmosfera denominado convecção (BARBON, 2008).

A taxa de mudança da temperatura em função da altitude denomina-se taxa de declínio (*lapse rate*). Na troposfera a temperatura decai com o aumento da altura a uma taxa média de 6,5 °C/km, que é designada taxa de declínio ambiental. Para parcelas de ar seco expandindo-se adiabaticamente (sem troca de calor com a vizinhança) a taxa de declínio é de 10 °C/km. (WALLACE; HOBBS, 2006).

As taxas de declínio são usadas como indicadores da estabilidade atmosférica e do potencial de dispersão de poluentes (GODISH, 2003).

A figura a seguir apresenta a relação entre as taxas de declínio ambiental e a estabilidade atmosférica.

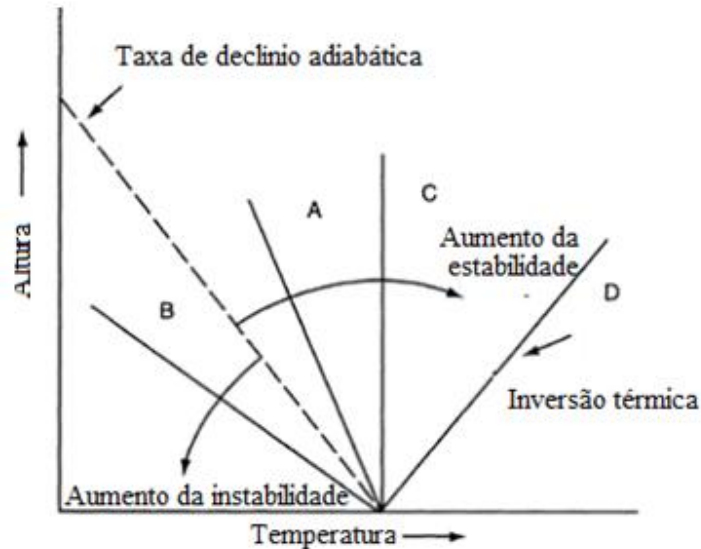


Figura 2 – Perfil de temperatura atmosférica relacionando a variação taxa de declínio com a estabilidade atmosférica.
Fonte: GODISH, 2003

A linha A indica um leve decaimento da temperatura com altura, cuja taxa de declínio é próxima a taxa de declínio adiabática (*adiabatic lapse rate*). Tem-se uma atmosfera neutra, que ocorre sob condição de nebulosidade (o que impede a entrada de radiação solar e cessa a radiação térmica), ventos intensos e circunstâncias transitórias próximas ao nascer e por do sol. Nessas condições a dispersão é relativamente boa (GODISH, 2003).

Quando a temperatura diminui com a altitude a uma taxa de declínio maior que a adiabática, tal como representado pela linha B, tem-se taxa de declínio superadiabática (*superadiabatic lapse rate*). Nessa condição, que ocorre em dias claros e com ventos fracos, a atmosfera é muito instável e apresenta fortes movimentos verticais do ar. Se uma parcela de ar poluído é lançada nessa condição atmosférica, ela subirá rapidamente e sua dispersão será excelente (GODISH, 2003).

A linha C representa a taxa de declínio isotérmica (*isothermal lapse rate*), na qual a temperatura não varia com a altitude, caracterizando uma condição pouco estável. Se uma parcela de ar poluído aquecido é lançada nesse ambiente, ela subirá lentamente, arrefecendo-se a temperatura do ar circundante. A dispersão nessa condição é limitada (GODISH, 2003).

A linha D indica a condição denominada inversão térmica, na qual a temperatura aumenta com a altura, configurando uma atmosfera muito estável, onde o movimento vertical do ar é

suprimido. Essa situação ocorre em noites de céu claro e ventos calmos, sendo desfavorável para a dispersão de poluentes (GODISH, 2003).

3.2.2.4 Albedo

Parte da energia solar recebida pela superfície da Terra é absorvida e uma parcela é refletida. A parcela refletida denomina-se albedo.

Há diferentes albedos para diferentes superfícies, logo, a quantidade de energia solar refletida é variável, promovendo diferentes gradientes de temperatura, que influenciam na estabilidade atmosférica e, conseqüentemente, na dispersão de poluentes (BARBON, 2008).

3.2.2.5 Camada limite planetária

Denomina-se camada limite planetária ou camada limite atmosférica (CLA) a porção da troposfera que é fortemente influenciada pelas forçantes da superfície terrestre (transferência de calor e modificação do fluxo de ar induzida pelo terreno). Segundo Stull (1998), a CLA responde aos forçantes em uma escala de tempo de mais ou menos uma hora.

A CLA apresenta estrutura e espessura (altura) variável no tempo e no espaço devido ao fluxo de calor, albedo, rugosidade e umidade da superfície (CIMORELLI et al, 2005), estendendo-se normalmente de 1 a 2 km (WALLACE; HOBBS, 2006).

Substâncias emitidas na CLA são gradualmente dispersas horizontalmente e verticalmente através da ação da turbulência, tornando-se completamente misturadas em um determinado tempo (SEIBERT, *et al.*, 1999).

Sobre superfícies terrestres, a CLA apresenta uma estrutura bem definida, cujos principais componentes são: altura de mistura, camada residual e camada limite estável, sendo essa última formada no período noturno, quando a superfície é mais fria que o ar. Poluentes emitidos na camada limite estável apresentam pouca dispersão vertical, dispersando-se mais rapidamente na direção horizontal (STULL, 1998).

A altura de mistura é a altura da camada adjacente ao solo, na qual poluentes ou quaisquer constituintes lançados são dispersos verticalmente em uma escala de tempo de cerca de uma hora. Ela apresenta um ciclo diurno e sazonal e é afetada pela topografia e pressão (SEIBERT *et al.*, 1999). A menor altura ocorre um pouco antes do nascer do sol, aumentando progressivamente à medida que o sol aquece a Terra e a Terra aquece o ar acima dela (GODISH,

2003). Quando o aquecimento da camada é muito intenso, ocorrem grandes turbilhões que transportam a pluma de poluentes para o solo (CUNHA, 2002).

A altura da camada de mistura é um parâmetro fundamental para caracterizar a estrutura da camada limite atmosférica e essencial nos modelos de dispersão (NATH; PATIL, 2002).

A camada residual é gerada ao final da tarde devido a ausência da radiação solar. Essa denominação se dá, pois a camada de ar formada nessas condições conserva temporariamente as variáveis meteorológicas e concentrações da camada de mistura (CUNHA, 2002).

Sob condições de céu nublado e ventos fortes, forma-se uma camada neutra (WALLACE; HOBBS, 2006), que pode ocorrer tanto no período diurno como noturno. Uma pluma de poluentes lançada nessa camada percorre uma longa distância até atingir o solo, dada a igualdade dos turbilhões nas três direções (CUNHA, 2002).

3.2.2.6 Topografia

As características topográficas locais podem ter efeitos significativos sobre o movimento de ar. Esses efeitos incluem variação vertical do fluxo de ar associado a presença de florestas, campos agrícolas e vegetações em geral. Tais fluxos afetam o comportamento das plumas das chaminés e, conseqüentemente o nível de poluentes. Montanhas, por exemplo, servem de barreira ao fluxo do ar (GODISH, 2003).

3.3 MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR

O monitoramento da poluição do ar é dividido em duas categorias: monitoramento das emissões e o monitoramento da qualidade do ar. O primeiro trata da medição da concentração ou taxa de emissão de poluentes emitidos por dutos e chaminés; o segundo objetiva quantificar as concentrações no ar ambiente, onde as pessoas, animais e plantas estão expostos (FRONDIZI, 2008).

Rede de monitoração atmosférica são duas ou mais estações de medidas de ar localizadas em uma região geográfica para medição de parâmetros meteorológicos e concentração de poluentes, a fim de determinar a extensão e natureza da poluição química e estabelecer a tendência das concentrações dos poluentes no tempo (FRONDIZI, 2008).

Em termos de uso do solo e população exposta, as estações de monitoramento da qualidade do ar recebem a seguinte classificação (WHO, 2000):

- a) Comercial: mede a exposição da população em áreas urbanas centrais e de comércio, com grande movimentação de pedestres e veículos.
- b) Residencial: mede a exposição da população em bairros residenciais e áreas suburbanas das cidades.
- c) Industrial: monitoramento de áreas onde as fontes industriais têm grande influência nas concentrações observadas. Objetiva-se à avaliação tanto de picos de concentração quanto a longo prazo.
- d) Urbana/concentração de fundo (*background*): localizadas em áreas urbanas, não próximas à fontes específicas. Representa as concentrações de fundo da área urbana como um todo.
- e) Veicular: localizadas próximas de vias de tráfego para avaliar a influência da emissão veicular.
- f) Rural: mede a concentração em áreas rurais, devendo estar o mais distante possível de fontes veiculares, industriais e urbanas.
- g) Ambiente fechado (*indoor*): mede as concentrações em ambientes de trabalho.

A avaliação da qualidade do ar em uma região requer uma descrição das condições existentes a partir de dados confiáveis e representativos (LYRA, 2008). No entanto, há uma limitação nessa avaliação em função da disponibilidade de recursos financeiros e humanos, bem como devido ao restrito número de poluentes, definidos em função de sua relevância (CETESB, 2008).

De acordo com Frondizi (2008) e CETESB (2008) uma rede de monitoramento é implantada com um ou mais dos seguintes objetivos:

- a) Verificar o atendimento aos padrões estabelecidos pela legislação, determinando situações críticas e seus respectivos planos de emergência, bem como subsidiar estudos epidemiológicos.
- b) Acompanhar a qualidade do ar em áreas nas quais os níveis de poluição pioraram ou os padrões de concentração de poluentes foram ultrapassados, melhorando posteriormente.
- c) Avaliar o impacto na qualidade do ar de uma ou mais fontes. Utiliza-se muito esse objetivo nos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), para avaliação da qualidade do ar antes, durante e depois da instalação do empreendimento.
- d) Obtenção de dados a serem aplicados em estudos para zoneamento, estudos de trânsito, estudos sobre os efeitos na saúde humana, fauna e flora etc.

- e) Validar modelos matemáticos de dispersão.
- f) Informar à população, órgãos públicos e à sociedade em geral os níveis presentes da contaminação do ar.

A abrangência no espaço e o período de medição, denominadas escala espacial e temporal respectivamente, são parâmetros essenciais que devem ser considerados em uma rede de monitoramento.

Com relação à escala espacial, a EPA (2008) apresenta as seguintes classificações:

- a) Microescala (<100 m): denominação dada a uma área que pode variar de dezenas a centenas de metros. Tal escala é importante quando as fontes estão próximas ao solo e as concentrações diminuem com a distância.
- b) Média escala: medir concentrações em áreas de até várias quadras de tamanho com dimensões que variam de cerca de 100 metros a 0,5 km.
- c) Escala de bairro ou área de uso homogêneo (< 4 km): um dos casos é quando se deseja monitorar um bairro dentro de uma cidade a partir de uma única estação que represente a qualidade do ar da maior área possível. Dependendo da topografia, meteorologia e uso urbano da região, pode-se inferir que uma área relativamente grande tenha um uso homogêneo, ou seja, onde não existam grandes fontes emissoras ou estradas de tráfego intenso. Assim, uma estação localizada próxima ao centro da região fornecerá resultados representativos da região como um todo. Outro caso da aplicação da escala de bairro é quando se deseja monitorar uma fonte de interesse especial devido a toxidez de suas emissões ou incômodo que elas produzem.
- d) Escala urbana (de 4 a 50 km): utilizada quando se tem interesse em monitorar a qualidade do ar de uma cidade pequena ou média ou o impacto de uma grande indústria ou pólo industrial. Essa escala normalmente requer mais de um local de instalação de estação de monitoramento.
- e) Escala regional ou bacia aérea (50 km a 500 km): dedicados a grandes áreas, abrangendo, em geral, vários municípios.
- f) Escala nacional/global: concentrações que caracterizam o globo como um todo.

De acordo com a Diretiva Europeia 2008/50/CE de 05/2008, a seleção de locais para o monitoramento da qualidade do ar deve garantir a representatividade dos dados obtidos, para tal é recomendável que o amostrador ou tomada de ar estejam afastados de paredes, prédios, árvores e plantas. A altura da tomada da amostra pode variar de 1,5 metros a 4 metros acima do solo e deve estar afastada no mínimo 1,5 metros de edificações.

No que tange a instalação dos sensores de direção e velocidade do vento, a distância deles em relação aos obstáculos deve ser no mínimo o dobro da altura desse obstáculo. Entende-se por obstáculos: prédios, parede divisória alta, pequeno morro, cerca ou árvore que possa alterar o fluxo normal do ar no local (FRONDIZI, 2008).

3.3.1 Legislação

A legislação é um dos instrumentos da gestão da qualidade do ar. Em esfera nacional tem-se a Resolução nº 003 de 1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, que estabelece os padrões primários e secundários de qualidade do ar, para os poluentes: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio.

Padrão primário de qualidade do ar são concentrações de poluentes atmosféricos que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Pode ser entendido como níveis máximos toleráveis de concentração a serem atingidos a curto e médio prazos. O padrão primário não é uma proteção ampla, pois representa proteção apenas à saúde da população, não considerando toda a natureza. Para proteção da natureza é fixado o padrão secundário, que são concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo de efeito adverso sobre o bem estar da população, bem como o mínimo dano à flora, fauna, aos materiais e meio ambiente em geral. Pode ser concebido como níveis máximos toleráveis de concentração a serem atingidos a longo prazo (IAP, 2009).

A Tabela 1 apresenta os poluentes regulamentados pela Resolução 03/90 do CONAMA e seus respectivos padrões primários e secundários.

TABELA 1 – Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA N° 03 de 28/06/90)

| Poluente | Tempo de Amostragem | Padrão Primário $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Padrão Secundário $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|--------------------------------|-----------------------|--|--|
| Partículas totais em suspensão | 24 horas ¹ | 240 | 150 |
| | MGA ² | 80 | 60 |
| Partículas inaláveis | 24 horas ¹ | 150 | 150 |
| | MAA ³ | 50 | 50 |
| Fumaça | 24 horas ¹ | 150 | 100 |
| | MAA ³ | 60 | 40 |
| Dióxido de enxofre | 24 horas ¹ | 365 | 100 |
| | MAA ³ | 80 | 40 |
| Dióxido de nitrogênio | 1 hora | 320 | 190 |
| | MAA ³ | 100 | 100 |
| Monóxido de carbono | 1 hora ¹ | 40.000 | 40.000 |
| | | 35 ppm | 35 ppm |
| | 8 horas ¹ | 10.000 | 10.000 |
| | | 9 ppm | 9 ppm |
| Ozônio | 1 hora ¹ | 160 | 160 |

Fonte: CETESB (2008).

1 - Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

2 - Média geométrica anual

3 - Média aritmética anual

No Brasil, cada estado da Federação pode estabelecer seus próprios limites ou padrões, desde que sejam mais restritivos que a legislação federal.

No âmbito estadual, o Paraná adota os padrões da qualidade do ar da Resolução CONAMA 3/1990 e fixou através da Resolução n° 054 de 2006 da Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – padrões de emissão para fontes estacionárias, segundo o poluente e tipologia de fonte potencial de poluição do ar.

3.4 MODELOS DE DISPERSÃO

Os numerosos e complexos processos que regem o comportamento de poluentes na atmosfera são descritos por modelos de dispersão atmosférica, que são programas computacionais que utilizam algoritmos matemáticos para simular o transporte e dispersão dos poluentes.

Os modelos matemáticos permitem avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora; analisar áreas de riscos e administrar liberações emergenciais. Assim, na gestão ambiental, os modelos são usados para: auxiliar na verificação das tecnologias industriais ou propostas de adequação quanto ao atendimento à legislação vigente; dar suporte a planos de ação para redução de emissões de poluentes; prever impactos de novos empreendimentos; indicar locais para instalação de estações de monitoramento; indicar áreas com maiores concentrações de poluentes que possam acelerar a degradação de materiais, entre outras finalidades (LYRA, 2008).

Outra vantagem do uso de modelos de dispersão atmosférica é a possibilidade de prever as concentrações mais altas de um poluente atmosférico que poderiam ocorrer no pior cenário, tanto em relação às condições meteorológicas, quanto de emissão (KAWANO; LISBOA, 2008). É possível também avaliar a qualidade do ar sem dados medidos, a partir da comparação dos resultados obtidos com os padrões legislados.

Os modelos de dispersão atmosférica requerem pelo menos três tipos de dados de entrada: informações sobre as fontes dos poluentes, dados meteorológicos e topografia da região. Como resultado, tem-se a concentração do poluente nos receptores estabelecidos, para um período de tempo específico (LYRA, 2008).

Os modelos mais utilizados são os modelos gaussianos, assim denominados por assumirem que os perfis de concentração médios, a qualquer distância, seguem uma curva gaussiana na direção vertical e horizontal (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

A Figura 3 apresenta o comportamento da pluma emitida por uma fonte pontual, segundo a distribuição gaussiana.

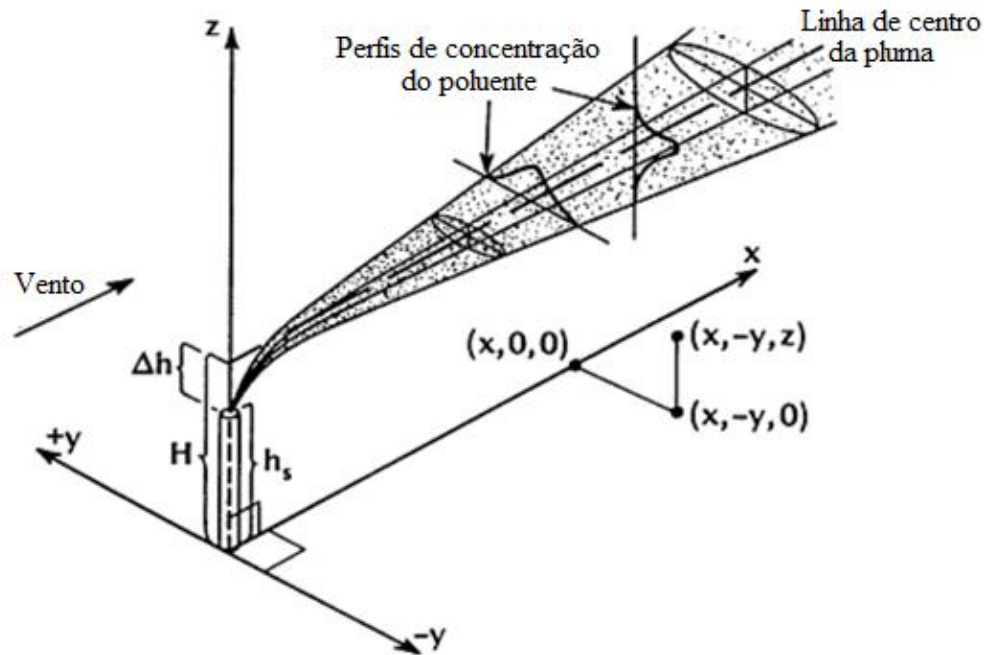


Figura 3 – Representação do modelo de pluma gaussiana
 Fonte: New Zealand Ministry for the Environment, (2004)

3.4.1 Aermod

O AERMOD é um modelo de pluma gaussiana estacionário, desenvolvido pela AERMIC – *American Meteorological Society* (AMS) e USEPA – *United States Environmental Protection Agency*.

Para a simulação da dispersão, o modelo requer como dados de entrada: dados da fonte emissora, dados meteorológicos, topográficos e da malha receptora.

As características da fonte emissora pontual (chaminé) incluem diâmetro interno, altura, taxa de emissão do gás, bem como sua velocidade e temperatura de saída.

O modelo se aplica às áreas rurais e urbanas, terrenos planos e complexos (montanhosos), lançamentos superficiais e elevados e múltiplas fontes, incluindo: fontes pontuais (chaminé de indústria), em área (emissões difusas com distribuição aproximadamente homogênea, ex., névoa salina), em linha (rodovia) e em volume (EPA, 2004).

O AERMOD é o *software* mais recomendado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) e amplamente utilizada em todo o mundo (SILVA; NETO, 2009).

Para predição da concentração, o AERMOD considera o transporte do poluente nas porções superior e inferior da pluma. O modelo adota que horizontalmente a pluma se dispersa

de maneira gaussiana (pluma direta). Verticalmente, além da dispersão da pluma gaussiana, considera-se uma pluma indireta e uma pluma penetrada (EPA, 2004a).

A fonte direta, em termos de concentração no nível do solo, ocorre quando a velocidade na linha superior da pluma é maior que a velocidade de ascendência da pluma, carregando-a para a superfície. A fonte indireta consiste no tratamento da porção da pluma que primeiro atinge a altura da camada limite convectiva, sendo carregada à superfície. O AERMOD também calcula a contribuição da porção da pluma que penetra acima da camada limite convectiva e reentra nesta camada posteriormente, dispersando-se nela e atingindo a superfície. A concentração total é a soma das concentrações dessas três situações (EPA, 2004a).

A Figura 4 ilustra o tratamento da pluma na camada limite convectiva.

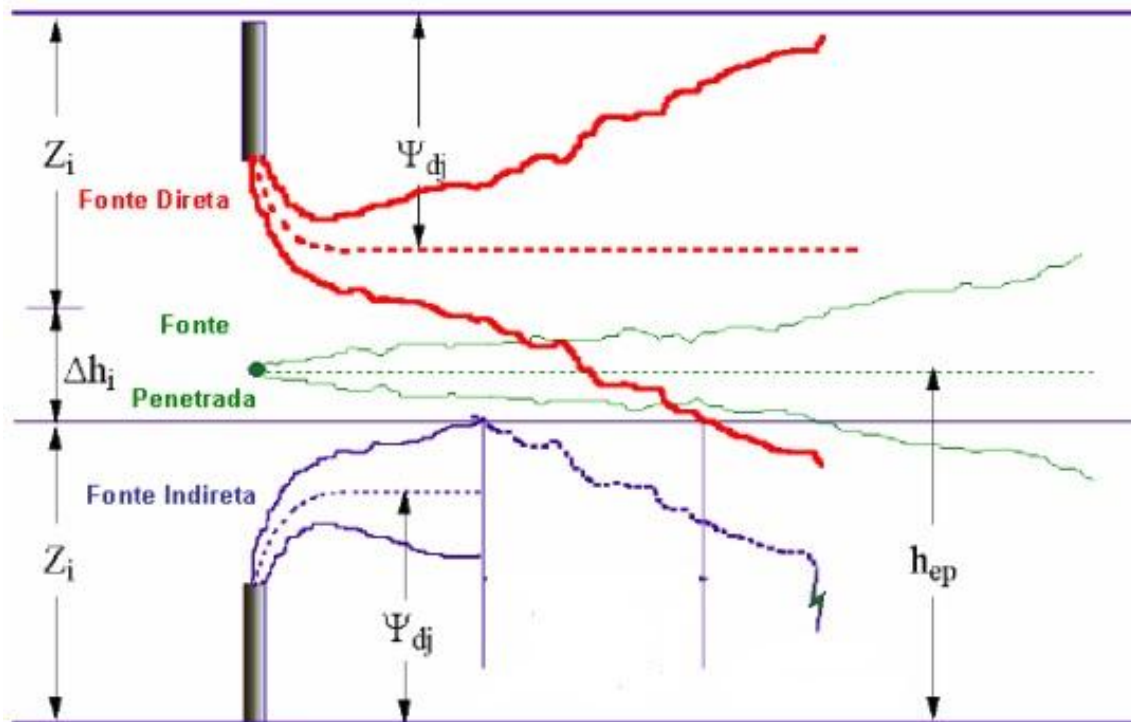


Figura 4 – Tratamento da pluma na camada limite convectiva pelo aermod
Fonte: EPA (2004a)

A contribuição da fonte direta é dada pela equação:

$$C_d(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}u} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(\frac{(z + \psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right]$$

Onde:

C_d : concentração devida a fonte direta em unidade de massa por volume (M/L^3);

Q : taxa de emissão pela chaminé em unidade de massa por tempo [M/T];

U: velocidade do vento em unidade de distância por tempo [L/T];

σ_y, σ_z : coeficientes de dispersão lateral e vertical;

x, y, z: distância segundo as direções dos eixos coordenados, em unidade de comprimento [L];

f_p : fração do material emitido pela fonte que permanece na camada limite convectiva, $0 < f_p < 1$;

j: 1 para linha inferior da pluma e 2 para a linha superior da plum;

y: altura entre a base da fonte e a linha central da pluma, em unidade de comprimento [L];

λ : coeficiente da distribuição;

ψ_{dj} : altura entre a base da fonte e a linha central da pluma;

z_i : altura da camada de mistura mecânica [L];

F_y : $\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$ representa a parcela de concentração referente a dispersão na direção do vento.

O primeiro termo entre colchetes representa a parcela da concentração devido a dispersão vertical do poluente, o segundo termo refere-se ao acúmulo de poluente devido ao efeito de reflexão da pluma no solo.

A contribuição da fonte indireta é dada pela equação:

$$C_r(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}u} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z + \psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(\frac{(z - \psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right]$$

Com $\psi_{rj} = \psi_{dj} - \Delta h_i$, sendo que Δh_i representa a parcela da pluma que ascende além do topo da camada limite convectiva.

A contribuição da fonte que penetra além da camada limite convectiva é dada pela equação 3.

$$C_p(x, y, z) = \frac{Q(1 - f_p)}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{zp}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right]$$

Onde

h_{ep} : altura da pluma que penetra além do topo da camada limite convectiva [L].

z_{ieff} : altura efetiva da camada de mistura mecânica.

3.4.1.1 Aermet

O aermet é um pré-processado que tem como função processar os dados meteorológicos e calcular os parâmetros da camada limite planetária necessários para os cálculos da dispersão pelo aermod.

O aermet requer como dados de entrada informações de observações meteorológicas, tais como: velocidade e direção do vento, temperatura, cobertura de nuvens, umidade relativa, pressão, radiação global, altura da base de nuvens, além das características de superfície, tais como reflexibilidade (albedo) e rugosidade.

A partir desses parâmetros são calculados o perfil vertical da velocidade do vento, os coeficientes de turbulência vertical e horizontal e o gradiente de temperatura (EPA, 2004).

3.4.1.2 Aermap

De acordo com EPA (2004d) o AERMOD é capaz de calcular a concentração de poluentes em todos os tipos de terreno, desde pradarias planas até terrenos complexos (montanhosos). Os modelos regulatórios de dispersão aplicáveis a diferentes características de terreno, requerem informações topográficas, pois consideram que elas podem influenciar no resultado da concentração de um poluente sobre o receptor.

O processamento do terreno é feito através do pré-processador aermap, cujas principais funções são a determinação da elevação da base das fontes e dos receptores, as quais são utilizadas pelo aermod para posterior determinação da concentração dos poluentes. As informações de entrada requeridas pelo aermap são: localização das fontes e dos receptores e um arquivo com os dados do terreno, no qual se contemplam as características do relevo da área estudada (distribuição e variação da altitude) (EPA, 2004d).

4 METODOLOGIA

Parte deste trabalho, devido a característica de estudo de caso, envolveu o levantamento de informações e de dados referentes à meteorologia e às fontes de emissão atmosférica do município de Maringá, para a composição do melhor cenário e posterior alimentação do programa AERMOD.

O Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV) do estado do Paraná, publicado em 2010, comenta sobre a necessidade de expansão da rede de monitoramento da qualidade do ar no estado, incluindo monitoramento em Maringá, por seu um dos municípios com maior frota veicular.

Diante da ausência de redes de monitoramento da qualidade do ar em Maringá, se faz necessário para fins práticos, um estudo para seleção de locais adequados à instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar no município de Maringá.

4.1 MUNICÍPIO DE MARINGÁ

Maringá está situada no Noroeste do Paraná, na latitude 23° 25' S e longitude 51° 57' W. O município abrange uma área de 486,433 km² e situa-se a uma altitude média de 596 metros (IPARDES, 2011).

Segundo dados do recenseamento realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população de Maringá é de 349.860 habitantes.

O clima de Maringá, de acordo com Koeppen (SALA, 2005), é subtropical úmido mesotérmico, com chuvas concentradas nos meses de novembro a fevereiro.

A Figura 5 apresenta a localização do município de Maringá no estado do Paraná.

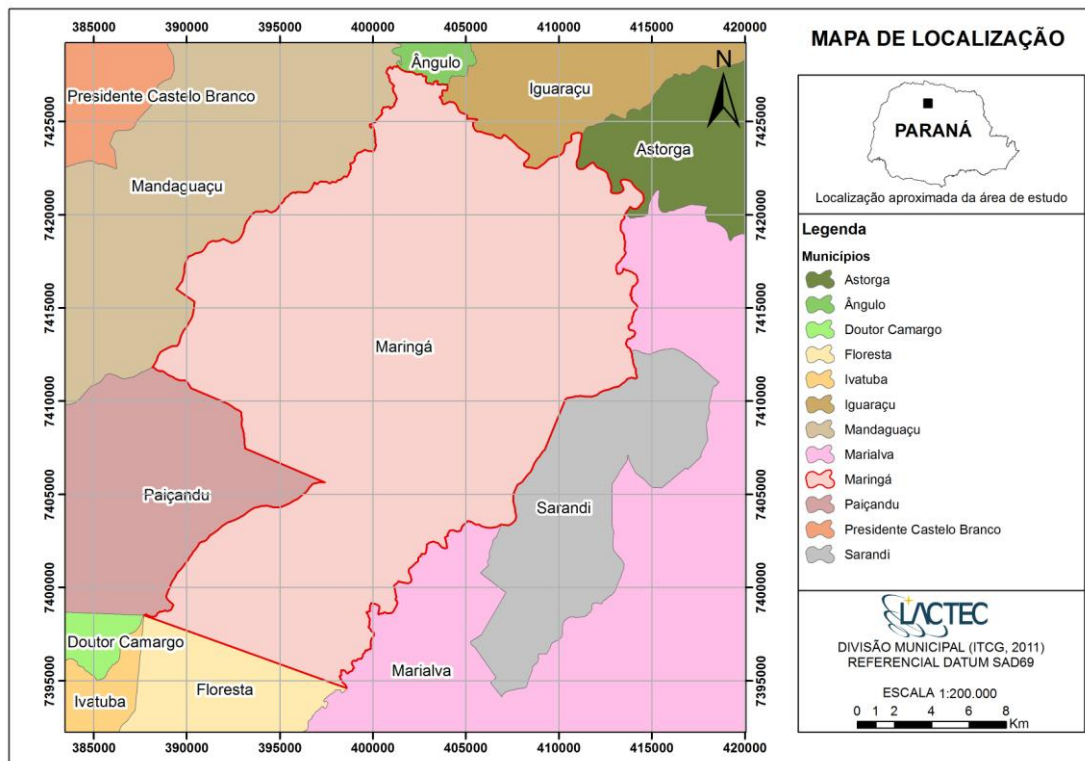


Figura 5 – Localização do município de Maringá.
Fonte: ITGC (2011).

A Figura 6 apresenta a topografia do município de Maringá.

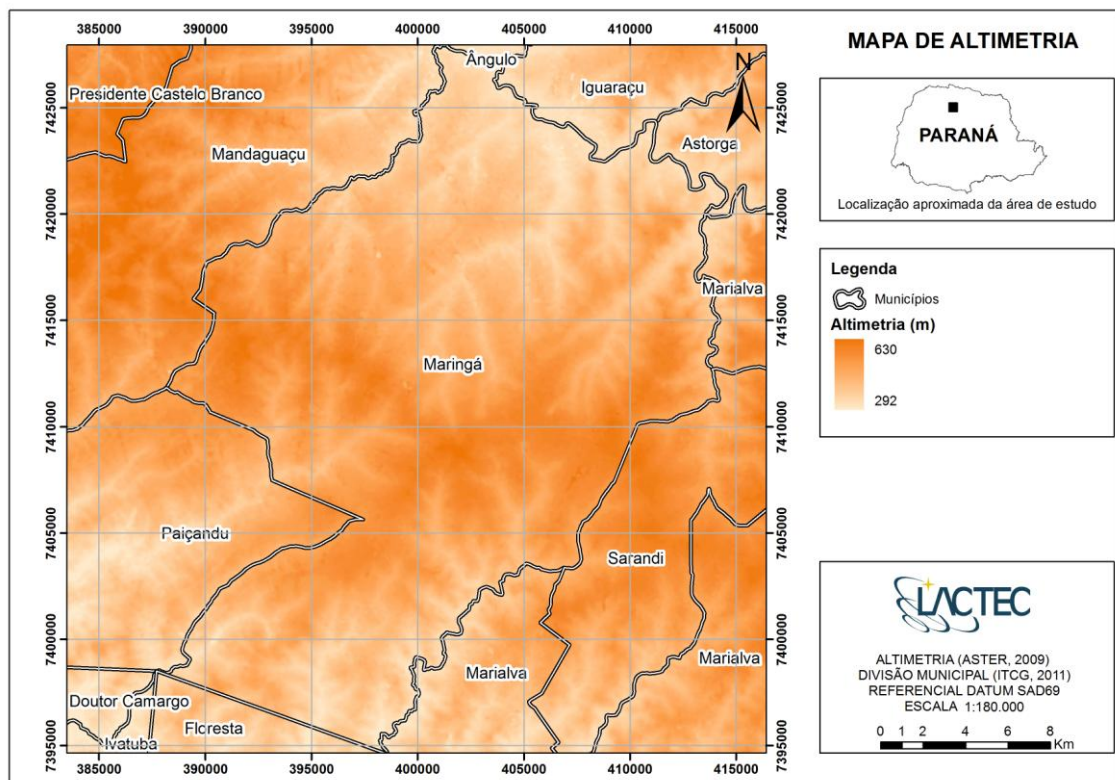


Figura 6 – Mapa de altimetria de Maringá
Fonte: ITGC (2011).

Observa-se na Figura 6 que Maringá está localizada em uma altitude entre 292 e 630 metros acima do nível do mar, sendo as menores altitudes ao sul e ao norte e as maiores na porção central do município. Trata-se um relevo relativamente suave, sem a presença de morros que possam ser desfavoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos.

4.2 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos de superfície utilizados na modelagem foram fornecidos pelo Simepar. Trata-se uma série de dados horários correspondente ao período de 1º de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2010 (43.800 horas de dados monitorados) e que contemplam os seguintes parâmetros: temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), pressão (hPa), radiação global (w/m^2), direção de vento (graus), velocidade do vento (m/s) e precipitação (mm).

A caracterização meteorológica do município de Maringá foi obtida a partir dos dados mensais da série de cinco anos (2006-2010), para cada parâmetro.

Primeiramente foi calculada a média, o mínimo e o máximo mensal para todos os meses de cada ano do período de 2006 a 2010 (cinco anos). A partir das cinco médias mensais calculadas gerou-se uma nova média. Calculou-se também a média dos valores mínimos e máximos, para representar o comportamento extremo das variáveis meteorológicas.

Para a precipitação foi calculada a soma mensal para cada ano, para então obter-se a média da soma mensal dos cinco anos. Das cinco somas mensais, foram também obtidos os valores mínimos e máximos de precipitação.

Os resultados obtidos para a média, máximos e mínimos são apresentados graficamente a seguir:

a) Temperatura

A Figura 7 apresenta o comportamento médio dos cinco anos de monitoramento da temperatura.

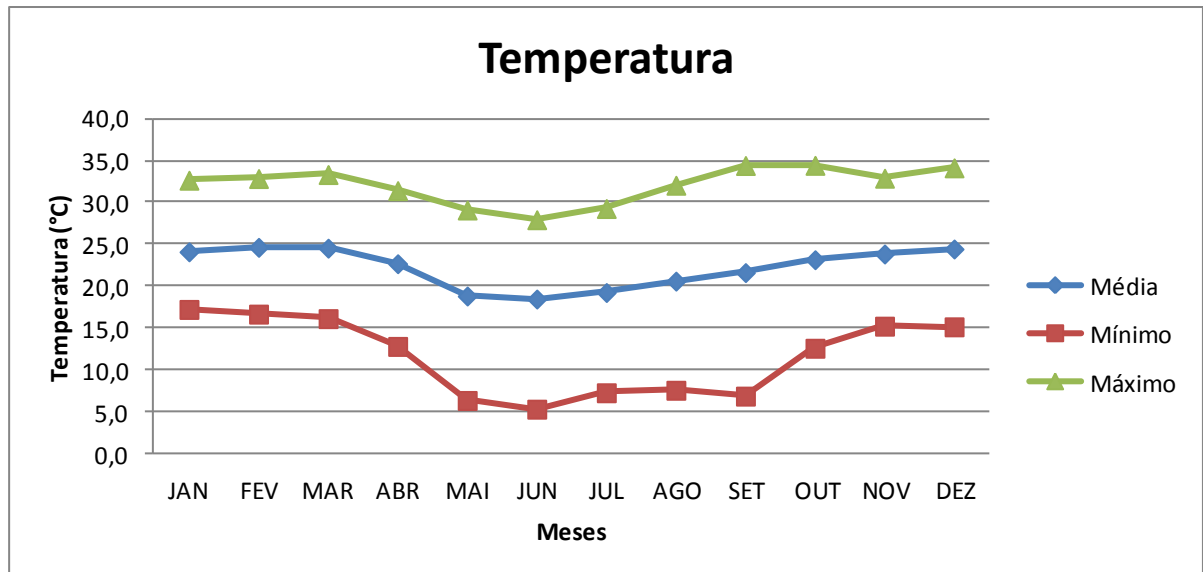


Figura 7 – Comportamento médio anual da temperatura entre 2006 e 2010.

O gráfico da Figura 7 evidencia o comportamento sazonal da temperatura, cujas médias variam de 18 a 25 °C aproximadamente, sendo as mais altas registradas no período de dezembro à março, no qual tem-se temperaturas extremas em torno de 16 e 33 °C.

O trimestre de maio a julho é caracterizado por temperaturas médias mais baixas, bem como por menores temperaturas mínimas, cujas médias são entre 5 e 7,3 °C. Nesses meses as temperaturas máximas podem atingir 30 °C o que implica em uma amplitude térmica diária mais intensa, superior a 20 °C.

b) Umidade relativa

A Figura 8 apresenta o comportamento médio dos cinco anos de monitoramento da umidade relativa do ar.

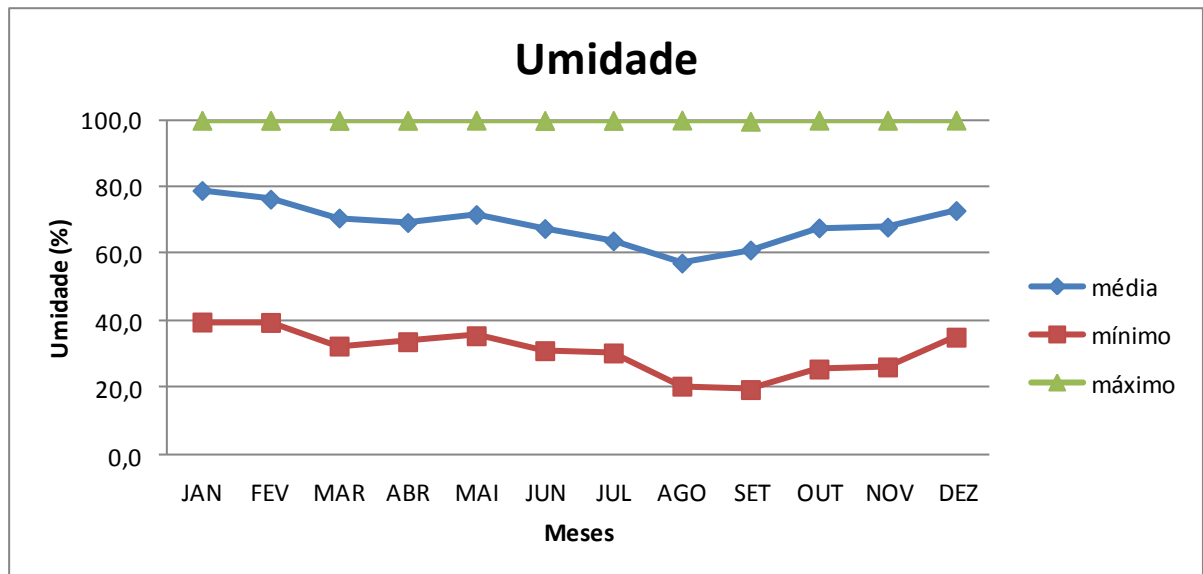


Figura 8 – Comportamento médio anual da umidade entre 2006 e 2010.

Como se observa na Figura 8 a umidade média ao longo do ano varia aproximadamente de 60 a 80 %, com menor valor de 57,3 % registrado para o mês de agosto, seguido dos meses de setembro e julho, que apresentaram uma umidade média de 61 e 63,9 % respectivamente. As maiores médias ocorrem no período de dezembro a fevereiro.

A partir das médias dos valores mínimos, verifica-se que a umidade pode chegar a 20 % conforme ocorrido para os meses de agosto e setembro.

Os valores máximos encontram-se entre 99 % e 100 % o que significa que em todos os meses há momentos em que o ar está saturado.

c) Pressão

A Figura 9 apresenta o comportamento médio dos cinco anos de monitoramento da pressão.

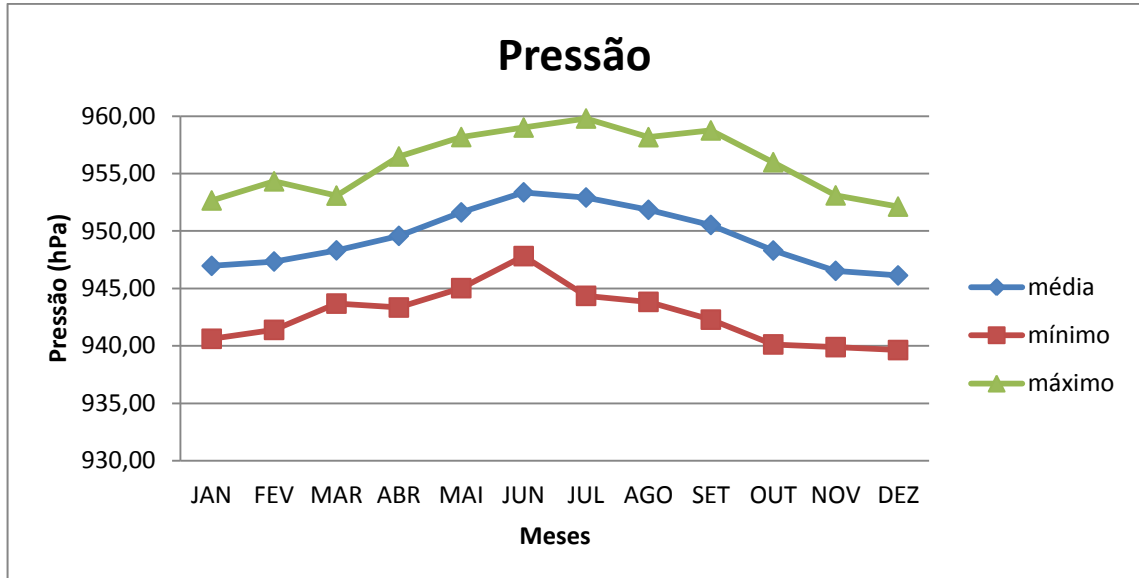


Figura 9 – Comportamento médio anual da pressão entre 2006 e 2010.

Observa-se na Figura 9 que a média mensal da pressão atmosférica apresenta um aumento gradativo a partir do mês de janeiro, atingindo valores mais altos nos meses de junho e julho, tornando a diminuir a partir de agosto. A média mensal da pressão varia de 946,1 a 953,4 hPa ao longo do ano.

O máximo valor registrado para pressão foi de 959,8 hPa para o mês de julho e o valor mínimo foi de 939,6 hPa para o mês de dezembro.

A variação da pressão atmosférica ocorre em decorrência do deslocamento das massas de ar, estando também relacionada à densidade e temperatura dessas massas, assim, pressões mais baixas estão associadas a temperaturas mais elevadas, enquanto que pressões mais altas são condicionadas por temperaturas mais baixas.

d) Radiação global

A Figura 10 apresenta o comportamento médio dos cinco anos de monitoramento da radiação global.

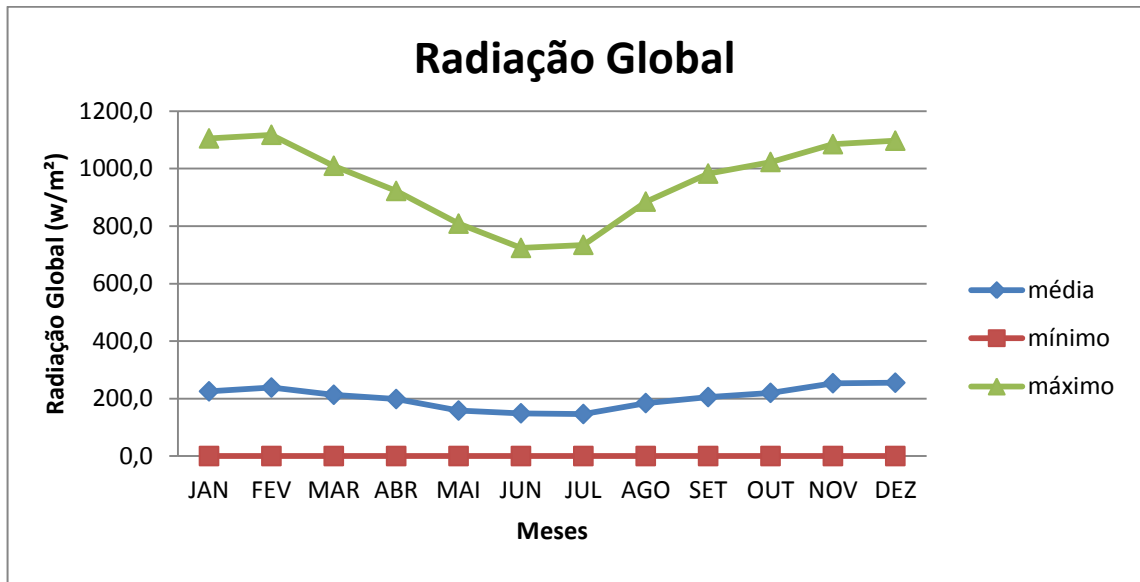


Figura 10 – Comportamento médio anual da radiação global entre 2006 e 2010.

Conforme o gráfico da Figura 10 verifica-se a sazonalidade da radiação global, cuja intensidade é maior no verão e menor no inverno. Nos meses de novembro a fevereiro têm-se médias superiores a 220 W/m², o que implica em temperaturas mais elevadas nesse período. Nesses meses, a maior intensidade registrada pode ultrapassar 1100 W/m², sobretudo em janeiro e fevereiro.

A partir de março observa-se a diminuição da intensidade da radiação com as menores médias registradas no trimestre de maio a julho, as quais não alcançam 160 W/m². Os valores mínimos representados no gráfico são nulos, correspondendo a ausência de incidência de radiação global no período noturno.

e) Precipitação

A Figura 11 apresenta a média da soma mensal da precipitação, bem os valores mínimos e máximos mensais.

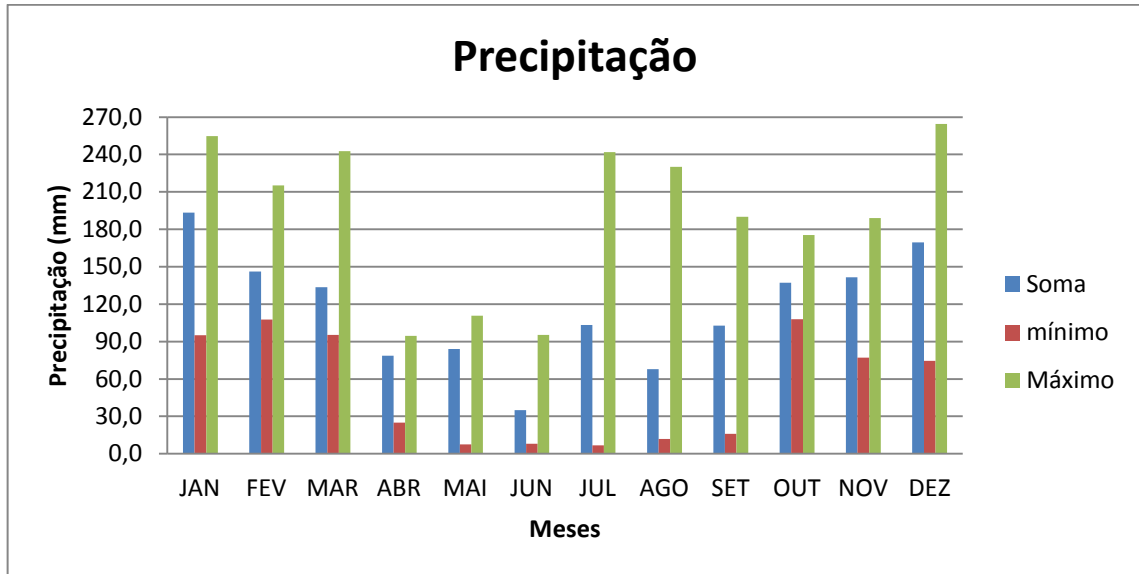
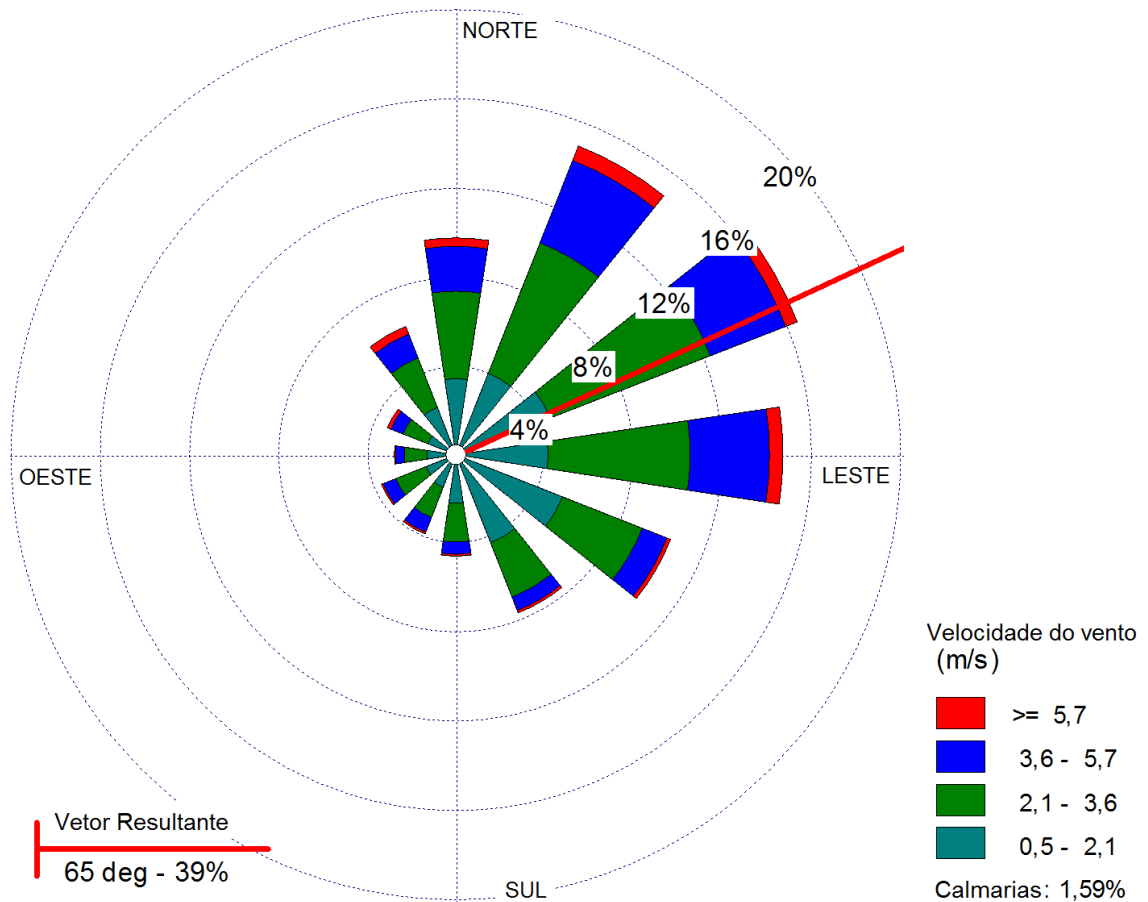


Figura 11 – Comportamento médio anual da precipitação entre 2006 e 2010.

Conforme observado pelas barras em azul no gráfico da Figura 11, as quais representam a média da soma da precipitação mensal, nota-se que o período de outubro a março é caracterizado por uma maior intensidade pluviométrica, superior a 120 mm, ultrapassando 180 mm no mês de janeiro. Os meses de abril a setembro, por sua vez, apresentam menor índice pluviométrico, com a média da precipitação variando entre 78 e 103 mm, sendo a menor intensidade ligeiramente superior a 30 mm, registrada para o mês de junho. Para esses meses tem-se valores mínimos, representados pelas barras em vermelho, inferiores a 30 mm.

f) Direção e direção do vento

A Figura 12 apresenta a rosa dos ventos, obtida a partir da inserção dos dados de direção e velocidade do vento de Maringá no pré-processador aermet.



No conceito da meteorologia a direção do vento é determinada pela direção de onde o vento é proveniente, assim, observa-se na rosa dos ventos da Figura 12 que a direção predominante do vento é nordeste, o que significa que o vento está vindo de nordeste e soprando para sudoeste.

4.3 LEVANTAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A modelagem do comportamento da dispersão de poluentes atmosféricos para o município em questão foi feita a partir da inserção no modelo, de dados de emissões atmosféricas de fontes fixas (industriais) e móveis (veiculares).

4.3.1 Fontes fixas

O setor da qualidade do ar, da Divisão de Meio Ambiente do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC desenvolveu uma metodologia de seleção de fontes fixas com

potencial significativo de emissões atmosféricas. Essa metodologia foi aplicada para oito municípios, entre eles Maringá.

A primeira etapa consistiu em pesquisas nas prefeituras dos municípios de interesse, órgãos ambientais e sindicatos dos diversos setores industriais, para identificar os empreendimentos instalados. A partir desta pesquisa, a fonte de dados selecionada foi o Cadastro das Indústrias, Fornecedores e Serviços do Estado do Paraná, elaborado e fornecido pela Federação das Indústrias do Estado do Paraná – FIEP. Esse documento contém informações dos empreendimentos cadastrados, tais como: endereço, contato, número de funcionários, setor de atividade e produto da indústria/empresa.

Na etapa seguinte o critério de seleção foi o setor de atividade e seu potencial de emissão. Atividades não industriais foram desconsideradas. Os empreendimentos que apresentavam atividade com baixo e/ou nenhum potencial de emissão atmosférica, como a galvanoplastia e atividades de montagem de equipamentos e máquinas, foram desconsiderados por não emitirem quantidades significativas de poluentes atmosféricos.

Posteriormente, avaliou-se a dimensão dos empreendimentos restantes através do número de funcionários. Aqueles com número de funcionários inferior a 50 foram desconsiderados, exceto quando o setor de atividade apresentava um potencial poluidor significativo.

Concluídas essas etapas, foram selecionadas 24 indústrias no município de Maringá. Os dados desses empreendimentos, requeridos como entrada no modelo matemático, foram fornecidos pelo órgão ambiental Instituto Ambiental do Paraná – IAP. Dessas 24 indústrias, o IAP possuía cadastro de apenas sete, sendo somente esses considerados na modelagem.

Os dados de entrada e suas respectivas unidades foram:

- a) Identificação (nome) da fonte;
- b) Coordenadas da fonte (em UTM);
- c) Altitude em que se encontra a fonte (m);
- d) Altura da chaminé (m);
- e) Diâmetro da chaminé (m);
- f) Velocidade de saída do gás na chaminé (m/s);
- g) Temperatura de saída do gás na chaminé (K);
- h) Taxa de emissão do gás (g/s).

A Tabela 2 apresenta esses dados e as indústrias são designadas por números. Os empreendimentos contemplam indústrias alimentícias, de bebidas, fabricação de produtos derivados do petróleo, fabricação de móveis e empreendimento agropecuário.

TABELA 2 – Dados das fontes fixas

| Indústria | Fonte | Altura Chaminé (m) | Diâmetro Chaminé (m) | Temp (K) | Vel (m/s) | Taxa (g/s) | | | |
|--------------|------------|--------------------|----------------------|----------|-----------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| | | | | | | NOx | SO ₂ | MPT | CO |
| 1 | Caldeira 1 | 11,00 | 0,50 | 933,15 | 3,34 | 0,08 | 0,087 | 0,02 | 0,11 |
| | Caldeira 2 | 11,00 | 0,50 | 819,15 | 3,36 | 0,08 | 0,087 | 0,02 | 0,26 |
| 2 | Caldeira | 10,00 | 0,25 | 473,15 | 84,93 | 0,16 | 0,002 | 0,11 | 0,02 |
| 3 | Caldeira | 25,00 | 2,26 | 449,15 | 2,58 | 7,16 | 3,072 | 4,70 | 3,01 |
| 4 | Caldeira | 13,00 | 0,90 | 440,15 | 11,22 | 0,64 | 0,880 | 1,00 | 14,83 |
| 5 | Caldeira 1 | 10,00 | 0,49 | 414,45 | 5,00 | 0,04 | 0,002 | 0,01 | 0,01 |
| | Caldeira 2 | 10,00 | 0,45 | 456,05 | 5,00 | 0,04 | 0,005 | 0,01 | 0,01 |
| | Caldeira 3 | 8,40 | 0,60 | 463,15 | 3,31 | 0,18 | 0,372 | 0,02 | 0,01 |
| | Caldeira 4 | 8,40 | 0,60 | 443,15 | 2,13 | 0,60 | 0,953 | 0,06 | 0,04 |
| | Caldeira 5 | 8,40 | 0,60 | 463,15 | 0,63 | 0,22 | 0,097 | 0,02 | 0,01 |
| 6 | Secador 1 | 7,00 | 1,17 | 316,26 | 14,27 | 0,55 | 0,669 | 0,66 | 5,81 |
| | Secador 2 | 7,00 | 1,17 | 305,77 | 11,80 | 0,45 | 0,553 | 0,35 | 4,80 |
| | Secador 3 | 7,00 | 1,17 | 316,65 | 9,57 | 0,37 | 0,449 | 0,37 | 3,90 |
| | Secador 4 | 10,30 | 1,17 | 314,01 | 12,66 | 0,49 | 0,594 | 0,40 | 5,15 |
| | Secador 5 | 10,30 | 1,17 | 313,62 | 9,65 | 0,37 | 0,452 | 0,42 | 3,93 |
| | Secador 6 | 7,00 | 1,17 | 313,73 | 10,25 | 0,39 | 0,481 | 0,34 | 4,17 |
| | Secador 7 | 7,00 | 1,17 | 313,95 | 15,33 | 0,59 | 0,719 | 0,52 | 6,24 |
| | Secador 8 | 7,00 | 1,17 | 325,18 | 9,63 | 0,37 | 0,452 | 0,38 | 3,92 |
| | Secador 9 | 10,30 | 1,17 | 318,79 | 14,35 | 0,55 | 0,673 | 0,43 | 5,84 |
| | Secador 10 | 10,30 | 1,17 | 331,43 | 9,97 | 0,38 | 0,467 | 0,58 | 4,06 |
| 7 | Caldeira | 29,50 | 0,55 | 400,00 | 9,69 | 0,18 | 0,241 | 0,27 | 2,83 |
| TOTAL | | | | | | 13,91 | 11,31 | 10,69 | 68,95 |

O artigo 8º da Resolução SEMA 054/06 define que a altura mínima da chaminé deve ser de 10 metros acima do nível do solo, assim, nota-se que as chaminés dos empreendimentos 5 e 6 não atendem a essa Resolução na totalidade, visto que a altura de algumas de suas chaminés é inferior a 10 metros.

4.3.2 Fontes móveis

O procedimento para considerar a emissão veicular no modelo AERMOD é através da inserção de segmentos (linhas) que representam as vias de tráfego. Cada segmento possui um comprimento e uma taxa de emissão, portanto, é necessário definir as vias a serem modeladas e conhecer a taxa de emissão veicular da frota total de Maringá para posteriores adaptações dessas taxas aos cenários modelados.

Os valores das taxas de emissão veicular para os poluentes MPT, HCT, SO₂, NO_x e CO foram obtidos de um estudo realizado pelo LACTEC, no qual as emissões atmosféricas veiculares foram quantificadas a partir da metodologia apresentada no “1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários” (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011). A equação geral da metodologia é apresentada a seguir:

$$E = Fr \times Iu \times Fe$$

Onde:

- E = taxa anual de emissão do poluente (g/ano)
- Fr = frota circulante de veículos
- Fe = fator de emissão do poluente (g_{poluente}/km)
- Iu = intensidade de uso do veículo (km/ano)

Essas taxas foram estimadas para a frota total de Maringá, que é de 222.062 veículos considerando 2010 como ano base. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – Estimativas das taxas de emissões veiculares calculadas para a frota total de Maringá

| Poluente | Taxa de emissão | |
|-----------------|-----------------|---------|
| | g/s | ton/ano |
| CO | 831,3 | 26215,2 |
| HCT | 273,2 | 8616,0 |
| SO ₂ | 12,8 | 405,1 |
| NO _x | 51,0 | 1608,3 |
| MPT | 6,7 | 211,3 |

Observa-se pela Tabela 3 que o CO e o HCT representam as maiores emissões veiculares, enquanto que o MPT apresenta a menor contribuição.

4.3.2.1 Seleção das vias para modelagem

As ruas consideradas nas simulações foram todas aquelas classificadas como vias arteriais, vias coletoras e rodovias, conforme apresentado na Figura 13, totalizando 66 segmentos inseridos no modelo matemático para representá-las.

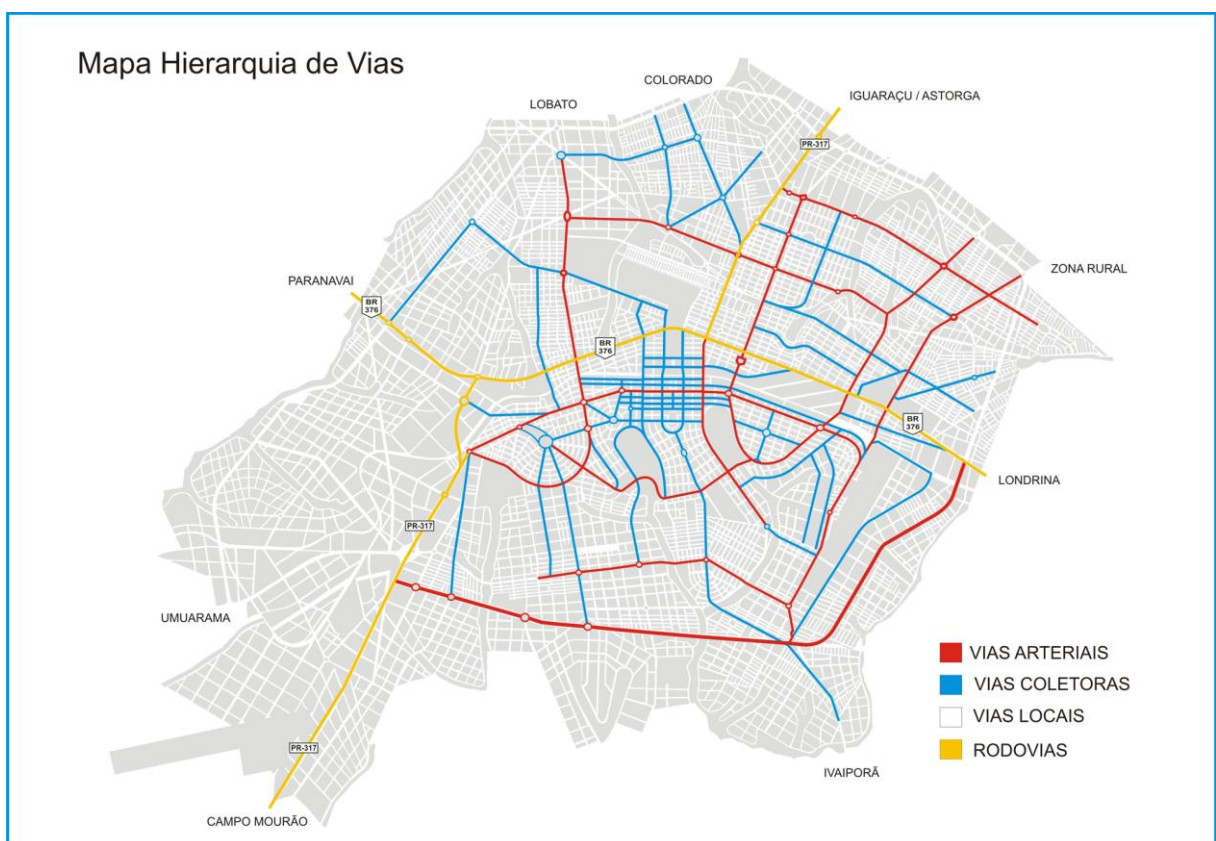


Figura 13 – Mapa de hierarquia de vias
Fonte: Prefeitura de Maringá (portal da Setran)

Para 22 dessas vias, a maioria delas localizadas na zona central de Maringá, estão disponíveis no site da Secretaria de Trânsito dados horários de fluxo veicular, por serem as de tráfego mais intenso.

Partindo-se da taxa de emissão calculada para a frota total de Maringá (222.062 veículos), pela da “Metodologia do Inventário de Fontes Móveis”, calculou-se, a partir de uma regra de três simples, a taxa de emissão para um único veículo, a qual foi multiplicada pelo fluxo médio de

cada via, obtendo-se a taxa dessa via. Esse procedimento foi feito para as 22 vias que apresentam dados de fluxo.

Para as outras 44 vias inseridas não se dispunha de dados de fluxo de veículos. Assim para efeito da modelagem, considerou-se como taxa de emissão total destas a mesma já calculada para as outras 22 vias de tráfego veicular mais intenso.

Essa taxa foi dividida pelo comprimento de todas as ruas consideradas de modo a se obter a taxa por metro; posteriormente esse valor foi multiplicado pelo comprimento de cada via, obtendo-se uma emissão proporcional ao comprimento de cada trecho modelado.

A Tabela 4 apresenta os dados de fluxo das 22 vias, bem como sua taxa de emissão e a taxa total inserida no modelo para cada poluente.

TABELA 4 – Taxas de emissão das fontes móveis

| Rua | Fluxo médio de veículos | taxa (g/s) | | | | |
|--|-------------------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | | CO | MP | SO ₂ | NO _x | HCT |
| Bento Munhoz da Rocha Neto | 1517 | 5,68 | 0,05 | 0,09 | 0,35 | 1,87 |
| Brasil | 3787 | 14,18 | 0,11 | 0,22 | 0,87 | 4,66 |
| Cidade de Leiria | 3298 | 12,35 | 0,10 | 0,19 | 0,76 | 4,06 |
| Colombo | 1516 | 5,68 | 0,05 | 0,09 | 0,35 | 1,87 |
| Curitiba | 917 | 3,43 | 0,03 | 0,05 | 0,21 | 1,13 |
| Duque de Caxias | 1057 | 3,96 | 0,03 | 0,06 | 0,24 | 1,30 |
| Herval | 1835 | 6,87 | 0,06 | 0,11 | 0,42 | 2,26 |
| Independência | 608 | 2,28 | 0,02 | 0,04 | 0,14 | 0,75 |
| Joubert de Carvalho | 1194 | 4,47 | 0,04 | 0,07 | 0,27 | 1,47 |
| Laguna | 858 | 3,21 | 0,03 | 0,05 | 0,20 | 1,06 |
| Mauá | 1377 | 5,16 | 0,04 | 0,08 | 0,32 | 1,69 |
| Paraná | 1128 | 4,22 | 0,03 | 0,07 | 0,26 | 1,39 |
| Paranavaí | 2788 | 10,44 | 0,08 | 0,16 | 0,64 | 3,43 |
| Pedro Taques | 5059 | 18,94 | 0,15 | 0,29 | 1,16 | 6,22 |
| Pion. João Pereira | 1017 | 3,81 | 0,03 | 0,06 | 0,23 | 1,25 |
| Prof. Lauro E. Werneck | 1696 | 6,35 | 0,05 | 0,10 | 0,39 | 2,09 |
| Prudente de Moraes | 1034 | 3,87 | 0,03 | 0,06 | 0,24 | 1,27 |
| Santos Dumont | 922 | 3,45 | 0,03 | 0,05 | 0,21 | 1,13 |
| São Paulo | 1070 | 4,01 | 0,03 | 0,06 | 0,25 | 1,32 |
| Tiradentes | 1040 | 3,89 | 0,03 | 0,06 | 0,24 | 1,28 |
| Tuiuti | 937 | 3,51 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | 1,15 |
| XV de Novembro | 862 | 3,23 | 0,03 | 0,05 | 0,20 | 1,06 |
| Taxa total das vias com dados de fluxo | | 132,96 | 1,07 | 2,05 | 8,16 | 43,70 |
| Taxa total inserida no modelo matemático | | 265,9 | 2,1 | 4,09 | 16,3 | 87,4 |

4.3.3 Contribuição das fontes veiculares e industrial

A Figura 14 apresenta a porcentagem da contribuição das fontes industriais e veiculares, segundo a taxa calculada e inserida no modelo matemático para cada uma das categorias de fontes.

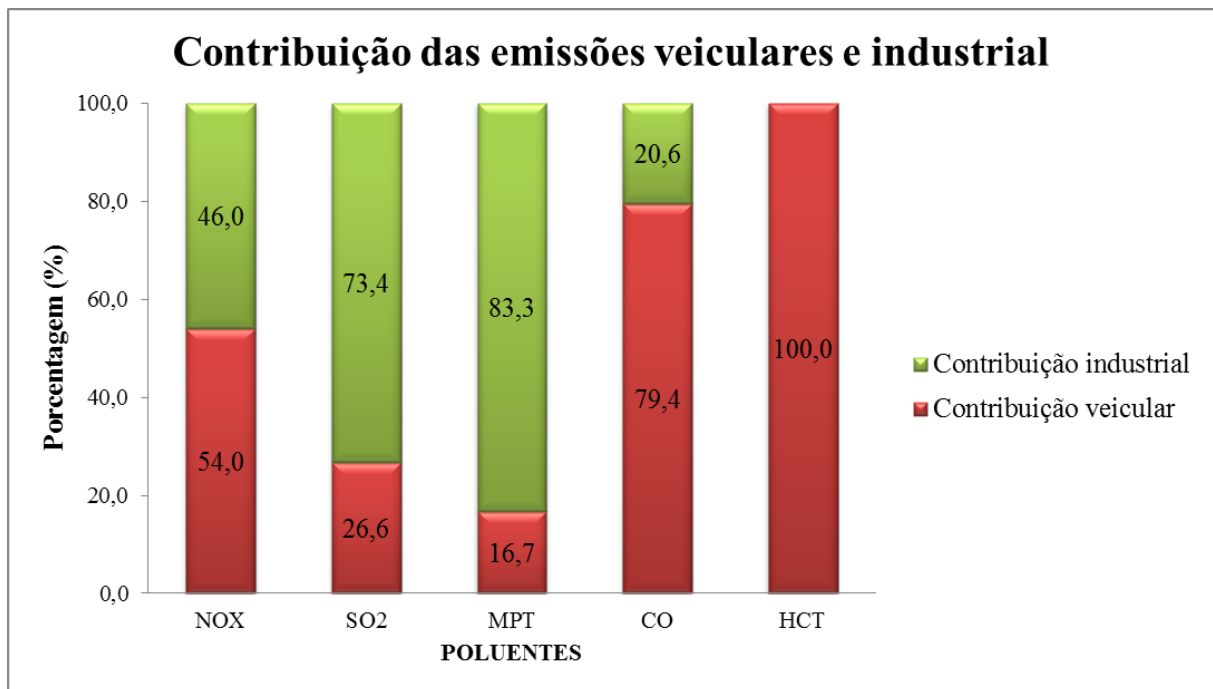


Figura 14 – Contribuição das fontes veiculares e industriais

A partir da Figura 14 observa-se que a emissão dos poluentes SO_2 e MPT é predominantemente industrial, apresentando uma pequena contribuição por fontes móveis. O NO_x , embora apresente uma contribuição veicular maior, tem significativa emissão industrial. O CO, por sua vez, possui uma emissão veicular maior em relação à industrial.

Uma vez que não se dispõe de dados de emissão industrial para HCT, só foram consideradas nas simulações as emissões veiculares, representando 100% da emissão desse poluente.

4.4 MODELO MATEMÁTICO

Para obtenção do padrão de dispersão de poluentes atmosféricos foi utilizado o modelo matemático AERMOD View 8.0, no qual foram inseridos dados meteorológicos, topográficos e das fontes de emissão. Foi definida uma malha (grade) de receptores e os cenários modelados.

Receptores são pontos distribuídos espacialmente formando uma malha, nos quais foram calculadas as concentrações.

Para a simulação da dispersão atmosférica em Maringá definiu-se uma malha com área de 400 Km², e 20 km de comprimento em X e em Y, totalizando 441 receptores, espaçados a cada 1 km horizontal e verticalmente.

A Figura 15 mostra a malha de receptores, delimitada pelo quadrado amarelo, a qual inclui a área urbana e rural do município e uma pequena extensão dos municípios vizinhos.

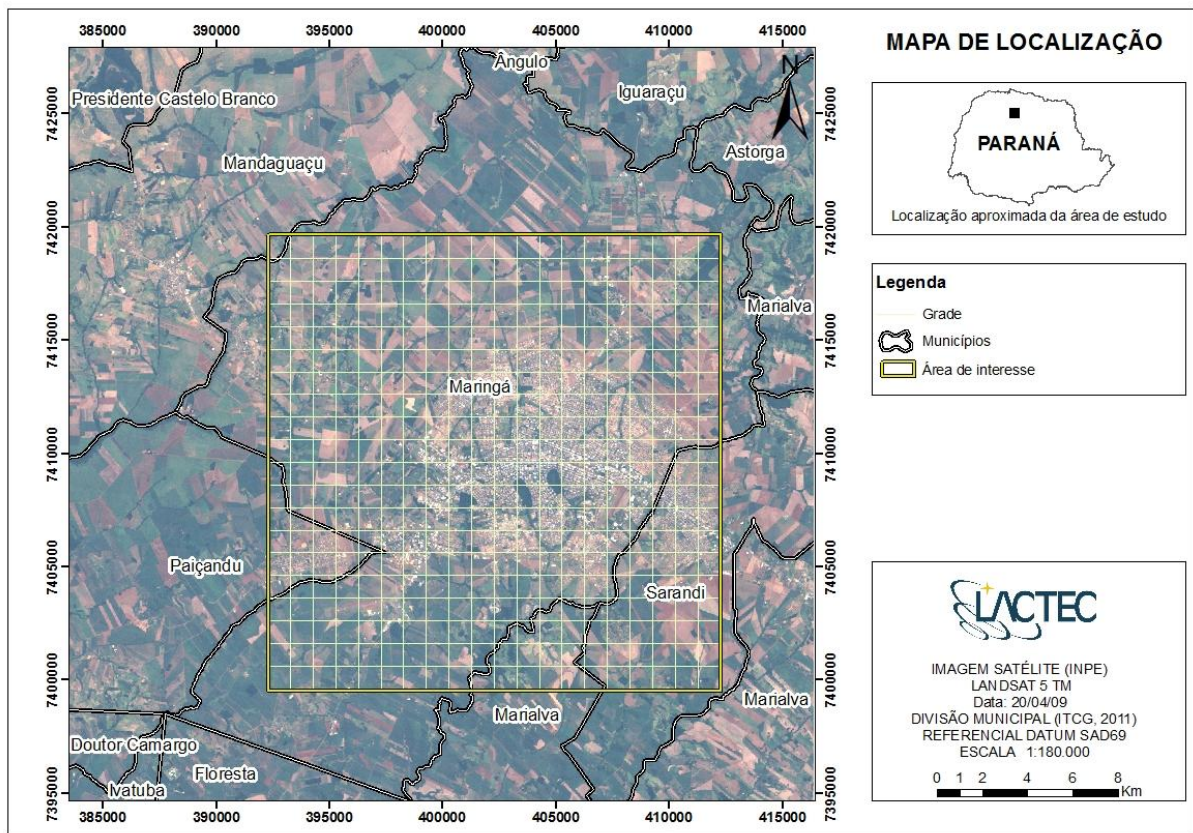


Figura 15 – Malha de receptores
 Fonte: ITGC (2011)

4.4.1 Cenário modelado

Para simular a dispersão da poluição atmosférica em Maringá foi desenvolvido um cenário para cada poluente (NO_x, SO₂, CO, HCT e MPT), contemplando os dados das fontes fixas e móveis.

A Figura 16 mostra a localização das fontes de emissão. As linhas em azul representam as vias modeladas e as indústrias estão representadas pelos pontos vermelhos.

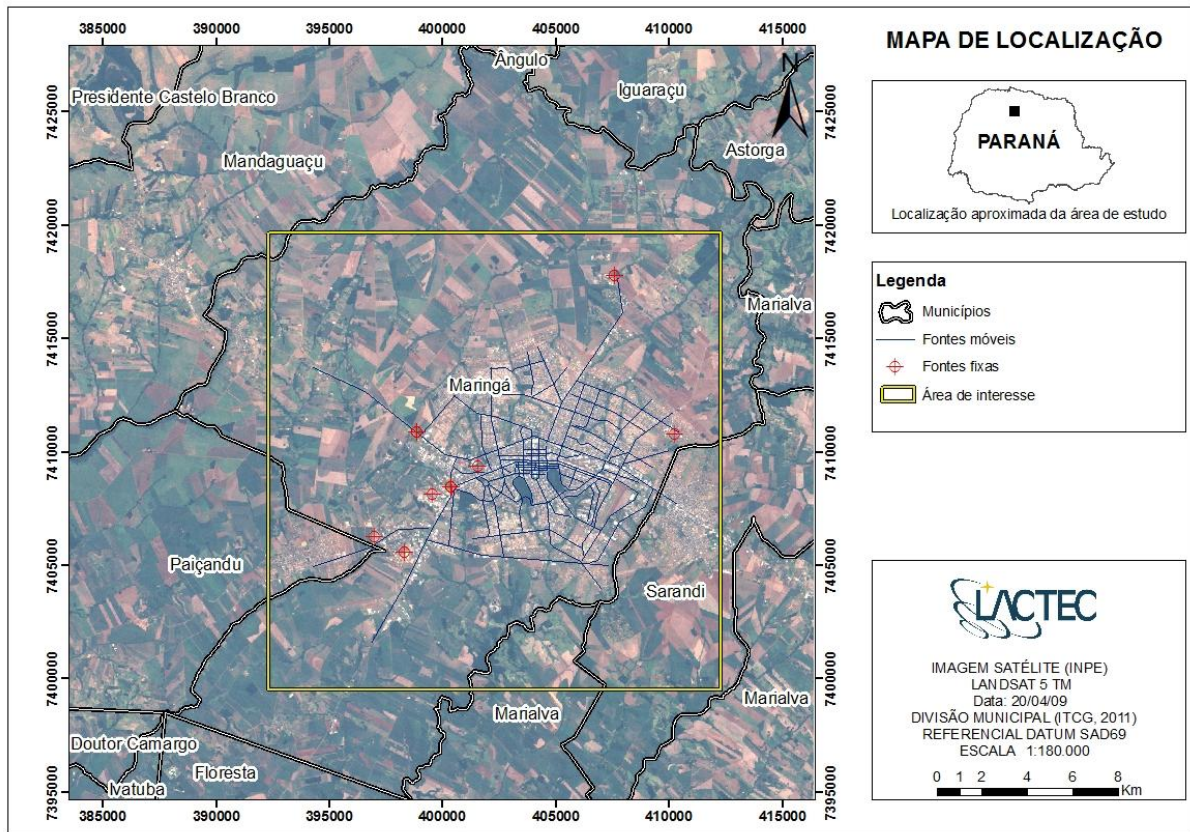


Figura 16 – Localização das fontes fixas e móveis
 Fonte: ITCG (2011)

4.5 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO

A escolha dos locais para instalação de estações do monitoramento da qualidade do ar em Maringá foi feita segundo a classificação das estações em comercial, residencial, urbana de fundo e industrial. Assim, foi sugerido um local para cada categoria de estação.

A primeira etapa da seleção de locais para o monitoramento consistiu em uma pré-seleção a partir da modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos no município.

A área pré-selecionada passou então por uma avaliação mais criteriosa, a qual contemplou o levantamento das seguintes informações sobre bairros inseridos na região definida pela modelagem:

- a) Zoneamento Urbano para verificação do uso do solo;
- b) Adensamento populacional: a concentração de pessoas é um fator importante para seleção de local, visto que um maior número de pessoas pode ser afetado pela poluição atmosférica;

- c) Verificar se os bairros estão situados na direção do vento em relação às fontes de emissão;
- d) Verificação da distribuição dos equipamentos urbanos (escolas, colégios, postos de saúde, etc.) os quais são capazes de fornecer espaço, segurança e acessibilidade.

Analisado esses critérios, foram sugeridos alguns pontos, os quais deverão, para fins práticos, ser posteriormente vistoriados por uma equipe técnica para verificar a questão da acessibilidade, segurança, infraestrutura de energia elétrica e telefonia, bem como se as medições poderão sofrer interferência de edificações ou outros fatores que possam tornar o local tecnicamente impróprio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada ponto receptor da malha considerada, como já explicado no item 4.4, foram calculadas concentrações horárias a partir da série de dados meteorológicos inserida no modelo, totalizando 43.800 valores de concentração em cada receptor.

A partir dos 43.800 valores de concentração calculados em cada receptor, o modelo gera duas plumas, uma que representa a concentração máxima em cada ponto e outra que apresenta a concentração média (em cada ponto).

As plumas geradas pela modelagem foram sobrepostas ao mapa de zonas do município de Maringá, para melhor visualização das áreas impactadas.

Para os poluentes SO_2 e MPT a modelagem foi feita de modo a se obter uma média de 24 horas para a pluma das concentrações máximas, pois esse é o tempo de amostragem legislado pela Resolução CONAMA n° 03 de 28/06/90 para esses poluentes.

Os valores máximos das concentrações fornecidas pelas simulações foram comparados com os padrões de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA n° 03 de 28/06/90, a título de avaliar a qualidade do ar do município de Maringá. As concentrações de NO_x foram comparadas com os padrões de NO_2 .

5.1 SIMULAÇÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados das concentrações máximas horárias de CO e as concentrações médias do período modelado, respectivamente.

Conforme se observa nas Figuras 17 e 18, as maiores concentrações estão localizadas no centro do município, devido a considerável emissão veicular nessa localidade. Contudo, nota-se que outras áreas não são afetadas pela elevada emissão dessa região, a qual foi acima de $7.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para as máximas horárias e entre 400 e $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média do período.

Próximo às indústrias também ocorreram picos de concentração, porém de menor magnitude, uma vez que a emissão industrial de CO é menor que a veicular. As concentrações máximas horárias ocorridas devido a emissão industrial ficaram entre 5.000 e $6.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e as concentrações médias entre 200 e $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A pluma apresenta uma dispersão uniforme sobre o município, não se observando tendência de seu deslocamento na direção predominante do vento, o que pode ser justificado devido a emissão veicular. A baixa altura de lançamento por fontes veiculares, associada a

presença de obstáculos (construções), sobretudo no centro da cidade, dificulta o transporte da pluma pelo vento.

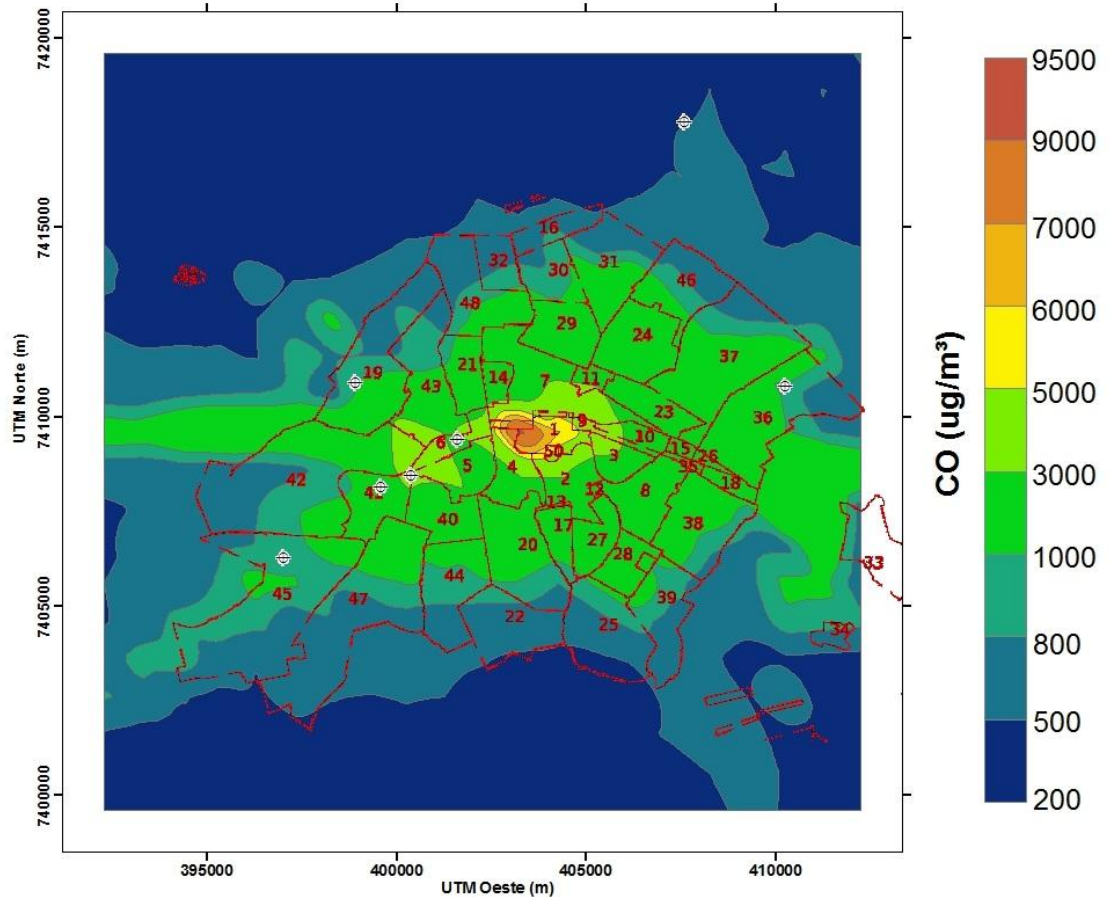


Figura 17 – Pluma das concentrações máximas horárias de CO para o período modelado (2006 a 2010).

Para a média horária concentração máxima de CO foi de 9336,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo dos padrões primários e secundários da qualidade do ar da Resolução CONAMA 03/90, que é de 40.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambos.

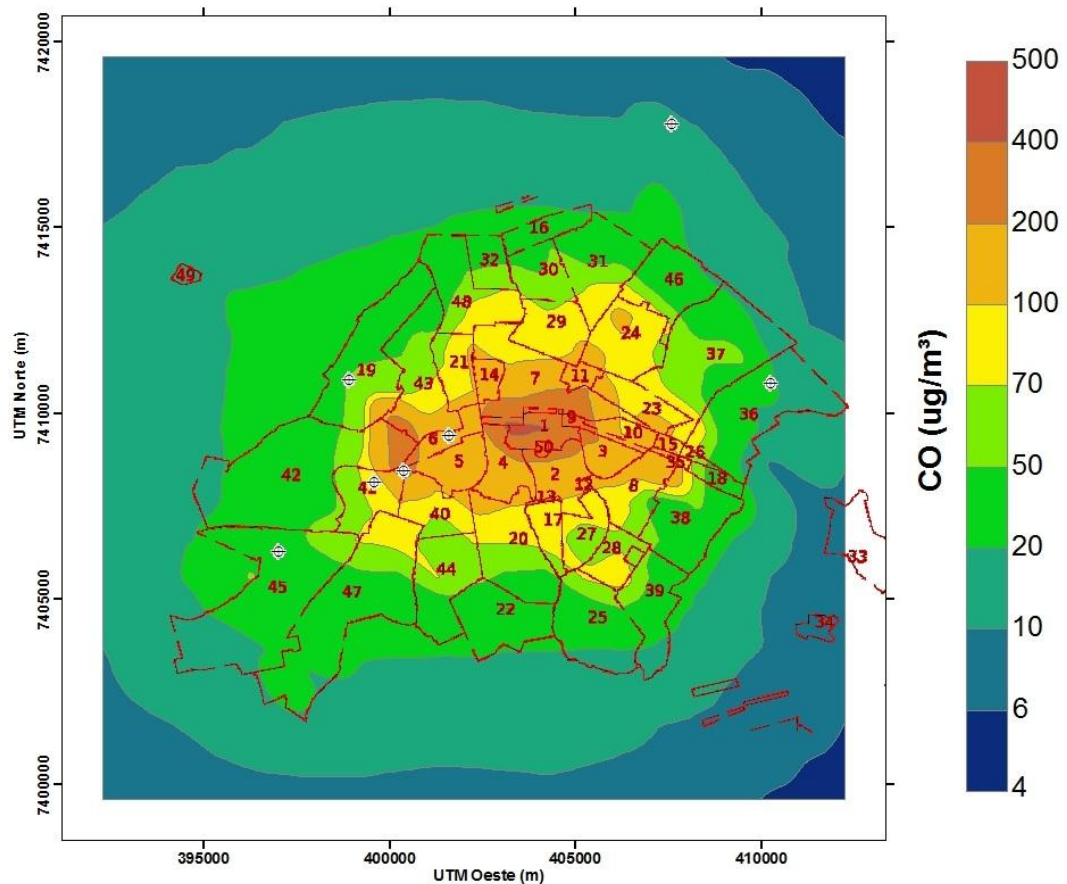


Figura 18 – Pluma das concentrações médias de CO para o período modelado (2006 a 2010).

A concentração máxima para o período modelado foi de $459,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo dos padrões primários e secundários da Resolução CONAMA 03/90, cujo valor é de $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambos.

5.2 SIMULAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO TOTAL

As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados das concentrações máximas diárias de MPT e as concentrações médias do período modelado, respectivamente.

Observa-se a partir das Figuras 19 e 20 que as concentrações mais elevadas ocorreram próximas às indústrias devido a maior emissão industrial em relação a veicular. As concentrações máximas diárias ficaram entre 50 e $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e as médias entre 10 e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na zona central onde não há indústrias e a contribuição é veicular, as concentrações máximas diárias ficaram entre 10 e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e as médias do período modelado entre 3 e $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nota-se o deslocamento da pluma na direção sudoeste, acompanhando a tendência do vento.

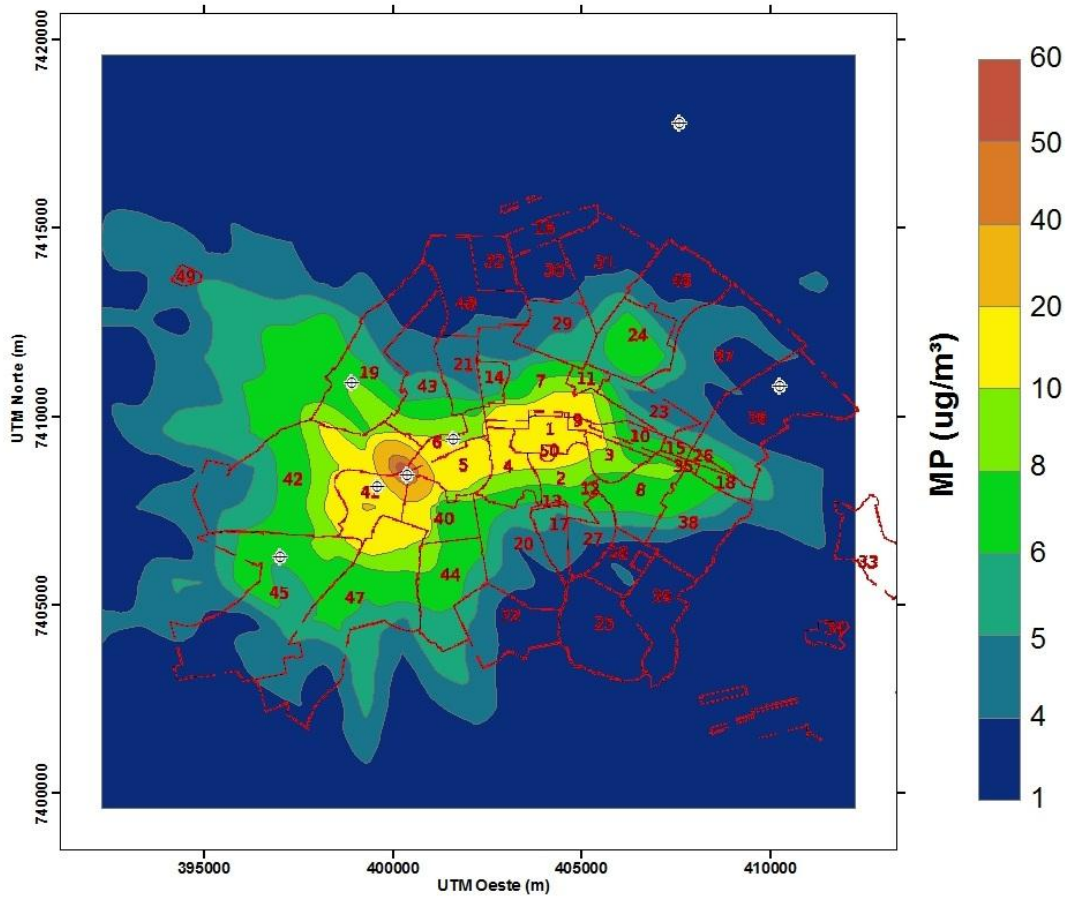


Figura 19 – Pluma das concentrações máximas diárias de MPT para o período modelado (2006 a 2010).

Para a média diária, a concentração máxima de MPT foi de $58,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo do padrão primário e secundário da qualidade do ar da Resolução CONAMA 003/90, que é de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

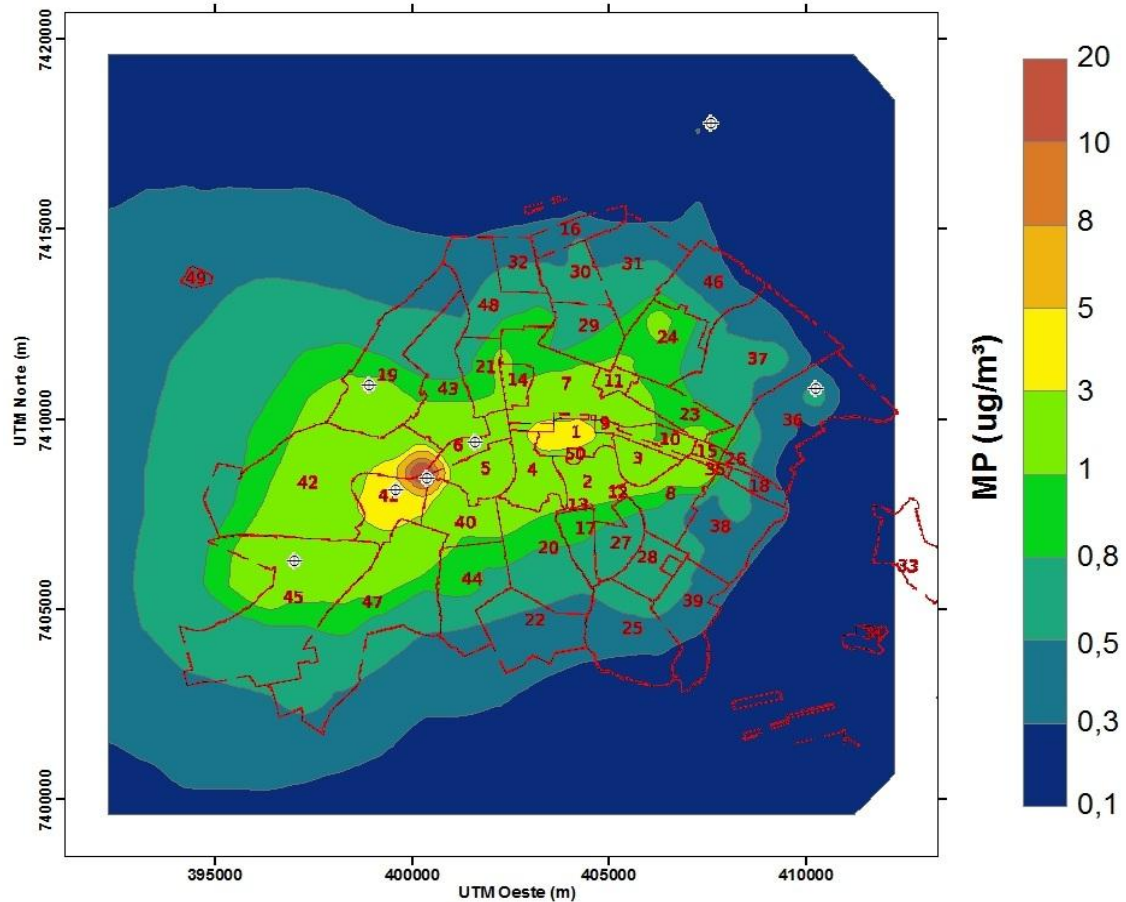


Figura 20 – Pluma das concentrações médias de MPT para o período modelado (2006 a 2010).

A concentração máxima para o período modelado foi de $14,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo dos padrões primários e secundários da Resolução CONAMA 03/90, cujos valores são de 80 e $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Além das industriais e veiculares, há várias outras fontes de emissão de material particulado que não foram contempladas na modelagem, tal como ressuspensão e formação secundária, pois o modelo não possui ferramentas para inseri-las. Isso pode justificar as baixas concentrações obtidas para esse poluente através das simulações.

5.3 SIMULAÇÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE

As Figuras 21 e 22 apresentam os resultados das concentrações máximas diárias de SO_2 e as concentrações médias do período modelado, respectivamente.

Observa-se que as maiores concentrações estão localizadas próximas às indústrias, estando as máximas diárias entre 70 e $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e as médias do período entre 10 e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No centro e a nordeste do município também se verificam picos de concentração devido a emissão veicular nessa região. As concentrações máximas diárias ficaram entre 30 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e as médias do período entre 5 e 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A pluma apresenta uma dispersão uniforme sobre o município, não se observando uma tendência de seu deslocamento na direção predominante do vento.

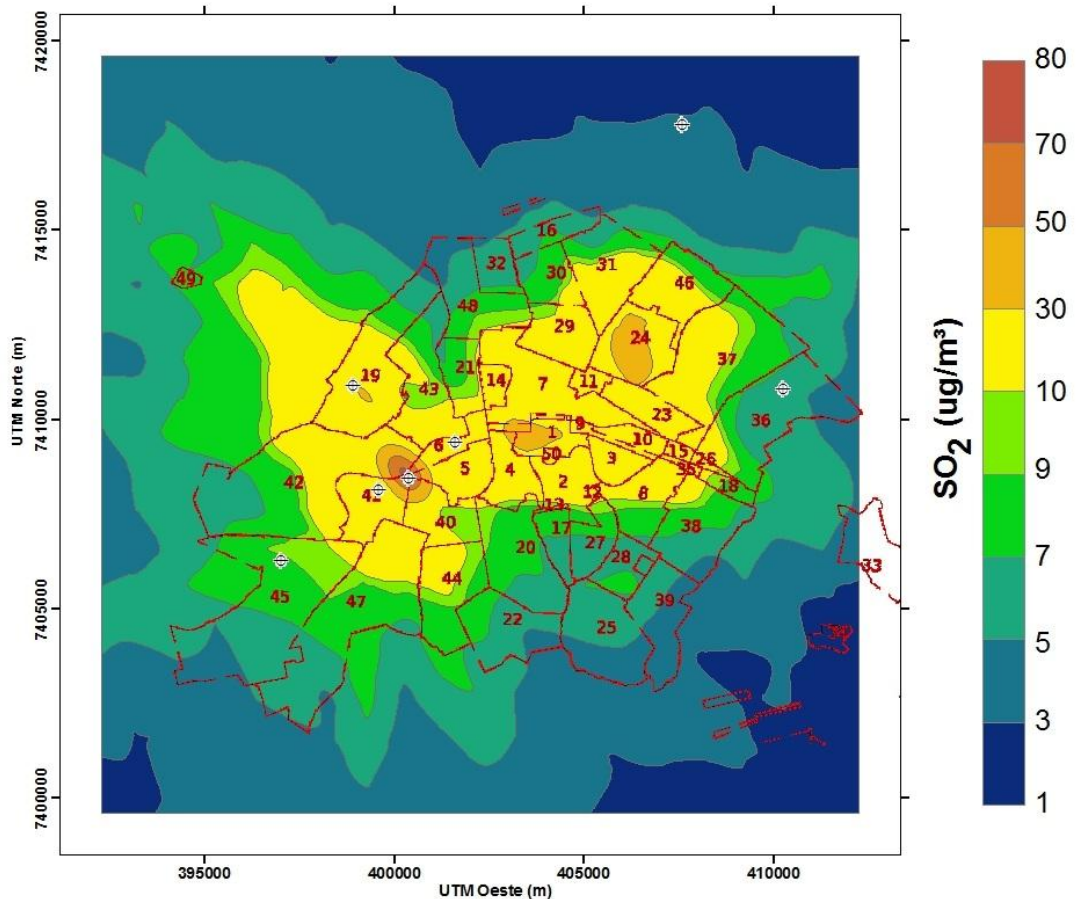


Figura 21 – Pluma das concentrações máximas diárias de SO_2 para o período modelado (2006 a 2010).

Para a média diária, a concentração máxima de SO_2 foi de 77,82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo dos padrões primários e secundários da Resolução CONAMA 03/90, cujos valores para SO_2 são de 365 e 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

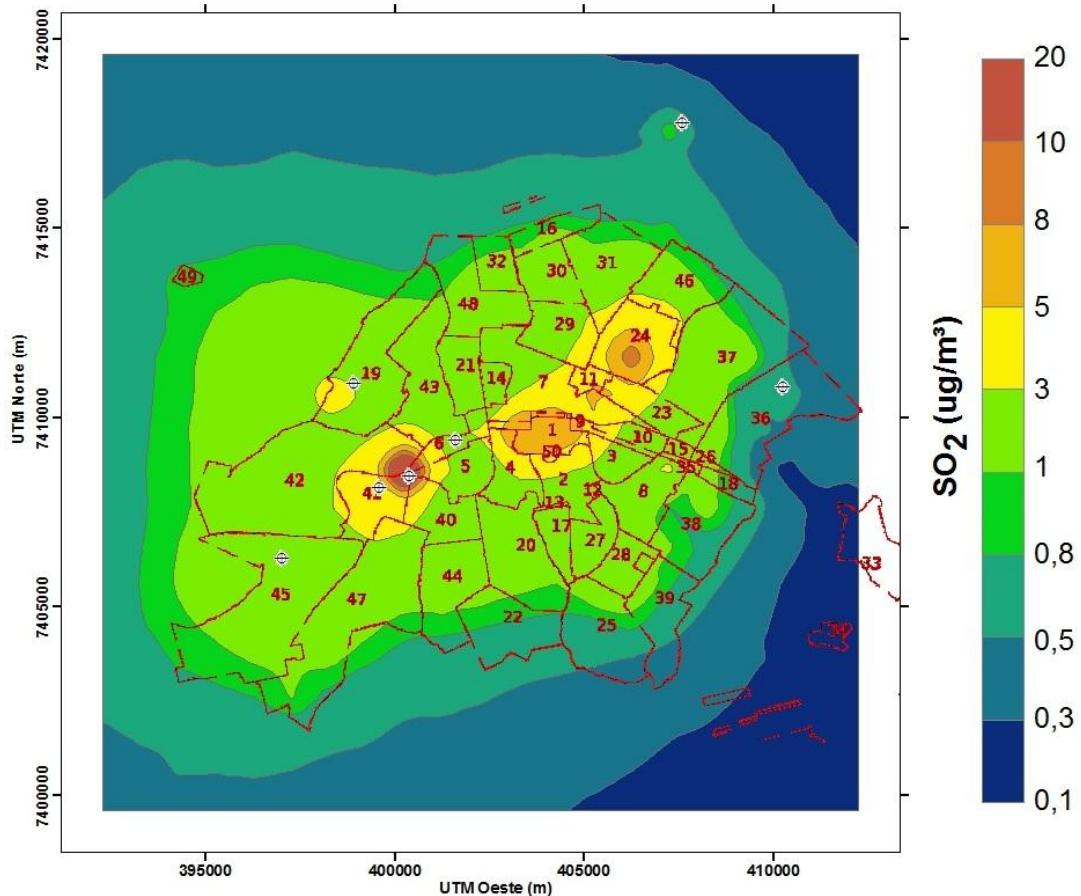


Figura 22 – Pluma das concentrações médias de SO₂ para o período modelado (2006 a 2010).

A concentração máxima para o período modelado foi de 18,04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, estando abaixo dos padrões primários e secundários da Resolução CONAMA 03/90, cujos valores para SO₂ são de 80 e 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

5.4 SIMULAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

As Figuras 23 e 24 apresentam os resultados das concentrações máximas horárias de NO_x e as concentrações médias do período modelado, respectivamente.

A partir das plumas observa-se que concentrações mais elevadas estão presentes no entorno das indústrias e em uma grande área do centro do município, região na qual o tráfego é mais intenso.

Próximo às indústrias, as concentrações máximas horárias foram entre 400 e 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e na zona central, devido a emissão veicular, as concentrações máximas ficaram entre 400 e 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

As concentrações médias do período modelado ficaram entre 20 e 30 para emissão veicular e entre 10 e 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a industrial. Assim, a partir da pluma e dos valores de concentração, nota-se uma contribuição equivalente entre as emissões industriais e veiculares de NO_x uma vez essas duas fontes apresentam uma taxa de emissão total bem próxima para esse poluente.

A pluma apresenta uma dispersão uniforme sobre o município, não se observando uma tendência de seu deslocamento na direção predominante do vento.

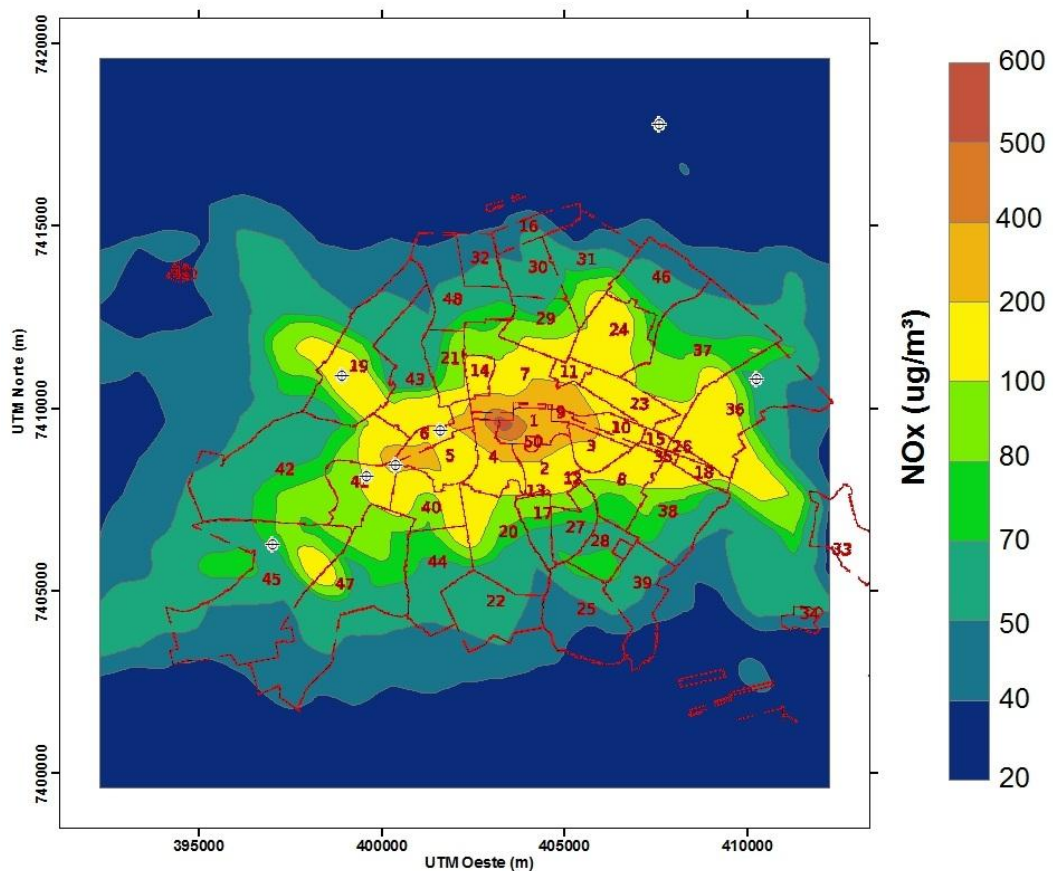


Figura 23 – Pluma das concentrações máximas horárias de NO_x para o período modelado (2006 a 2010).

Para a média horária, a concentração máxima de NO_x foi de $572,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando acima dos padrões primários e secundários da Resolução CONAMA 003/90 para NO_2 , cujos valores são de 320 e $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Tal fato justifica-se devido a comparação de NO_x com NO_2 . A taxa de emissão inserida no modelo matemático é de NO_x , pois não se dispunha de taxa de emissão para dióxido de nitrogênio e o modelo não considera as reações que ocorrem com esses poluentes. Apenas uma parcela do total emitido de NO_x é NO_2 , então comparando o NO_x com NO_2 é esperado que fique acima do limite.

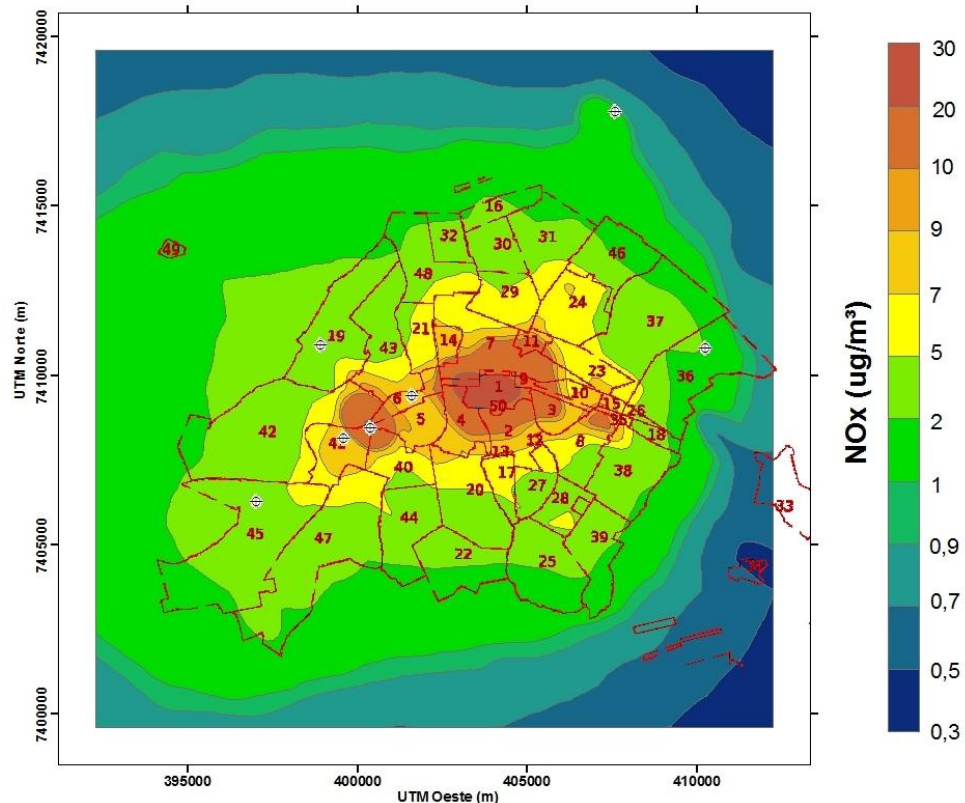


Figura 24 – Pluma das concentrações médias de NO_x para o período modelado (2006 à 2010).

A concentração máxima de NO_x para o período modelado foi de $28,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 003/90, cujo valor é de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual de NO_2 . Embora os NO_x sejam principalmente a soma de NO (monóxido de nitrogênio) com NO_2 , faz-se a comparação com o NO_2 , uma vez que não há limite legislado para os óxidos de nitrogênio.

5.5 SIMULAÇÕES DE HIDROCARBONETOS TOTAIS

As Figuras 25 e 26 apresentam os resultados das concentrações máximas horárias de HCT e as concentrações médias do período modelado, respectivamente.

Uma vez que não se dispõe de dados de emissão industrial para HCT, foi considerada na modelagem apenas a emissão veicular desse poluente. Por tal motivo as maiores concentrações estão localizadas no centro do município.

A pluma apresenta uma dispersão uniforme sobre o município, não se observando uma tendência de seu deslocamento na direção predominante do vento, o que pode ser justificado devido a emissão veicular. A baixa altura de lançamento por fontes veiculares, associada a

presença de obstáculos (construções), sobretudo no centro da cidade, dificulta o transporte da pluma pelo vento.

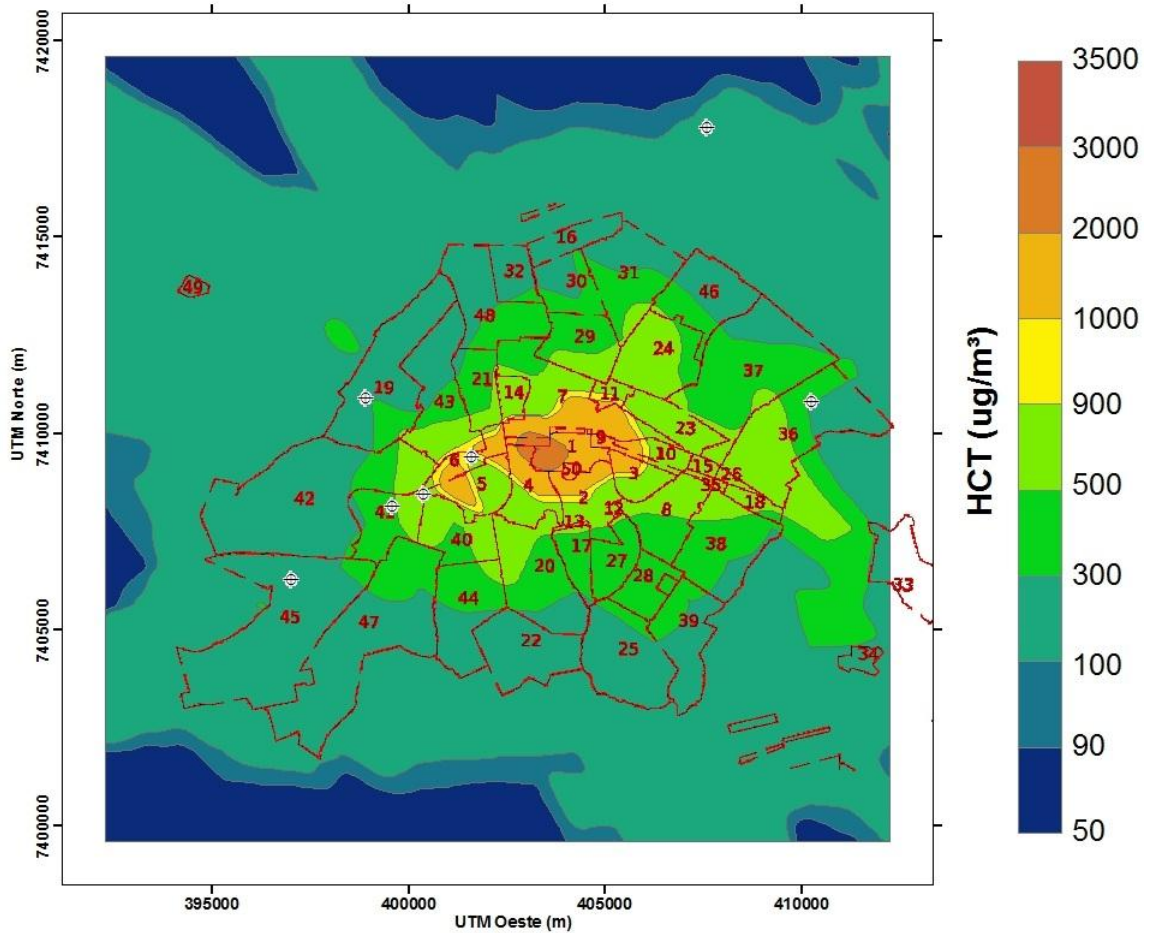


Figura 25 – Pluma das concentrações máximas horárias de HCT para o período modelado (2006 a 2010).

A concentração máxima de HCT para a média horária foi de $3058,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$

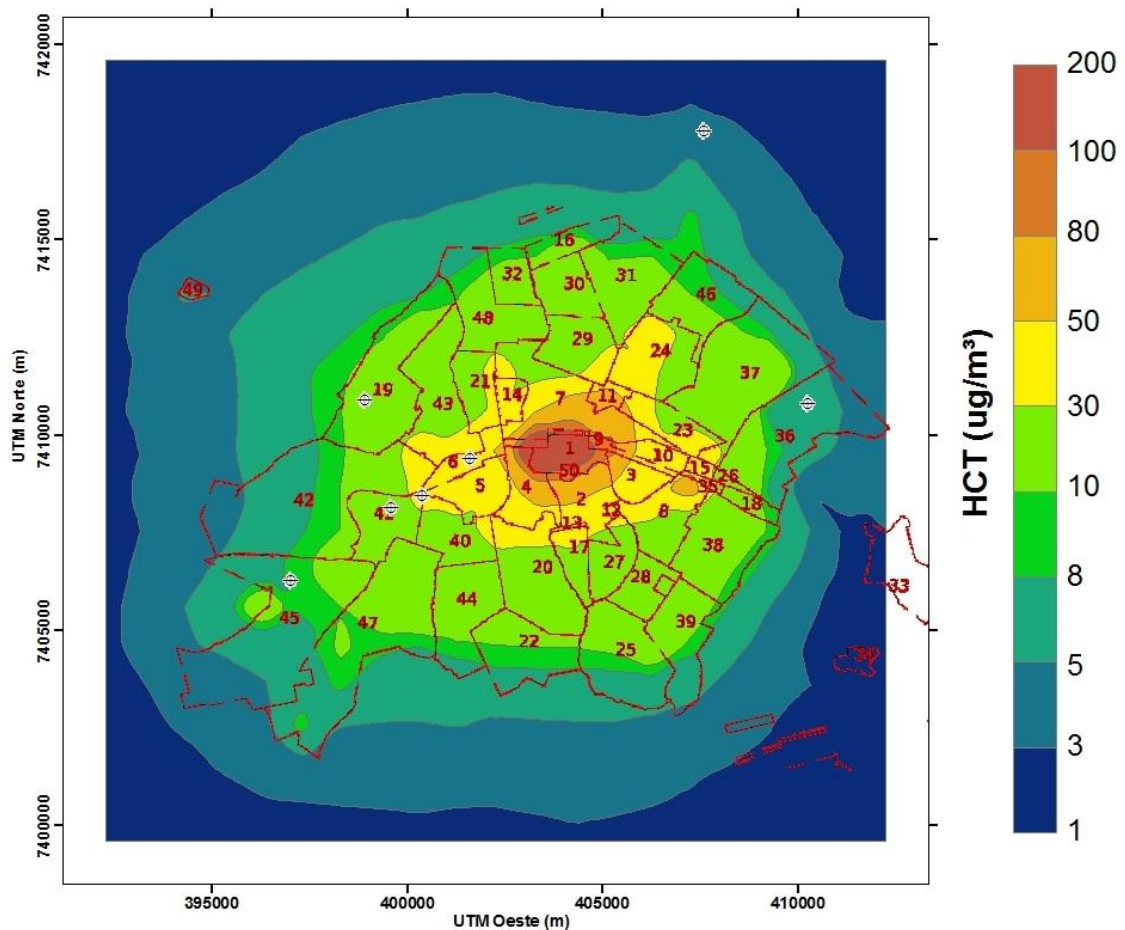


Figura 26 – Pluma das concentrações médias de HCT para o período modelado (2006 à 2010).

A concentração máxima de HCT para o período modelado foi de $157,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que equivale aproximadamente a 0,24 ppm.

Considerando que o gás metano (CH_4) compõe os HCT e que sua concentração média global na atmosfera é de 1,72 ppm segundo IPCC (2007), o valor de 0,24 ppm de HCT, devido às emissões antrópicas, representa um acréscimo pouco significativo à concentração ambiente.

Uma vez que os HCT não é legislado, não há como compará-lo com nenhuma legislação, no entanto é necessário seu monitoramento e modelagem, pois ele é precursor na formação de poluentes secundários.

5.6 SELEÇÃO DAS ÁREAS A PARTIR DOS RESULTADOS DA MODELAGEM

A modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Maringá deu suporte à escolha dos locais para o monitoramento, pois a partir dos resultados

obtidos foi possível concluir quais zonas são mais adequadas a cada classificação de estação de monitoramento da qualidade do ar.

A Figura 27 mostra as regiões onde as simulações forneceram as concentrações mais elevadas.

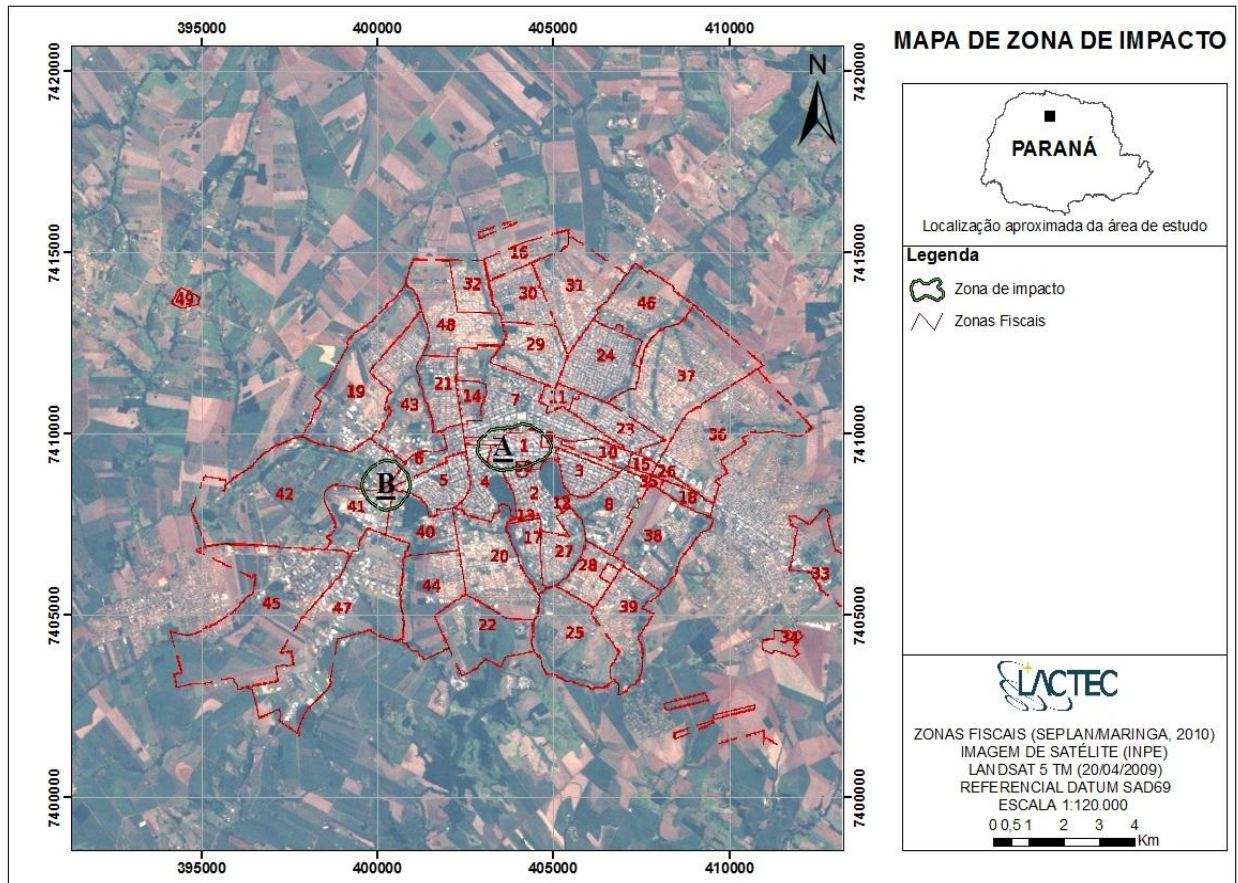


Figura 27 – Áreas mais impactadas pela poluição atmosférica, obtida pela modelagem.
Fonte: SEPLAN Maringá (2010)

Observa-se que as áreas mais atingidas estão na parte central do município – Área A – devido a intensa circulação de veículos, e próximas às indústrias – Área B – como esperado.

Verifica-se pela Figura 27 que a única zona que possui quase totalidade de seu território inserido nas áreas mais impactadas é a zona 1.

5.6.1 Detalhamento das áreas indicadas e escolha do local

O local da instalação da estação de monitoramento da qualidade do ar depende primeiramente do objetivo do monitoramento o qual está relacionado à classificação da estação.

A etapa seguinte à modelagem consistiu na avaliação mais criteriosa das áreas indicadas pelas simulações.

As áreas atingidas por maiores concentrações, segundo as simulações, abrangeram 9 zonas do município de Maringá, cujas informações são apresentadas na tabela 5.

TABELA 5 – Informações das zonas inseridas nas regiões mais impactadas indicadas pela modelagem

| ÁREA A | | | | |
|----------------|---|----------------------|---|---|
| Zonas | População^b (nº de habitantes) | População (%) | Zoneamento | Equipamentos^c urbanos |
| Zona 1 | 10.946 | 3,13 | Zona central | 13 |
| Zona 50 | --- | --- | Zona central | -- |
| Zona 7 | 28.447 | 8,13 | Zona Residencial I | 18 |
| Zona 4 | 4.839 | 1,38 | Zona Residencial II | 8 |
| ÁREA B | | | | |
| Zona 5 | 5.967 | 1,71 | Residencial II | 7 |
| Zona 6 | 3.858 | 1,10 | Zona central | 5 |
| Zona 40 | 1.724 | 0,49 | Zona de qualificação | 4 |
| Zona 41 | 157 | 0,04 | Zona industrial I | NA |
| Zona 42 | 1.386 | 0,40 | Zona industrial I e Zona de ocupação imediata | 4 |
| MARINGÁ | 349.860 | 100 | --- | |

* a Fonte: Prefeitura de Maringá

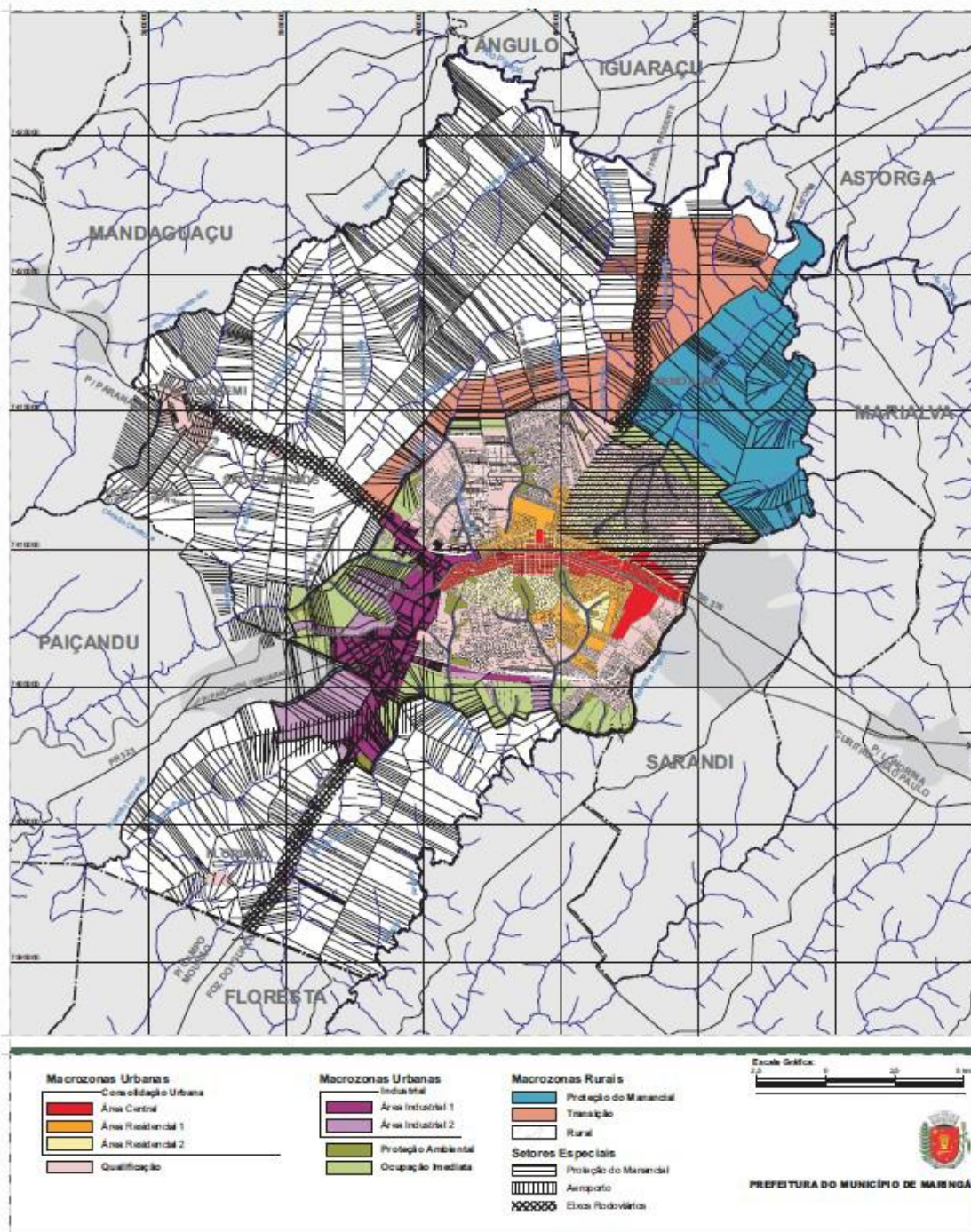
* b Fonte: IBGE (2010)

* NA – não apresenta

Não foram encontradas informações para todas as zonas avaliadas, por isso a presença de campos em branco na tabela.

A título de elucidação do exposto a seguir, se faz necessária a apresentação do mapa de zoneamento urbano de Maringá, representado pela Figuras 28.

ANEXO II - ALTERADO PELA LC 799/2010



PLANO DIRETOR DE MARINGÁ

ANEXO VI

(ALTERA O ANEXO II - MAPA 01 - MACROZONEAMENTO DA LEI N° 632/06)

Figura 28 – Zooneamento urbano de Maringá

a) Estação industrial

As indústrias estão localizadas na região sudoeste do município e a direção predominante do vento é nordeste, ou seja, flui de nordeste para sudoeste, assim, a poluição industrial tende a ser transportada para fora do município, não causando grande impacto nas zonas residenciais, pois elas estão na direção oposta a qual o vento sopra predominantemente.

Dentre as zonas inseridas nas regiões indicadas pela modelagem, as Zonas 41 e uma parte da 42 são destinadas para uso industrial, conforme Zoneamento Urbano do município de Maringá e, portanto, apresentam pouca ocupação urbana. A zona 41 apresenta apenas 157 habitantes e a 42 possui 1.386.

A zonas 45 e uma parte da 47 também são de uso industrial e, portanto, concentrações elevadas de poluentes podem atingi-las. A população é 728 e 5.977 habitantes para as zonas 45 e 47 respectivamente.

A zona 41 não apresenta equipamentos urbanos, as zonas 45 e 42 apresentam 4 cada uma e a 47 possui 10.

Para o monitoramento das emissões industriais, a zona 45 seria a mais indicada, pois por estar localizada ao sul da área destinada ao uso industrial, recebe influência das indústrias localizadas ao norte, devido a direção na qual o vento flui. Essa zona, no entanto, possui apenas 728 habitantes.

Desse modo sugere-se a zona 47 para instalação da estação industrial pelas seguintes razões:

- Possui maior número de habitantes;
- Possui 10 equipamentos urbanos, ou seja, 10 pontos capazes de fornecer a infraestrutura necessária para acomodar as instalações;
- Nessa zona têm-se além da industrial, zonas de ocupação imediata e de qualificação a qual é caracterizada pela alta taxa de crescimento populacional, conforme plano diretor;
- Tende a receber influência das emissões industriais das zonas 41, 42 e 45.

Nessa região devem ser monitorados no mínimo os seguintes poluentes: NO_x, PM₁₀, (material particulado inalável), SO₂ e O₃.

É importante medir também os parâmetros meteorológicos, para identificar a direção da qual a poluição se dirige e correlacionar com os dados químicos, assim, deve-se medir no mínimo umidade relativa do ar, temperatura, direção e velocidade do vento, radiação global.

b) Estação comercial

A zona 1 está inserida na zona central a qual, segundo o Plano Diretor, é caracterizada pela diversidade de uso, áreas destinadas a comércio e serviços especializados e atacadistas e também pela ocupação urbana intensiva. Essa região possui 10.946 habitantes, sendo a segunda mais populosa entre as zonas selecionadas.

A zona 6 e a porção nordeste da zona 4 também pertencem a zona central, apresentando uma população de 3.858 e 4.839 habitantes, respectivamente.

A zona 1 dispõe de 20 equipamentos urbanos. As zonas 4 e 6 possuem 8 e 5 equipamentos urbanos, respectivamente.

Para instalação de uma estação comercial a zona 1 é a mais indicada pelos seguintes fatores:

- Trata-se de uma área central e comercial, com grande circulação de pessoas e veículos;
- Possui grande população residente;
- Foi a área não industrial onde as simulações forneceram as maiores concentrações;
- Possui 20 equipamentos urbanos.

Nessa região devem ser monitorados no mínimo os seguintes poluentes: CO, NO_x, PM₁₀, HCT, O₃ e, os parâmetros meteorológicos: umidade relativa do ar, temperatura, direção e velocidade do vento.

c) Estação Urbana (concentração de fundo)

A estação urbana deve representar a qualidade do ar em áreas urbanas não próximas à fontes específicas, mas que receba influência indireta de fontes de emissão afastadas dessa região.

Pelas plumas observa-se que, de modo geral, a dispersão de poluentes é bastante uniforme no município, apresentado concentrações mais elevadas no centro, as quais diminuem homogeneamente a partir dessa região. Desse modo, várias zonas relativamente próximas da zona central podem representar as concentrações de fundo.

As zonas 4 e 7 tiveram uma pequena área inserida na região de maior concentração indicada pela modelagem, dada a proximidade com a zona central. Isso indica as zonas que fazem divisa com a zona central estão sujeitas às influências das emissões dessa zona.

Assim, sugere-se para instalação de uma estação urbana, a zona 27, que está relativamente próxima à zona 1 (ao sul) , mas não faz divisa com ela. Essa zona possui 8.862 habitantes e 6 equipamentos urbanos.

Nessa região devem ser monitorados no mínimo os seguintes poluentes: CO, NO_x, MPT, PM₁₀, HCT, SO₂, O₃ e, os parâmetros meteorológicos: umidade relativa do ar, temperatura, direção e velocidade do vento.

d) Estação residencial

Essas estações monitoram bairros residenciais e áreas suburbanas das cidades, representando um “ar limpo” devido a ausência de fontes de emissão significativas,

bem como devido a distância dessa região em relação à fontes impactantes. Assim, para monitoramento residencial indica-se a zona 37, localizada a nordeste do município, distante da zona central e industrial. Essa zona é a de maior extensão territorial, possui uma população de 32.687 habitantes e conta com 18 equipamentos urbanos.

Nessa região devem ser monitorados no mínimo os seguintes poluentes: CO, NO_x, MPT, PM₁₀, (material particulado inalável), SO₂, O₃ e, os parâmetros meteorológicos: umidade relativa do ar, temperatura, direção e velocidade do vento.

6 CONCLUSÃO

O comportamento da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Maringá se mostrou bastante homogêneo em toda área modelada, apresentando maiores concentrações próximas às indústrias e no centro da cidade, mais especificamente na zona 1.

A poluição industrial tende a ser transportada para fora do município devido a direção predominante do vento, que flui de nordeste para sudoeste. Tal comportamento foi evidenciado pelas plumas geradas na simulação do material particulado, uma vez que a taxa industrial desse poluente é consideravelmente maior que a veicular.

As concentrações obtidas a partir das simulações dos poluentes CO, MPT e SO₂ não excederam os limites horários e anuais fixados pela Resolução CONAMA 03/90, tanto para o padrão primário quanto para o secundário.

Devido a ausência de limite de concentração para os NO_x, os resultados obtidos para esse poluente foram comparados com o padrão de NO₂, o qual foi excedido para a média horária. Isso, porém, não implica em má qualidade do ar para esse parâmetro, uma vez que os NO_x são a soma de NO e NO₂.

A modelagem se apresentou como uma ferramenta útil na escolha de locais para instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar, pois os resultados por ela gerados permitiram identificar áreas com características adequadas à instalação de cada classe de estação. Assim, a zona 1 foi sugerida para instalação de estação comercial, pois além dessa área possuir intensa atividade comercial, ocupação urbana e tráfego veicular, apresentou maiores concentrações de poluentes.

Para instalação de uma estação urbana para avaliação da concentração de fundo, foi sugerida a zona 27, por não estar próxima à fontes industriais e tráfego intenso, mas sofrer impacto indireto de suas emissões, conforme mostrado pela modelagem, que apresentou uma distribuição uniforme da concentração de poluentes nessa região e ligeiramente menor que as concentrações da zona central.

Para instalação de uma estação residencial e industrial foram sugeridas as zonas 37 e 47 respectivamente, dada as características populacionais e distribuição de equipamentos urbanos, associados aos resultados da modelagem.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBON, Amarildo. **Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com o uso do modelo AERMOD**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Positivo, Curitiba, 2008.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA 3/1990. Brasília. 1990. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html> >. Acesso em 10 abr. 2012.
- CANÇADO, José E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **J Bras Pneumologia**, v 32, p 6 – 11. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/jbpneu/v32s1/a02v32s1.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2012.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2008**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em 17 jul. 2012.
- CIMORELLI, Alan J. et al. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization. **Journal of applied meteorology**, v 44, p 682 – 693, mai. 2005. Disponível em: < <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAM2227.1> >. Acesso em 01 jul. 2012.
- CUNHA, Rosa M. P da. **Transporte de poluentes na região do pólo petroquímico de Triunfo – RS**. 155 f. Tese (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **AERMOD description of model formulation**. EPA-454/R-03-004. 2004.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Quality Assurance Handbook for air pollution measurement systems Vol II: Ambient air quality monitoring program. December, 2008. Disponível em: <www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/.../QA-Handbook-Vol-II.pdf>. Acesso em 15 abr. 2012.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET)**. EPA-454/B-03-002. 2004b.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Users guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP)**. EPA-454/B-03-003. 2004d.
- FILHO, Galvão J. B. Poluição do Ar. In: MARGULIS, S. *Meio Ambiente: aspectos técnicos e econômicos*. Brasília: IPEA, 1996. Disponível em: <www.consultoriaambiental.com.br>. Acesso em: 26 fev. 2012.
- FRONDIZI, Carlos A. **Monitoramento da qualidade do ar: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.feam.br/monitoramento/qualidade-do-ar>>. Acesso em 16 mar. 2012.

GODISH, Thad. **Air Quality**. 4 ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2003.

HOLMES, Nicholas; MORAWSKA, Lidia. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. **Atmospheric Environment**. v. 40, p. 5902 – 5928, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006006339>>. Acesso em 12 ago. 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resultados divulgados no Diário Oficial da União - 04/11/10**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 6 abr. 2012.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Indicadores da qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=59>>. Acesso em 16 mar. 2012.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Relatório da qualidade do ar na região metropolitana de Curitiba ano de 2009**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=639>>. Acesso 21 jul. 2012.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DO DISTRITO FEDERAL – Brasília Ambiental (IBRAM). **Principais Poluentes Atmosféricos**. 2010. Disponível em: <www.sedhab.df.gov.br/sites/300/379/00002594.pdf>. Acesso em: 26 de fev. 2012.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Qualidade do ar**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/fma/qualidade-ar.asp#poluentes>>. Acesso em 17 mar. 2012

IPARDES – Instituto Paranaense e Desenvolvimento Econômico e Social. **Perfil do município de Maringá**. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?Municipio=87000>. Acesso em 30 abr. 2012.

JACOB, Daniel J. **Introduction to atmospheric chemistry**.

KAWANO, Mauricy; LISBOA, Henrique M. Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos. In: **VI Semana de Estudos da Engenharia Ambiental**, 2008, Irati.

KUNDU, Soumita. Dispersion modeling of oxides of nitrogen, sulfur dioxide and PM_{2.5} in the province of nova Scotia, Canada. 2011. 264 f. Tese (Mestrado em Ciências Aplicadas), Universidade Dalhousie. Halifax, 2011. Disponível em: <<http://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/14309>>. Acesso em 28 abr. 2012.

LYRA, Diógenes G. P de. **Modelo Integrado da Gestão da Qualidade do Ar da Região Metropolitana de Salvador**. 2008. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MACHADO, Helena S.; OLIVEIRA, Júlio C. D. de.; MENEGUETTI, Karin S. Potencial poluidor de atividades industriais: Estudo de caso – Maringá – PR. In: VII Encontro Nacional de Produção Científica, 2011, Maringá. Disponível em: <www.cesumar.br/prppge/pesquisa/.../heloisa_helena_s_machado.pdf>. Acesso em 26 mar. 2012.

MARINGÁ. Prefeitura Municipal. Lei Complementar nº 632. Cria o Plano Diretor de Maringá. Maringá, 2006. Disponível em: <http://www2.maringa.pr.gov.br/site/images/plano_diretor.pdf>. Acesso em 20 fev. 2013.

MAYER, Helmut. Air pollution in cities. **Atmospheric Environment**, v 33, p. 4029-4037, out. 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099001442>>. Acesso em 13 abr. 2012.

MOREIRA, Davidson; TIRABASSI, Tiziano. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: Um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente e Sociedade**, v 7, n. 2, dez. 2004. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/asoc/v7n2/24693.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2012.

MORENO, Ruben G. M. et al. Lesões em DNA induzidas pela oxidação de S (IV) na presença de íons metálicos de transição. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 5, out. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422006000500032&script=sci_arttext>. Acesso em 27 fev. 2012.

NATH, Sunita.; PATIL, R. A simple model to determine in situ mixing height growth from surface measurements. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 3, p. 195-219, 2003.

NEW ZEALAND MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT. **A typical plume from an elevated point source**. June, 2004. Disponível em: <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/atmospheric-dispersion-modelling_jun04/html/figure2-2.html>. Acesso em 12 ago. 2012.

OLIVEIRA, Michele P. de B de. et al. Uso do aermod na estimação da concentração de monóxido de carbono, proveniente de veículos leves, na região central de Maringá. 2011. Disponível em: <www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/.../2011/504_AC.pdf>. Acesso em 29 abr. 2012.

PAES, Juliana L. et al. Consideração sobre poluição do ar em grandes metrópoles. **Ponto de vista**, v 5, p. 67-81, 2009. Disponível em: <<http://www.coluni.ufv.br/revista/docs/volume05/consideracoesPoluicao.pdf>>. Acesso em 15 mar. 2012.

PIRES, Dilson O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do rio de janeiro**. 2005. 194 f. Tese (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) – Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

SALA, Marta G. **Indicadores de fragilidade ambiental na bacia do ribeirão Maringá – PR**. 2005. 164 f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005. Disponível em: <www.pge.uem.br/novo/teses/pdf/mgsala.pdf>. Acesso em 07 abr. 2012.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO PARANÁ (SEMA) Resolução Sema 054, de dezembro de 2006: define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado de forma ambientalmente segura, e dá outras providências. 2006.

PREFEITURA DE MARINGÁ – **Portal da Setran (Secretaria de trânsito)**. Disponível em: <http://www2.maringa.pr.gov.br/site/images/mapa_hierarquia.jpg> Acesso em 23 nov. 2012.

SEIBERT, Petra et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. **Atmospheric Environment**, v 34, p. 1001 – 1027, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099003490>>. Acesso em 02 jul. 2012.

SILVA, Tamyris B.; NETO, Aurélio A. B. **Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos na região metropolitana da grande Vitória**. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, 2009. Disponível em <<http://www.cefetes.br>>. Acesso em 29 ago. de 2009.

SOCOLOFSKY, Socott A.; JIRKA Gehard H. **Special topics in mixing and transport process in the environment**. 5 ed. Texas: Texas A&M University.

SOUZA, Rodrigo A. F. de. Monitoramento de monóxido de carbono (CO) na atmosfera a partir de informações do sistema de sondagem AQUA: perfis verticais de CO. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis: INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007 p. 4289-4291. Disponível em: <<http://bibdigital.sid.inpe.br/rep-/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.01.20.41>>. Acesso em: 04 abr. 2012.

STENFELD, John H; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

STULL, **An introduction to boundary layer meteorology**. 7 ed. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1988.

VALLERO, Daniel. **Fundamentals air pollution**. 4 ed. California: Elsevier Inc, 2008.

VIEIRA, Neise, R. **Poluição do ar**. Rio de Janeiro: E-papers, 2009.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: An introductory survey**. 2. ed. Washington: Elsevier, 2006.

WHO (World Health Organization). **Guidelines for air quality**. Geneva, 1999. Disponível em:<www.who.int>. Acesso em 15 mar. de 2012.

WHO (World Health Organization). **Guidelines for air quality**. Geneva, 2000. Disponível em:<http://www.rshh.saglik.gov.tr/hki/pdf/Guidelines_for_Air_Quality.pdf>. Acesso em 20 fev. de 2013.

