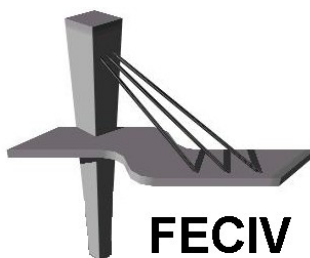


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 037

**Análise da Qualidade do Ar com base no fluxo
de Veículos e variáveis climáticas:
o caso da cidade de
Uberlândia - MG**

MARCELO GONÇALVES DA SILVA



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



MARCELO GONÇALVES DA SILVA

**Análise da Qualidade do Ar com base no fluxo de
Veículos e variáveis climáticas:
o caso da cidade de
Uberlândia - MG**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria

Uberlândia, 21 de Setembro de 2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- S586a Silva, Marcelo Gonçalves da, 1982-
Análise da qualidade do ar com base no fluxo de veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia / Marcelo Gonçalves da Silva. - 2007. 107 f. : il.
- Orientador: Carlos Alberto Faria.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Inclui bibliografia.
1. Ar - Qualidade - Uberlândia (MG) - Teses. I. Faria, Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 504:064



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 037/2007

CANDIDATO: Marcelo Gonçalves da Silva

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria

TÍTULO: "Análise da qualidade do ar com base no fluxo de veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia - MG"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Operação de Transportes

DATA DA DEFESA: 21 de setembro de 2007

LOCAL: Sala de Apoio da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 08:30 - 10:30

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

OBS: alguns esclarecimentos no sentido de justificar alguns gráficos apresentados no texto bem como comentários de figuras de linhas pontas que podem ter mais clareza nas interpretações. Poder a fornecer geral do texto conforme pedido do PPGEC.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria – FECIV – UFU

Membro externo: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo – FEQUI - UFU

Membro externo: Prof.ª Dr.ª Suely da Penha Sanches – UFScar - SP

Uberlândia, 21 de setembro de 2007.

À Maria e José, meus pais...

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de avançar mais um pequeno degrau em minha vida com saúde e discernimento.

Aos meus pais, Maria Aparecida e José Luiz, pela confiança e compreensão. Ao Leonardo e ao Júnior, pela fraternidade confortante. À Sônia, minha “Linda”, pelo incentivo e carinho.

Ao Aristóteles Teobaldo, Thiago Marra, Cristiane Salgado, Hélio Carlos, Silvio Barbosa e Rodrigo Felix pelo companheirismo desde os tempos de graduação.

Ao Elcio, Ricardo Drummond, Ricardo, Helaine, Camila, César e Leonardo pelos momentos de aprendizado mútuo vividos nas aulas da pós.

Ao Frederico Rodrigues, Hugo e Euclides, pela paciência e disposição em ajudar nos momentos mais complicados.

Ao Fernando, Haroldo (Mossoró), Evandro, Mateus Pagliarini, Luis Henrique, Guara e Sr. Enéas, pelo interesse e empenho em ajudar.

À Sueli, pela presteza, competência e bom senso nos momentos “burocráticos”.

Aos professores Marcos Barrozo e Douglas pelas idéias e sugestões.

Ao meu orientador, Carlos Alberto Faria, pela confiança e envolvimento no decorrer dessa jornada.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Química, Instituto de Geografia e especialmente à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolos

$d_{(f)}$ – grau de liberdade

Ln – Logaritmo Neperiano

R^2 – Coeficiente de determinação

$S_{y(E)}$ – Erro padrão de estimativa

$T_{(b)}$ – Valor do teste t-Student para as contantes “bi”

μ - micron

Abreviaturas

MP – Partículas Inaláveis

PTS – Partículas Totais em Suspensão

Tep – Toneladas Estimadas de Petróleo

Siglas

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente (MG)

CETESB – Companhia Estadual de Saneamento do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Estimativa de emissão e contribuição relativa das fontes de Poluição RMSP	10
Tabela 3.2	Componentes básicos de um motor de combustão interna	11
Tabela 4.1	Padrões Primários e Secundários para PTS e MP ₁₀	25
Tabela 4.2	Parâmetros conforme Resolução CONAMA 03/90	26
Tabela 5.1	Instrumentos que compõem um AGV e suas respectivas funções	28
Tabela 6.1	Constituição da Frota de veículos. Uberlândia, 2002-06	35
Tabela 6.2	Combustível consumido pela frota de veículos de Uberlândia (2001)	36
Tabela 6.3	Concentrações mínimas, máximas e médias de PTS por estação climática	41
Tabela 6.4	Concentrações mínimas, máximas e médias de MP ₁₀ por estação climática	41
Tabela 6.5	Proporção do consumo de etanol e gasolina – Brasil	50
Tabela 7.1	Matriz de correlação linear entre as variáveis testadas – (PTS 2004)	62
Tabela 7.2	Ln(PTS _{verão}): parâmetros do Teste t-student para o modelo	63
Tabela 7.3	Ln(PTS _{outono}): parâmetros do Teste t-student	65
Tabela 7.4	Ln(PTS _{primavera}): parâmetros do Teste t-student	66
Tabela 7.5	Ln(PTS _{inverno}): parâmetros do Teste t-student	67
Tabela 7.6	Ln(PTS _{chuvoso}): parâmetros do Teste t-student	69
Tabela 7.7	Ln(PTS _{seco}): parâmetros do Teste t-student	70
Tabela 7.8	(MP _{10verão}) parâmetros do Teste t-student	72
Tabela 7.9	Matriz de correlação linear entre as variáveis testadas – (MP ₁₀ 2004)	73
Tabela 7.10	(MP _{10outono}): parâmetros do Teste t-student	74
Tabela 7.11	(MP _{10inverno}): parâmetros do Teste t-student	76
Tabela 7.12	(MP _{10primavera}): parâmetros do Teste t-student	77
Tabela 7.13	(MP _{10chuvoso}) parâmetros do Teste t-student	79
Tabela 7.14	(MP _{10seco}) parâmetros do Teste t-student	80
Tabela 7.15	Ln(PTS _{chuvoso(b)}) parâmetros do Teste t-student	83
Tabela 7.16	Ln(PTS _{seco(b)}) parâmetros do Teste t-student	84
Tabela 7.17	MP _{10 chuvoso(b)} parâmetros do Teste t-student	85
Tabela 7.18	MP _{10 seco(b)} parâmetros do Teste t-student	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Corte de um motor de ciclo Otto.....	12
Figura 3.2	Esquema ilustrativo de um cilindro básico de um motor de ciclo Otto	14
Figura 3.3	Motor de ciclo Diesel	15
Figura 3.4	Proporção do consumo de combustíveis no Brasil – 2005	17
Figura 3.5	Petróleo: percentual médio de derivados a cada metro cúbico.....	20
Figura 3.6	Evolução do Consumo de Combustíveis pelo Setor de Transportes	22
Figura 5.1	Estação Climatológica – IGUFU (localização)	30
Figura 5.2	Ambiente de trabalho do Microsoft Office Excell 2003	33
Figura 6.1	Cruzamento Avenidas João Pinheiro e João Naves de Ávila	37
Figura 6.2	Amostradores de grandes volumes	37
Figura 6.3	Configuração geomorfológica da região do município de Uberlândia	38
Figura 6.4	Amostradores de Grandes Volumes (AG.V) – Localização	40
Figura 6.5	Concentrações diárias de PTS (05/01/2004 a 29/12/2004)	43
Figura 6.6	Concentrações diárias de PTS (05/01/2004 a 29/12/2004)	44
Figura 6.7	Localização dos detectores eletrônicos de fluxo de veículos	45
Figura 6.8	Fluxo de Veículos por mês – Avenida João Pinheiro (2004)	46
Figura 6.9	Fluxo de veículos por dia da semana – Av João Pinheiro (2004)	47
Figura 6.10	Fluxos máximos e mínimos Avenida João Pinheiro	47
Figura 6.11	Fluxo diário de veículos (11/09/2003)	48
Figura 6.12	Fluxo de veículos por tipo de motor – Av João Pinheiro (04/01/2007)	49
Figura 6.13	Fluxo de veículos por tipo de combustível	50
Figura 6.14	Umidade Relativa do Ar: médias mensais (Uberlândia, 2004)	52
Figura 6.15	Temperatura do ar - médias mensais (Uberlândia, 2004)	53
Figura 6.16	Intensidade média dos ventos (Uberlândia, 2004)	54
Figura 6.17	Direção dos ventos no período da manhã: ocorrências em 2004	55
Figura 6.18	Direção dos ventos no período da tarde: ocorrências em 2004	55
Figura 6.19	Direção dos ventos no período da noite: ocorrências em 2004	56
Figura 6.20	Precipitação média mensal (Uberlândia, 2004)	57

Figura 6.21	MP ₁₀ : Concentrações Médias Mensais (2001 a 2005) – RMSP	59
Figura 7.1	Ln(PTSverão) previstas e observadas pelo modelo	64
Figura 7.2	Ln(PTSoutono) previstas e observadas pelo model	65
Figura 7.3	(Ln(PTSoutono) previstas e observadas pelo modelo	66
Figura 7.4	Ln(PTSinverno) previstas e observadas pelo modelo	68
Figura 7.5	Ln(PTSchuvoso) previstas e observadas pelo modelo	69
Figura 7.6	Ln(PTSseco) previstas e observadas pelo modelo	70
Figura 7.7	(MP ₁₀ verão) previstas e observadas pelo modelo	72
Figura 7.8	(MP ₁₀ outono) previstas e observadas pelo modelo	75
Figura 7.9	(MP ₁₀ inverno) previstas e observadas pelo modelo	76
Figura 7.10	(MP ₁₀ primavera) previstas e observadas pelo modelo	78
Figura 7.11	(MP ₁₀ chuvoso previstas e observadas pelo modelo	79
Figura 7.12	(MP ₁₀ seco) previstas e observadas pelo modelo	80
Figura 7.13	Ln(PTSchuvoso(b)) previstas e observadas pelo modelo	83
Figura 7.14	Ln(PTSseco(b)) previstas e observadas pelo modelo	84
Figura 7.15	MP ₁₀ chuvoso(b) previstas e observadas pelo modelo	85
Figura 7.16	MP ₁₀ seco(b) previstas e observadas pelo modelo	87
Figura 7.17	Relação Fluxo de Veículos x PTS	88
Figura 7.18	Relação Fluxo de Veículos x MP ₁₀	89

SUMÁRIO

Capítulo 1

Apresentação	01
--------------------	----

Capítulo 2

Introdução	03
2.1 – Justificativa	04
2.2 – Objetivos	05

Capítulo 3

Poluição atmosférica no ambiente urbanizado: caracterização dos elementos de análise ..	08
3.1 - Material Particulado	09
3.2 - Motores de combustão interna	11
3.2.1 - Motores de Ciclo Otto	11
3.2.2 - Motores de Ciclo Diesel	15
3.3 - Os combustíveis, pneus e a qualidade do ar urbano ..	16

Capítulo 4

A qualidade do ar e a Legislação Ambiental brasileira	24
4.1 - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores	26
4.2 - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares	27

Capítulo 5

Metodologia	28
5.1 - Monitoramento da concentração de Poluentes	28
5.2 - Monitoramento do fluxo de veículos e variáveis atmosféricas	29
5.3 - Critérios para elaboração dos modelos	31

Capítulo 6

Caracterização geral das variáveis dos modelos	35
6.1 – Níveis de Concentração de PTS e MP ₁₀	39
6.1.1 – Partículas Totais em Suspensão PTS	40
6.1.2 – Partículas Inaláveis (MP ₁₀)	41
6.2 - Fluxo de veículos automotores	45
6.3 - Condições climáticas e atmosféricas	50
6.3.1 Umidade do ar	51
6.3.2 --Temperatura do Ar	52
6.3.3 – Ventos	53
6.3.4 – Precipitação	56
6.4 - A Dinâmica Atmosférica e a Qualidade do Ar	58

Capítulo 7

Calibração dos modelos de previsão de PTS e MP ₁₀	60
7.1 - Modelos gerados	60

7.1.2 - Particulados Totais (PTS)	61
7.1.3 - Partículas Inaláveis (MP ₁₀)	71
7.2 - Análise dos modelos	81
7.2.1 – PTS	82
7.2.2 - MP ₁₀	84
7.3 – Aplicação dos modelos	87

Capítulo 8

Considerações Finais	90
----------------------------	----

Referências Bibliográficas	95
----------------------------------	----

Anexos

Silva, M.G. Análise da qualidade do ar com base no fluxo de veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia - MG, 100 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

RESUMO

O monitoramento da qualidade do ar é um fator de extrema relevância para a garantia de um ambiente saudável às populações urbanas, visto que é comum a existência de grandes concentrações de fontes estacionárias e móveis de poluentes atmosféricos nas cidades de médio e grande porte. Este trabalho tem por objetivo discutir os principais fatores que determinam a qualidade do ar na cidade de Uberlândia – MG, apresentando modelos de previsão dos níveis de concentração de particulados totais e partículas inaláveis, gerados à partir do método da regressão linear múltipla. As variáveis selecionadas para a elaboração dos modelos foram: concentrações de poluentes (variável dependente), fluxo de veículos, umidade relativa do ar, temperatura do ar e intensidade dos ventos, tomando-se como base os dados diários referentes ao ano de 2004. Foram elaborados modelos para cada estação climática (verão, outono, inverno e primavera) e para cada período do regime pluviométrico da região (período chuvoso e seco). Os critérios apresentados para validação de cada um dos modelos foram o coeficiente de determinação, o erro padrão de estimativa e o teste T Student.

Palavras-chave: qualidade do ar - fluxo de veículos - particulados totais - modelos de predição.

Silva, M.G. Analysis of the air quality based on the flow of the vehicles and climatic variables: The case of the city of Uberlândia (MG), 100 p.p., Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2007.

ABSTRACT

The air quality is a factor of extreme relevance for a healthful urban environment, since it is common the existence of great concentrations of stationary and mobile sources of atmospheric pollutants in the medium and great cities. The objective this work is to argue the main factors that determine the air quality in the city of Uberlândia - MG, showing models for the prediction of the levels of concentration of Total Suspended Particles (TSP) and Particles with aerodynamic diameter smaller than 10 μm (PM_{10}), generated from the method of the multiple linear regression. The variable selected for the elaboration of the models were: concentrations of pollutants, flow of vehicles, relative humidity of air, temperature of air and intensity of the winds, being overcome as base the referring daily data to the year of 2004. Models for each climatic station (summer, autumn, winter and spring) and for each period of the haste regimen of the region were elaborated (rainy and dry period).

Keywords: air quality - flow of vehicles – particles matter - models to predict

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

Efeito estufa; aquecimento global. Estes têm sido temas bastante divulgados e comentados pelos canais de comunicação nacionais e internacionais nos últimos anos. Líderes políticos de todo o mundo têm se reunido regularmente para discutir esses fenômenos e parecem, enfim, assumir a relevância do assunto. Anunciado de forma alarmista e catastrófica por pesquisadores de várias nações já há algumas décadas, as consequências do uso indiscriminado de recursos ganharam nova versão, visibilidade e importância a partir do relatório divulgado pela Organização das Nações Unidas - ONU em 2007.

Essa comoção se deve, em grande parte, às contundentes amostras que vem sendo observadas em vários pontos do planeta do que as mudanças climáticas podem representar para o planeta em termos de sustentabilidade ambiental, política e econômica. A redução drástica da oferta de água potável e as perdas substanciais na agricultura são apontadas como consequências prováveis caso a evolução desse quadro não seja contida; dificuldades como essas podem fomentar uma série de outras desgraças, capazes de lançar bases para o comprometimento da qualidade de vida das populações, na maior parte do planeta.

E cada vez mais temas como “poluição atmosférica” e “qualidade do ar” ganham espaço nos centros acadêmicos e políticos. Nesse contexto, esforços deverão ser pensados no sentido de se criar mecanismos de reversão do quadro crítico de degradação atmosférica que o sistema produtivo vem desenhando nas últimas décadas. É consenso que medidas corretivas e preventivas deverão ser aprimoradas e difundidas de forma mais eficiente e eficaz. Inovações tecnológicas, re-educação das sociedades e esforços políticos entre nações formam a base para o êxito de qualquer tentativa de superação desse desafio.

Nesse cenário, instrumentos de gestão da qualidade do ar e controle da emissão de poluentes atmosféricos tornam-se bastante relevantes. Emitidos por fontes móveis ou

estacionárias, esses poluentes comprometem a saúde das populações que atualmente convivem com níveis de qualidade do ar cada vez menos favoráveis, além de representar uma ameaça à garantia de um ambiente saudável às próximas gerações.

Esse trabalho, por sua vez, não tem a ambição de apontar soluções imediatas ou acabadas para a reversão do quadro crítico de degradação ambiental que vem sendo desenhado no mundo desde a consagração da sociedade industrial, há alguns séculos. Nem mesmo indicará sequer uma inovação tecnológica capaz de revolucionar as metodologias de combate à degradação da qualidade do ar nos grandes centros urbanos. Nosso objetivo é bem menos ambicioso. Contudo, não menos importante.

Trata-se, por sua vez, de contribuir para a instalação de um debate na busca pela sensibilização dos gestores e pesquisadores de uma cidade de porte médio, localizada no interior do Estado de Minas Gerais, para a necessidade de se garantir um ambiente minimamente sadio à sua população, num horizonte de médio e longo prazo, antecipando ferramentas de planejamento ambiental que certamente serão necessárias para seus sucessores dentro de algumas décadas, senão anos.

Esse papel terá sido cumprido caso, ao final da exposição das idéias, dados e sugestões contidas nos capítulos seguintes o leitor possa entender a distância que separa nossa sociedade de uma solução para esse problema, bem como dos obstáculos que deverão ser superados em nome do ar puro de cada dia.

CAPÍTULO 2

INTRODUÇÃO

Nem sempre a degradação do ambiente natural pelas sociedades humanas representou de fato uma ameaça ao equilíbrio ambiental, sobretudo em escala global. Somente a partir do processo que se convencionou historicamente como a “revolução moderna dos meios de produção” ou “Revolução Industrial”, que ocorreu a partir do século XVIII na Inglaterra, é que novas formas e contornos foram conferidos aos impactos das atividades humanas sobre o meio natural.

Ao passo em que as “novas” tecnologias de produção eram apontadas como um dos fatores-chave para o desenvolvimento e contínua re-construção dos valores das sociedades modernas, foram também assumidas, paradoxalmente, como as responsáveis pelo aumento significativo da capacidade de alteração do equilíbrio ecológico-natural. Isto se deu, em grande medida, a partir das atividades (re) produzidas pelo modo de ocupação/produção materializados, que acabaram por conferir a essas novas tecnologias um papel ambíguo na relação desenvolvimento sócio-econômico *versus* equilíbrio ecológico.

O que se pretende afirmar é que, a partir da modernização dos meios de produção e da conseqüente ascensão de novos valores sócio-econômicos, a apropriação do meio natural pelas sociedades humanas possibilitou a geração de impactos nunca antes observados na História. Tal processo ainda hoje se perpetua como regra nos mais diversos assentamentos humanos ao redor do planeta, com raríssimas exceções.

Todavia, apesar da tendência à configuração de uma série de fatores que levam à quase irremediável deterioração da qualidade do ambiente natural, as ocupações humanas costumam representar diferentes impactos ao equilíbrio ecológico de cada região. Isso se deve, por um lado, às singularidades dos fatores ecológicos que determinam a configuração do ambiente natural de cada lugar. Nesse sentido destaca-se, por exemplo, o arranjo

geomorfológico regional (topografia e relevo), sua configuração climática, os aspectos geológicos e pedológicos (tipos e características do solo), bem como as características da fauna e flora natural. Assim, de acordo com sua caracterização natural, cada região deve “responder” de uma forma peculiar aos impactos gerados pela ocupação humana aí vivenciada.

Por outro lado, os níveis de degradação dos impactos se devem também a fatores sociais, econômicos, políticos e culturais, que atuam de maneira decisiva nesse processo. São infinitas as suas combinações. Porém, cita-se, como algumas de seus condicionantes, o desenvolvimento social, as formas de apropriação e o estágio do desenvolvimento produtivo, as formas de representação dos interesses das mais variadas esferas do poder, os níveis de desenvolvimento científico e os valores compartilhados em cada sociedade.

Por tais motivos, as particularidades de cada região devem ser exaustivamente consideradas em qualquer análise ambiental, uma vez que dificilmente um mesmo arranjo ecológico e sócio-político deverá se repetir em situações de tempo e espaço distintas, o que deverá se refletir diretamente em seus níveis de qualidade ambiental.

É nesse contexto que se torna relevante a preocupação quanto ao impacto da ocupação humana na constituição dos níveis de qualidade ambiental. Cabe reafirmar que, nesse sentido, o próprio termo “qualidade ambiental” deve ser incumbido de um significado mais amplo, no qual se contempla não só os aspectos naturais do meio, mas também os aspectos sociais, econômicos, culturais e políticos que, direta ou indiretamente, são intimamente relacionados às melhores ou piores condições de desenvolvimento das atividades fisiológicas e produtivas de cada indivíduo ou mesmo dos próprios assentamentos humanos em geral.

2.1 - Justificativa

Regra geral, os esforços voltados ao saneamento ambiental costumam ser centrados na conservação da viabilidade da utilização de determinado recurso. Mais recentemente, nota-se o aumento nas tentativas de se conciliar formas de exploração sustentáveis dos recursos

naturais primários, como a água, o solo, fauna, flora e o ar, que são componentes básicos de qualquer avaliação direcionada à mensuração dos níveis de qualidade ambiental, sobretudo em escalas maiores.

É nesse aspecto que a qualidade do ar assume um papel de fundamental importância na composição final dos padrões de qualidade ambiental, visto seu peso significativo na constituição dos índices de salubridade do ambiente vivenciado pelas populações humanas (ROSEIRO, 2002; SILVA, 2006; CETESB, 2006;). Os níveis de concentração de poluentes denominados material particulado (particulados totais em suspensão (PTS); partículas inaláveis - MP_{10}) tomam relevância nesse contexto, sendo apontado como um dos principais agentes causadores da deterioração da qualidade do ar respirado pela população urbana (CETESB, 2006; CIOQUETA et al, 2004).

Dada a relevância que a qualidade do ar representa para a constituição de um ambiente saudável às populações urbanas, esse trabalho se justifica pela necessidade de se ampliar os instrumentos de gestão da variável “qualidade do ar” no ambiente densamente urbanizado do município de Uberlândia – MG, que vem apresentando níveis de concentração de material particulado superiores àqueles limites indicados pela legislação ambiental pertinente (CIOQUETA et al, 2004).

2.2 - Objetivos

Devido à sua importância fundamental para as populações humanas, busca-se, nesse momento, o estabelecimento de parâmetros que possam contribuir para a gestão sócio-ambiental da qualidade do ar, bem como complementar medidas que visem o estabelecimento de formas mais sustentáveis de ocupação do meio ambiente densamente urbanizado, tais como as cidades de médio e grande porte, tal qual o município de Uberlândia.

No contexto do agravamento do cenário de degradação da qualidade do ar na área central dessa cidade, bem como pelo aumento significativo da participação das fontes móveis nas emissões de poluentes atmosféricos no ambiente urbano, o objetivo geral desse trabalho é

reconhecer a relação existente entre as variáveis do comportamento climático e de tráfego de veículos com os níveis de concentração de material particulado num dado cruzamento na área central da cidade de Uberlândia – MG. Espera-se, dessa forma, que seja possível alcançar uma série de outros objetivos específicos, a saber:

- Discutir a questão da qualidade do ar na perspectiva desse município e oferecer instrumentos necessários à gestão da qualidade do ar no seu ambiente urbano.
- Contribuir para a avaliação da qualidade do ar tomando como referência a concentração de material particulado (particulados totais e partículas inaláveis);
- Disponibilizar uma análise das características do fluxo de veículos em locais de grande concentração de veículos e sua relação com os níveis de concentração de poluentes ;
- Mensurar o grau de correlação das concentrações de material particulado registradas com variáveis climáticas e atmosféricas, fluxo de veículos automotores.
- Elaborar e aplicar os modelos de previsão dos níveis de concentração de particulados totais e partículas inaláveis a partir de parâmetros de natureza ambiental (variáveis climáticas e atmosféricas) e do fluxo de veículos automotores para a área central da cidade de Uberlândia – MG.

Nesse sentido, o trabalho foi estruturado em 5 capítulos, cujos conteúdos são sinteticamente apresentados a seguir:

O capítulo 3 discute o tema central abordado na pesquisa, que é a questão da poluição atmosférica e sua relevância no contexto da qualidade ambiental em áreas urbanas. Assim, são apresentados e caracterizados alguns elementos que nortearam a linha de análise da pesquisa.

No capítulo 4 são apresentados os principais instrumentos jurídicos de regulamentação da qualidade do ar no Brasil, assim como alguns instrumentos de regulação das fontes móveis de emissão de poluentes atmosféricos, especialmente dos materiais particulados. Nesse momento é realizada ainda uma breve apresentação dos padrões de qualidade do ar referentes a essa classe de poluente atmosférico.

O capítulo 5 é reservado à exposição dos instrumentos e materiais utilizados no decorrer do trabalho, assim como a apresentação dos parâmetros empregados na materialização dos objetivos anteriormente elencados.

No capítulo 6 são discutidos alguns parâmetros que subsidiaram as bases teóricas para a elaboração dos modelos. Trata também da sistematização dos dados e apresentação dos cenários típicos relacionados às variáveis selecionadas para a calibração dos modelos de previsão.

O Capítulo 7 mostra os modelos calibrados no decorrer do trabalho, apresentando as informações para análise e disponibilizando os dados imprescindíveis à sua validação estatística. Em seguida, é realizada uma análise de sensibilidade dos modelos indicados.

Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas algumas idéias conclusivas discutidas no decorrer do trabalho, bem como sugestões para futuras ações e estudos a serem desenvolvidos sobre o tema da qualidade do ar na cidade de Uberlândia – MG.

CAPÍTULO 3

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO AMBIENTE URBANIZADO: CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ANÁLISE

O ambiente urbano é entendido, nesse momento, como o produto das transformações operadas pelas sociedades humanas a partir de um cenário natural, tendo como objetivo final a busca pelo atendimento de suas necessidades econômicas, culturais e/ou políticas. Apresenta uma série de características que são resultados de ações intervencionistas, que desencadearam e continuam a desencadear processos que contribuem, direta ou indiretamente, para a alteração do equilíbrio ecológico, seja numa escala local ou regional.

A alteração do uso e ocupação do solo de um cenário natural relativamente estável para um cenário antropizado, constitui-se num fator de extrema relevância na análise das particularidades do ambiente urbano, visto que, aí, os impactos decorrentes da instalação de grandes áreas residenciais e/ou parques industriais é uma característica tipicamente evidenciada.

Em decorrência da configuração espacial desse arranjo e das demandas conseqüentemente criadas, alguns serviços básicos, como a implementação de obras de infra-estrutura sanitária e de transportes, por exemplo, são imprescindíveis para a viabilidade e perpetuação das atividades produtivas e comerciais que operam tradicionalmente no ambiente urbanizado há alguns séculos.

Nesse contexto, onde as forças econômicas e políticas influenciam diretamente na organização de um ambiente propício ao atendimento de suas demandas, é comum constatar o comprometimento de alguns recursos necessários à manutenção de um ambiente saudável às populações humanas. A redução dos níveis de qualidade dos recursos hídricos, a significativa alteração da taxa de arborização, a contaminação do solo por atividades degradantes das mais diversas naturezas e uma gama de outros processos são

reflexos da intensidade com a qual as sociedades humanas atuam no ambiente, geralmente intensificados pela falta de um planejamento adequado de suas operações.

O clima urbano é resultado da forma com a qual o espaço natural é modificado, tendo como origem processos derivados da nova organização espacial instaurada. Particularidades do ambiente urbano, a grande concentração de fontes de emissão de poluentes atmosféricos, seja de fontes estacionárias ou móveis, combinada com a alta taxa de impermeabilização do solo e outros fatores que atuam, por exemplo, na formação das chamadas “ilhas de calor”, acabam por redefinir as características atmosféricas de uma determinada localidade. Isso pode refletir, de maneira significativa, nos níveis de qualidade do ar respirado pelas populações aí instaladas (ROSEIRO, 2002).

Vários são os fatores que podem contribuir para o comprometimento da qualidade do ar respirado pelos cidadãos, bem como causar alterações significativas nas condições de desenvolvimento da fauna e flora aí encontradas. Dentre esses fatores, o tráfego de veículos automotores destaca-se, em conjunto com as atividades industriais, como os principais agentes antrópicos que atuam, direta ou indiretamente, na alteração dos níveis da qualidade do ar oferecido às populações (AMORIM, 2004; CETESB, 2006).

O deslocamento de um veículo por uma via qualquer ocasiona a ressuspensão e liberação de uma série de poluentes para a atmosfera, seja pelo atrito dos pneus com o solo, pelo aquecimento de seus componentes ou mesmo a partir dos gases liberados pelo escapamento dos motores. Dentre os resíduos produzidos, os materiais particulados apresentam-se como um dos mais significativos.

Por outro lado, existe uma série de fatores “não-antrópicos” que podem contribuir de forma direta ou indireta para o agravamento das condições negativas dos níveis da qualidade do ar no ambiente densamente urbanizado. Dentre estes, são destacados, o arranjo geomorfológico da região e suas características climáticas e condições atmosféricas.

3.1 - Material Particulado

Segundo caracterização definida pela CETESB/SP (2006), as PTS (Partículas Totais em Suspensão) correspondem a *partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., com faixa de tamanho < 100 micra*, enquanto que as MP₁₀ (Partículas Inaláveis) apresentam as mesmas características gerais da primeira, porém, com faixa de tamanho < 10 micra. Ainda segundo a CETESB/SP (2006), os efeitos gerais desses poluentes sobre a saúde humana se tornam mais efetivos de acordo com o tamanho das partículas, sendo que, *quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde*.

Em geral, os PTS causam efeitos significativos em pessoas que apresentam histórico de doença pulmonar, asma e bronquite, enquanto que vários estudos comprovam que os MP₁₀ são responsáveis pelo aumento dos atendimentos hospitalares e mortes prematuras naquelas comunidades expostas excessivamente a esse tipo de poluente (MARTINS, 2002).

No contexto da produção de material particulado (PTS e MP₁₀), o tráfego de veículos também é apontado como uma das principais fontes. Segundo estudo da CETESB (2006), os automóveis respondem diretamente por cerca de 40% dos níveis constatados na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, sendo que os veículos a diesel são identificados como os maiores contribuintes individuais, conforme ilustra a Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Estimativa de emissão e contribuição relativa das fontes de Poluição do ar na RMSP em 2005

Fonte de Emissão		Emissão (1000t/ano)	Fator de Emissão (g/km)
Tubo de escapamento de Veículos	Gasolina ¹	5,0	0,08
	Álcool Flex	-	-
	Diesel ²	13,9	0,57
	Motocicletas e Similares	0,8	0,05
Pneus	Todos os Tipos	8,5	0,07
Operação de Processo Industrial		31,6	-
Total		59,7	-

¹ Gasolina C: Gasolina contendo 22% de álcool anidro e 500 ppm de enxofre (massa).

² Diesel: com 1100 ppm de enxofre (massa) até fevereiro e com 350 ppm de enxofre a partir de março de 2005.

3.2 - Motores de combustão interna

A maioria dos motores utilizados na frota de veículos dos mais diversos países, inclusive no Brasil, são classificados como motores de combustão interna, visto que a reação do combustível (energia química) para a geração da energia utilizada para a locomoção dos veículos (energia mecânica) ocorre num compartimento denominado câmara de combustão, localizada no interior dos motores. Os componentes básicos de um motor de combustão interna são apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Componentes básicos de um motor de combustão interna.

Componentes fixos	Componentes móveis	Componentes auxiliares
Bloco Cilindro Cárter Cabeçote	Pistão Biela Girabrequim Volante Válvula Eixo do comando de válvulas.	Velas, coletores de admissão e de escape, motor de arranque, alternador, carburador, bicos injetores, filtros de ar, de óleo e de combustível, bombas de água e de combustível, distribuidor etc.

Fonte: Santos, A.M.

Basicamente, os motores de combustão interna podem ser classificados em dois grandes grupos, determinados a partir do ciclo termodinâmico em que se baseiam:

- motores de ciclo OTTO (ICE);
- motores de ciclo DIESEL (ICO).

3.2.1 - Motores de Ciclo Otto

O primeiro motor baseado nos conceitos do ciclo termodinâmico Otto foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto, em 1876, embora o engenheiro francês Alphonse Beau de Rochas já houvesse idealizado o mesmo ciclo termodinâmico em 1862.

Os motores de ciclo Otto são conhecidos também como motores de ignição por centelha (faísca elétrica originada por bateria ou qualquer outra fonte elétrica). Esta característica é explicada pelo fato de que os combustíveis utilizados para a alimentação desse tipo de

motor, classificados como combustíveis leves, tais como a gasolina, o álcool e o gás natural, se caracterizam por cadeias carbônicas curtas e com fortes ligações entre os átomos das moléculas, o que dificulta a reação de explosão espontânea do combustível utilizado para sua alimentação com o oxigênio. A Figura 3.1 apresenta o corte de um motor ciclo Otto, apresentando seus principais componentes:

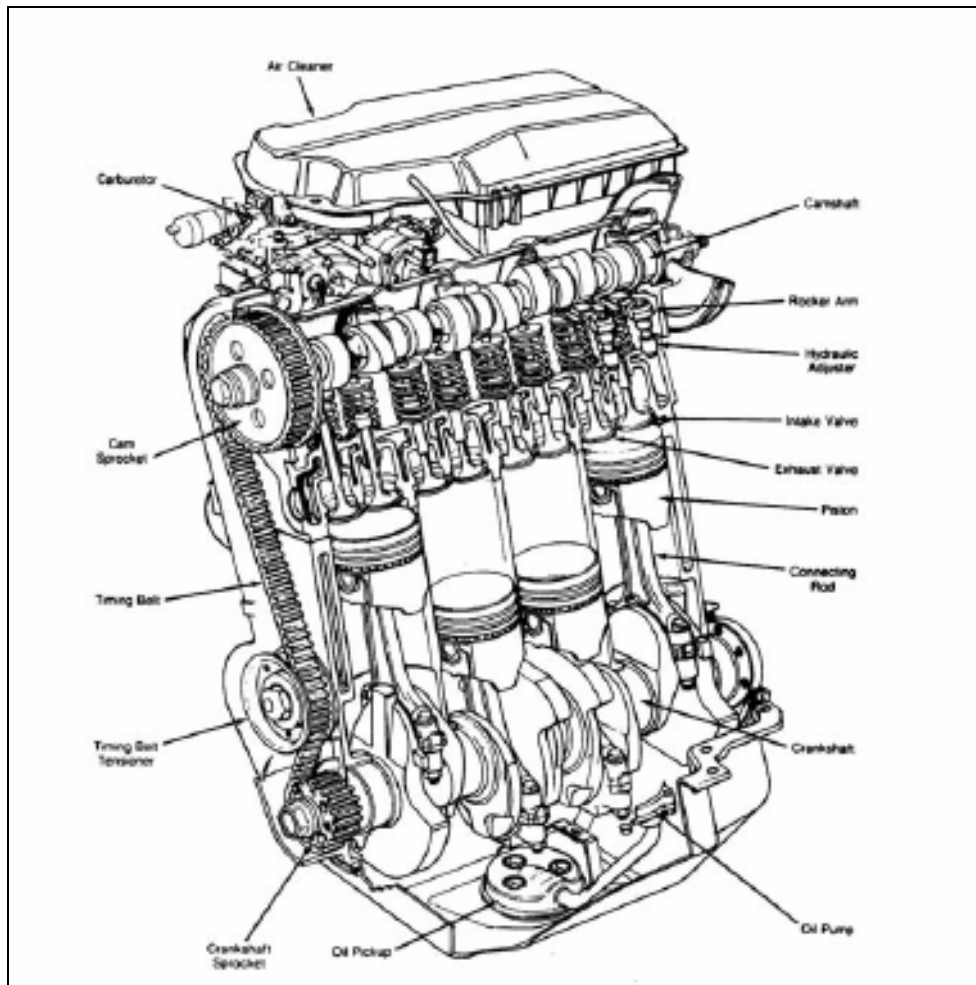


Figura 3.1: Corte de um motor de ciclo Otto.

Fonte: Santos, A.M

Com exceção de algumas motocicletas, que são equipadas com motores de dois tempos, a grande maioria dos veículos com os motores de ciclo Otto apresenta o ciclo de operação realizado em quatro tempos, a saber:

- admissão;
- compressão;

- explosão;
- descarga.

Os motores de ciclo Otto contam basicamente com uma válvula de admissão e outra de escape, bem como um dispositivo gerador de centelha elétrica para ignição, normalmente denominado “vela”.

A partir de um processo aproximadamente isobárico, a válvula de **admissão** é responsável pela aspiração da mistura ar/combustível fornecida por um sistema de alimentação por carburação (modelos mais antigos) ou injeção eletrônica (modelos mais modernos).

Após a maior integração das partículas de combustível/ar ocorrida pelo deslocamento do cilindro do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS) (processo de **compressão**), com as válvulas de admissão e escape fechadas, a mistura recebe a ignição pela atuação de uma centelha disparada por uma vela (**explosão**). Por fim, o tempo da **descarga** corresponde à etapa em que os gases formados pelo processo de combustão da mistura ar/combustível são expelidos pela válvula de escape.

A Figura 3.2 (www.mspc.eng.br) apresenta o processo de operação de um cilindro básico de um motor de ciclo Otto de forma mais detalhada.

Em 01, a válvula de admissão está aberta e o movimento do pistão aspira a mistura de ar e combustível.

Ao atingir a posição mais inferior (ponto morto inferior), a válvula de admissão é fechada e o movimento ascendente comprime a mistura (12). Este processo é aproximadamente adiabático porque a velocidade do pistão é alta, havendo pouco tempo para a troca de calor.

Em 23 o pistão atinge sua posição mais acima (ponto morto superior), quando uma centelha na vela provoca a ignição da mistura. Temos, portanto, um fornecimento de calor pela reação de combustão. Desde que esta é bastante rápida, podemos considerar que o processo ocorre sob volume constante.

O fornecimento de calor eleva a pressão da mistura que se expande forçando o pistão para baixo como em 34 da figura. Pela mesma razão de 12, a transformação pode ser suposta adiabática.

Em 41 o pistão atinge o ponto morto inferior, quando a válvula de escape é aberta, reduzindo rapidamente a pressão do gás. De forma similar a 23, podemos supor um processo sob volume constante, durante o qual o ciclo cede calor ao ambiente.

Em 10 o movimento ascendente com a válvula de escape aberta remove a maior parte dos gases da combustão e o ciclo é reiniciado quando o pistão chega ao ponto morto superior

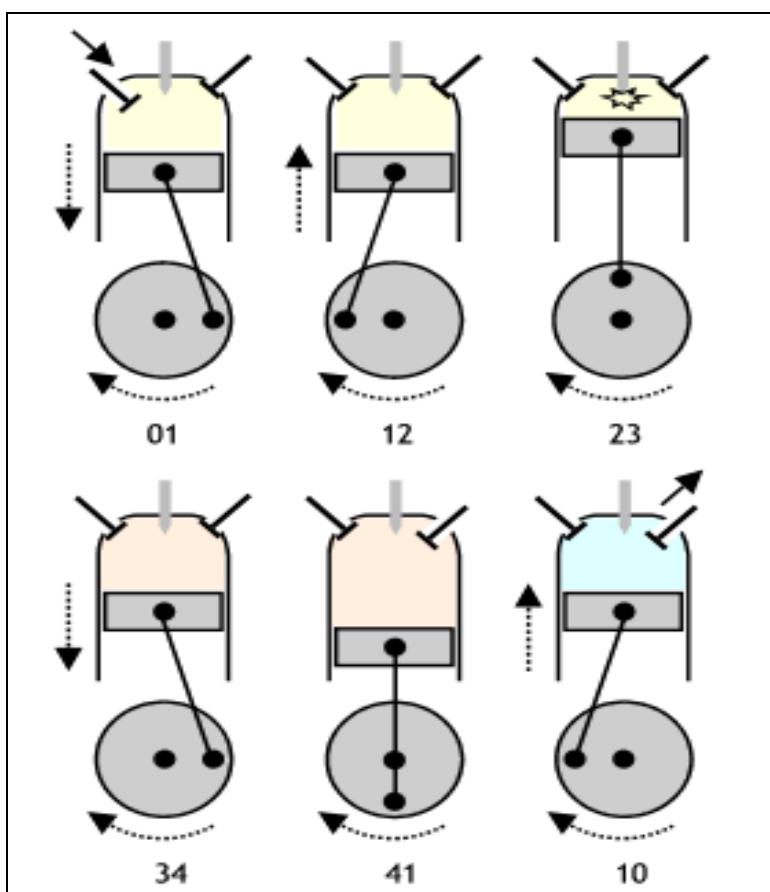


Figura 3.2: Esquema ilustrativo do processo de operação de um cilindro básico de um motor de ciclo Otto.

3.2.2 - Motores de Ciclo Diesel

Nos motores de ciclo Diesel a ignição ocorre por compressão e, para que isto ocorra, apresentam taxas de compressão bem maiores. São utilizados geralmente em veículos pesados, como ônibus, caminhões, caminhonetas e tratores ou por qualquer outro tipo de veículo que requer um desempenho diferenciado em relação aos veículos equipados com motores de ciclo Otto. A figura 3.3 apresenta um esquema básico do motor de ciclo Diesel.

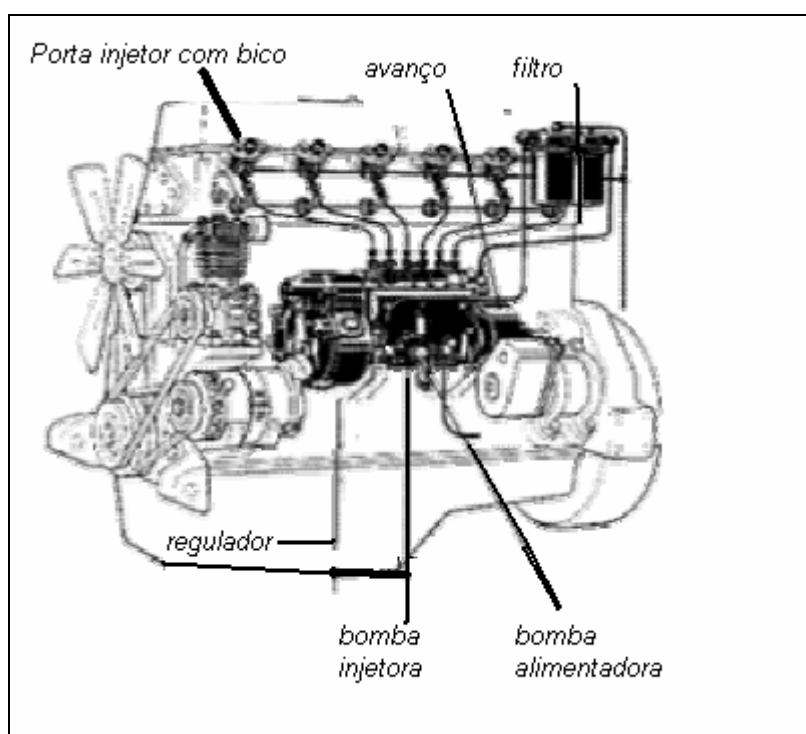


Figura 3.3: Motor de ciclo Diesel
Fonte: Santos, A.M. (Adaptado pelo autor).

Assim como os motores de ciclo Otto, os motores de ciclo Diesel também operam normalmente com um ciclo de operação de quatro tempos (admissão, compressão, explosão e descarga), sendo raros os casos em que o ciclo de operação se faz em dois tempos. Os ônibus e caminhões operam com motores de quatro tempos.

Diferentemente dos motores de ciclo Otto, no tempo da **admissão** dos motores de ciclo Diesel apenas o ar é injetado para o interior do cilindro do motor, no que denominamos

câmara de combustão. Somente na fase da **compressão**, quando o ar é elevado a uma temperatura superior àquela necessária à auto-ignição do combustível pelo deslocamento do pistão do PMI para o PMS, é que o combustível é injetado.

Ao misturar-se com o ar aquecido, o combustível reage até sua combustão espontânea (**explosão**), fazendo com que o pistão se movimente agora do PMS para o PMI e que a válvula de escape se abra. Enquanto o pistão se desloca novamente do PMI ao PMS, ocorre a **descarga** dos gases formados no processo de combustão do combustível, sendo então liberados pelo sistema de escapamento.

Ao contrário dos combustíveis utilizados nos motores de ciclo Otto, o óleo combustível que alimenta os motores de ciclo Diesel apresenta cadeias carbônicas longas e ramificadas, o que facilita a reação espontânea do combustível como o oxigênio na câmara de combustão em altas temperaturas, haja vista que as forças de ligação entre os átomos são menores.

Discorrendo sobre os avanços tecnológicos para os motores de ignição por compressão, Santos afirma que

um outro avanço para os motores de ignição por compressão é o duplo sistema de alimentação de combustível. O óleo Diesel ou biodiesel é injetado diretamente na câmara de combustão e funciona como combustível piloto de ignição por compressão e um segundo combustível é fornecido ao motor através de um sistema de alimentação adicional. Com este sistema pretende-se viabilizar a queima de um combustível mais apropriado para motores ICE nos motores ICO. Este segundo combustível, que é fornecido em maior quantidade, pode ser gasolina, etanol, GLP ou gás natural. O segundo combustível pode ser fornecido pelo coletor de admissão ou também injetado diretamente na câmara de combustão. (SANTOS, A.M; p.09)

3.3 - Os combustíveis, pneus e a qualidade do ar urbano

Desde a popularização do uso dos automóveis nas cidades, várias tecnologias foram incorporadas a esse segmento, tornando-o cada vez mais complexo e atrativo à maioria das sociedades. Dentre esses avanços, as variações quanto aos combustíveis utilizados nos propulsores de ciclo OTTO (gasolina, gás e álcool) ou DIESEL merecem destaque.

Os combustíveis denominados fósseis, ou seja, aqueles derivados do petróleo, tais como a gasolina e óleo diesel, são os mais difundidos mundialmente. No Brasil, a proporção de emprego dessas fontes não-renováveis representaram, em 2005, cerca de 86% do consumo de combustíveis (figura 3.4)

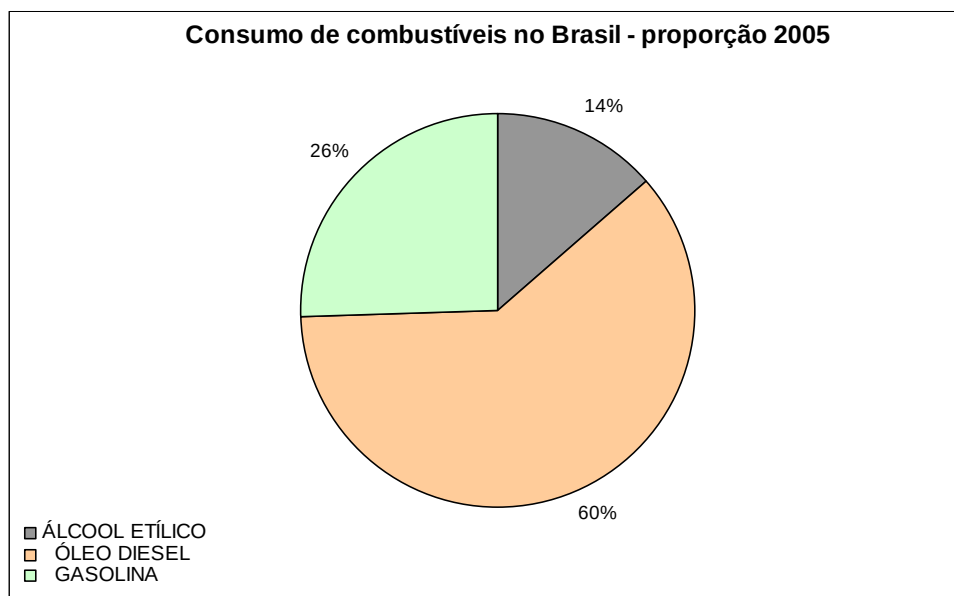


Figura 3.4: Proporção do consumo de combustíveis no Brasil – 2005

Fonte: EPA-MME, 2005.

Os combustíveis utilizados na alimentação da frota de veículos podem ser classificados em dois grandes grupos quanto à sua fonte:

- Fontes renováveis - destacam-se o etanol e o biodiesel *in natura*. Em menores proporções, também são utilizadas fontes como a eletricidade, o ar e a água, sobretudo em veículos de tecnologia híbrida.
- Fontes não-renováveis - destacam-se nesse grupo os combustíveis fósseis, tais como a gasolina, o óleo diesel e o gás-natural.

O Brasil é o único país cuja frota de veículos é abastecida com etanol em larga escala, seja em estado puro ou misturado à gasolina. Sua utilização foi marcada pela instalação do Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL pelo Governo Federal. Inicialmente, determinou-se a adição de 15% de etanol hidratado a cada fração de gasolina e,

posteriormente, em 1990, essa proporção foi elevada para 22%, por determinação do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Contudo, em 1998, o Governo Federal, a partir da Medida Provisória 1662-3 elevou essa proporção para 24%. Segundo CETESB (2005, p. 02),

Os veículos movidos a etanol hidratado representam 13% da frota de RMSP e os movidos a gasolina (mistura 22% de etanol e 78% de gasolina), representam 68%. O álcool corresponde a 44% do combustível consumido, segundo dados de consumo.

A lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005, mais conhecida como “Lei do Biodiesel”, o define como um tipo de biocombustível,

derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.

Porém, o biodiesel representa, para diversos setores econômicos e políticos da sociedade, uma alternativa de distribuição de recursos e de provimento de trabalho e renda para as mais diversas camadas sociais de nosso país. Como uma de suas peculiaridades, pode-se destacar os esforços no planejamento estratégico desse projeto, adotado pelo governo nacional, em se aliar os interesses comuns de grandes produtores ligados ao chamado agronegócio e, por outro lado, incluir nesse processo os denominados produtores familiares, historicamente marginalizados de qualquer iniciativa efetiva de se aliar produção agrícola com a geração de energia, tal como o programa voltado à produção de álcool etílico.

Por outro lado, a utilização do biodiesel se justifica não só pela preocupação geopolítica que a dependência externa aos combustíveis fósseis possa gerar num eventual cenário de instabilidade, tendo em vista de que é uma fonte limitada de energia não-renovável, cujos preços são amplamente dependentes da conjuntura econômica internacional, mas também à sua característica menos impactante no que se refere às emissões de poluentes atmosféricos.

Segundo afirmação contida no Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial sobre o Biodiesel, em seu anexo I, o biodiesel apresenta características favoráveis em relação ao

óleo diesel mineral nesse aspecto. Acredita-se, inclusive, que 1 tonelada de biodiesel evita a produção de 2,5 toneladas de gás-carbônico. As vantagens do emprego dessa tecnologia energética alternativa é ainda reforçada pelo fato de que, segundo o mesmo relatório,

embora não haja linearidade quando se consideram diferentes proporções de mistura de biodiesel ao diesel mineral (B5, B20 etc), a redução de emissão de material particulado e de poluentes compostos de carbono e enxofre são expressivas.

Até 2013, período correspondente a oito anos a partir da publicação da Lei do Biodiesel, a proporção de 5% de biodiesel (B5) deverá ser implantada para cada litro de óleo diesel comercializado nos postos de combustíveis de todo o território nacional, havendo um período de transição não superior a três anos (até 2008), período no qual será tolerada uma proporção de 2% de biodiesel (B2) para cada litro de óleo diesel mineral.

Contudo, o posicionamento de entidades diretamente ligadas à pesquisa e aprimoramento das tecnologias ligadas a esse biocombustível, tais como a Confederação Nacional de Agricultura e o Projeto Biodiesel Brasil, coordenado pela Universidade de São Paulo – USP conferem a essas instituições uma perspectiva mais otimistas, afirmando que “uma proporção de 30% em relação ao óleo diesel seria confiável.”

Os combustíveis fósseis são compostos líquidos ou gasosos derivadas do óleo bruto (petróleo), extraídos a partir do seu refino. O refino do petróleo se dá a partir de uma torre de fracionamento, onde:

Os compostos de ponto de ebulição mais elevados são condensados nos pratos inferiores, e os compostos de ponto de ebulição mais baixos nos pratos superiores, porque o nível de temperatura na torre diminui ao passar pelos pratos. As porções condensadas são retiradas para tratamentos específicos a fim de fornecer os produtos desejados. (REIS, 2001, p.03)

A gasolina corresponde à fração superior da destilação direta, representando assim as frações mais leves do óleo bruto. O óleo diesel apresenta-se em frações mais pesadas. A figura 3.5 apresenta os percentuais médios de derivados obtidos a cada metro cúbico de petróleo.

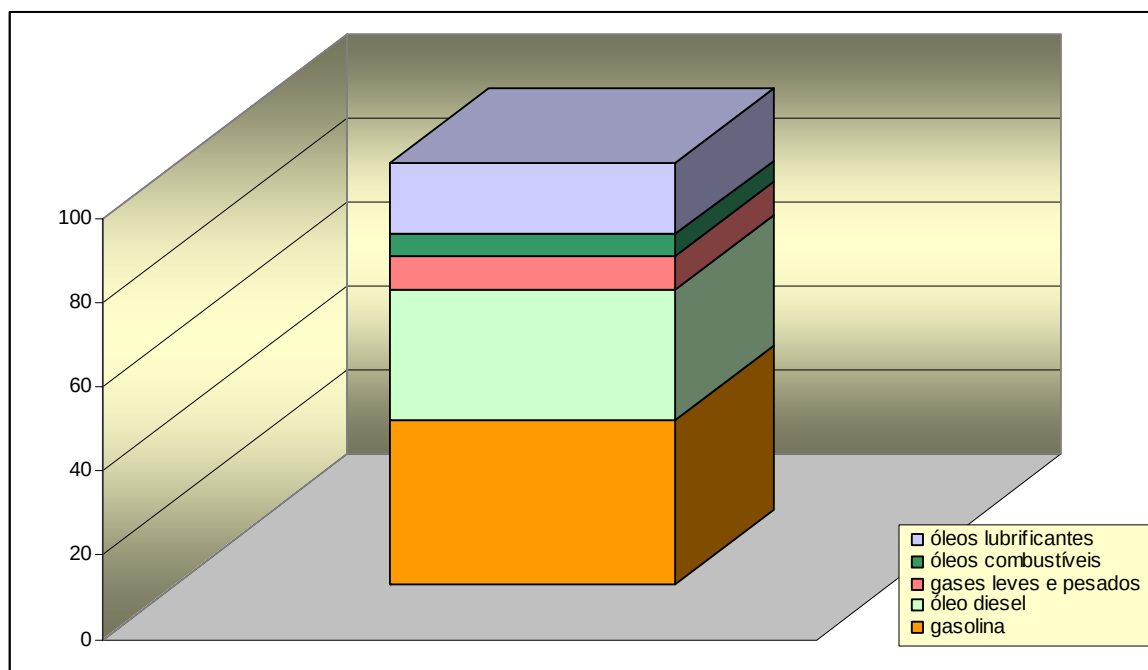


Figura 3.5 – Petróleo: percentual médio de derivados a cada metro cúbico
Fonte: REIS, 2001.

A gasolina é um combustível constituído basicamente por hidrocarbonetos (compostos orgânicos que contém átomos de carbono e hidrogênio) aromáticos, oleofínicos e saturados, com moléculas de cadeias carbônica de 4 a 12 átomos de carbono (predominam as de 8 átomos de carbono). Em menores quantidades, a gasolina também é formada por produtos oxigenados (produtos que possuem átomos de oxigênio em sua fórmula, como álcoois, éteres, etc).

O óleo diesel, por sua vez é formado por hidrocarbonetos e compostos de enxofre e nitrogênio. Por apresentar uma cadeia carbônica que varia de 6 a 30 átomos, o óleo diesel é considerado um combustível mais pesado do que a gasolina.

O uso indiscriminado do automóvel, principal responsável pela demanda de óleo combustível e gasolina no Brasil, é apontado por muitos como um problema a ser superado pela sociedade moderna, tendo em vista que a perpetuação de seu uso irracional pode agravar problemas econômicos e sanitários já evidentes nos grandes centros urbanos espalhados nos cinco continentes.

O caso brasileiro é emblemático para o entendimento desse desafio. No ano de 1970, o Brasil contava com cerca de 90 milhões de habitantes. Nesse mesmo período, o consumo de energia pelo setor de transporte rodoviário correspondia a $11.361 \times 10^3 \text{ tep}^3$. No ano de 2005, com uma população estimada em cerca de 190 milhões de pessoas, o consumo de energia consumido pelo setor de transporte rodoviário chegou à $48.073 \times 10^3 \text{ tep}$. Em outras palavras, enquanto a população cresceu cerca de 210%, o consumo de energia pelo setor de transporte rodoviário aumentou 423%. Em síntese, é como afirmar que o consumo de energia desse setor cresceu duas vezes mais que o próprio aumento da população.

Em parte, esse crescimento da demanda por energia se explica pela mudança do comportamento dos consumidores brasileiros ao longo desse período. O acesso cada vez mais facilitado aos veículos, devido à gradual popularização de seus preços, bem como a necessidade que o estilo de vida cosmopolita acabou assegurando ao automóvel, acabam por explicar a difusão do automóvel como item indispensável para a família brasileira. Aliado a esse novo comportamento sócio-cultural, a própria opção estratégica do governo federal em priorizar o transporte rodoviário, em detrimento a outros modais, como as ferrovias ou hidrovias, contribuíram substancialmente para a consolidação desse cenário.

Paralelamente a esse processo, o uso de combustíveis alternativos nos automóveis nacionais também alternou momentos de expansão e retração na demanda. O caso mais relevante é o uso do álcool etílico ou etanol, que no Brasil é comumente extraído da cana-de-açúcar. Atualmente, além da venda de etanol puro, a legislação brasileira prevê a mistura de 22% de etanol para cada fração de gasolina. A figura 3.6 apresenta a evolução do consumo de combustíveis pelo Setor de Transportes no Brasil no período de 1970 a 2005.

³ Tep: Toneladas Estimadas de Petróleo

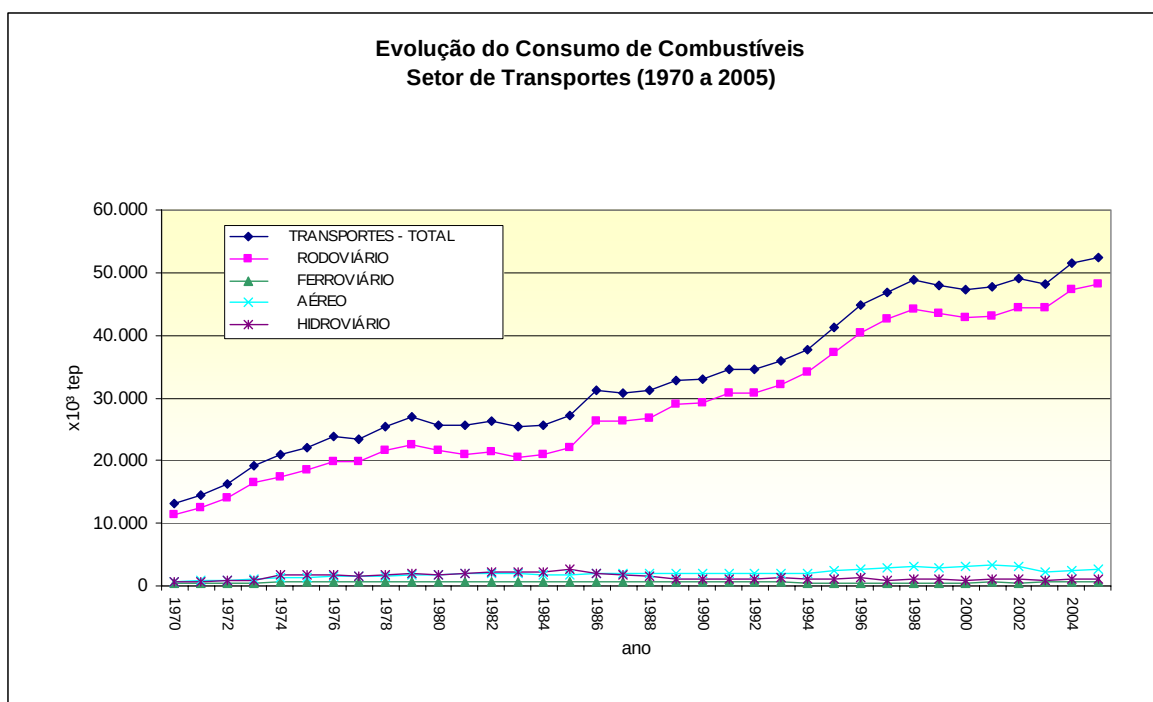


Figura 3.6: Evolução do Consumo de Combustíveis pelo Setor de Transportes Brasil (1970 – 2005).

Fonte: EPA-MME, 2005.

Em termos de emissão de material particulado pelo escapamento dos veículos, a opção pelo etanol é a mais favorável. Tal afirmação se explica pelo fato de que os veículos abastecidos com etanol, assim como o gás natural, não emitem material particulado para a atmosfera. Veículos abastecidos com gasolina e diesel contribuem, respectivamente, com 0,08 e 0,57 gramas desse poluente para cada quilômetro percorrido, em média.

Contudo, apesar de aparentemente apresentar uma relação poluente/km mais degradante que os demais combustíveis em termos de material particulado é importante ressaltar que grande parte dos veículos empregados no transporte coletivo de passageiros são movidos por motores de ciclo Diesel. Essa peculiaridade confere a esses veículos uma vantagem em relação aos veículos movidos à gasolina, visto que um único ônibus, no ambiente urbano, pode chegar a transportar uma quantidade 60 vezes maior de passageiros do que a maioria dos veículos à gasolina, o que acaba lhe conferindo uma melhor relação “emissão de material particulado/deslocamento de passageiros”.

Um outro fator que não pode ser desprezado é o fato de que o atrito dos pneus com a superfície, independente do combustível utilizado, produz uma quantidade significativa de

material particulado. Além disso, o simples deslocamento dos veículos pela pista de rolagem ocasiona a ressuspensão dos poluentes ali depositados, o que contribui de maneira significativa para a deterioração da qualidade do ar mesmo em veículos movidos a álcool ou a gás natural.

Outra fonte significativa de produção de material particulado são os pneus de borracha. Ao se deslocar pela estrada de rodagem, seu atrito com a camada asfáltica da via libera em média 0,07 gramas desse poluente para cada quilômetro de deslocamento.

Essa razão, que independe do tipo de veículo e combustível empregado, representa quase a mesma magnitude de emissão de material particulado pelo escapamento de veículos à gasolina, o que evidencia sua importância no contexto de produção de material particulado.

CAPÍTULO 4

A QUALIDADE DO AR E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA

O primeiro instrumento legal efetivamente voltado à regulamentação da qualidade do ar no Brasil foi a Portaria GM 0231 de 27/04/1976 que, fundamentalmente, previa o estabelecimento de novos padrões de qualidade do ar assim que informações científicas a respeito fossem concebidas. Nesse sentido, a Resolução 03/1990 foi instituída pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente - IBAMA, a partir do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, a fim de atender a essas necessidades.

A Resolução CONAMA 03/1990 estabelece uma série de conceitos que referenciam os trabalhos relativos ao controle da qualidade do ar, conforme verifica-se a seguir:

(a) padrões de qualidade do ar: são as concentrações de poluentes atmosféricos que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

(b) poluente atmosférico: qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora.
- prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.
- Padrões de concentração: a Resolução CONAMA 03/90 instituiu dois conceitos fundamentais para o monitoramento e gestão da qualidade do ar: o padrão primário e o padrão secundário de concentração de poluentes atmosféricos.

Por “padrão primário de concentração” define-se “as concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população”. Atendem à regulamentação da qualidade do ar em curto prazo, ou seja, aos limites máximos que não deverão ser ultrapassados no decorrer de um dia, aplicando-se assim às áreas de desenvolvimento (ALMEIDA, 1999).

Por outro lado, o padrão secundário de concentração indica “as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral”, aplicando-se basicamente na busca pela preservação ambiental em sentido amplo, e não apenas em relação à saúde humana, conforme observado no padrão primário.

Os padrões primários e secundários de qualidade do ar adotados pela legislação brasileira para os PTS e as MP₁₀ podem ser apresentados conforme dados expostos na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Padrões Primários e Secundários para PTS e MP₁₀

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/cm ³)	Padrão Secundário (µg/cm ³)
PTS	24 horas ⁴	240	150
	MGA ⁵	80	60
Partículas Inaláveis	24 horas ⁶	150	150
	MAA ⁷	50	50

Fonte: Resolução CONAMA 03/90.

A Resolução CONAMA 03/90 estabelece também os métodos de monitoramento das concentrações desses poluentes, através de sua amostragem e análise. Nesse sentido, às PTS deve ser aplicado o método de Amostrador de Grandes Volumes (ou equivalente), enquanto que às partículas inaláveis deve ser aplicado o método de separação inercial/filtração (ou método equivalente).

⁴ Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

⁵ Média Geométrica Anual

⁶ Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

⁷ Média Aritmética Anual.

Além dos particulados totais e do material inalável, esta resolução considera ainda uma série de outros poluentes atmosféricos, bem como seus padrões de concentração e ocorrência, tais como o dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio, fumaça e dióxido de nitrogênio.

A Resolução CONAMA 03/90 estabeleceu ainda alguns critérios baseados nos níveis de concentração de poluentes para orientar a atuação dos gestores em episódios agudos de concentração desses poluentes na atmosfera. Os parâmetros instituídos pela resolução para os particulados totais (PTS) e partículas inaláveis (MP₁₀) são apresentados na tabela 4.2, a seguir.

Tabela 4.2: Parâmetros conforme Resolução CONAMA 03/90

Parâmetros (µg/m ³) - 24 horas	Atenção	Alerta	Emergência
PTS	375	625	875
MP ₁₀	250	420	500

4.1 - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

Inspirado em ações dos países “desenvolvidos”, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE foi instituído pela Resolução CONAMA 18/1986. Este programa pode ser definido como uma política pública instituída pelo governo brasileiro na tentativa de conceber uma ferramenta eficaz na busca pela melhoria da qualidade do ar nos ambientes urbanos, especialmente nas regiões metropolitanas.

Consiste, basicamente, na redução gradual nos níveis máximos de emissão de poluentes por veículos automotores (diesel e gasolina), definindo, para tal, parâmetros a serem respeitados por fábricas e / ou montadoras de automóveis cuja produção era destinada ao mercado brasileiro.

Segundo a CETESB (2006), *os fabricantes vêm cumprindo as exigências legais, o que resultou na obtenção de redução média de mais de 94% na emissão de poluentes dos veículos leves novos de 2005, em relação ao início do programa.* Contudo, apesar da significativa melhora nos níveis de emissão de poluentes em relação ao cenário observado num momento anterior à instalação do PROCONVE, ainda existem registros de ultrapassagem dos parâmetros exigidos, o que revela a necessidade de intensificação gradual da busca por melhorias tecnológicas que contribuam para a instauração de um cenário ideal, tendo em vista as necessidades da saúde humana no ambiente urbano.

4.2 - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares

Tendo em vista os bons resultados alcançados pelo PROCONVE, bem como o notável aumento da participação das motocicletas e similares nas vias urbanas brasileiras, combinado com os elevados fatores de emissão destas em comparação com os veículos novos, foi instituído o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares – PROMOT, a partir da Resolução CONAMA 297/2002. A proposta contida nessa resolução é baseada na Diretiva da Comunidade Européia nº97/24/EC.

Contudo, a Resolução CONAMA 342/03 estabeleceu novos limites para a emissão de motociclos e similares para 2005 e para todos os modelos lançados a partir de 01/01/2006, prevendo ainda novas reduções à partir de 2009, oportunidade em que os limites permitidos serão igualados àqueles já operados na Comunidade Européia.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

5.1 - Monitoramento da concentração de Poluentes

A concentração de poluentes foi monitorada a partir de dois aparelhos, denominados amostradores de grandes volumes - AGV. O primeiro é responsável pelo monitoramento dos níveis de particulados totais (PTS), enquanto o segundo monitora os níveis de partículas inaláveis (MP₁₀).

Em concordância com a Resolução CONAMA 03/90 e com a NBR 9.547/97 (PTS) e NBR 13.412/95 (MP₁₀), as amostras são coletadas em períodos de 24 horas, com intervalos médios de 48 horas entre o fim de uma amostragem e o início de outra.

O AGV é um aparelho formado por vários equipamentos básicos e auxiliares, responsáveis por seu funcionamento e manutenção preventiva. A configuração básica de um amostrador de grandes volumes é apresentada pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Instrumentos que compõem um AGV e suas respectivas funções.

Instrumento	Função
Moto aspirador de ar	aspira a amostra de ar, por redução de pressão, através do filtro a uma velocidade facial uniforme
Porta filtro	retêm as partículas em suspensão por impacto direto das mesmas sobre o filtro
Indicador de vazão	por meio de um transdutor de pressão com orifício, é possível quantificar a vazão de ar amostrado no período da amostragem.
Programador de tempo (timer)	funciona como um relógio que permite ligar ou desligar automaticamente uma carga programável, nos horários pré-determinados, em ciclos diários ou semanais
Regulador de tensão	aumenta a vida útil do motor-aspirador e de suas escovas, além de manter a faixa de vazão de amostragem recomendada pelas normas vigentes
Horâmetro	mede com precisão o tempo da amostragem e, além disso, é útil para determinar o tempo de vida do motor e suas escovas

Fonte: Cioqueta et al, 2004.

Ao discorrer sobre as diferenças básicas entre os AGV que monitoram os PTS daqueles que monitoram os MP₁₀, Cioqueta (2004) apud Amorim (2004) afirma que:

no AGV-MP10, o ar adentra o cabeçote, que possui a região de entrada perfazendo 360°, assegurando que qualquer que seja a direção do vento ocorrerá amostragem. O escoamento é acelerado por 9 bocais que projetam o ar para a câmara de impactação inercial, onde o material particulado com diâmetro aerodinâmico superior a 10µm é retido em uma placa untada com graxa de silicone. Esta placa impede que partículas maiores que 10 µm, se dividam em partículas menores, devido ao impacto, e sejam amostradas.

Dada a necessidade de se monitorar a concentração de poluentes, os AGV's foram equipados com filtros de fibra de vidro. Caso o objetivo do trabalho fosse a retenção de uma amostra de poluentes para posterior caracterização química, seria necessário a utilização de outros tipos de filtro.

Os amostradores de grandes volumes foram instalados na área externa do Terminal Central, localizado num dos principais cruzamentos da região central da cidade, formado pela interseção das avenidas João Naves de Ávila e João Pinheiro.

A escolha desse ponto de coleta de amostras de concentrações de poluentes se justifica pela importância estratégica do cruzamento para a dinâmica da cidade e sobretudo pelo tráfego intenso observado no local, inclusive de veículos equipados com motores de ciclo Diesel, em grande parte constituídos pelos ônibus que operam no Sistema Integrado de Transportes Coletivo – SIT (CIOQUETA et al, 2004)

5.2 - Monitoramento do fluxo de veículos automotores e variáveis atmosféricas

O monitoramento do fluxo de veículos foi realizado com base num detector automático por laço indutivo, instalado no pavimento. Este equipamento monitora o fluxo de veículos na

via durante as 24 horas do dia, o ano todo, disponibilizando os dados a cada período de 15 minutos.

Os dados relativos ao comportamento atmosférico foram coletados a partir de equipamentos manuais, localizados na estação climatológica do Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos do Instituto de Geografia – IGUFU, conforme ilustra a Figura 5.1.



Figura 5.1: Estação Climatológica – IGUFU (localização).

Os dados referentes à umidade relativa do ar, temperatura do ar, precipitação direção e velocidade dos ventos são coletados diariamente, em horários pré-determinados, a saber:

- Manhã (09:00hs)
- Tarde (15:00hs)
- Noite (21:00hs)

A partir dos dados registrados para umidade relativa do ar, foram calculadas médias diárias, assim como para temperatura do ar, sendo consideradas dessa forma na elaboração dos modelos de previsão.

No que se refere à velocidade dos ventos, os dados foram organizados em duas vertentes: uma destinada à caracterização dos ventos na região estudada (manhã, tarde e noite) e outra para serem consideradas nos modelos de previsão (médias diárias).

Quanto às informações referentes à direção dos ventos, estas foram utilizadas somente para a caracterização dos deslocamentos de ar no período considerado pelo modelo de previsão, subsidiando a elaboração das rosas dos ventos (gráficos que informam a distribuição da ocorrência da direção dos ventos) para os períodos da manhã, tarde e noite.

As informações referentes às precipitações ocorridas no período foram utilizadas para a determinação do regime pluviométrico. Esses dados foram coletados diariamente em três períodos, posteriormente organizados em totais diários.

Dada a forte relação existente entre os níveis de concentração de poluentes do ar atmosférico e as condições de dispersão, determinadas em grande medida pelo comportamento atmosférico e das características climáticas da região analisada, os modelos foram gerados a partir de duas perspectivas de agrupamento dos dados:

- 1 – estações climáticas: verão, outono, inverno e primavera.
- 2 – regime pluviométrico: período seco e período chuvoso.

A organização dos dados nessas duas linhas de análise se justifica pela necessidade de se considerar cenários minimamente homogêneos quanto ao comportamento atmosférico e, por conseguinte, das condições de dispersão dos poluentes.

5.3 - Critérios para elaboração dos modelos

A elaboração do modelo propriamente dito baseou-se no método da regressão linear múltipla. Segundo Kazmier (1982) a análise da regressão linear múltipla aplica-se aos casos que envolvem duas ou mais variáveis independentes para estimar o valor da variável dependente. A seguir, é apresentada a fórmula básica da análise de regressão linear múltipla para n variáveis independentes:

$$Y_i = a + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + \dots + b_n \times X_n \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, **Y_i** representa o valor calculado da variável dependente (concentração de PTS e MP₁₀), enquanto **a** e **b_i** são as constantes do modelo. As variáveis independentes, representadas por **X₁**, **X₂** e **X_n**, são variáveis do tipo:

- dados referentes ao fluxo de veículos no cruzamento;
- dados referentes ao monitoramento atmosférico: temperatura do ar, umidade relativa do ar e intensidade dos ventos.

A base para calibração do melhor modelo a partir da teoria da regressão linear é o método dos mínimos quadrados (KAZMIER, 1982). Este método consiste na minimização da somatória ao quadrado dos erros obtidos entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados.

Os dados resultantes do monitoramento das variáveis informadas foram organizados em planilhas e submetidos à função PROJ. LIN, do programa Microsoft Office Excell 2003. A função PROJ. LIN foi utilizada para calcular *as estatísticas para uma linha usando o método de "mínimos quadrados" para calcular uma linha reta com o ajuste perfeito para seus dados e retorna uma matriz que descreve a linha* (MICROSOFT, 2003).

A partir da matriz retornada pelo programa, foi possível elaborar o modelo, considerando as constantes calculadas, bem como reconhecer algumas estatísticas imprescindíveis para a validação do modelo, tais como o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão de estimativa (S_{xy}) e o Teste T student (t_b). A figura 5.2 apresenta o ambiente de trabalho do Microsoft Office Excell 2003.

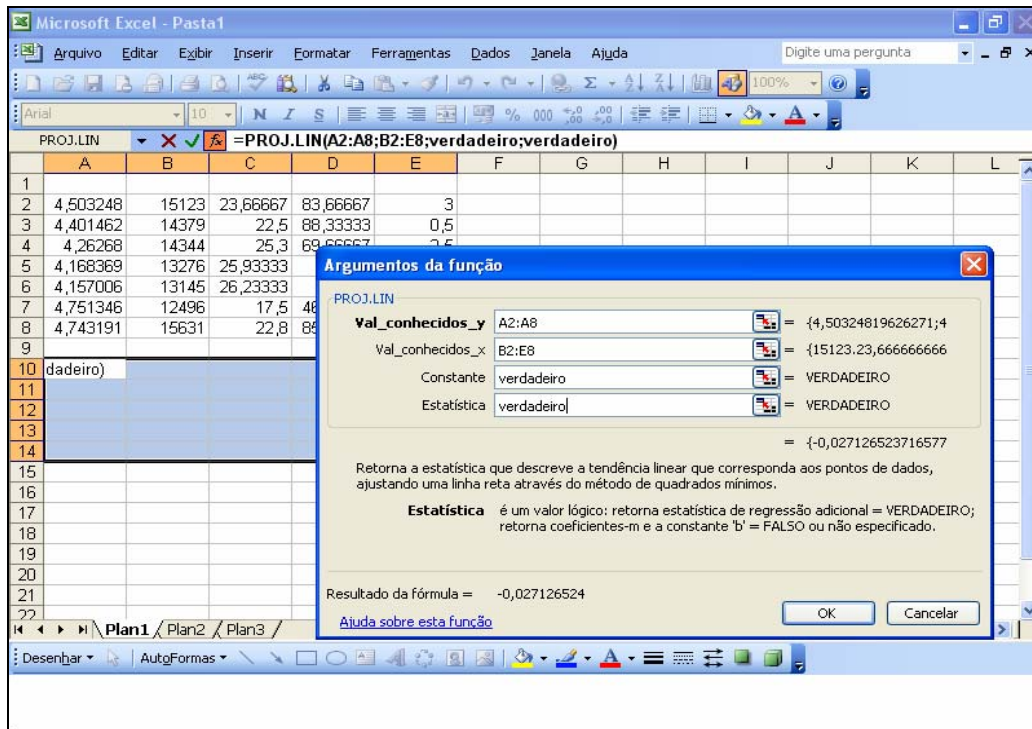


Figura 5.2: Ambiente de trabalho do Microsoft Office Excell 2003 - Função PROJ. LIN.

O modelo obtido conforme a Equação 5.1 deve ser validado através dos testes de significância estatística (coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa e o teste t-Student), conforme apresentados a seguir:

- Coeficiente de Determinação (r^2):

$$r^2 = 1 - \frac{s_{YX}^2}{s_Y^2} \quad (5.2)$$

onde:

s_{YX} : Erro Padrão de Estimativa

s_Y^2 : Variância Total

Para que o modelo seja bom, o valor do r^2 deve ser maior que 70%.

- Erro Padrão de Estimção (S_{YX}):

$$S_{YX} = \frac{\sqrt{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY}}{n - 2} \quad (5.3)$$

Para que o modelo seja bom, o Erro Padrão de Estimação deverá ser o menor possível, comparado com a ordem de grandeza dos valores da variável dependente.

- Teste *t-Student*

$$t = \frac{b}{s_b} \quad (5.4)$$

$$\text{onde: } s_b = \frac{s_{yx}}{\sqrt{\sum x^2 - n\bar{X}^2}}$$

O valor de *t*, calculado pela Equação 6.4 deve ser comparado com o valor de *t* obtido na tabela de distribuição *t-Student* em função do número de grau de liberdade e do grau de confiança (maior que 95%).

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS VARIÁVEIS DOS MODELOS

Com vistas ao atendimento dos objetivos deste trabalho, quais sejam de calibração de modelos de previsão dos níveis de material particulado (PTS e MP_{10}) a partir do fluxo de veículos automotores e de parâmetros de natureza ambiental (comportamento climático e atmosférico), foi selecionado para estudo de caso um cruzamento na região central da cidade Uberlândia, localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais.

Este município apresenta uma frota de veículos de 193.411 veículos, conforme apresentado na Tabela 6.1, para uma população estimada em 600.368 habitantes – (IBGE - 2007), estabelecendo-se assim uma relação de aproximadamente 3,1 habitantes por veículos (hab/veic).

Capítulo 2 Tabela 6.1 - Constituição da Frota de veículos. Uberlândia, 2002-06

Tipo de Veículo	Quantidade	
	2002	2006
Automóvel	107.241	116.842
Caminhão	8.203	8.345
Caminhão Trator	1.765	2.113
Caminhonete	5.536	8.993
Micro-ônibus	686	718
Motocicleta	38.517	47.351
Motoneta	5.646	7.896
Ônibus	1.011	1.046
Trator de rodas	93	107
Total	168.698	193.411

Fontes: Ministério da Justiça, Departamento Nacional de Trânsito, 2004/2007

Segundo Reis (2001, p.11), a frota de veículos de Uberlândia consome cerca de 15.000.000 litros de combustível mensalmente, conforme ilustra a Tabela 6.2

Tabela 6.2 - Combustível consumido pela frota de veículos de Uberlândia (2001).

Volume de combustível	Combustível Consumido (litros)		
	álcool	gasolina	diesel
Automóvel	1.556.719	1.484.184	-
Caminhonete	63.513	201.123	264.363
Ônibus	-	-	2.647.200
Caminhão	-	-	7.881.750
Motos	-	306.250	-
Outros	111.586	353.354	-
Total	1.828.528	2.344.912	10.798.586

Tal situação representa, conforme exposto anteriormente, um fator que pode implicar no desencadeamento de processos de degradação da qualidade ambiental urbana, sobretudo no que se refere à qualidade do ar.

Para instrumentação da análise dos dados a serem trabalhados, foi selecionado o cruzamento das avenidas João Naves de Ávila e João Pinheiro localizado na área central da cidade de Uberlândia, considerando-se dados referentes ao ano de 2004.

As avenidas João Pinheiro e João Naves de Ávila se destacam no contexto do município de Uberlândia por representarem importantes vias de acesso à área central da cidade. A posição estratégica dessa interseção atuou como fator decisivo para que, em meados da década de 1990, fosse construído nesse local o Terminal de Transporte Coletivo Paulo Ferolla da Silva (Terminal Central). A figura 6.1 apresenta a visão geral do cruzamento.



Figura 6.1 – Cruzamento Avenidas João Pinheiro e João Naves de Ávila

Nesse local, foram instalados equipamentos para o monitoramento de duas variáveis imprescindíveis para a investigação proposta, a saber:

- dois amostradores de grandes volumes, para monitoramento da concentração de material particulado (Partículas Totais em Suspensão – PTS) e Partículas Inaláveis – MP_{10} (Figura 6.2);
- um sistema de detecção de veículos por laço indutivo, para monitoramento do fluxo de veículos automotores na área proposta.



Figura 6.2 – Amostradores de grandes volumes

Em seguida, estes dados foram relacionados àqueles referentes ao comportamento climático e atmosférico do lugar, no referido espaço de tempo.

A partir da caracterização e análise desses dados e dos processos pertinentes, foram elaborados modelos de previsão da concentração de PTS e MP₁₀ para este local da área central da cidade de Uberlândia. Assim, esses níveis de concentração foram previstos a partir da relação entre o fluxo de veículos e as condições climáticas e atmosféricas (umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade dos ventos).

A figura 6.3 apresenta informações referentes à condição topográfica da bacia do Rio Araguari, onde está situado o município de Uberlândia.

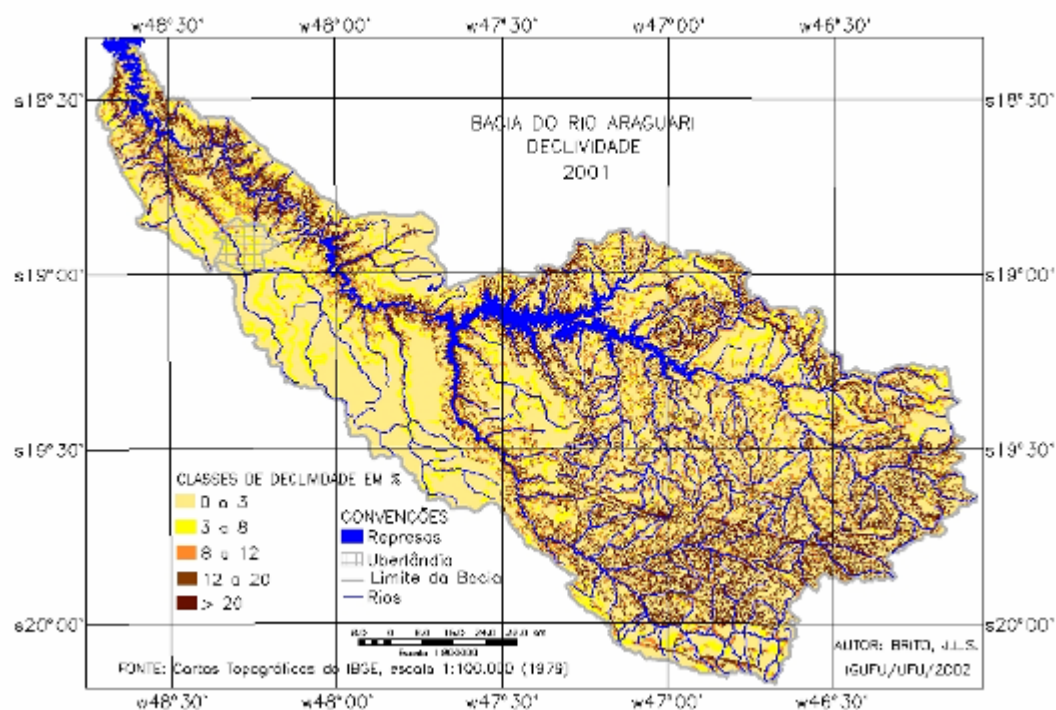


Figura 6.3 – Configuração geomorfológica da região do município de Uberlândia.

Fonte: Cartas Topográficas IBGE.

Autor: BRITO, J.L.S, 2002.

Nota-se que a declividade da área onde se localiza a cidade de Uberlândia é formada basicamente por classes de declividade que variam de 0 a 3%, apresentando assim uma topografia bastante suave (aplainada). As maiores declividades devem-se, sobretudo, aos

entalhes formados pelos vales fluviais que formam a rede de drenagem da bacia do rio Araguari.

Por haver apenas um ponto de coleta de dados de poluentes e de dados relativos à dinâmica atmosférica, não houve necessidade de se incluir a condição geomorfológica na elaboração dos modelos. A consideração desse fator se justificaria em casos onde se trabalhassem com mais de um ponto de monitoramento e que ainda apresentassem variações significativas na topografia do terreno.

6.1 – Níveis de Concentração de PTS e MP₁₀

Os dados referentes à concentração de PTS e MP₁₀ foram disponibilizados pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – FEQUI, que desde 2003 vem realizando um trabalho de monitoramento dos níveis de concentração do material particulado (PTS e MP₁₀) na área central desta cidade.

Cada amostra foi levantada num período de 24 horas, conforme regulamenta a Resolução CONAMA 003/90 e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 9547/97 para particulados totais e NBR 13412/95 para partículas inaláveis.

Os amostradores de grandes volumes (AGV), aparelhos utilizados para monitoramento da concentração dos poluentes atmosféricos, foram instalados na área externa do Terminal Central, localizado num dos principais cruzamentos da região central da cidade, formado pela interseção das avenidas João Naves de Ávila e João Pinheiro.

A Figura 6.4 apresenta a localização dos equipamentos para monitoramento dos PTS e MP₁₀ (AGV).

Percebe-se, a partir dos dados dispostos na Tabela 6.3, que a maior média diária de concentração de PTS corresponde à primavera. Contudo, conforme será detalhado com mais propriedade no Capítulo 8, o alto valor dessa média se deve, sobretudo, à convergência de dois fatores: a) uma concentração muito alta numa observação específica ($513,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que não se enquadra nos padrão de concentração da estação e b) ao baixo número de observações disponíveis para essa estação.

Tabela 6.3 - Concentrações mínimas, máximas e médias de PTS por estação climática (Uberlândia, MG - 2004)

Estação Climática	Concentração diária mínima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentração diária máxima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Verão	63,88	115,74	88,57
Outono	20,89	227,81	82,99
Inverno	46,33	136,14	89,52
Primavera	59,42	513,97	140,09

6.1.2 – Partículas Inaláveis (MP_{10})

A seguir, são apresentados dados de concentração de MP_{10} , organizados por estação climática.

Tabela 6.4 - Concentrações mínimas, máximas e médias de MP_{10} por estação climática (Uberlândia, MG - 2004)

Estação Climática	Concentração diária mínima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentração diária máxima ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Verão	35,16	56,57	43,97
Outono	22,71	81,11	47,64
Inverno	32,18	164,97	61,04
Primavera	36,12	68,49	50,50

Com base nos dados dispostos na Tabela 6.4, nota-se que a maior e menor média de concentração de MP_{10} no cruzamento correspondem às estações de inverno e verão, respectivamente. Isto se deve, sobretudo, ao padrão do comportamento atmosférico observado em cada uma das estações, que determinam condições de dispersão de poluentes diferenciadas (precipitação, umidade, direção e velocidade dos ventos etc.).

Segundo dados levantados por Cioqueta et al (2004), a concentração média geométrica anual (C.M.G.A) para o PTS no ano de 2004 foi de $79,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, ou seja, apenas $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a menos do que o limite instituído pela Resolução CONAMA 003/90. Quanto ao MP_{10} , a concentração média aritmética anual (C.M.A.A) para o ano de 2004 foi de 58,48

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, ultrapassando o limite tolerável pela Resolução CONAMA 003/90, que é de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Os dados contidos nas figuras 6.5 e 6.6 representam o monitoramento desses poluentes no decorrer do ano de 2004. Nota-se que em algumas observações (uma no inverno e outra na primavera para PTS e duas no inverno para MP_{10}) a concentração dos poluentes mostraram-se muito superiores ao padrão observado pelas demais amostras, sendo assim denominadas *out-liers*. Esse comportamento atípico observado nessas amostras pode ser resultado de uma série de fatores, tais como: a) eventual descarga de poluentes por uma fonte estacionária; b) mudança do padrão de direção dos ventos, direcionando poluentes das zonas de concentração de fontes estacionárias para a região do cruzamento; c) ocorrência de queimadas ou fenômenos similares; d) convergência simultânea fatores já citados; e) falha na coleta ou processamento dos dados monitorados.

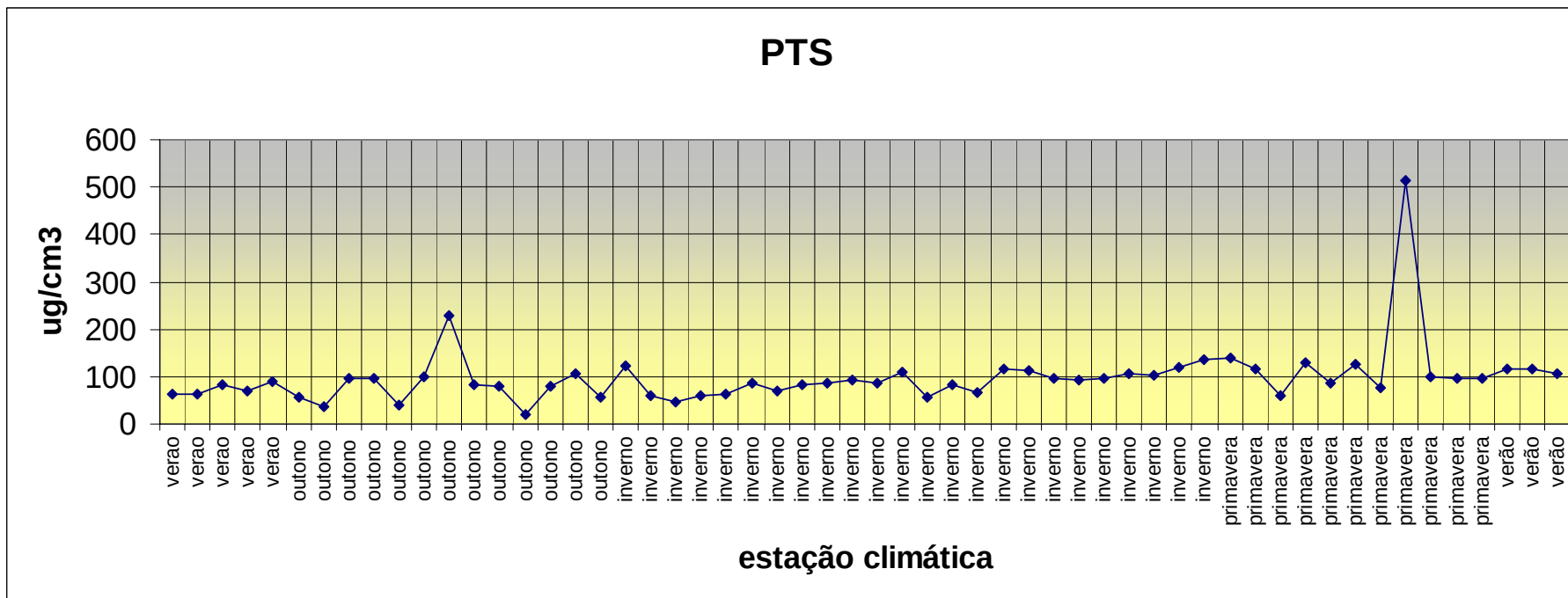


Figura 6.5 - Concentrações diárias de PTS (05/012004 a 29/12/2004)

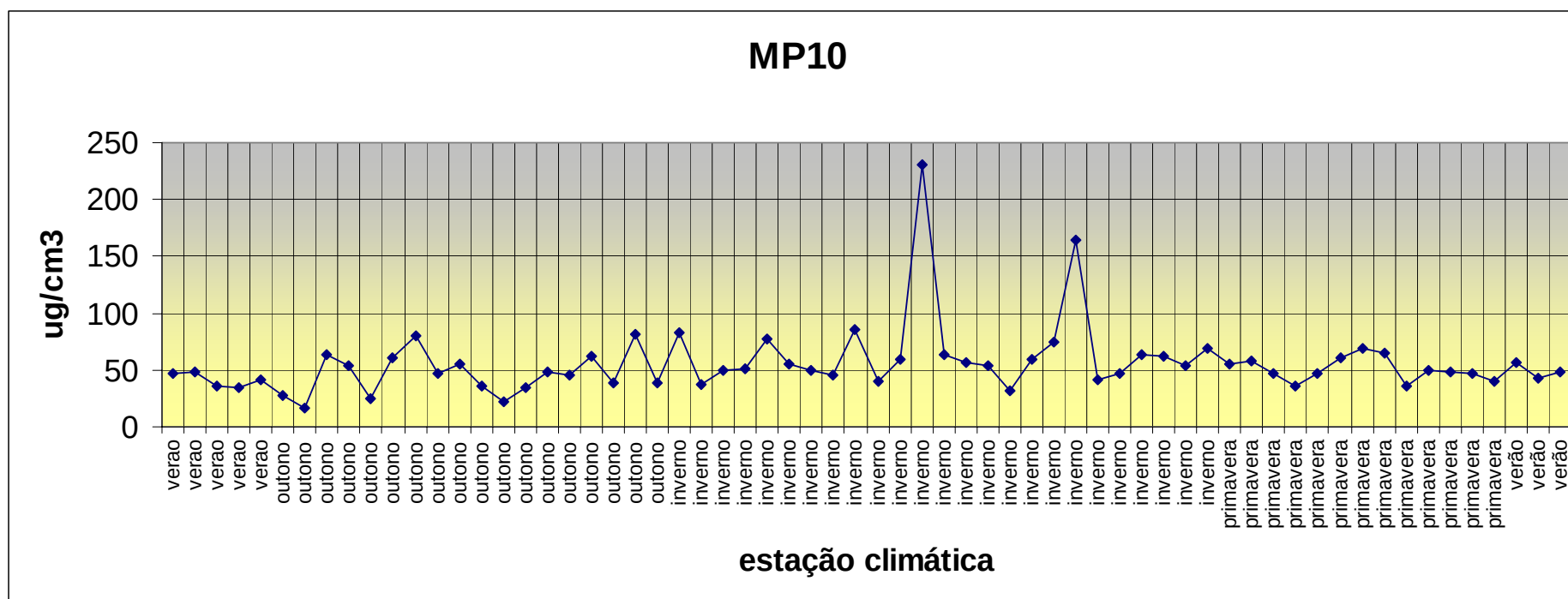


Figura 6.6 - Concentrações diárias de PTS (05/01/2004 a 29/12/2004).

FECIV. Essa equipe realizou um levantamento manual do fluxo de veículos para o cruzamento, com dados organizados em intervalos de 15 minutos.

A partir da diferença obtida entre a quantidade de veículos detectada pela equipe técnica da FECIV com aquela detectada automaticamente pelo sistema de laço indutivo, estabeleceu-se uma estimativa do fluxo para todo o cruzamento.

O passo seguinte consistiu na caracterização do fluxo de veículos a partir dos dados diários, para todos os meses do ano de 2004 (figura 6.8), para a avenida João Pinheiro.

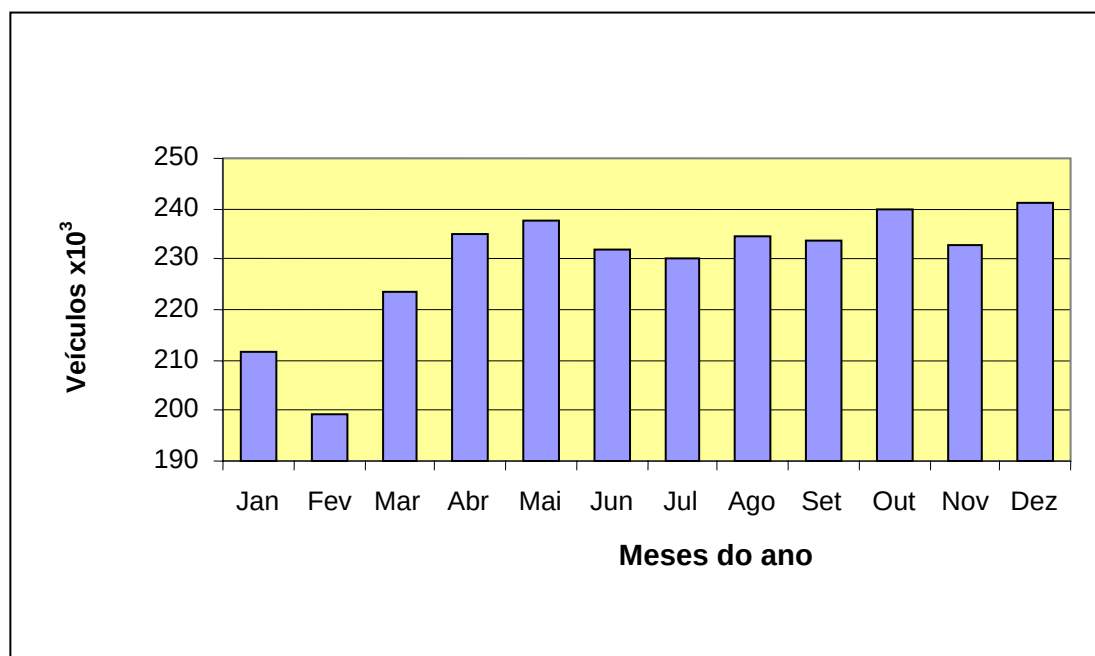


Figura 6.8 – Fluxo de Veículos por mês – Avenida João Pinheiro (2004).

A partir da análise desses dados, foi possível verificar que nos meses de janeiro, fevereiro e março, o fluxo de veículos na via foi bastante reduzido em relação aos demais meses. Este fato se explica, provavelmente, por estes meses coincidirem com as férias escolares. Os meses de abril, maio, outubro e dezembro apresentaram os maiores fluxos, respectivamente, sugerindo assim a existência de dois períodos de pico, sendo um no primeiro semestre (abril/maio) e outro no segundo semestre (outubro e dezembro).

Na figura 6.9 estão apresentados os valores do fluxo de veículos da Avenida João Pinheiro, agrupados por dia da semana (2004) no cruzamento mencionado.

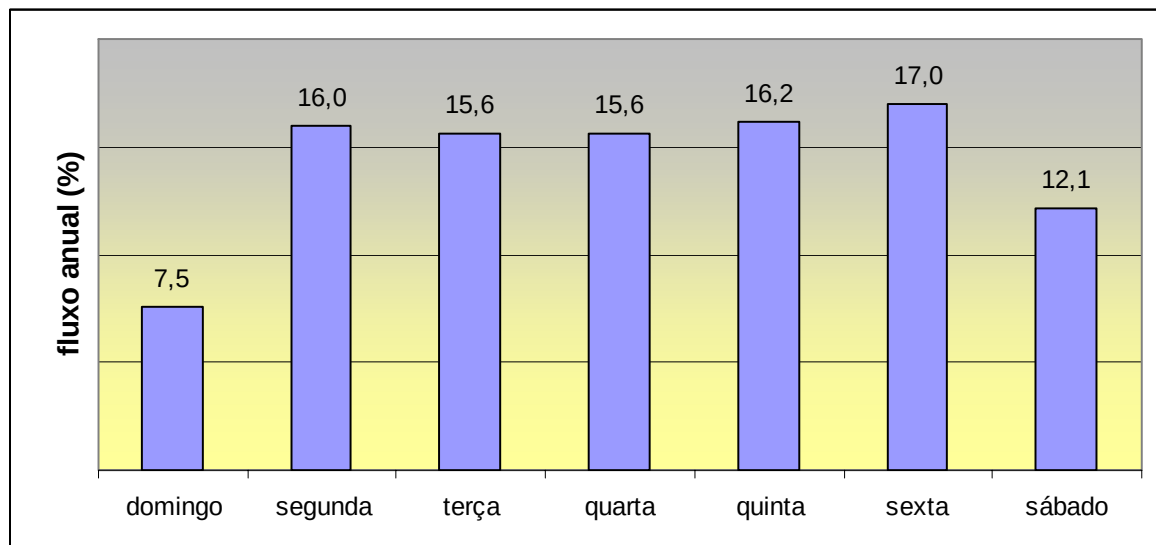


Figura 6.9 – Fluxo de veículos por dia da semana – Av João Pinheiro (2004)

Nota-se que o fluxo de veículos na via sofre reduções significativas apenas nos dias de domingo e sábado, mantendo-se relativamente uniforme nos demais dias da semana.

A figura 6.10, por sua vez, apresenta a forma de variação dos fluxos máximo e mínimo ao longo do dia.

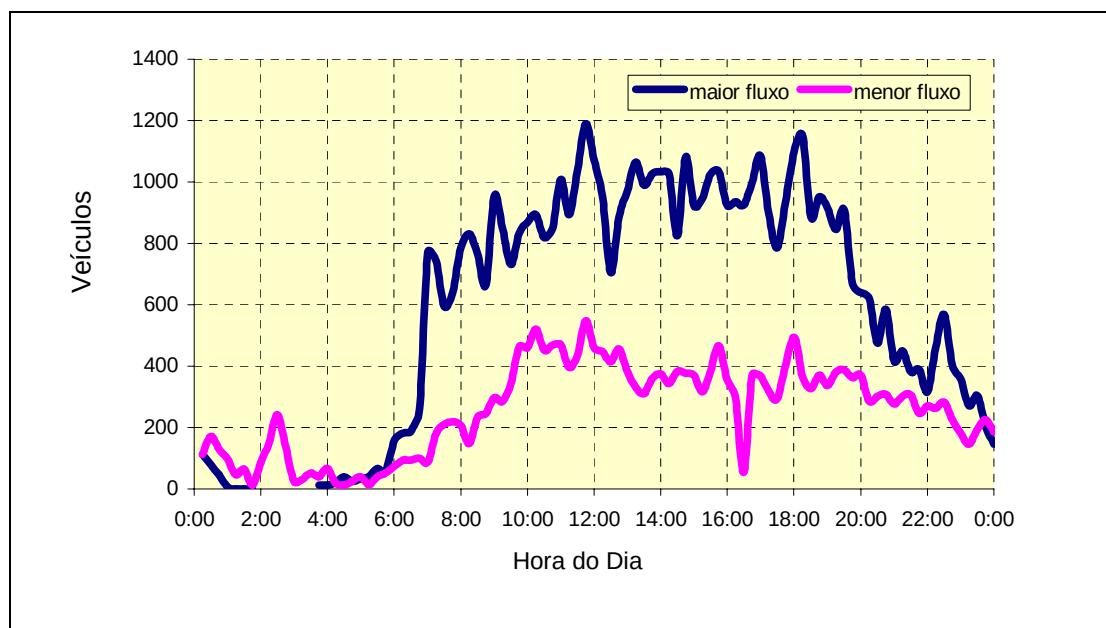


Figura 6.10 – Fluxos máximos e mínimos Avenida João Pinheiro.

A figura 6.10 informa a existência de pelo menos dois períodos de pico para a via, sendo o primeiro por volta das 12h00min e o segundo por volta das 18h00min. Esses períodos de fluxo mais intenso são explicados pelas maiores demandas simultâneas de deslocamento com finalidade de estudo entre os turnos da manhã/tarde e tarde/noite, e de trabalho devido ao intervalo para almoço no pico das 12h00min e o fim do expediente comercial às 18h00min.

A partir dos valores de fluxo disponibilizados pela Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes - SETTRAN referentes ao fluxo da avenida João Pinheiro (coletados por detector eletrônico) com aqueles levantados pela FECIV em 2003 (dados de fluxo para toda a aproximação, coletados por contagem direta), foram realizadas estimativas para o fluxo de toda a aproximação tendo como referência o fluxo mensurado na Avenida João Pinheiro pela SETTRAN (figura 6.11).

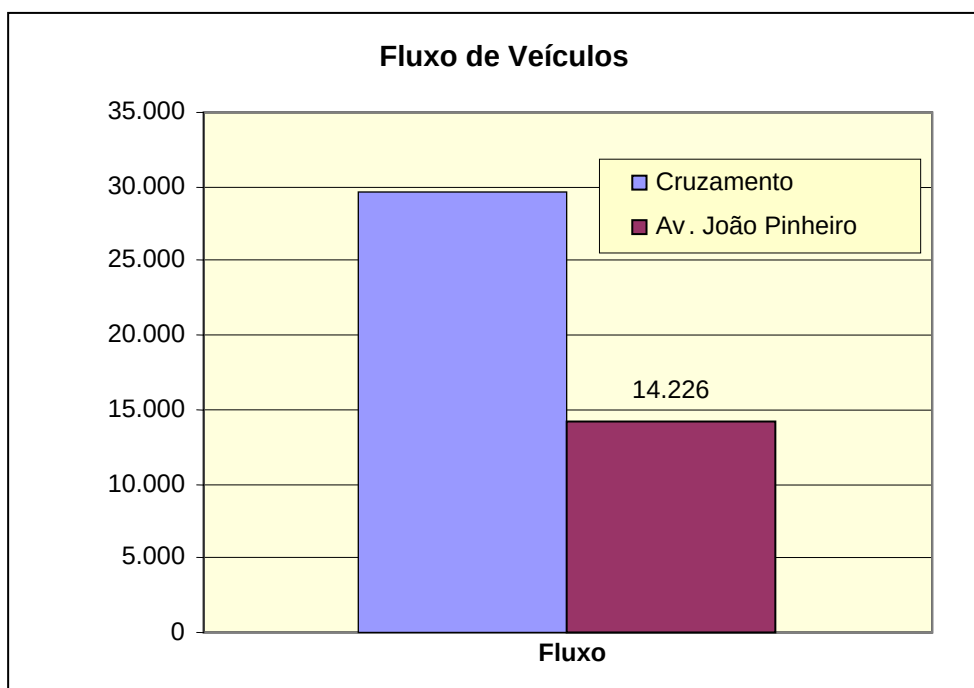


Figura 6.11 – Fluxo diário de veículos (11/09/2003)

De acordo com os dados contidos na Figura 6.11, pode-se estimar que o fluxo obtido na Avenida João Pinheiro corresponda à cerca de 48% do fluxo total do cruzamento. Assim,

esse dado compreende uma das bases fundamentais para o desenvolvimento das análises, visto que sua utilização é indispensável para a mensuração do fluxo geral do cruzamento.

Para subsidiar uma estimativa da proporção do número de veículos a partir do tipo de combustível, foi realizada uma contagem manual na Avenida João Pinheiro, identificando-se o tipo de ciclo do motor (Otto ou Diesel) de cada um dos veículos identificados na via num período de uma hora (15:00 a 15:59h), conforme dados apresentados na figura 6.12. Observa-se que a maior proporção de veículos corresponde àqueles de motor ciclo Otto (61,0%), seguidos pelos veículos de motor ciclo Diesel (21,9%) e pelas motocicletas (17,1%)

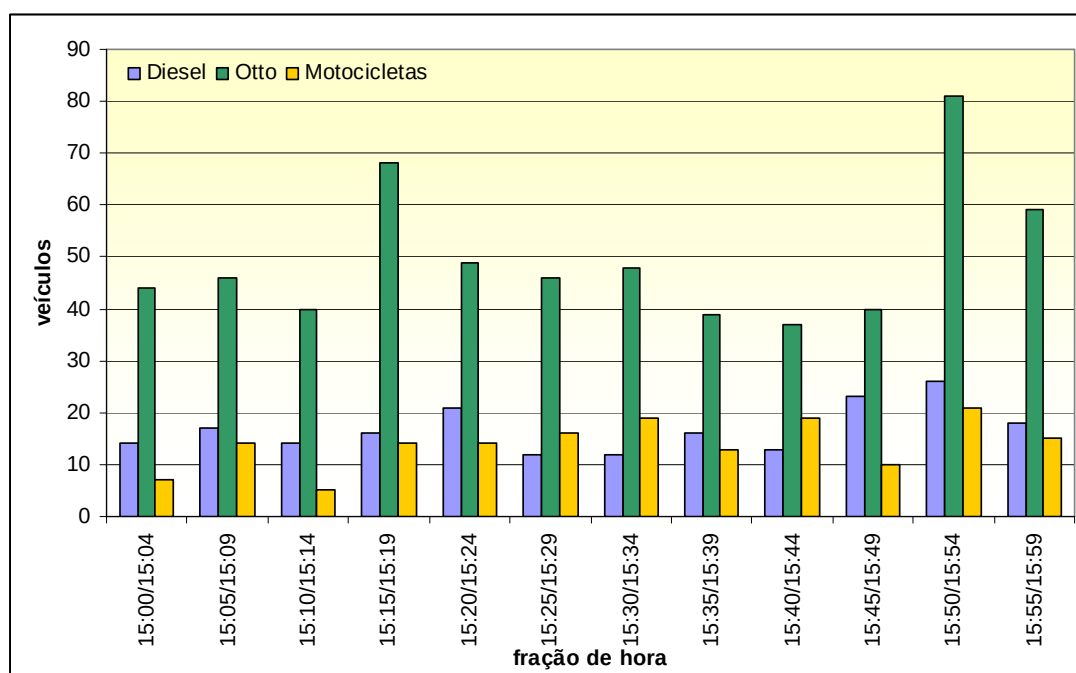


Figura 6.12 – Fluxo de veículos por tipo de motor – Avenida João Pinheiro (04/01/2007)

Em seguida, para que se fosse possível estimar a proporção de utilização de gasolina ou etanol dentre aqueles veículos equipados com motores derivados do ciclo Otto, relacionou-se os números obtidos na contagem com os valores de consumo desses combustíveis no país (EPA, MME; 2005). Os valores obtidos encontram-se dispostos na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Proporção do consumo de etanol e gasolina – Brasil (2000 a 2005).

Combustível/Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	média	%
Etanol	6.457	6.052	6.557	6.253	6.961	7.321	6.600	34,9
Gasolina	13.319	13.051	12.468	13.162	13.607	13.638	13.208	65,1

Conforme dados dispostos na Tabela 6.5, admite-se que 65,1% do combustível utilizado nos veículos de motores de ciclo Otto seja a gasolina, enquanto que o restante (34,9%) seja o etanol (álcool etílico). Adotando-se essa relação para o contexto uberlandense, pode-se afirmar que cerca de 2 a cada 3 litros de combustível consumido por automóveis de motor ciclo Otto no cruzamento em questão seja a gasolina, conforme ilustra a figura 6.13.

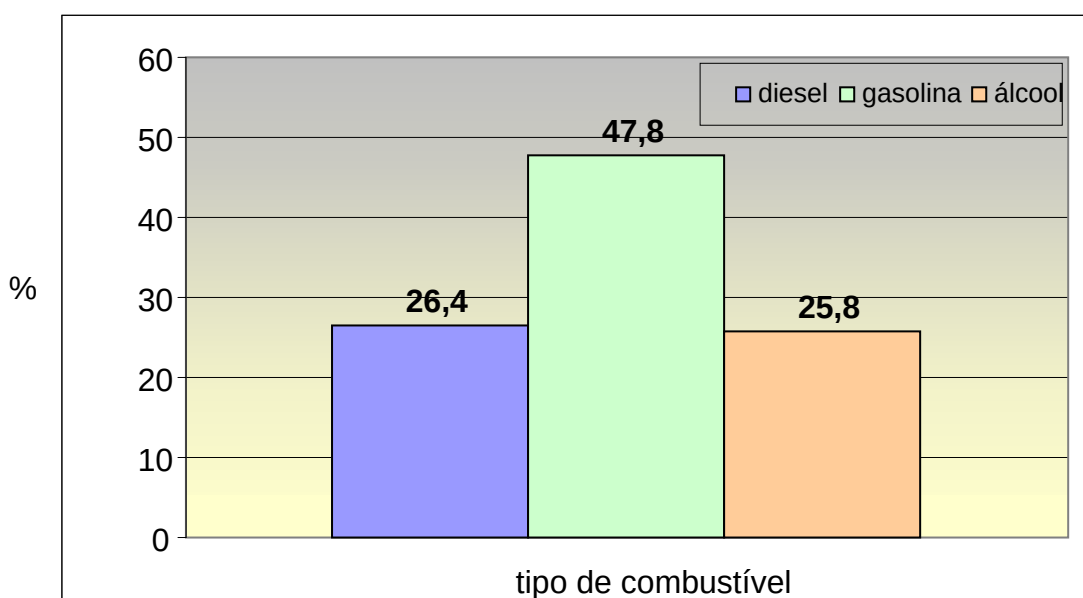


Figura 6.13 – Fluxo de veículos por tipo de combustível

Os valores obtidos a partir desse método se aproximam razoavelmente daqueles encontrados por Reis (2001, p.10), que estabeleceu que os automóveis a álcool correspondessem a 30% do total de veículos.

6.3 - Condições climáticas e atmosféricas

Os níveis de concentração de poluentes presentes na atmosfera não dependem, somente, da quantidade de gases e resíduos emitidos ou gerados pelas fontes móveis (automóveis,

caminhões, motocicletas etc) ou estacionárias (fábricas, construções, manejo do solo etc). Apesar da nítida importância da quantidade de poluentes gerados, seus níveis de concentração estão também relacionados com as condições de dispersão impostas pela atmosfera e sua dinâmica, seja em escala local ou regional.

A relação existente entre as condições climáticas e os índices de concentração de poluentes atmosféricos obedece a uma lógica singular. O comportamento atmosférico exerce um papel ambíguo na determinação da qualidade do ar, explicando muitas vezes episódios de altas concentrações de poluentes (compreendendo períodos de relativa estabilidade atmosférica) ou mesmo episódios em que houve registros de baixa concentração (explicada por períodos de alta instabilidade atmosférica, propiciando condições de dispersão dos poluentes) para uma carga similar de emissão de poluentes. Dessa forma, considera-se que as condições atmosféricas podem atuar como um regulador dos níveis de concentração de MP_{10} e PTS, influenciando na melhora dos índices ou contribuindo para o agravamento de um cenário anteriormente alterado por uma carga excessiva de emissões.

É importante frisar que, mesmo mantidas as emissões, a qualidade do ar pode mudar em função das condições meteorológicas que determinam uma maior ou menor diluição dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar piora com relação aos parâmetros CO, MP e SO₂ durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes. (...) A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera vai definir o nível de qualidade do ar, que determina por sua vez o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores (Relatório CETESB 2006 – pg17).

Os principais elementos da dinâmica atmosférica que atuam direta ou indiretamente nas condições de dispersão dos PTS e MP_{10} na atmosfera são:

- a) umidade do ar;
- b) temperatura do ar;
- c) ventos;
- d) precipitação.

6.3.1 - Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar (UR) pode ser definida como a proporção (%) de vapor d'água verificada numa dada medida de ar (umidade absoluta, geralmente expressa em g/m^3) em relação ao seu ponto de saturação (UR_s), considerando, para tanto, a mesma temperatura. A figura 6.14 informa os dados de UR para o ano de 2004, monitorados pelo IGUFU.

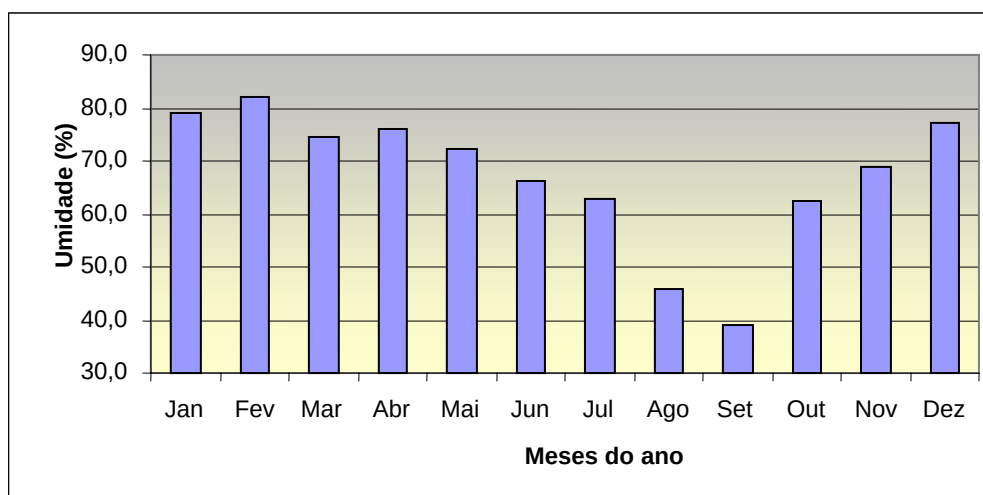


Figura 6.14 – Umidade Relativa do Ar: médias mensais (Uberlândia, 2004)

Com exceção do mês de outubro, os meses de setembro, agosto e julho apresentaram as menores médias de UR, período correspondente aos meses de inverno.

Segundo Cioqueta et al (2004), altos valores de umidade relativa do ar tendem a promover a aglomeração de partículas, fazendo com que aumentem de diâmetro devido ao processo de coalescência e sedimentem com mais facilidade, porque quanto maior o diâmetro da partícula menor o seu tempo de residência na atmosfera. Ainda segundo Cioqueta et al (2004) apud Amorim (2004), a umidade mais elevada provoca aumento da densidade das partículas causada pela maior adsorção de água.

6.3.2 - Temperatura do Ar

A temperatura do ar, por sua vez, refere-se à temperatura ambiente, ou seja, a temperatura registrada ao ar livre por um termômetro de mercúrio simples.

A figura 6.15 informa os dados de temperatura do ar para o ano de 2004, monitorados pelo Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia – IGUFU.

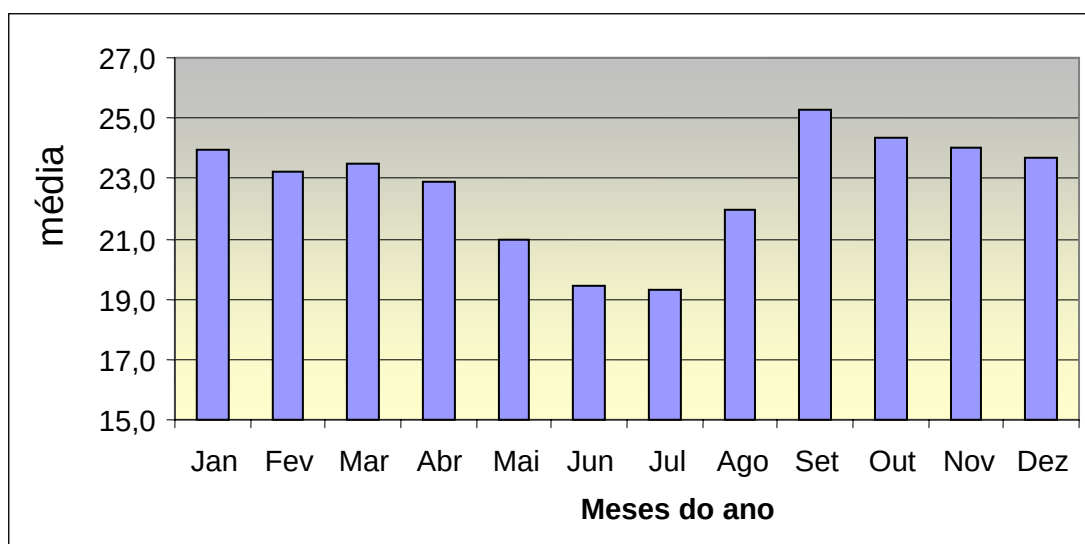


Figura 6.15 – Temperatura do ar - médias mensais (Uberlândia, 2004)

Os meses de junho e julho se destacam por apresentarem as menores médias de temperatura do ano: 19,4 e 19,3 °C, respectivamente. Os meses de maio (20,9°C) e agosto (21,9°C) são os outros meses mais frios do ano. Temperaturas baixas, aliadas à baixa umidade e estabilidade atmosférica, contribuem para o aumento da concentração de poluentes atmosféricos. O mês de setembro se destaca por apresentar a maior média de temperatura do ano (25,3°C).

6.3.3 - Ventos

Os ventos (deslocamentos de ar) originam-se das diferenças de pressão atmosférica, resultantes do aquecimento desigual da superfície terrestre. Podem ser monitorados quanto à direção (a partir de onde eles sopram) e velocidade (m/s). Um cenário de pouca intensidade dos ventos dificulta a dispersão dos poluentes, contribuindo assim para o agravamento das consequências geradas pela emissão dos próprios poluentes.

O monitoramento realizado pelo Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos do IGUFU identifica a velocidade e direção dos ventos, diariamente, às 09, 15 e 21hs. A Figura 6.16 apresenta as médias mensais de velocidade dos ventos.

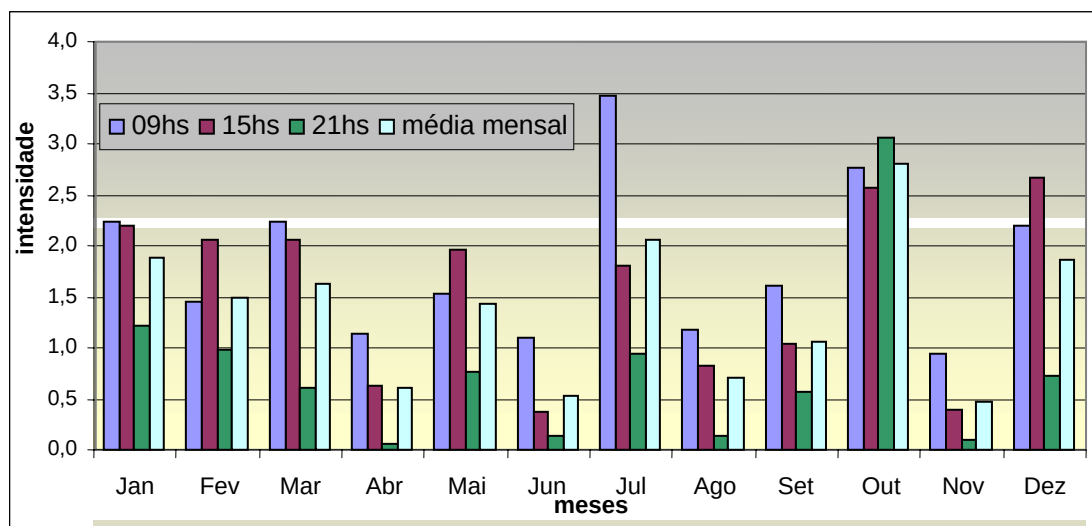


Figura 6.16 – Intensidade média dos ventos (Uberlândia, 2004)

Note que no período da noite (21hs), os deslocamentos de ar tendem a ser menos intensos, o que dificulta a dispersão dos poluentes nesse período. Os meses de novembro (0,5m/s), junho (0,5m/s), abril (0,6m/s) e agosto (0,7m/s) apresentam as menores médias de velocidade do vento.

A partir dos dados disponibilizados pelo IGUFU, foram elaborados gráficos que representam a ocorrência da direção dos ventos por período (rosa dos ventos), que auxiliam na determinação da direção típica dos ventos nos períodos da manhã, tarde e noite.

Segundo indica a figura 6.17, os ventos da manhã podem ser classificados, em sua maioria, como ventos de NE (46,2%) e E (26,5%), com um índice de calmaria de 7,7%.

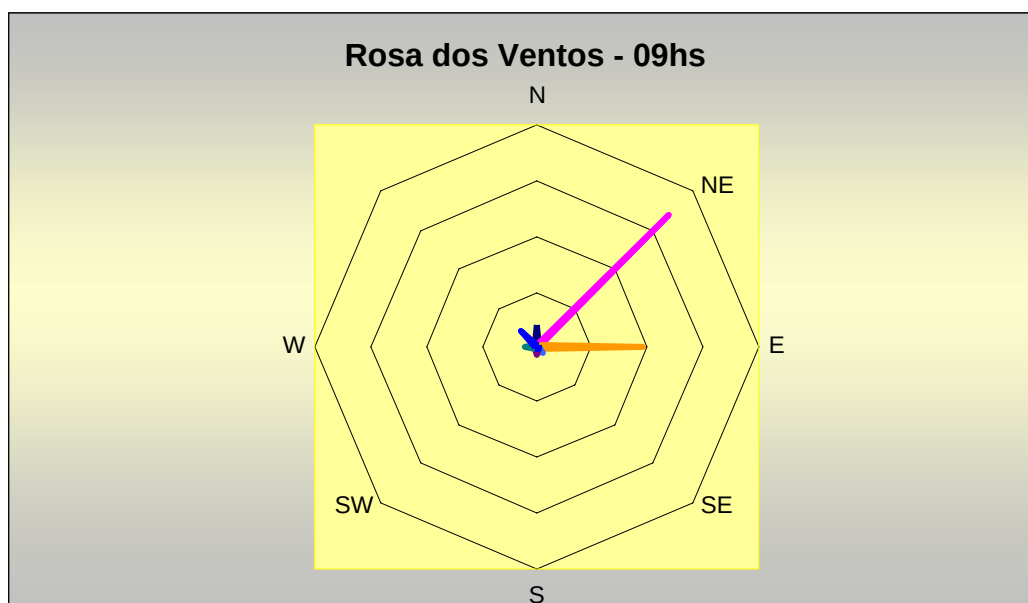


Figura 6.17 - Direção dos ventos no período da manhã: ocorrências em 2004.

Os ventos da tarde, indicados pela Figura 6.18, podem ser classificados como ventos de NE (39,7%) e E (12,1%), com índice de calmaria de 15,2%.

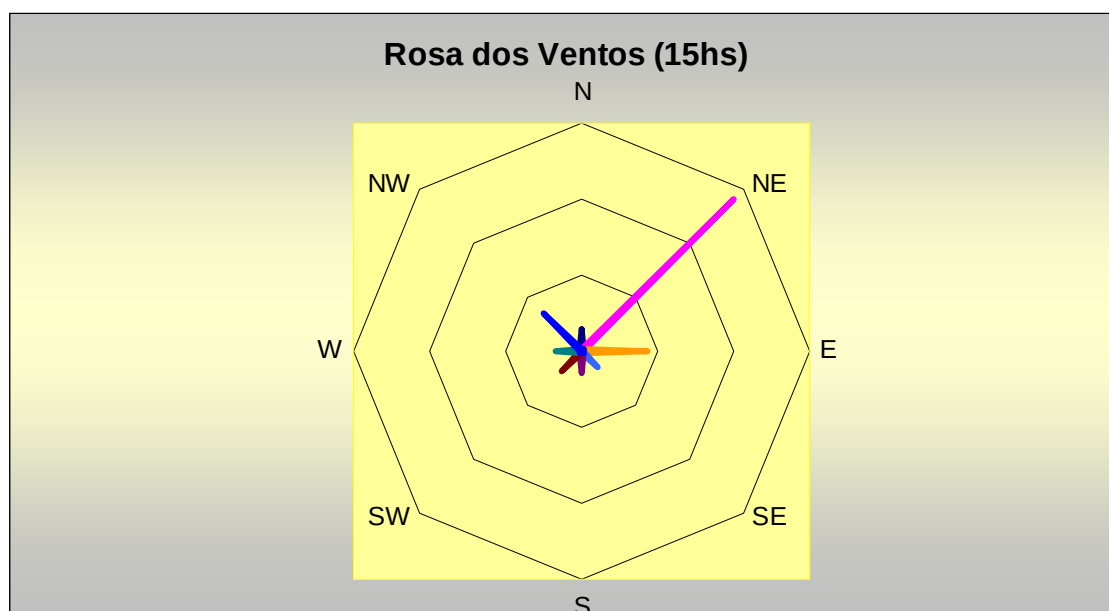


Figura 6.18 - Direção dos ventos no período da tarde: ocorrências em 2004.

A figura 6.19 informa que os ventos noturnos podem ser classificados, em sua maioria, como ventos de E (23,6%) e NE (14,6%).

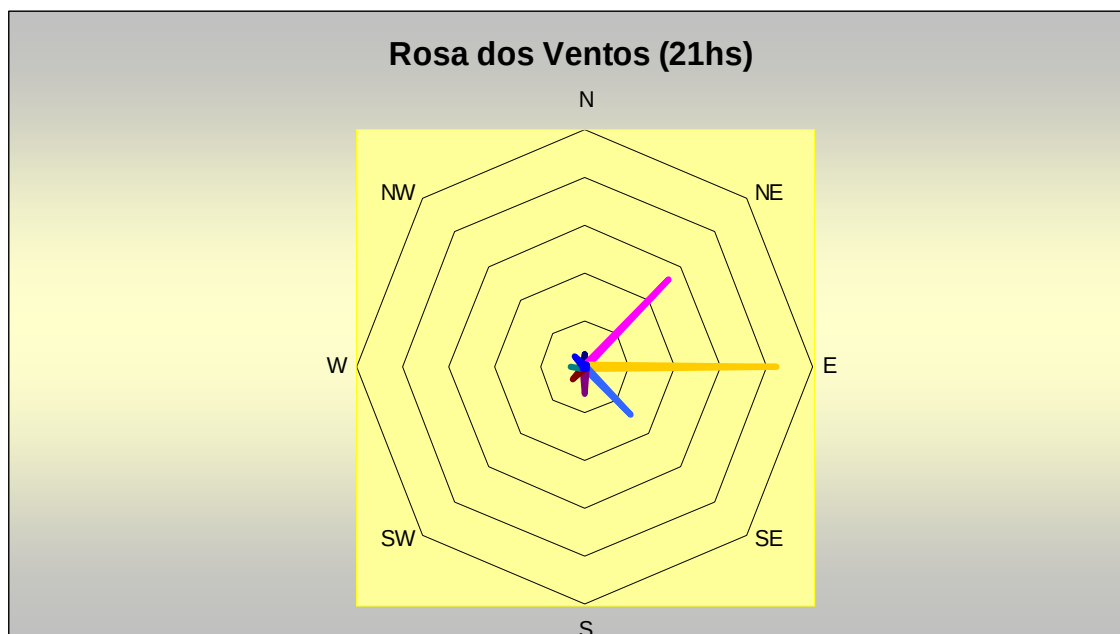


Figura 6.19 - Direção dos ventos no período da noite: ocorrências em 2004

Além de apresentar um padrão de direção dos ventos diferenciado do período da manhã e tarde, percebe-se que o período noturno apresenta o maior índice de calmaria (43,8%), configurando-se, assim, o pior cenário para a dispersão dos poluentes no que se refere à atuação dos deslocamentos de ar.

6.3.4 - Precipitação

O regime pluviométrico de Uberlândia é caracterizado por dois períodos distintos: um chuvoso, que se estende de outubro a abril; e um seco, que se estende pelos meses de maio a setembro. Segundo Corrêa (2004),

a precipitação (anual) média em Uberlândia, para o período analisado (1990 - 2003) foi de 1.558,6 mm. Os meses mais chuvosos são os de dezembro e janeiro, com média de 295,8 mm e 281,0 mm respectivamente. Os meses mais secos e de menores totais pluviométricos, são julho e agosto com média de 6,8 mm e 14,7 mm respectivamente.

A figura 6.20 apresenta dados relativos à pluviosidade mensal em Uberlândia, considerando o monitoramento realizado no ano de 2004 pelo Laboratório de Climatologia

e Recursos Hídricos do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia – IGUFU.

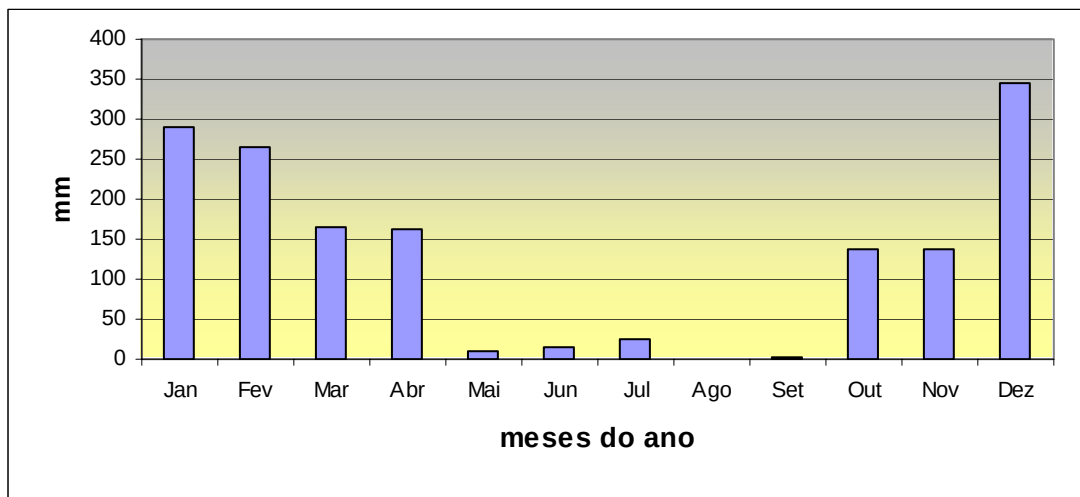


Figura 6.20 – Precipitação média mensal (Uberlândia, 2004)

Intervalos de tempo prolongados com a ausência de chuvas é um fator que pode contribuir sensivelmente para o acúmulo de poluentes na atmosfera. A importância da precipitação se justifica pela retirada das partículas de poluentes do ar pela água.

Sabe-se que a umidade aumenta devido à ocorrência de precipitação. Desta forma, como o fenômeno da precipitação limpa a atmosfera removendo as partículas presentes no ar, para altas umidades a concentração de MP_{10} e MP_{1000} (PTS) na atmosfera será menor. (Mendes, 2005)

O fluxo de água, ao promover o escoamento superficial, atua também no carreamento dos poluentes contidos na superfície das vias, passeios, prédios e da vegetação, evitando assim a ressuspensão de parte dos resíduos já sedimentados.

Analisando dados relativos a um período de 14 anos (1990-2003), Corrêa (2004) afirma que:

35,7% do início do período chuvoso ocorreu em outubro, 64,3% em novembro e em nenhum ano ocorreu em setembro ou dezembro. Pode-se considerar, levando em consideração este período de estudo de quatorze

anos, que o início do período chuvoso em Uberlândia geralmente ocorre em novembro, mais especificamente na primeira quinzena deste mês.

A consideração do início do período chuvoso no município de Uberlândia no que se refere à qualidade do ar se sustenta pela reconhecida importância desse fator para a determinação de níveis mais favoráveis de concentração de poluentes nos dias chuvosos.

6.4 - A Dinâmica Atmosférica e a Qualidade do Ar

Estudos sobre a qualidade do ar na RMSP revelam que a dinâmica climática que atua nessa região, fazendo alternar períodos chuvosos (outubro a abril) e secos (maio a setembro), interfere diretamente nas condições de dispersão dos poluentes (CETESB, 2006). Além disso, a ocorrência de grandes intervalos de calma e estabilidade atmosférica é maior nos períodos mais secos.

No que se refere à concentração de material particulado, nota-se que os períodos mais secos são desfavoráveis à sua dispersão/diluição na atmosfera, visto que aí é verificado o aumento das ocorrências de inversões térmicas próximas à superfície (alturas inferiores a 200m). Segundo estudo realizado pela CETESB na RMSP, há uma clara correlação entre os períodos de maior concentração de MP_{10} (figura 6.21) com as inversões térmicas.

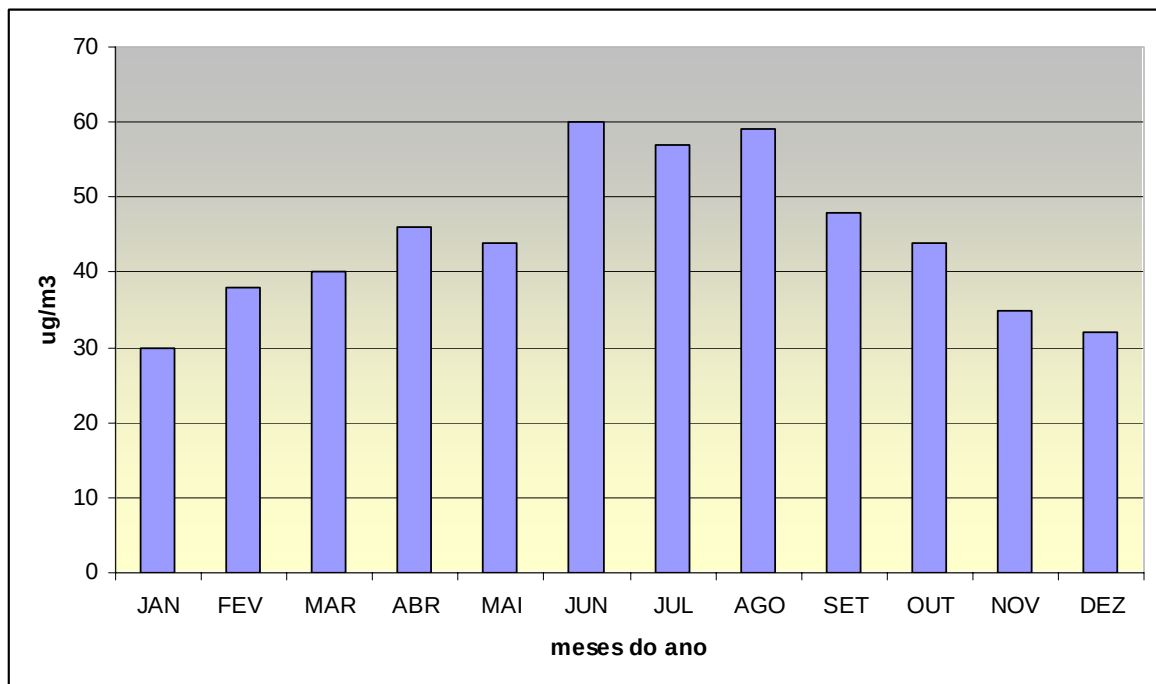


Figura 6.21 - MP_{10} : Concentrações Médias Mensais (2001 a 2005) - RMSP.

Segundo CETESB (2006) isto ocorre porque as inversões térmicas mais próximas à superfície impedem a dispersão dos poluentes para os níveis mais altos da atmosfera, provocando normalmente elevados níveis de concentração de poluentes.

Dada a importância do regime pluviométrico para a concentração dos níveis diários de material particulado, serão gerados modelos também a partir da consideração do regime pluviométrico (período chuvoso ou seco) na cidade de Uberlândia.

CAPÍTULO 7

CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE PTS E MP₁₀

7.1 - Modelos gerados

A calibração dos modelos de previsão dos níveis de concentração de particulados totais em suspensão – PTS e partículas inaláveis – MP₁₀ consiste numa tentativa de se criar instrumentos de subsídio ao planejamento e monitoramento da qualidade ambiental numa dada localidade ou região geográfica definida. Neste caso, trata-se de um cruzamento com grande fluxo de veículos, localizado na área central da cidade de Uberlândia.

Com vistas à elaboração de um modelo robusto e cientificamente representativo, os dados referentes ao monitoramento dos fluxos de veículos e do comportamento atmosférico foram utilizados como variáveis independentes. Os valores referentes ao fluxo de veículos correspondem àqueles detectados pelo laço indutivo na avenida João Pinheiro e, no caso das demais variáveis independentes, utilizou-se as médias diárias anteriormente obtidas pelo LCRH/UFU, conforme já mencionado.

Num primeiro momento, os dados foram organizados a partir de suas respectivas estações climáticas (verão, outono, inverno e primavera), na tentativa de se desenvolver modelos de previsão para cada um desses períodos. Tal opção se justifica pela maior homogeneidade que o comportamento atmosférico tende a apresentar sob a perspectiva de análise das estações climáticas.

Para cada um dos materiais particulados foi gerada uma matriz de correlação das variáveis a serem consideradas no modelo, assim como algumas transformações lineares do tipo logaritmo neperiano e a função $1/X$ para cada uma das variáveis, como forma de linearização do relacionamento entre as variáveis X_i e Y_i . A elaboração dessa matriz permite a identificação dos casos mais significativos em termos estatísticos.

7.1.2 - Particulados Totais (PTS)

Foram coletadas e disponibilizadas 45 observações diárias na elaboração dos modelos de PTS, sendo 21 coletadas no inverno, 09 no outono, 08 na primavera e 07 no verão. A Tabela 7.1 apresenta a matriz de correlação linear para os dados da variável dependente PTS e as demais variáveis independentes no ano de 2004.

De acordo com os valores obtidos a partir da matriz de correlação linear, observa-se que o coeficiente de correlação entre as variáveis $\text{Ln}(\text{PTS})$ e fluxo diário Veículos é 0,1424. No que se refere à correlação do poluente com as demais variáveis independentes (fatores climatológicos), nota-se que a correlação entre as variáveis $1/(\text{PTS})$ e $1/(\text{vento})$ é 0,1494, enquanto que a correlação entre $\text{Ln}(\text{PTS})$ e Temperatura do Ar é 0,0781 e entre $1/(\text{PTS})$ e $1/(\text{UR})$ é 0,0480. Esses valores correspondem às maiores correlações entre a variável dependente com cada uma das variáveis independentes, porém, são valores extremamente baixos para comporem modelos de regressão linear simples. Isto significa que os modelos a serem calibrados deverão ser os de regressão linear múltipla.

Cada um dos modelos são apresentados a seguir, contendo os valores dos coeficientes de correlação linear obtidos para cada período considerado, bem como as informações referentes à sua validação estatística e os respectivos gráficos com o comparativo entre os valores estimados pelo modelo calibrado e aqueles observados em campo, no mesmo período.

Tabela 7.1: Matriz de correlação linear entre as variáveis testadas – (PTS 2004).

	Fluxo de Veículos	ln(Veic)	1/Veic	Temp Ar	Ln(Temp Ar)	1/Temp Ar	URA	Ln(URA)	1/URA	Vento	ln(Vento)	1/Vento
PTS	0,0550	0,0522	0,0460	0,0344	0,0333	0,0312	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001	0,0041	0,0188
Ln(PTS)	0,1424	0,1303	0,1105	0,0781	0,0703	0,0611	0,0221	0,0234	0,0246	0,0102	0,0390	0,0805
1/PTS	0,1396	0,1213	0,0962	0,0680	0,0584	0,0482	0,0422	0,0461	0,0480	0,0402	0,0948	0,1494
Veículos				0,0686	0,0628	0,0563	0,0034	0,0013	0,0001	0,0211	0,0451	0,0640
ln(Veic)				0,0613	0,0554	0,0489	0,0066	0,0036	0,0013	0,0263	0,0477	0,0618
1/Veic				0,0528	0,0473	0,0412	0,0096	0,0065	0,0034	0,0295	0,0466	0,0556
Temp Ar							0,0655	0,0831	0,1027	0,0076	0,0013	0,0000
ln(Temp Ar)							0,0496	0,0648	0,0822	0,0052	0,0003	0,0001
1/Temp Ar							0,0356	0,0482	0,0634	0,0034	0,0000	0,0009
Umid rel										0,0836	0,1656	0,2179
ln(Umid rel)										0,0667	0,1389	0,1845
1/Umid rel										0,0498	0,1108	0,1486

De acordo com os dados contidos na matriz, destaca-se a correlação entre as variáveis Ln(PTS) e veículos, que é de 0,1424. No que se refere à correlação com as variáveis climáticas, destacam-se as seguintes correlações: Ln(PTS) e Temperatura do Ar (0,0703); Ln(PTS) e 1/UR (0,0480); 1/PTS e 1/Vento (0,01494).

Verão

A análise da matriz de correlação entre a variável dependente (PTS) e as variáveis independentes (fluxo de veículos, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos), indica que a temperatura do ar é a variável independente com maior correlação linear com os níveis de concentração de PTS (-0,782). Isso nos permite afirmar que, nos dias de verão, os níveis de concentração de PTS sofrem uma maior influência com as variações de temperatura. A seguir, está apresentado o modelo de previsão de PTS calibrado para a estação verão.

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{verão}}) = 4,20 + 0,0002 * X_1 - 0,0066 * X_2 - 0,0068 * X_3 - 0,0271 * X_4$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,93$$

$$S_{y(E)} = 0,11$$

Tabela 7.2: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{verão}})$: parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-0,34	-0,67	-2,82	1,56
$t_{\min} (d_f = 2)$	2,92	2,92	2,92	2,92

Nota-se que o modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{verão}})$ apresenta coeficiente de determinação (R^2) muito bom, assim como o valor do erro padrão de estimativa ($S_{y(E)}$), que é pequeno comparado aos valores da variável dependente ($\text{Ln}(\text{PTS})$). A figura 7.1 apresenta um gráfico comparativo entre os valores observados em campo com aqueles previstos pelo modelo calibrado.

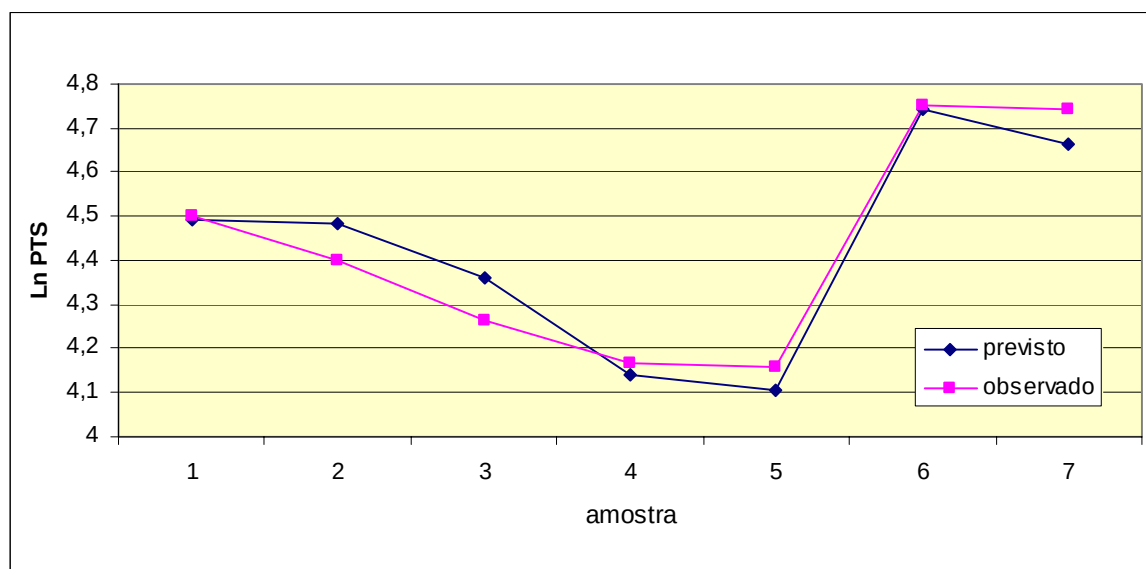


Figura 7.1 – $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{verão}})$ previstas e observadas pelo modelo.

Observando o gráfico da figura 7.1 e considerando os testes de validação estatística do modelo, nota-se que os valores obtidos se aproximam razoavelmente daqueles observados em campo e cujos valores do R^2 e $S_y(E)$, estão dentro dos padrões estatísticos desejados. O teste t-Student, associado às constantes “ b_{is} ” indica que a estimativa da constante X_3 é estatisticamente significativa com nível de confiança maior que 95% (02 graus de liberdade).

Outono

De acordo com a matriz de correlação estatística gerada para esta estação, a variável independente que se mostrou mais fortemente correlacionada com os níveis de concentração de PTS é a variável “UR” (0,775), seguida pela variável “fluxo de veículos” (0,449). O modelo de previsão de PTS calibrado para essa estação é apresentado a seguir:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{outono}}) = 0,0002 * X_1 + 0,2 * X_2 - 0,0015 * X_3 - 0,06 * X_4 + 0,23$$

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

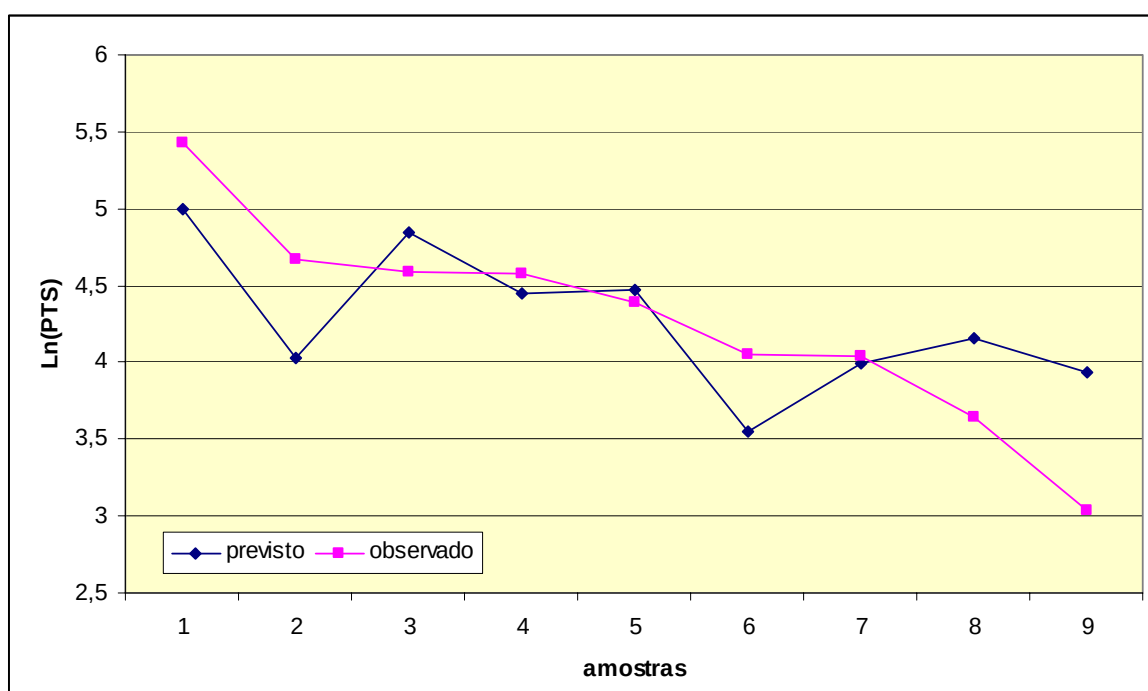
$$R^2 = 0,45$$

$$S_{y(E)} = 0,71$$

Tabela 7.3: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{outono}})$ parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-0,25	-0,37	0,87	1,46
$t_{\min} (d_f = 4)$	2,13	2,13	2,13	2,13

A figura 7.2 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

Figura 7.2 - $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{outono}})$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{outono}})$ calibrado obteve o valor para R^2 de 0,45 e $S_{y(E)}$ de 0,7085. Os valores de “t” associadas às constantes “bi”, conforme apresentados na Tabela 7.3 não são estatisticamente bons conforme o padrão desejado de nível de significantes menor que 5% para (08 graus de liberdade).

Primavera

A análise da matriz de correlação para esta estação climática revelou que a variável independente com maior correlação com variável PTS é a “UR” (0,262), seguida pela variável “temperatura do ar” (-0,239). O modelo calibrado para previsão dos PTS nesse período está apresentado a seguir:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{primavera}}) = 9,7 - 4^{-5} * X_1 - 0,18 * X_2 + 0,003 * X_3 - 0,1155 * X_4$$

onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,31$$

$$S_{y(E)} = 0,76$$

Tabela 7.4: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{primavera}})$ parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-0,58	0,09	-0,68	-0,02
$t_{\min} (d_f = 3)$	2,35	2,35	2,35	2,35

A figura 7.3 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

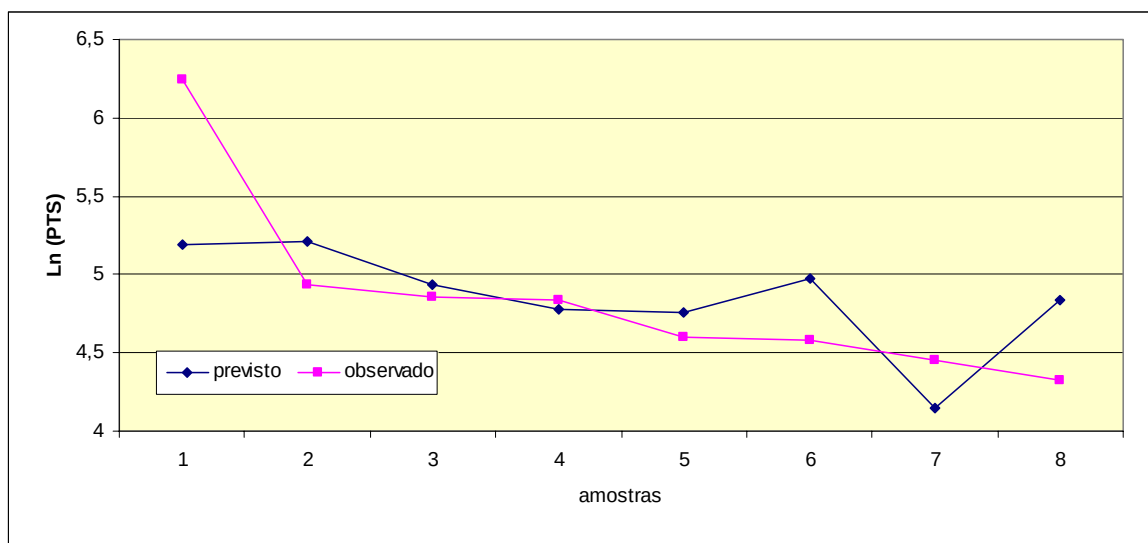


Figura 7.3 - $(\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{primavera}}))$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{primavera}})$ calibrado obteve o valor de R^2 igual a 0,31, enquanto que o valor obtido para $S_{y(E)}$ é 0,7592. Os valores de “t” associados às constantes “bi” conforme apresentados na Tabela 7.4 não são estatisticamente bons conforme o padrão desejado de nível de significantes menor que 5% para 3 graus de liberdade.

Inverno

Para a estação inverno, a matriz de correlação linear aponta que a maior correlação com a variável PTS é a “temperatura do ar” (0,526), seguida pela variável “fluxo de veículos” (0,434). O modelo calibrado para esta estação está apresentado a seguir:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{inverno}}) = 3,62 + 3,4^{-5} * X_1 + 0,02 * X_2 - 0,006 * X_3 + 0,05 * X_4$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em ° C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,51$$

$$S_{y(E)} = 0,22$$

Tabela 7.5: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{inverno}})$ parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	1,43	-1,01	1,01	1,91
$t_{\min} (d_f = 16)$	1,75	1,75	1,75	1,75

A figura 7.4 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

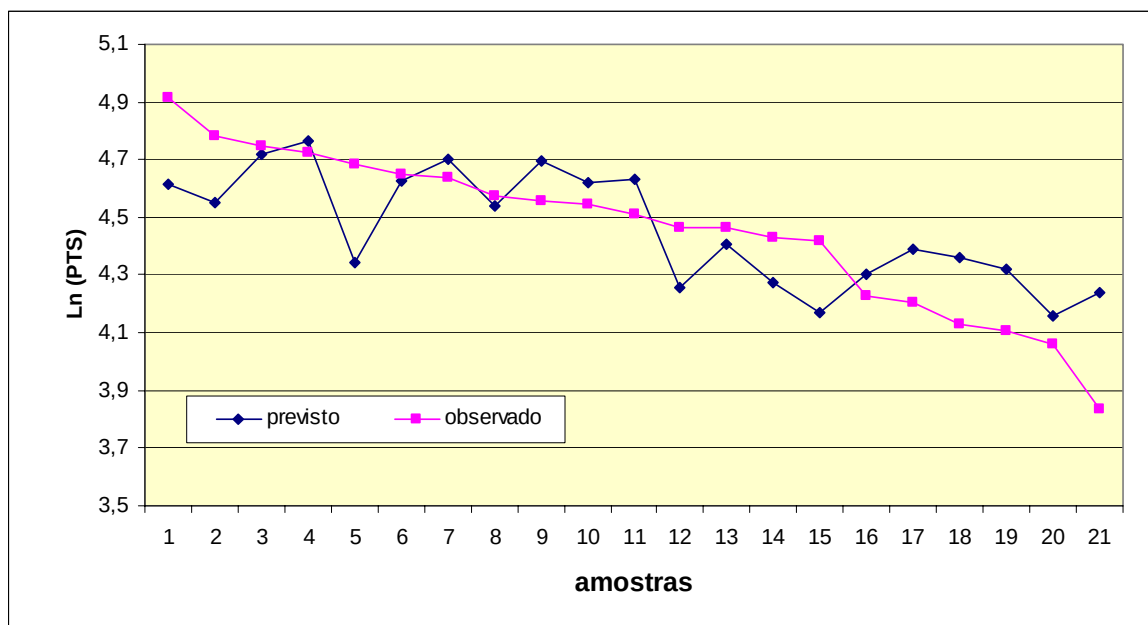


Figura 7.4 - $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{inverno}})$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{inverno}})$ calibrado obteve o valor de R^2 igual a 0,51. O valor obtido para $S_{y(E)}$ é bastante razoável comparado aos valores da variável dependente. A constante “bi” associada à variável X_4 mostrou-se estatisticamente significativa com base no teste t-Student, com nível de significância menor que 5% e 16 graus de liberdade, conforme dados contidos na tabela 7.5.

Em seguida, foram calibrados modelos com os dados organizados a partir do regime pluviométrico da região onde está inserido o município de Uberlândia. Nesse sentido, adotando-se como base o histórico do regime pluviométrico da região, as estações climáticas primavera e verão foram agrupadas como “período chuvoso” e as estações outono e inverno como “período seco”.

Período chuvoso (primavera/verão)

A matriz de correlação linear obtida com os dados referentes ao período chuvoso aponta que a variável independente com maior correlação com os níveis de PTS referem-se à “UR” (0,493) sendo, portanto, a variável mais significativa na calibração do modelo para esse período. O modelo calibrado está apresentado a seguir, juntamente com os testes de validação estatística aplicados.

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}}) = 5,63 + 2,4 * 10^{-05} * X_1 - 0,03 * X_2 - 0,008 * X_3 + 0,004 * X_4$$

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,08$$

$$S_{y(E)} = 0,57$$

Tabela 7.6: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}})$: parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-0,81	-0,49	0,21	2,74
$t_{\min} (d_f = 10)$	1,81	1,81	1,81	1,81

O valor obtido pelo modelo para o R^2 foi de 0,08. O $S_{y(E)}$ mostrou-se estatisticamente válido. Com base no teste t-Student, verificou-se que a constante “bi” associada à variável X_4 é significativa porque o valor de “t” = 2,74 é maior que o valor de “tmin” = 1,81 para um nível de significância menor que 5% e 10 graus de liberdade, conforme dados contidos na tabela 7.6..

A figura 7.5 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

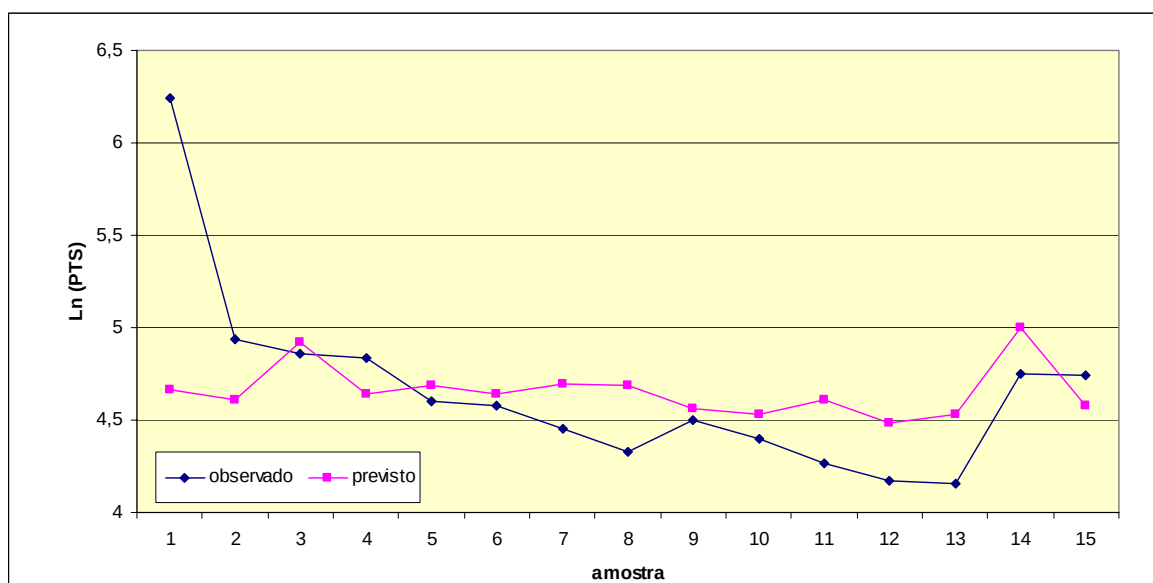


Figura 7.5 - $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}})$ previstas e observadas pelo modelo.

Período Seco

A matriz de correlação linear entre as variáveis consideradas no modelo indica que a variável “veículos” é aquela que apresenta uma maior correlação com os níveis de concentração de PTS (0,381), seguida pela variável “temperatura do ar” (0,361). O modelo gerado para esse período está apresentado a seguir:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}}) = 2,78 + 5,6^{-5} * X_1 + 0,04 * X_2 - 0,003 * X_3 - 0,03 * X_4$$

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,32$$

$$S_y (E) = 0,39$$

Tabela 7.7: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}})$: parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,55	-0,54	1,51	2,12
$t_{\min} (d_f = 25)$	1,71	1,71	1,71	1,71

A figura 7.6 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

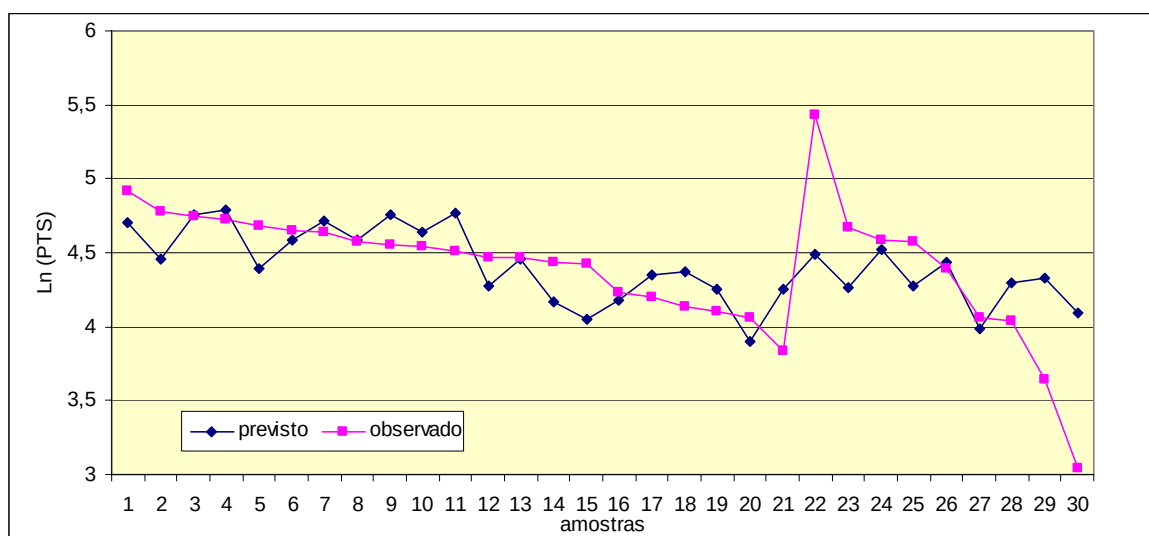


Figura 7.6 $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}})$ previstas e observadas pelo modelo.

O valor obtido para R^2 foi de 0,32, enquanto que o $S_{y(E)}$ foi satisfatório. Com base no teste t-Student, verificou-se que a constante ‘ b_i ’ associada à variável X_4 é estatisticamente significativa porque o valor de $t_4 = 2,12$ é maior que o valor de $t_{\min} = 1,81$ para nível de significância menor que 5% e 25 graus de liberdade, conforme dados contidos na tabela 7.7.

7.1.3 - Partículas Inaláveis (MP_{10})

Para a elaboração do modelo de previsão dos níveis de concentração de MP_{10} foram consideradas 52 amostras diárias, sendo 22 coletadas no inverno, 14 no outono, 09 na primavera e 07 no verão. A Tabela 6.2 apresenta a matriz de correlação linear para os MP_{10} no ano de 2004.

Cada um dos modelos estão apresentados a seguir, com informações referentes à correlação linear entre a variável dependente e as variáveis independentes, bem como informações indispensáveis à sua validação estatística.

Verão

A partir da matriz de correlação linear elaborada para a estação de verão, percebe-se que a variável com maior valor de correlação linear com a variável MP_{10} é a “UR” (0,123). O modelo calibrado para esta estação é apresentado a seguir:

$$(MP_{10\text{verão}}) = \frac{1}{-529,04 * \frac{1}{X_1} + 0,0004 * X_2 - 0,02 * \ln X_3 + 0,003 * \frac{1}{X_4} + 0,13}$$

Onde:

X_1 = fluxo de veículos por dia

X_2 = temperatura do ar em ° C

X_3 = umidade relativa do ar em %

X_4 = velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,073$$

$$S_y (E) = 0,006$$

Tabela 7.8: ($MP_{10\text{verão}}$) parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,39	-0,37	0,26	-0,36
$t_{\min} (d_f = 2)$	2,92	2,92	2,92	2,92

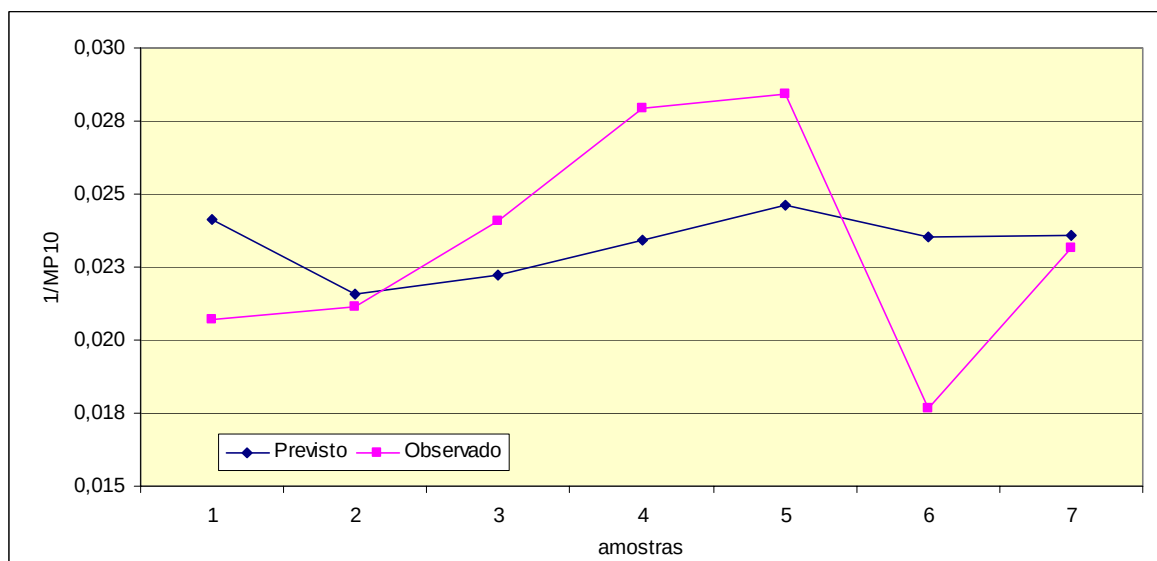


Figura 7.7 – ($MP_{10\text{verão}}$) previstas e observadas pelo modelo

O modelo ($MP_{10\text{verão}}$) apresentou valores de R^2 e $S_{y(E)}$ iguais a 0,073 e 0,0065, respectivamente, enquanto que nenhuma das variáveis do modelo mostrou-se estatisticamente significativa com base no teste t-Student para um nível de significância menor que 5% e com dois graus de liberdade, conforme ilustra a tabela 7.8.

	Fluxo de Veículos	Ln(Veíc)	1/Veic	Temp Ar	Ln(Temp Ar)	1/Temp ar	Umid rel	Ln(umid rel)	1/Umid rel	Vento	LN(Vento)	1/Vento
MP10	0,0068	0,0106	0,0135	0,0271	0,0223	0,0177	0,0832	0,0913	0,0931	0,0016	0,0095	0,0249
ln(MP10)	0,0131	0,0187	0,0230	0,0241	0,0192	0,0146	0,0838	0,0902	0,0908	0,0060	0,0171	0,0377
1/MP10	0,0156	0,0221	0,0274	0,0193	0,0149	0,0109	0,0756	0,0790	0,0778	0,0086	0,0192	0,0392
Veículos				0,0141	0,0132	0,0121	0,0044	0,0012	0,0000	0,0190	0,0585	0,0819
Ln(Veíc)				0,0102	0,0088	0,0075	0,0024	0,0002	0,0002	0,0276	0,0697	0,0909
1/Veic				0,0064	0,0050	0,0038	0,0006	0,0001	0,0014	0,0363	0,0782	0,0959
Temp Ar							0,0560	0,0853	0,1213	0,0004	0,0027	0,0047
ln(Temp Ar)							0,0388	0,0625	0,0926	0,0013	0,0048	0,0069
1/Temp ar							0,0247	0,0429	0,0675	0,0026	0,0072	0,0093
Umid rel										0,1544	0,1851	0,1710
Ln(umid rel)										0,1405	0,1660	0,1486
1/Umid rel										0,1212	0,1423	0,1234

Tabela 7.9: Matriz de correlação linear entre as variáveis testadas – (MP₁₀ 2004).

De acordo com os dados contidos na matriz (Tabela 7.9), destaca-se a correlação entre as variáveis 1/MP₁₀ e Ln(veículos), que é de 0,0274. No que se refere à correlação com as variáveis climáticas, destacam-se as seguintes correlações: MP₁₀ e Temperatura do Ar (0,0271); MP₁₀ e 1/URA (0,0913); 1/MP₁₀ e 1/Vento (0,0392).

Outono

A matriz de correlação estatística da estação outono revela que a variável independente que apresenta a maior correlação com a variável MP_{10} é a “temperatura do ar” (0,181), seguida por “UR” (0,173) e “fluxo de veículos” (0,165). Neste caso, nota-se que cada uma das variáveis independentes atuam de forma razoavelmente equilibrada na definição dos valores de concentração de MP_{10} , com exceção da “velocidade do ar”. A seguir é apresentado o modelo calibrado para a estação de outono.

$$(MP_{10 \text{ outono}}) = -76789,2 * \frac{1}{X_1} + 3,19 * X_2 - 26,80 * \frac{1}{X_3} - 7,02 * \frac{1}{X_4} - 11,15$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,11$$

$$S_y (E) = 21,21$$

Tabela 7.10: ($MP_{10\text{outono}}$): parâmetros do Teste t-student

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-0,61	-0,01	0,90	-0,34
$t_{\min} (d_f = 9)$	1,83	1,83	1,83	1,83

A figura 7.8 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do

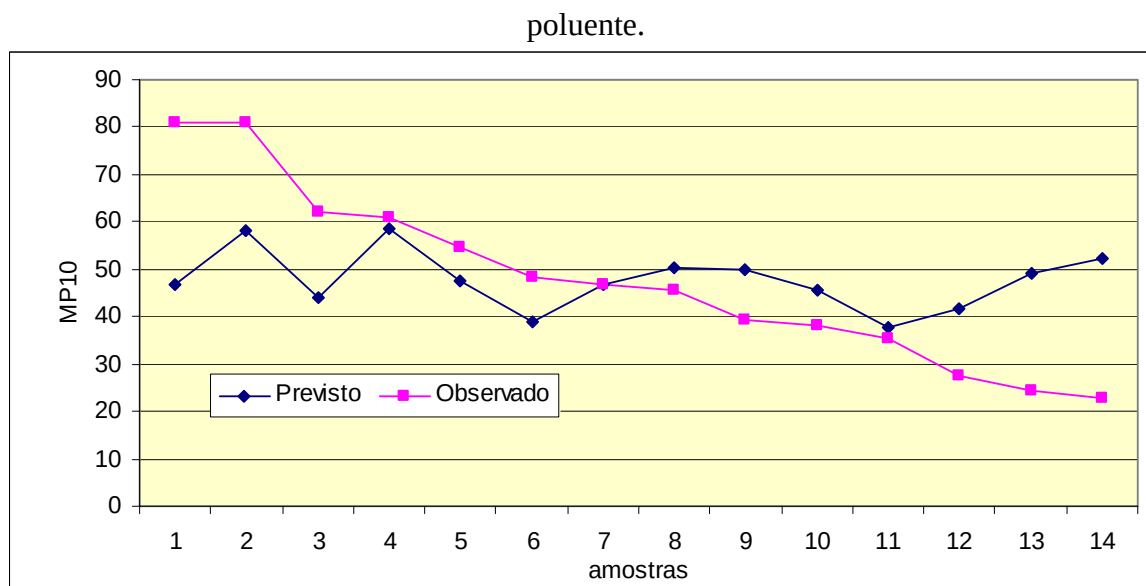


Figura 7.8 - ($MP_{10outono}$) previstas e observadas pelo modelo

O modelo ($MP_{10outono}$) obteve um R^2 igual a 0,11, enquanto que o $S_{y(E)}$ atingiu o valor de 21,2052. Nenhuma das constantes “ b_i ” mostrou ser estatisticamente significativa com base no teste t-Student, porque o valor de $t_{min} = 1,83$ para nível de significância menor que 5% e com 9 graus de liberdade, conforme ilustra a tabela 7.10.

Inverno

Para a estação de inverno, a matriz de correlação estatística revela que a variável com correlação mais forte é a “velocidade do ar” (-0,421) sendo, portanto, a variável independente mais significativa para determinação dos níveis de concentração de MP_{10} nesta estação. A seguir, é apresentado o modelo de previsão de MP_{10} para a estação de inverno.

$$(MP_{10inverno}) = \frac{1}{233,49 * X_1 - 0,00046 * X_2 + 0,004 * X_3 - 0,007 * X_4 + 0,03}$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$R^2 = 0,39$

$S_{y(E)} = 0,004$

Tabela 7.11: (MP_{10inverno}): parâmetros do Teste t-student

	variáveis			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
t _b	0,89	-0,68	-0,99	2,59
t _{min} (d _f = 17)	1,76	1,76	1,76	1,76

A figura 7.9 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

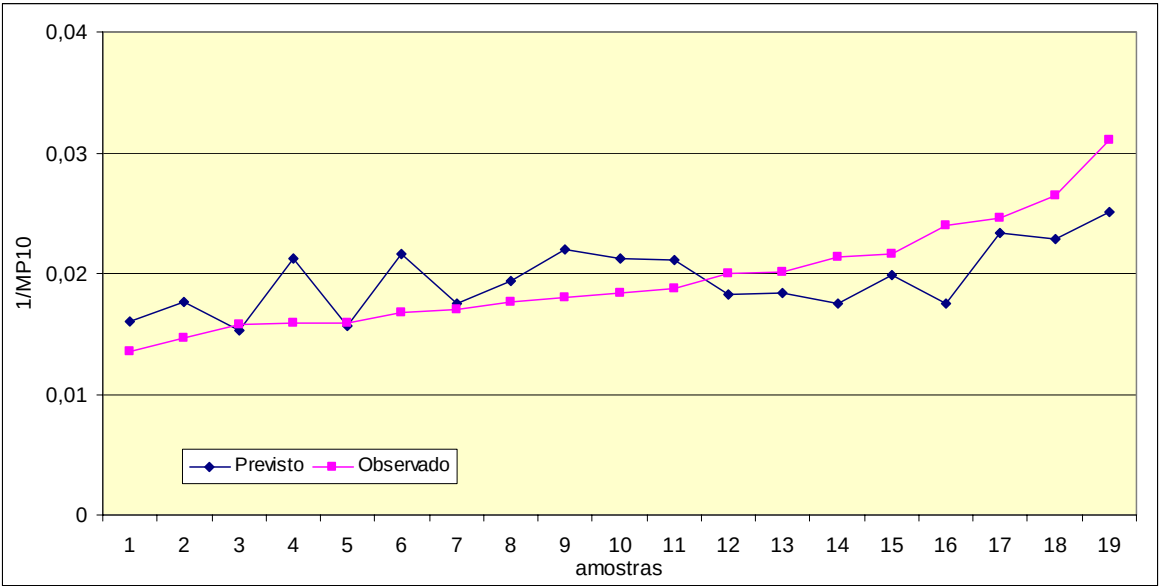


Figura 7.9 - (MP_{10inverno}) previstas e observadas pelo modelo

O modelo (MP_{10inverno}) apresentou um valor de R^2 igual a 0,39, com um $S_{y(E)}$ satisfatório. A constante b_4 associada à variável X_4 mostrou ser estatisticamente significativa com base no teste t-Student porque o valor de $t_{tabela} = 1,76$ para nível de significância menor que 5% e com 17 graus de liberdade, conforme ilustra a tabela 7.11.

Primavera

A matriz de correlação para os dados referentes à estação climática da primavera revelou que a variável independente com a maior correlação estatística com o MP_{10} é a UR (0,188) sendo, portanto, a variável mais significativa para a calibração do modelo de previsão da variável MP_{10} . O modelo calibrado para esse período está apresentado a seguir.

$$(MP_{10\text{primavera}}) = \frac{1}{-331,5 * \frac{1}{X_1} - 0,0005 * X_2 - 0,036 * \ln X_3 + 0,005 * \frac{1}{X_4} + 0,21}$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,89$$

$$S_{y(E)} = 0,002$$

Tabela 7.12: ($MP_{10\text{primavera}}$): parâmetros do Teste t-student

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,58	-3,37	-0,36	-3,45
$t_{\min} (d_f = 4)$	2,13	2,13	2,13	2,13

O modelo ($MP_{10\text{primavera}}$) apresentou bons valores para R^2 e $S_{y(E)}$. Com base no teste t-Student para nível de significância menor que 5% e com 4 graus de liberdade (ver Tabela 7.12), o valor de $t_{\min} = 2,13$, portanto, os valores de $t_{b2} = -3,37$ e $t_{b4} = -3,45$ são boas estimativas estatísticas. A figura 7.10 compara os valores obtidos pelo modelo calibrado com os dados observados em campo para o mesmo período.

A figura 7.10 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

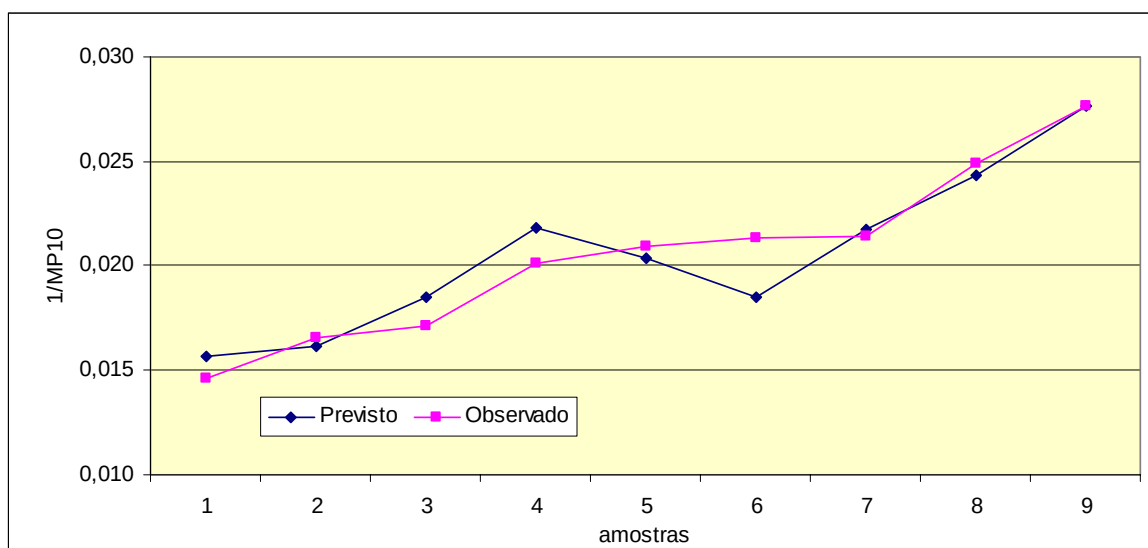


Figura 7.10 - ($MP_{10\text{primavera}}$) previstas e observadas pelo modelo.

Assim, também foram gerados modelos para os períodos chuvoso (primavera/verão) e seco (outono/inverno). Os modelos para o período chuvoso e seco estão apresentados a seguir, juntamente com as validações estatísticas.

Período Chuvoso

Os coeficientes de correlação linear estão apresentados na matriz de correlação do período chuvoso revelam que a variável “fluxo de veículos” apresenta a maior correlação com a variável MP_{10} . Assim, admite-se que o fluxo de veículos, quando comparado às demais variáveis independentes consideradas no modelo, é o fator que mais interfere para a concentração desse poluente no período chuvoso. O modelo calibrado para esse período está apresentado a seguir.

$$(MP_{10 \text{ chuvoso}}) = 526.613,1 * \ln X_1 - 1,43 * X_2 - 2.975,03 * \frac{1}{X_3} - 8,85 * \frac{1}{X_4} + 92,7$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em $^{\circ}C$

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$R^2 = 0,38$

$S_{y(E)} = 8,70$

Tabela 7.13: ($MP_{10\text{chuvoso}}$) parâmetros do Teste t-student

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-1,82	-2,47	-1,29	1,68
$t_{\min} (d_f = 11)$	1,80	1,80	1,80	1,80

A figura 7.11 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

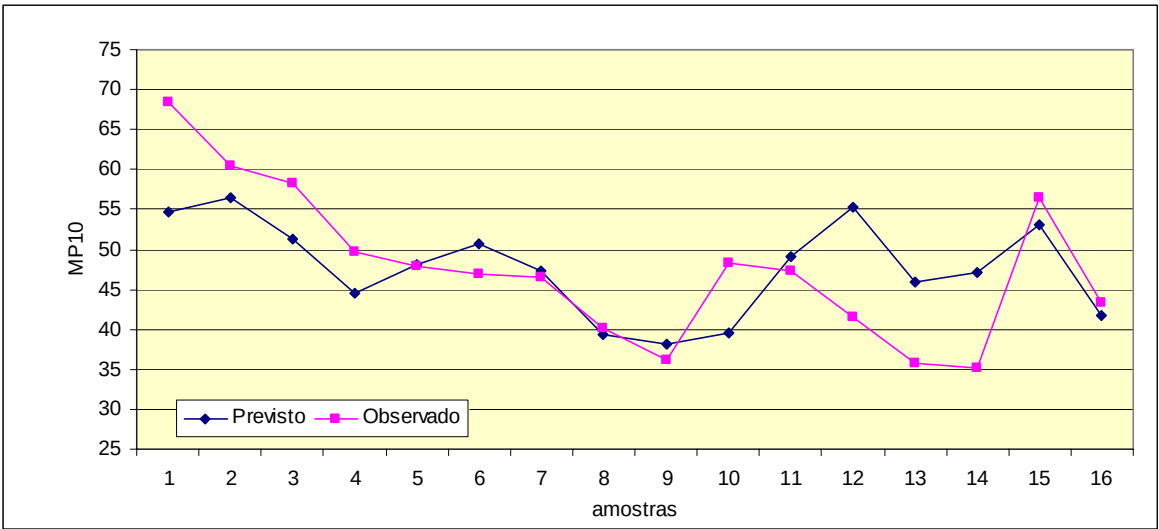


Figura 7.11 - ($MP_{10\text{chuvoso}}$) previstas e observadas pelo modelo.

O modelo ($MP_{10\text{chuvoso}}$) apresentou valores satisfatórios para $S_{y(E)}$. A aplicação do teste t-Student apresentou valores bastante razoáveis, identificando três constantes que atenderam aos níveis de significância estatística estipulados a um nível de confiança de 95% (11 graus de liberdade), conforme exposto na tabela 7.13. O valor obtido para R^2 foi de 0,38.

Período Seco

A matriz de correlação obtida para o período seco revela que a variável independente com maior correlação com o MP_{10} é a UR (-0,253), e o modelo calibrado está apresentado a seguir.

$$(MP_{10\text{seco}}) = \frac{1}{51,5 * \frac{1}{X_1} - 5,9^{-05} * X_2 + 0,009 * \text{Ln}X_3 + 0,0005 * \frac{1}{X_4} - 0,02}$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,15$$

$$S_{y(E)} = 0,008$$

Tabela 7.14: ($MP_{10\text{seco}}$) parâmetros do Teste t-student

	Variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,16	1,31	-0,10	0,74
$t_{\min} (d_f = 31)$	1,70	1,70	1,70	1,70

A figura 7.12 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

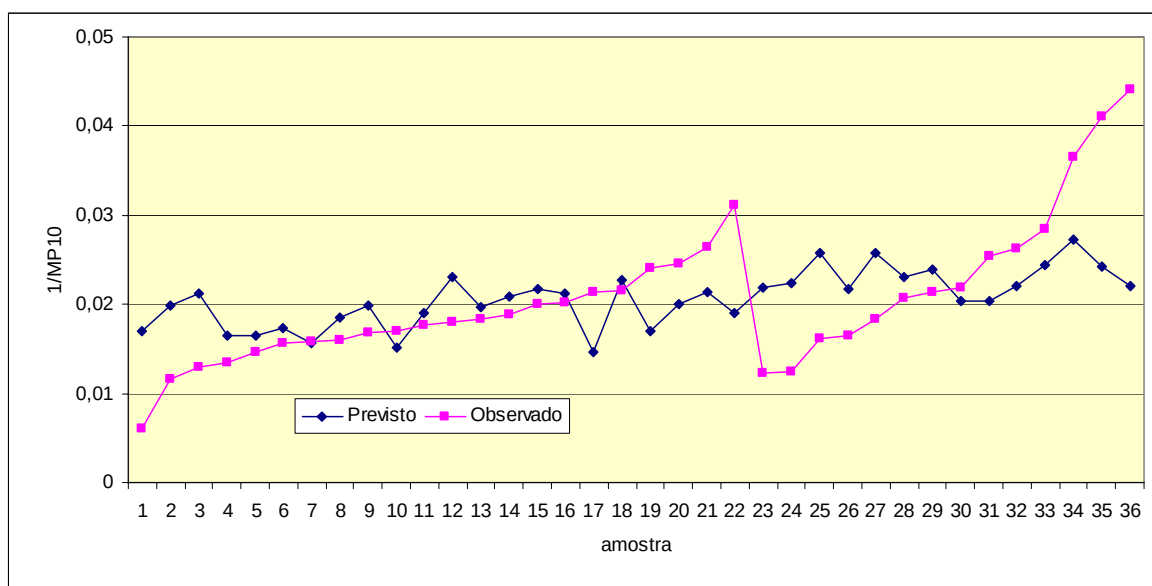


Figura 7.12 – $(MP_{10\text{seco}})$ previstas e observadas pelo modelo.

No que se refere ao modelo $(MP_{10\text{seco}})$, o valor de R^2 obtido foi de 0,15, com um valor de $S_{y(E)}$ razoável. A aplicação do teste t-Student revelou que nenhuma constante “ b_i ” é estatisticamente válida a um grau de confiança de 95% (31 graus de liberdade), conforme dados contidos na tabela 7.14.

7.2 - Análise dos modelos

Conforme apresentado no item anterior, alguns modelos não apresentaram a significância estatística desejada. Tais resultados se devem, em grande medida, às poucas observações disponíveis no decorrer do ano, que produziram poucos graus de liberdade para o teste t-Student. Contudo, a influência de outros fatores que não puderam ser considerados nesses modelos, tais como a atuação das fontes estacionárias de emissão desses poluentes, não podem ser desprezadas.

Um passo importante para a superação desse problema seria a caracterização química da amostra coletada nesses dias, informando a provável fonte emissora do material particulado amostrado, apontando assim se as partículas são oriundas da queima incompleta do combustível utilizado pela maioria dos veículos automotores ou por

processos industriais, por exemplo. Assim seria possível reconhecer a proporção de cada uma dessas fontes no volume analisado a partir da determinação das substâncias identificadas. Tal contribuição possibilitaria confirmar ou não a hipótese da atuação de fontes de emissão de material particulado diferentes do fluxo de veículos automotores na área central da cidade de Uberlândia.

Outra hipótese para a explicação desses fenômenos é a convergência de uma série de fatores antrópicos e ambientais que contribuíram para a geração desse cenário atípico, como a mudança da direção predominante dos ventos conciliado com um fluxo mais intenso de veículos ou de maior emissão de particulados pela atividade industrial ou mesmo por queimadas, direcionando os poluentes à área central da cidade de Uberlândia.

Apesar da impossibilidade de se confirmar cientificamente essa hipótese no momento, admite-se que em determinadas datas as fontes estacionárias acabaram determinando uma concentração atípica dos poluentes, invalidando assim algumas amostras na perspectiva da execução da proposta desse trabalho, que é a criação de um modelo a partir da consideração de variáveis de fluxo de veículos e de natureza climatológica/atmosférica.

As amostras foram reorganizadas em períodos determinados a partir do regime pluviométrico típico da região de Uberlândia, que é um fator ambiental preponderante para a determinação dos níveis de concentração de poluentes atmosféricos (período seco e período chuvoso).

7.2.1 - PTS

No que se refere aos modelos de previsão de PTS foram observadas melhoras significativas nos coeficientes de determinação e nos resultados do teste t-Student para cada uma das constantes “ b_i ” para o período seco e, especialmente, para o período chuvoso.

A seguir serão apresentados os modelos calibrados com base nos dados considerados mais relevantes e sem os valores alheios aos padrões de regularidade adotados.

Período Chuvoso

Modelo obtido:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso(b)}}) = 0,0002 * X_1 - 0,06 * X_2 - 0,006 * X_3 + 0,05 * X_4 + 4,0$$

Onde:

X₁ é o fluxo de veículos por dia

X₂ é a temperatura do ar em ° C

X₃ é a umidade relativa do ar em %

X₄ é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,80$$

$$S_y (E) = 0,14$$

Tabela 7.15: parâmetros do Teste t-student para o modelo

	Variáveis			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
t _b	1,62	-2,24	-3,76	3,85
t _{min} (d _f = 7)	1,89	1,89	1,89	1,89

A figura 7.13 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente

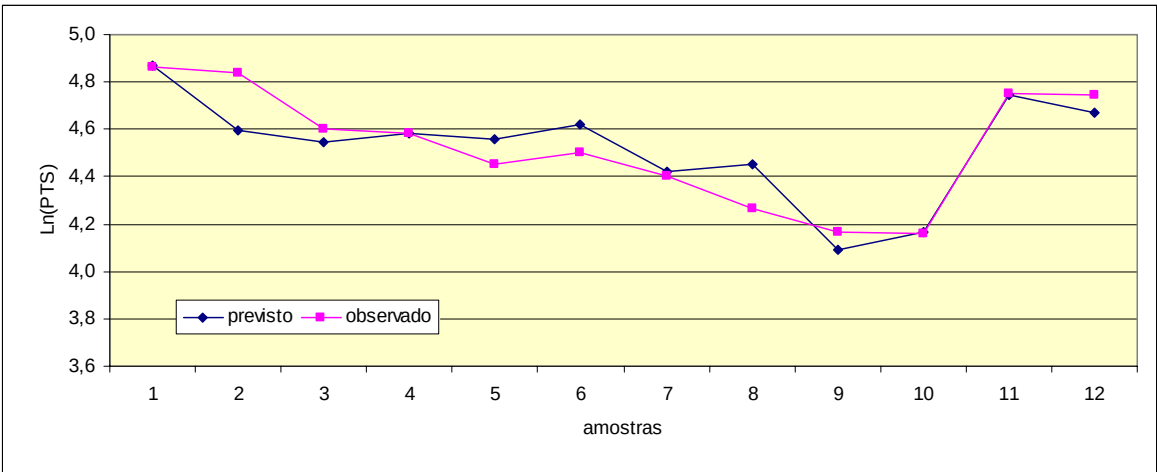


Figura 7.13: Ln(PTS_{chuvoso(b)}) previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}(b)})$ apresentou um R^2 bom, assim como o $S_{y(E)}$. A aplicação do teste t-Student revela que três constantes mostraram-se estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95% (7 graus de liberdade), conforme ilustra a tabela 7.15. A figura 7.13 apresenta um gráfico comparativo com os valores obtidos pelo modelo com aqueles observados em campo. Nota-se que os valores obtidos pelo modelo estão razoavelmente próximos daqueles monitorados pelo AGV.

Período Seco

Modelo obtido:

$$\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}(b)}) = 0,00004 * X_1 + 0,03 * X_2 + 0,0003 * X_3 + 0,026 * X_4 + 3,0$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,45$$

$$S_{y(E)} = 0,22$$

Tabela 7.16: parâmetros do Teste t-student para o modelo

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,89	0,08	2,00	2,78
$t_{\min} (d_f = 22)$	1,72	1,72	1,72	1,72

A figura 7.14 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

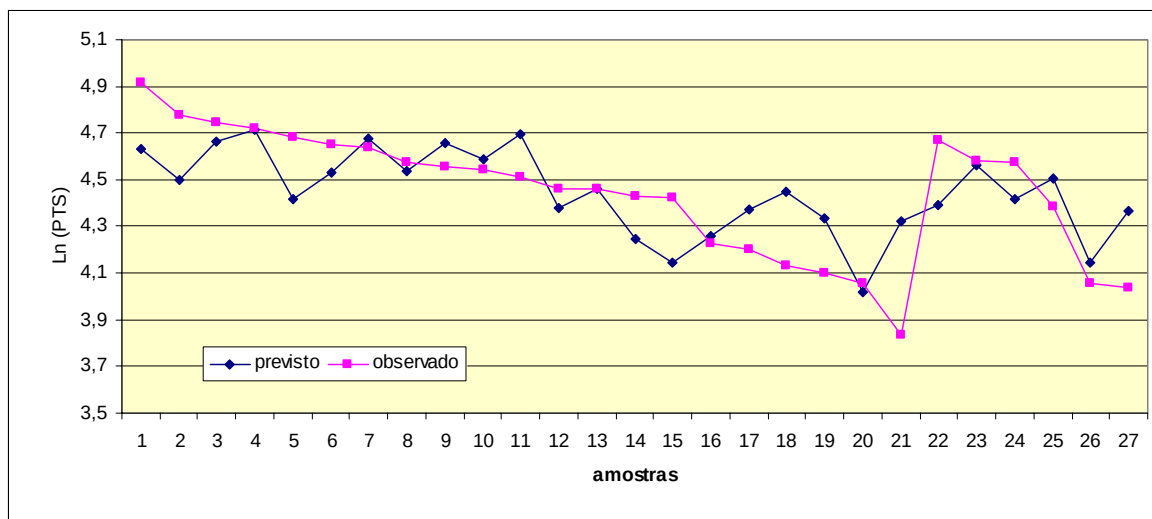


Figura 7.14 - $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}(b)})$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{seco}(b)})$ apresentou um R^2 com valor igual a 0,45 e um $S_{y(E)}$ satisfatório. Quanto ao teste t-Student, duas constantes são estatisticamente significativas a um grau de confiança de 95% e 22 graus de liberdade, conforme verifica-se na tabela 7.16.

7.2.2 - MP_{10}

Após a eliminação de algumas observações não-confiáveis, verificou-se melhorias também nos testes de validação dos modelos gerados para o período chuvoso e seco, tornando-os, portanto mais significativos que aqueles calibrados anteriormente.

Período Chuvoso

Modelo obtido:

$$(\text{MP}_{10 \text{ chuvoso}(b)}) = 711.790,7 * \text{Ln}X_1 - 2,75 * X_2 - 4388,3 * \frac{1}{X_3} - 20,5 * \frac{1}{X_4} + 138,7$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,73$$

$$S_{y(E)} = 6,20$$

Tabela 7.17: parâmetros do Teste t-student para o modelo

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	-4,05	-4,65	-3,10	3,10
$t_{\min} (d_f = 9)$	1,83	1,83	1,83	1,83

A figura 7.15 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

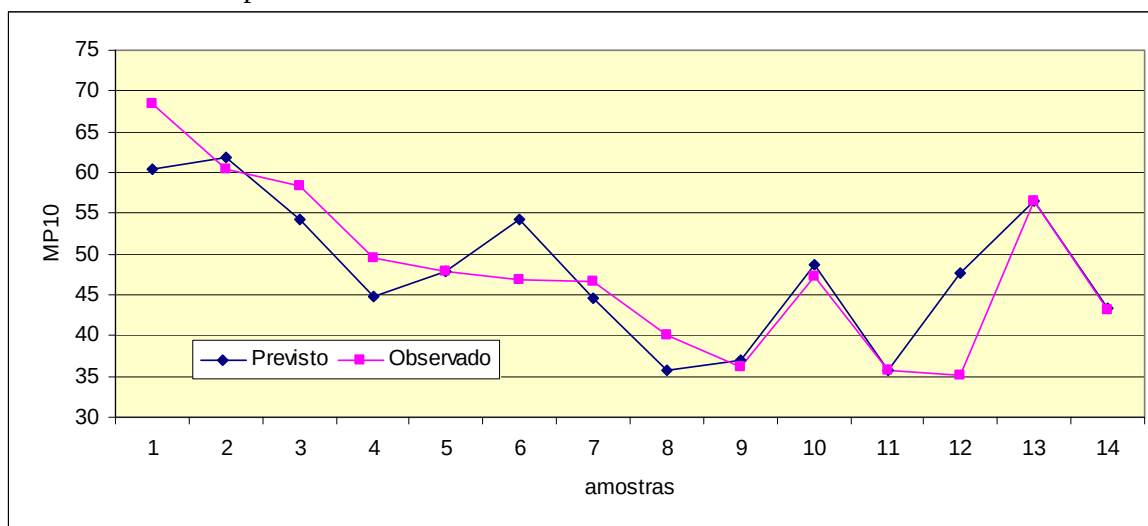


Figura 7.15 - $MP_{10\text{chuvoso}(b)}$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $MP_{10\text{chuvoso}(b)}$ apresentou um R^2 ligeiramente superior ao padrão estipulado (0,73). O $S_{y(E)}$ obtido também atende aos padrões adotados pela pesquisa. Quanto ao teste t-Student, todas as constantes " b_i " testadas se mostraram estatisticamente significantes porque os valores de t para as constantes " b_i " foram maiores que o valor de $t_{\min} = 1,83$ para 9 graus de liberdade, conforme ilustra a tabela 7.17.

Dessa forma, o modelo calibrado para o período apresentou bons indicadores estatísticos, sendo, portanto, adequado à previsão dos níveis de concentração de MP_{10} no período chuvoso, que correspondem às estações de primavera e verão. A figura 7.15 apresenta um

gráfico comparativo entre os valores obtidos pelo modelo calibrado com aqueles coletados em campo.

Período Seco

Modelo obtido:

$$(MP_{10\text{seco}(b)}) = \frac{1}{115,2 * \frac{1}{X_1} - 0,0004 * X_2 + 0,002 * \ln X_3 + 0,002 * \frac{1}{X_4} + 0,012}$$

Onde:

X_1 é o fluxo de veículos por dia

X_2 é a temperatura do ar em °C

X_3 é a umidade relativa do ar em %

X_4 é a velocidade do ar em m/s

$$R^2 = 0,38$$

$$S_{y(E)} = 0,005$$

Tabela 7.18: parâmetros do Teste t-student para o modelo

	variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
t_b	0,96	0,32	-0,97	2,02
$t_{\min} (d_f = 25)$	1,71	1,71	1,71	1,71

A figura 7.16 compara os valores previstos pelo modelo com aqueles observados pelo monitoramento do poluente.

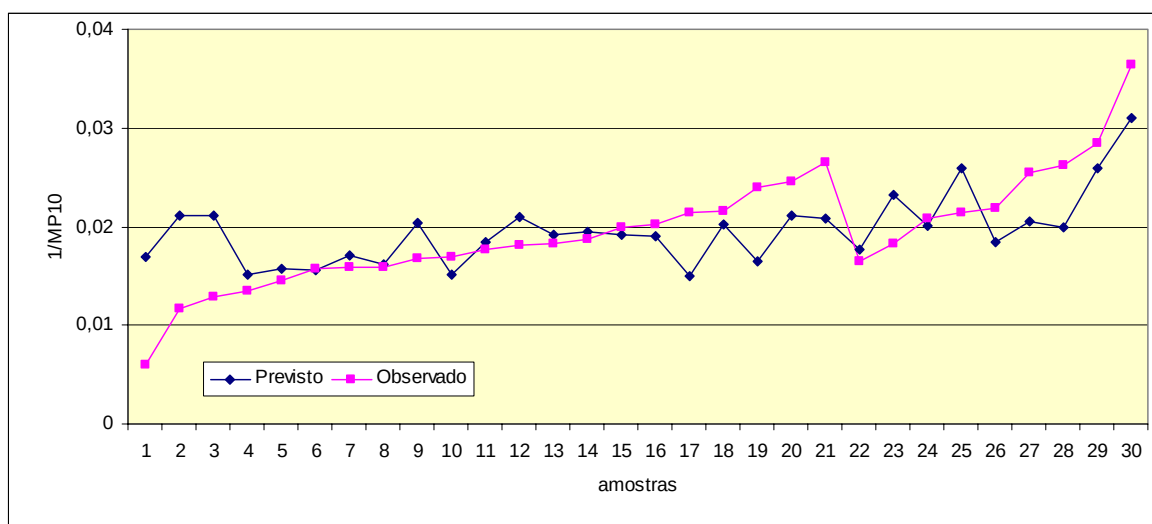


Figura 7.16 - $MP_{10 \text{ seco}(b)}$ previstas e observadas pelo modelo.

O modelo $MP_{10 \text{ seco}(b)}$ apresentou um valor de R^2 igual a 0,38, enquanto que o valor do $S_{y(E)}$ mostrou-se satisfatório. A aplicação do teste t-Student revelou que nenhuma das constantes “ b_i ” são estatisticamente significativas a um grau de confiança de 95% (25 graus de liberdade).

7.3 - Aplicação dos modelos

Após a eliminação dos *out-liers*, observa-se que dois modelos atenderam aos parâmetros adequados de validação estatística: $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}(b)})$ e $(MP_{10\text{chuvoso}(b)})$. Os demais modelos que não atenderam a esses parâmetros devem ser mais explorados, procurando, inicialmente, obter mais valores, aumentando assim a série de observações empregadas no processo de calibração.

Com vistas ao reconhecimento da influência do tráfego de veículos na concentração dos PTS na atmosfera, o modelo $\text{Ln}(\text{PTS}_{\text{chuvoso}(b)})$ assume que, mantidas constantes as condições do comportamento climático⁸, ou seja, temperatura do ar, UR e velocidade do ar, existe uma relação direta entre a variação do tráfego de veículos no cruzamento com a variação da concentração desse poluente, conforme ilustra o gráfico contido na figura 7.17.

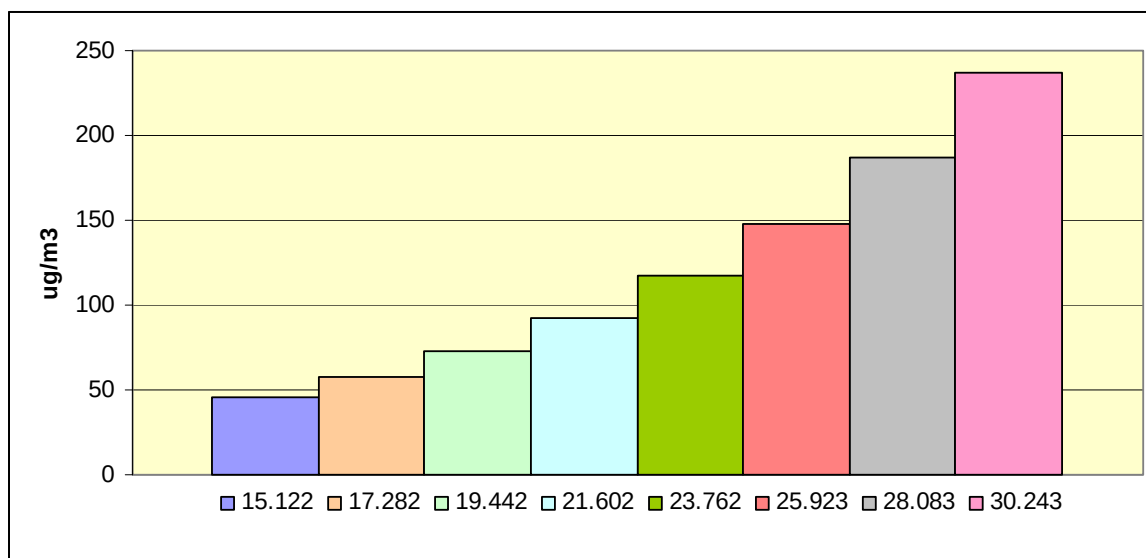


Figura 7.17 – Relação Fluxo de Veículos x PTS (fluxo médio do modelo: 21.602 vpd)

Segundo os dados levantados, a cada variação de 10% a partir do fluxo médio de veículos por dia na Avenida João Pinheiro ocorre uma variação constante de 26,45% na concentração de PTS no local.

Considerando-se as médias geométricas anuais (M.G.A) instituídas como padrões primários e secundários de concentração desse poluente pela Resolução CONAMA 03/90, observa-se que, ao adotar como parâmetros do comportamento climático as médias de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do ar referentes aos dias aproveitados para a calibração dos modelos, que o fluxo diário no cruzamento de aproximadamente 21.300 veículos é suficiente para que os níveis de concentração desse poluente ultrapasse a M.G.A do padrão primário ($80,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), enquanto que um fluxo de aproximadamente 18.000 veículos é suficiente para ultrapassar os padrões secundários ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

No que se refere à previsão do MP_{10} , o modelo ($\text{MP}_{10\text{chuvoso(b)}}$) indica que, mantidas as mesmas condições⁹ de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do ar, também existe uma relação direta entre a variação do fluxo de veículos e a variação dos níveis de concentração de MP_{10} . A figura 7.18 apresenta um gráfico que ilustra esse fato.

⁹ Temperatura média: 25°C; URA: 65,5%; Velocidade média dos ventos: 2,4 m/s

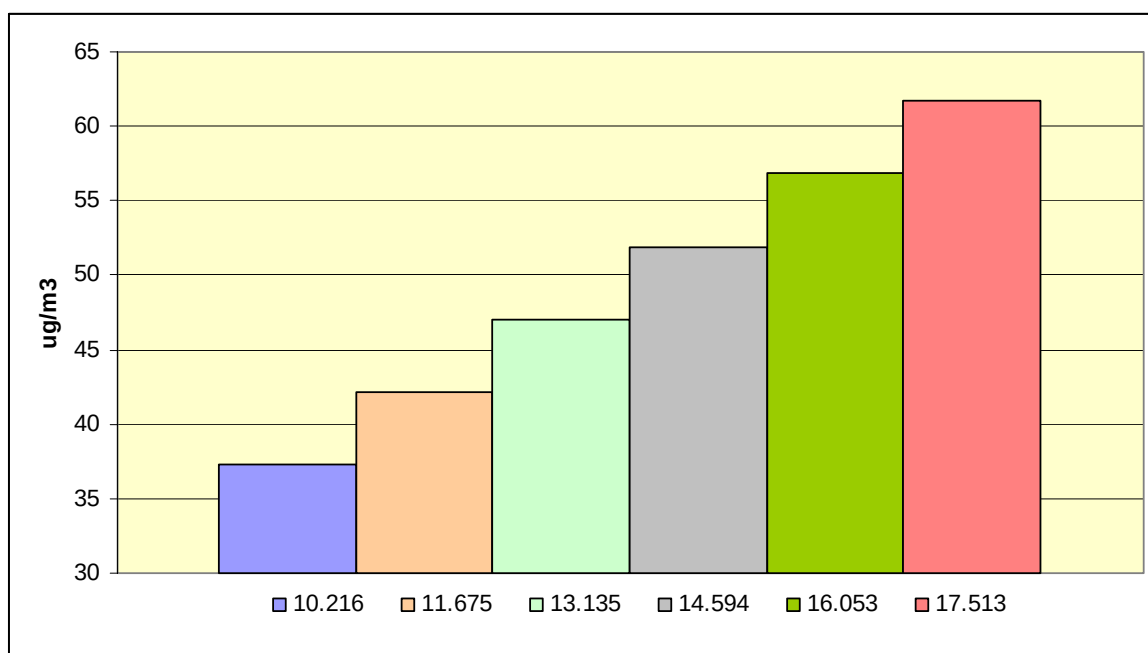


Figura 7.18 – Relação Fluxo de Veículos x MP₁₀ (fluxo médio do modelo: 14.594 vpd)

O modelo indica que, a cada variação de 10% do fluxo médio de veículos na avenida João Pinheiro resulta numa variação de cerca de $4,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de MP₁₀ no local.

Considerando que a Resolução CONAMA 03/90 estabelece como padrões primários e secundários de concentração de MP₁₀ na atmosfera a média aritmética anual (M.A.A) e, adotando-se ainda os valores médios de cada variável do comportamento atmosférico considerado para calibração do modelo, estima-se que, para o período chuvoso, o fluxo diário de aproximadamente 14.050 veículos por dia na avenida João Pinheiro (ou 20.800 se considerarmos todo o cruzamento) é suficiente para que se ultrapasse o limite legalmente instituído para a M.A.A desse tipo de poluente ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

⁹ Temperatura média: 24°C; URA: 73,3%; Velocidade média dos ventos: 2,1 m/s

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os níveis de qualidade do ar no ambiente densamente urbanizado, como é o caso da região central da cidade de Uberlândia, não dependem apenas da quantidade de emissões de poluentes despejados diariamente na atmosfera do lugar, seja pelo tráfego de veículos ou por outras fontes. As condições de dispersão/diluição desses elementos (umidade, ventos, precipitação, temperatura) também devem ser encaradas como fatores de fundamental importância para a consideração dos níveis de concentração dos poluentes atmosféricos, especialmente dos materiais particulados – particulados totais (PTS) e partículas inaláveis (MP₁₀).

O melhoramento dos níveis de qualidade do ar nas médias e grandes cidades requer uma série de medidas de controle das fontes de poluição. A utilização dos combustíveis com teores mais baixos de emissão de poluentes (etanol e biodiesel) devem ser estimuladas. O planejamento de ações de conscientização e sensibilização dos diversos atores sociais e econômicos envolvidos nessa problemática constitui-se num dos pilares para o sucesso de qualquer programa de controle da qualidade do ar, seja em escala local, regional ou nacional.

No que se refere especificamente aos níveis de concentração de PTS e MP₁₀, as preocupações devem se basear, especialmente, na efetivação de projetos que se pautem:

- No melhoramento da qualidade dos combustíveis utilizados pelos veículos automotores movidos a diesel e gasolina, especialmente. Em termos de emissão de material particulado, combustíveis como o álcool anidro e o bio-diesel são alternativas tecnicamente mais favoráveis, visto que diminuem sensivelmente o nível de produção desse poluente. Tecnologias híbridas já estão sendo comercializadas de forma efetiva na Europa e Estados Unidos da América. Os automóveis híbridos se caracterizam pelo fato de que seus motores à explosão são

auxiliados pelos motores elétricos (híbrido-paralelo) ou, como ocorre no método mais difundido, a tração do veículo é realizada por motores elétricos, sendo restrito ao motor à explosão, a tarefa de movimentar o gerador que movimenta o motor elétrico e carregar as baterias (híbrido-série).

- No incentivo à maior utilização do serviço público de transporte coletivo. Para tal, é necessário também que os esforços voltados às melhorias dos níveis de serviço dos sistemas de transporte oferecidos para as populações urbanas, a ponto de proporcionarem maior qualidade e confiabilidade do serviço aos usuários, tornando-se uma opção viável para o deslocamento das pessoas no cotidiano de suas atividades econômicas.
- Re-planejamento do uso do solo urbano, visando medidas de maior eficiência do sistema viário. Instrumentos de planejamento, como o Plano Diretor Municipal, devem inserir o tema da qualidade do ar como um dos pilares para a melhoria da qualidade ambiental almejada pelos gestores municipais.

Os níveis de emissão de poluentes pelo escapamento dos automóveis variam de acordo com o combustível utilizado. Dentre os combustíveis mais utilizados no Brasil, o etanol e o gás natural são aqueles que representam as melhores opções em termos de emissão de material particulado, visto que a combustão desses combustíveis não liberam esse tipo de poluente. Contudo, estima-se que apenas 25,8% dos veículos que trafegam no cruzamento utilizam o etanol como combustível.

O transporte coletivo de passageiros na cidade de Uberlândia é efetuado com ônibus equipados com motores de ciclo Diesel, e corresponderam a cerca de 63% dos veículos movidos à óleo diesel na avenida João Pinheiro e 75% do fluxo do fluxo diário desse tipo de veículo no cruzamento. Independentemente da melhor relação “emissão de material particulado/passageiro transportado”, quando se considera os expressivos índices de emissão de material particulado ocasionado por esses motores (0,57g/km), pode-se afirmar que os veículos do transporte coletivo têm um peso significativo na determinação dos índices de qualidade do ar no referido cruzamento, o que justifica a implantação de

medidas de substituição da tecnologia de propulsão desses veículos em médio prazo ou mesmo a massificação do uso de biocombustíveis na frota de veículos que operam no transporte coletivo. Alternativas como a adoção de veículos com tração elétrica também devem ser consideradas nesse contexto.

Um outro fator que não pode ser desprezado é o fato de que o atrito dos pneus com a superfície, independente do combustível utilizado, produz uma quantidade significativa de material particulado. Além disso, o simples deslocamento dos veículos pela pista de rolagem ocasiona a ressuspensão dos poluentes ali depositados, o que contribui de maneira efetiva para a deterioração da qualidade do ar mesmo em veículos movidos a álcool ou a gás natural.

A maior proporção de veículos no cruzamento das avenidas João Naves de Ávila e João Pinheiro corresponde àqueles de motor ciclo Otto (61,0%), seguidos pelos veículos de motor ciclo Diesel (21,9%) e pelas motocicletas (17,1%)

Conforme dados dispostos na tabela 6.5, admite-se que 65,1% do combustível utilizado nos veículos de motores de ciclo Otto seja a gasolina, enquanto que o restante (34,9%) seja o etanol (álcool etílico). Adotando-se essa relação para o contexto uberlandense, pode-se afirmar que cerca de 2 a cada 3 litros de combustível consumido por automóveis de motor Otto no cruzamento em questão seja a gasolina.

Paralelamente ao monitoramento da concentração de poluentes atmosféricos, tais como o material particulado, a calibração dos modelos de previsão desenvolvidos nesse trabalho pode servir como instrumento complementar para a identificação das causas dos fenômenos de poluição na atmosfera da região, bem como para a discriminação do fator de contribuição de cada fonte poluidora, seja móvel ou estacionária. Além disso, contribuem, conseqüentemente, para a predisposição e verificação dos planos de melhoria da qualidade ambiental da região (Moreira e Tirabassi, 2004) e do planejamento urbano num sentido mais amplo.

A eliminação de algumas amostras não-confiáveis (out-liers), na tentativa de aproximação dos modelos a um cenário típico de emissão de poluentes, fluxo de veículos e de

comportamento atmosférico resultou em melhorias significativas em todos os modelos estabelecidos. Contudo, apenas os modelos referentes ao período chuvoso (primavera/verão) mostraram-se estatisticamente significativos após a aplicação dos testes de validação: $\text{Ln}(\text{PT}_{\text{Chuvoso}(b)})$ e $(\text{MP}_{10\text{chuvoso}(b)})$.

Instrumentos básicos e sugestões para futuras pesquisas

O primeiro passo para o subsídio a pesquisas sobre a qualidade do ar deverá consistir na implantação de uma rede de monitoramento local, atendendo aos seguintes critérios e necessidades:

- posicionamento estratégico das bases de monitoramento, contemplando preferencialmente cruzamentos de grande fluxo de veículos (fontes móveis) e regiões com grande concentração de fontes estacionárias de poluentes (complexos industriais);
- Possibilitar o mapeamento da qualidade do ar para no município de Uberlândia, representando a distribuição espacial dos poluentes para diferentes períodos de tempo (diários, semanais, mensais e/ou anuais). Incentivar a união de conceitos de Engenharia de Tráfego, qualidade ambiental e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para pesquisas realizadas na cidade de Uberlândia, tal qual o trabalho desenvolvido por Carneiro (2006) na cidade de Florianópolis – SC é um desafio a ser encarado com seriedade por cientistas e gestores do espaço urbano dessa cidade.
- ampliação do número de poluentes monitorados. O monitoramento de poluentes como o CO_2 são imprescindíveis para que se possa subsidiar medidas concretas e efetivas para o controle da qualidade do ar no ambiente urbano, tendo em vista sua contribuição para a determinação da qualidade do ar em cidades de porte médio, como Uberlândia. Tal medida também é fundamental para a elaboração de modelos de previsão dos níveis de concentração desses poluentes, bem como para o mapeamento de qualidade do ar;
- integração de bases de monitoramento locais com outras redes de monitoramento implantadas no estado de Minas Gerais, sob a supervisão da Fundação Estadual do Meio

Ambiente - FEAM, bem como a proposição de um eventual termo de cooperação técnica-científica com a rede de monitoramento de poluição atmosférica do estado de São Paulo, gerenciada pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Tal medida representa um avanço para as políticas ambientais dos dois estados, o que implica em vantagens diretas às pesquisas desenvolvidas nesses pólos, possibilitando ainda a abertura de um leque de informações a serem utilizadas e (re) trabalhadas de acordo com os interesses e objetivos de cada um dos atores, desde que preservada a autonomia de gestão dos dados monitorados por cada uma dessas instituições.

Cabe ressaltar, nesse momento, a necessidade de implantação de novas estações meteorológicas para o monitoramento de variáveis que configuram o comportamento atmosférico, a fim de complementar o levantamento dos dados de concentração de poluentes. Deve-se buscar a implantação dessas estações em sintonia com os locais estrategicamente selecionados para a alocação das bases de monitoramento dos poluentes, o que provavelmente resultará numa maior acurácia e representatividade para os modelos e mapas a serem gerados.

- Elaboração de um plano de re-ordenamento do tráfego na área central da cidade de Uberlândia. Medidas interessantes na perspectiva do melhoramento da qualidade do ar devem privilegiar o a fluidez do tráfego de veículos, aumentando a velocidade média dos deslocamentos, como a implantação de trincheiras/viadutos nos cruzamentos onde o fluxo de veículos é mais intenso (João Naves / João Pinheiro, por exemplo). Outras medidas a serem consideradas são aquelas oriundas do planejamento urbano no sentido de estimular a maior dispersão de atividades para outras áreas da cidade e não apenas a concentração na área central.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. M; CALAZANS, A.R; BRIKUS, L. S. R. et al. **Avaliação de poluentes químicos e material particulado no ar de interiores de residências no Rio de Janeiro.** Disponível em <<http://www.s bq.org.br/ranteriores/23/resumos/0856/index.html>> Acessado em 16/07/2007.

AMORIM. **Monitoramento da concentração e caracterização do material particulado suspenso na atmosfera.** Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2004.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** Tradução por Maria Juraci Zani dos Santos. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

BOÇON, F.T. **Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Pos- Graduação em Engenharia Mecânica, 1998.

CARNEIRO, R. M. A. **Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica:** uma contribuição para a saúde da comunidade. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, 2004.

CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (Coordenador). **Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia.** Disponível em < www.biodiesel.gov.br/docs/relatoriofinal.pdf> Acessado em 09/07/2007.

CASTANHO, A.D.A. **A Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Química, 1999.

CIOQUETA, D.R; ROSSY, A.S; SILVERIO,B.C; LIMA, E.A.P; BARROZO, M.A.S. **Análise da distribuição de emissões particuladas no ar atmosférico na cidade de Uberlândia – MG.** In Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia, ENEMP, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Avaliação da Qualidade do ar no município de Ribeirão Preto.** Período 04/08/2004 a 31/03/2006. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_geral.asp> Acessado em 08/07/2007.

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo.** Série Relatórios 2005. Disponível em < http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_geral.asp> Acessado em 06/07/2007.

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo.** Série Relatórios 2006. Disponível em < http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_geral.asp> Acessado em 06/07/2007.

Ciclo Otto: Introdução. Disponível em <<http://www.ms pc.eng.br/termo/termod3B.asp>> Acessado em 16/07/2007.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Considerações sobre a poluição do ar em Curitiba – PR face a seus aspectos de urbanização**. R. RA’EGA, Curitiba, n. 4, p. 101-110. 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Análises Energéticas e Dados Agregados - 2005**. Disponível em <http://www.ben.epe.gov.br/ben2006_capitulo1.aspx> Acessado em 08/07/2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – FEEMA/RJ. **Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em <http://www.feema.rj.gov.br/admin_fotos/INVENTARIO_%20Relatorio.pdf> Acessado em 16/07/2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM/MG. **Monitoramento da qualidade do ar na região metropolitana de Belo Horizonte** – Período de 2003 e 2004. Belo Horizonte, 2005. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/relatorio_de_qualidade_ar_2003-2004.pdf> Acessado em 16/07/2007.

GUIA DEL USUARIO DEL MODELO SCREEN 3. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina, 2000. Disponível em <www.epa.gov/ttn/catc/dir2/scrn3ds.pdf> Acessado em 16/07/2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades@**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>> Acessado em 05/01/2006.

KAZMIER, L.J. **Estatística Aplicada à Economia e Administração**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. Coleção Schaum.

LANDIM, P.M.B. **GEOEAS: um exemplo de aplicação em análise geoestatística**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório de Geomatemática, Texto Didático 11, 41 pp. 2003. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acessado em 06/07/2007.

LEITE, V.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, UFV: Impr. Univ., 1991.

LIMA, P.H.F; OLIVEIRA, M.B; FERREIRA, C.A.M et al. **Estudos da poluição veicular em Juiz de Fora – MG**. In: X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Juiz de Fora, MG. Disponível em <<http://geografia.igeo.uerj.br/xsbgfa/cdrom/eixo3/3.4/291/291.htm>> Acessado em 16/07/2007.

LIU, B.W.Y; FIORAVANTE, E.F; DUTRA, E.G. et al. **Monitoramento da qualidade do ar: as concentrações de partículas inaláveis (PM10) na região metropolitana de Belo Horizonte entre 1995 e 2002**. Disponível em <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/t013.pdf>> Acessado em 16/07/2007.

- MARTINS, C.M et al. **Poluição Atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil**. Revista Saúde Pública, São Paulo, n 36, vol 1, pág. 88-94, 2002. Disponível em <www.fsp.usp.br/rsp>. Acessado em 08/07/2007.
- MENDES, F.B; SILVA, C.A; JAFELICE, R.S.M. **Modelagem da interação clima x poluição em Uberlândia**. FAMAT em Revista, nº 04, abril de 2005. Disponível em <<http://www.famat.ufu.br/revista/indices/indicetrabalhosensino.htm>> Acessado em 09/07/2007.
- MICROSOFT. **Office Excell 2003**. Parte do produto Microsoft Office Professional Edição 2003. Microsoft Corporation, 1985-2003.
- MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. **Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental**. Revista Ambiente e Sociedade – Volume VII, nº2, jul./dez. 2004. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v7n2/24693.pdf>> Acessado em 28/08/2007.
- OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Porto Alegre: Globo, 1971.
- REIS, J.N.W; FARIA, Carlos. A. **Análise e Avaliação de Sistemas de Transportes Urbanos**. Uberlândia, 2001. Iniciação Científica. Universidade Federal de Uberlândia, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.
- ROCHA, M. T. **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: uma aplicação do modelo CERT**. Piracicaba, 2003. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. (Tese de Doutorado).
- RODRIGUES, F. **Análise de ruído em terminais de transporte coletivo urbano: desenvolvimento de modelos de previsão**. 136p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- ROSEIRO, M. N. V. **Morbidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto – SP, de 1995 a 2001, segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos**. Ribeirão Preto, 2002. Universidade de São Paulo, Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto. (Dissertação de Mestrado).
- SALDANHA, C.B; ALVES, R.C.M. **Utilização de imagens de satélite e modelagem numérica para determinação de dias favoráveis a dispersão de poluentes**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2002, INPE, p. 3301-3308. Disponível em <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.17.14.16/doc/3301.pdf>> Acessado em 09/07/2007.
- SANTOS, A. M. **Introdução aos motores de combustão interna**. Apostila. Disponível em <<http://www.netef.eesc.sc.usp.br/moreira/AULA1.pdf>> Acessado em 16/07/2007.
- _____. **Inovações e tendências na área de motores**. Notas de aula. Disponível em <<http://www.netef.eesc.sc.usp.br>> Acessado em 16/07/2007.

SAUCIER, W. J. **Princípios de Análise Meteorológica**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969.

SILVA, G. C. **Tráfego, Monóxido de Carbono e Ruído em Áreas Urbanas: o caso de Florianópolis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

_____. **Aplicação da Geoestatística usando a predição espacial de monóxido de carbono pelo tráfego veicular urbano**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TORRES, S. T. P; Martins, L. A. **Fatores que influenciam na concentração de material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG)**. In: Revista Caminhos de Geografia. Volume 16, Ano 6, Outubro – 2005. Disponível em <www.ig.ufu.br>. Acessado em 06/07/2007.

VIANNA JUNIOR, A.L. **Estudo comparativo de microsistemas de geração baseados em combustíveis**. Rio de Janeiro, RJ. Centrais Elétricas do Brasil - CEPEL/ELETROBRÁS, 2001.

UNEP/WHO (1994). **Measurement of suspended particulate matter in ambient air**. United Nation Environment Programme / World Health Organization. GEMS/AIR methodology review Handbook series.