



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**UM ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DO AR DE UBERLÂNDIA:
MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO**

EUCLIDES ANTÔNIO PEREIRA DE LIMA

Uberlândia – MG
2007



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**UM ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DO AR DE UBERLÂNDIA:
MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO**

EUCLIDES ANTÔNIO PEREIRA DE LIMA

Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo

Co-Orientador: José Renato Coury

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade Federal
de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química

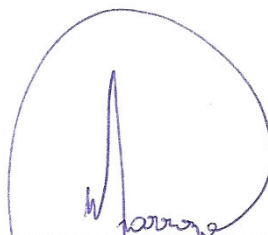
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- L732e Lima, Euclides Antônio Pereira de, 1964-
Um estudo sobre a qualidade do ar de Uberlândia : material particu-
lado em suspensão / Euclides Antônio Pereira de Lima. - 2007.
148 f. : il.
- Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Co-orientador: José Renato Coury.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Ar - Poluição - Uberlândia (MG) - Teses. I. Barrozo, Marcos Anto-
nio de Souza. II. Coury, José Renato. III. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

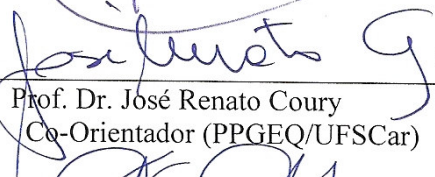
CDU: 628.5(815.12 * UDI)

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 11 DE DEZEMBRO DE 2007.

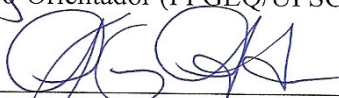
BANCA EXAMINADORA



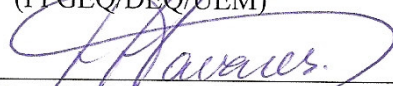
Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. José Renato Coury
Co-Orientador (PPGEQ/UFSCar)



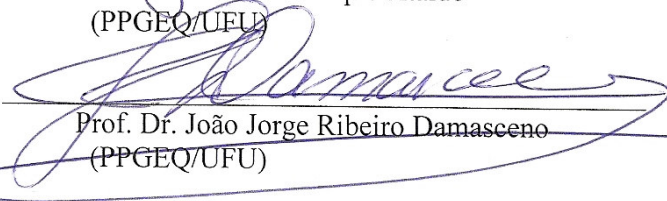
Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes
(PPGEQ/DEQ/UEM)



Prof. Dr. Marcelo Tavares
(FAMAT/UFU)



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(PPGEQ/UFU)

**“SEJAS FORTE, NÃO COMO O MAR
QUE A TUDO DESTRÓI,
MAS SIM COMO A MONTANHA
QUE A TUDO RESISTE”**

AGRADECIMENTOS

Uma tarefa como essa não é feita sozinho, jamais esquecerei o apoio e incentivo que recebi durante essa jornada. Agradeço a **DEUS** pela dose exata de paciência que me confiou, aos inúmeros **AMIGOS** que me ajudaram de diversas formas. Não poderia esquecer da **FAMILIA**, da qual, quando necessário, abrimos mão, afastamos e depois quando retornamos, independentemente do resultado obtido, das alegrias, tristezas ou dores sofridas, ela nos recebe, acolhe e novamente volta a nos incentivar, jamais se cansando de falar do orgulho e admiração que tem por nós.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia onde passei meus últimos dezoito anos, aprendendo, ensinando, trocando experiências, **universalizando**. A Faculdade de Engenharia Química que me acolheu e me deu tantas oportunidades e desafios. Aos mestres por cumprirem da melhor forma o seu papel, aos funcionários e colegas de curso por não medirem esforços para ajudar e torcer por um resultado positivo.

Esse trabalho tornou-se possível e ficou mais relevante depois da participação e colaboração direta do Prof. José Renato Coury o “Zezão”, através do qual agradeço também o apoio da Universidade Federal de São Carlos.

Ednaldo e Marcelo, obrigado é pouco para traduzir o sentimento de agradecimento que tenho por vocês, a contribuição dada ao trabalho foi significativa, mas para minha vida foi ainda maior.

Jamais esquecerei a passagem pela Prefeitura de Uberlândia durante essa etapa da vida, onde aprendi muito e conquistei diversos aliados. Um agradecimento especial ao Pratic Center, que administra os terminais de ônibus de Uberlândia, em nome do Paulo que sempre colaborou para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Sem um orientador é impossível concluir uma tese, mas ele poderia ser apenas um orientador, o que não aconteceu com o Marquinho. Enfeitar um diamante trabalhado não é tarefa difícil, lapidá-lo sim. Tenho certeza que ainda necessito aprender muito, mas deixo o registro do esforço de um “ser humano” que dedicou além da sua obrigação de mestre, para que a transformação ocorresse.

... Soraia, ... Pablo, Luiza, Julia e Marina, ... Dona Nely (Leninha), ... Sr. Manoel, ... Coquinha, Durango Kid, Bil Kid, Juninho, Mel Kid, Marcos, Mauricio, Marcio e Marcelo ...

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv

Índice

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	xv
1.1 – Aspectos importantes para a definição da área de estudo.....	17
1.2 – Ojetivos	19
1.3 – Divisão da tese em capítulos.....	19
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 – O ar atmosférico	20
2.2 – Usos do Ar	21
2.3 - Poluição Atmosférica	21
2.4 – Poluentes Atmosféricos	22
2.5 – Aerossol	22
2.6 – Material Particulado	23
2.7 – Fontes de emissão de material particulado	26
2.7.1 Queimadas.....	27
2.7.2 – Despalha da cana de açúcar através da queimada	29
2.8 – Inversões Térmicas	29
2.9 – Legislação Ambiental – Aspectos Legais e Institucionais.....	31
2.9.1 – Nível Federal.....	31
2.9.1.1 – Resolução CONAMA 001 de 1986	32
2.9.1.2 – Resolução CONAMA 018 de 1986	32
2.9.1.3 – Resolução CONAMA 005 de 1989	32
2.9.1.3 – Resolução CONAMA 003 de 1990	33
2.9.1.4 – Resolução CONAMA 008 de 1990	35
2.9.1.5 – Resolução CONAMA 382 de 2006	35
2.9.2 – Nível Estadual	36
2.9.2.1 – Deliberação Normativa (DN) 01 de 1981	37
2.9.2.2 – Deliberação Normativa 011 de 1986	38
2.9.2.3 – Deliberação Normativa 01 de 1992	38
2.9.3 – Nível Municipal.....	39
2.9.3.1 – Lei Complementar 017 de 1991	39
2.10 – Danos Causados pela Poluição do Ar.....	39
2.10.1 – Saúde.....	40
2.10.2 – Materiais.....	46
2.10.3 – Propriedades da natureza	47
2.10.4 – Vegetação	48
2.10.5 – Economia.....	49
2.11 – Monitoramento do Material Particulado.....	50
2.11.1 – Métodos de Amostragens.....	52
2.11.1.1 – Uso de impactadores na separação de material particulado	53
2.11.1.2 - Amostradores de Grandes Volumes (AGV)	55

2.11.1.3 - Amostradores de Pequenos Volumes (APV)	56
2.12 – Análise Estatística	57
2.12.1 - Análise por Box Plot.....	57
2.12.2 - Geoestatística	58
2.12.4. – Análise dos Componentes Principais (ACP).....	76
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	79
3.1 – Local de Amostragem.....	79
3.2 – Coleta de dados	82
3.2.1 – Amostrador de Grandes Volumes para Partículas Totais em Suspensão (AGV-PTS).....	82
3.2.2 – Amostrador de Grandes Volumes para Partículas Respiráveis (AGV-MP ₁₀).....	84
3.2.3 – Amostrador de Pequenos Volumes (APV-MP _{2,5})	85
3.3 – Meios Filtrantes, Medidas de Concentração e Caracterização Química	86
3.3.3 – Caracterização da Composição Química do MP ₁₀	87
3.4 – Tratamento Estatístico dos Dados Experimentais	90
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
4.1 – Dados meteorológicos de Uberlândia de janeiro de 2003 a dezembro de 2006	93
4.2 – Resultados de concentração de material particulado em suspensão.....	101
4.2.1 – Amostrador de grandes volumes para partículas totais (AGV-PTS) – 01/2003 a 12/2006.	102
4.2.2 – Amostrador de grandes volumes para partículas respiráveis (AGV-MP ₁₀) – 01/2003 a 12/2006.	104
4.2.3 – Amostrador de pequenos volumes para MP _{2,5} (APV) – 07/2006 a 07/2007... ..	104
4.3 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais	106
4.3.1 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais PTS	106
4.3.2 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais do MP ₁₀	109
4.3.3 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais APV MP _{2,5}).	111
4.4 – Diagramas BOX PLOTS aplicados aos dados experimentais de concentração de material particulado.....	112
4.5 – Testes de hipóteses para comparação de duas médias usando teste t de Student .	114
4.6 – Classificação do ar de Uberlândia de acordo com o índice de qualidade do ar da CETESB	117
4.6 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística.	119
4.6.1 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística para o PTS.....	119
4.6.2 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística para o MP ₁₀	121
4.7 – Tratamento dos dados experimentais através de Séries Temporais.	123
4.8 – Análises Multivariadas.	130
4.8.1 – Resultados da Análise Estatística Descritiva Aplicada aos Dados Experimentais de Composição Química do MP ₁₀	130
4.8.2 – Resultados da Análise de Componentes Principais Aplicados aos Dados Experimentais de Composição Química do MP ₁₀	134
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	137
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	139
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXO I.....	144
UM ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DA CIDADE DE UBERLÂNDIA-MG	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização de Uberlândia.	17
Figura 2.1 - Esquema de distribuição bimodal do material particulado suspenso à atmosferas urbanas CELLI (1999).	25
Figura 2.2 – Condição favorável de dispersão de poluentes.	30
(Fonte: CETESB, 2006).	30
Figura 2.3 – Condição desfavorável de dispersão de poluente – Inversão Térmica.....	31
(Fonte: CETESB, 2005).	31
Figura 2.4 - Estrutura do Índice de Qualidade do ar (CETESB, 2005).	35
Figura 2. 5 - Frações de material particulado inalável definido pela ACGIH e USEPA (Fonte: BRUNO, 2005).	42
Figura 2.6 – Sistema respiratório humano e suas partes constituintes (INNOCENTINI, 1993).	43
Figura 2.7- Impactação inercial convencional (MARQUES, 2000).....	54
Figura 2.8 - Esquema de um impactador virtual (MARQUES 2000).	54
Figura 2.9 - AGV para PTS, com detalhamento do sistema suporte de filtro/moto-aspirador (Grasiby GMW, 1988; CELLI, 1999).....	55
Figura 2.10- Amostrador de pequenos volumes, Dicotômetro, marca Andersen (Energética, 2006).	56
Figura 2.11- Descrição de um diagrama box plot.....	58
Figura 2.12 - Semivariogramas: (A) sem efeito pepita; (B) com efeito pepita.....	59
Figura 2.13 (A) – Semivariograma com patamar definido	60
Figura 2.13 (B) – Semivariograma com efeito pepita puro.....	61
Figura 2.13 (E) – Semivariograma com estruturas entrelaçadas	62
Figura 2.14- Modelos de semivariograma: (A) com patamar; (B) sem patamar.....	64
Figura 2.15 - Comportamento da série temporal da precipitação mensal (mm) de Uberlândia-MG, no período de 1981 a 1999 (GUIMARÃES, 2005).	66
Figura 2.16 A - Séries que apresentam tendência nos dados.	68
Figura 2.16B - Variações cíclicas	68
Figura 2.16 C- Variações sazonais	68
Figura 2.17 - Correlograma de uma série estacionária (EHLRS, 2004).	72
Figura 3.1 – Mapa de localização dos pontos de amostragem.	80
Figura 3.2 – Foto do ponto de amostragem (Fonte: Site da Prefeitura de Uberlândia).	81
Figura 3.3 – Foto do Ponto de Amostragem: 1 - AGV-PTS; 2- AGV-MP ₁₀ ; 3 – APV (MP _{2,5}).	82

Figura 3.4 – Desenho esquemático (A) e fotografia (B) do Amostrador AGV-PTS.	83
Figura 3.5 – Desenho esquemático (A) e fotografia (B) do Amostrador AGV- MP ₁₀	84
Figura 3.6 – Cabeça de separação inercial do AGV- MP ₁₀ . Fonte: Energética.....	84
Figura 3.7 – Esquema do sistema proposto por HOPKE et al. (1997).	85
Figura 3.9 – Desenho esquemático do sistema de amostragem do APV.....	86
Figura 3.10 - Diagrama simplificado de coleta e análise do monitoramento da qualidade do ar	89
Figura 4.1 – Médias diárias da temperatura do ar de 2003 a 2006.....	96
Figura 4.2 – Médias diárias da Umidade Relativa do ar de 2003 a 2006.	97
Figura 4.3 – Médias diárias da precipitação de 2003 a 2006.	98
Figura 4.4 – Média diária da velocidade dos ventos de 2003 a 2006.	99
Figura 4.5 – Rosa dos Ventos para o período de 2003 a 2006.....	100
Figura 4.6 – Média diária da pressão atmosférica de 2003 a 2006.....	100
Figura 4.7 – Médias diárias de insolação de 2003 a 2006.	101
Figura 4.8 - Resultado da concentração de PTS – 2003-2006.	103
Figura 4.9 - Resultado da concentração de MP ₁₀ – 2003-2006.....	105
Figura 4. 10 - Resultado de concentração de MP _{2,5} – 07/2006 - 06/2007.....	106
Figura 4.16 – Diagrama Box plot de 2003 a 2006 para MP ₁₀	113
Figura 4.17 – Índice de qualidade do ar para o PTS em função das estações do ano.....	117
Figura 4.18 – Índice de qualidade do ar para o MP ₁₀ em função das estações do ano.	118
Figura 4.19 – Semivariograma para PTS do ano de 2003.....	119
Figura 4.20 – Semivariograma para PTS do ano de 2004.....	119
Figura 4.21 – Semivariograma para PTS do ano de 2005.....	120
Figura 4.22 – Semivariograma para PTS do ano de 2006.....	120
Figura 4.23 – Semivariograma para MP ₁₀ do ano de 2003.	121
Figura 4.25 – Semivariograma para MP ₁₀ do ano de 2005.	122
Figura 4.26 – Semivariograma para MP ₁₀ do ano de 2006.	122
Figura 4.27 – Representação gráfica da concentração de particulados totais (PTS) no município de Uberlândia- MG nos anos de 2003 a 2006.....	124
Figura 4.28 – Representação gráfica da concentração MP ₁₀ no município de Uberlândia- MG nos anos de 2003 a 2006	124
Figura 4.29 – Função autocorrelação da série original de dados do PTS.	125
Figura 4.30 – Função autocorrelação da série original de dados do MP ₁₀	125
Figura 4.31 – Resíduos das séries ajustadas para o PTS e MP ₁₀	126
Figura 4.32 – Modelo SARIMA (1,2,3)(1,2,0) para o PTS, de janeiro a junho de 2007.	129

Figura 4.33 – Modelo SARIMA (1,0,0) (1,2,0) para o MP_{10} de janeiro a junho de 2007.....	129
Figura 4.34 – Porcentagem de contribuição dos componentes principais nas series estudadas: 2003(a); 2004 (b); 2005 (c); 2006 (d) e de 2003 a 2006 (e).....	135
Figura 4.35 – Composição química dos dois componentes principais para os quatro anos do estudo.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre padrões internacionais de MP_{10} . Adaptado de GEENPEACE (1998), CELLI (1999).	25
Tabela 2.2 – Principais diferenças entre as frações do Material Particulado (CELLI, 1999)..	26
Tabela 2.3 – Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera.....	28
Tabela 2.4 – Padrões de Qualidade do ar – Resolução CONAMA 03/90.	34
Tabela 2.5 – Critérios para episódios agudos de poluição do ar – CONAMA 003/90.	35
Tabela 2.6 – Padrões estaduais de qualidade do ar (Deliberação Normativa 01/81).	38
Tabela 2.7 – Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas.	41
Tabela 2.8 – Estudos de séries temporais longitudinais correlacionando mortalidade / MP_{10} (LIPFERT, 1995; VEDAL, 1997; CELLI, 1999).	45
Tabela 2.9 – Danos provocados pela poluição do ar em materiais.....	47
Tabela 2.10- Frequência mínima de amostragem (DERÍSIO, 1992).	51
Tabela 2.11 - Dimensionamento do tamanho mínimo da Rede de Monitoramento (DERÍSIO, 1992).	51
Tabela 4.1 – Estatística descritiva para os dados climatológicos de 2003 a 2006.....	94
Tabela 4.2 – Estatística descritiva para os dados climatológicos de 2003 a 2006. Dados individuais obtidos pela média diária de cada variável	95
Tabela 4.3 – Análise estatística descritiva para o PTS de 2003 a 2006.	107
Tabela 4.4 – Análise estatística descritiva para o MP_{10} para o período de 2003 a 2006.	109
Tabela 4.5 – Estatística descritiva para $MP_{2,5}$ com dados de julho/06 a junho/07.	111
Tabela 4.8 – Média aritmética e Desvio Padrão de PTS e MP_{10} em cada Estação do ano....	116
Tabela 4.9 – Resultados de comparação das médias dentro do ano para o PTS e MP_{10}	116
Tabela 4.10 – Resultado da análise dos semivariogramas para o PTS de 2003 a 2006.	120
Tabela 4.11 – Síntese do tratamento geoestatístico para o MP_{10} de 2003 a 2006.	123
Tabela 4.12 – Dados comparativos entre os modelos e valores observados para PTS e MP_{10}	128
Tabela 4.13 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP_{10} de 2003.....	131
Tabela 4.14 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP_{10} de 2004.....	131
Tabela 4.15 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP_{10} de 2005.....	132
Tabela 4.16– Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP_{10} de 2006.	132
Tabela 4.17 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP_{10} de 2003 à 2006.	133
Tabela 4.18– Matriz dos componentes principais de 2003 a 2006.	134

LISTA DE SÍMBOLOS

A	constante que define o modelo
AAS	Espectrometria de absorção atômica
ACP	análise de componentes principais
AGV-MP ₁₀	Amostrador de grandes volumes - partículas menores que 10 µm
AGV-PTS	Amostrador de grandes volumes - Partículas Totais em Suspensão
APV 10-20 lpm	Amostrador de pequenos volumes – 10 – 20 litros por minutos
AR	Modelo auto-regressivo
ARIMA	Modelo auto-regressivo integrado
ARMA(p,q)	modelo auto-regressivo de média móvel
a_t	ruído branco.
d	número de diferenças não sazonais
D	número de diferenças sazonais
B	constante que define o modelo
C_0	efeito pepita
d	é a distância máxima na qual o semivariograma é definido
D_{ae}	diâmetro aerodinâmico da partícula
EDXRF	Fluorescência de raio-x por energia dispersiva
$FI(x)$	função probabilidade acumulada da variável x
fac	Função autocorrelação
H	número de habitantes da cidade
<i>HRPM</i>	Fração respirável de alto risco
I	intensidade de luz transmitida através da camada de partículas na ausência hipotética do filtro
ICP-MS	Espectrometria de massa por plasma induzido
ICP-OES	Espectrometria de emissão ótica por plasma induzido
I_o	intensidade de luz branca incidente
<i>IPM</i>	Fração inalável
K	últimas observações
Lag	período
LI	limite inferior
LS	limite superior
MA(q)	móveis de ordem “q”
MM	médias móveis
N	número de pontos de coleta
N(h)	número de pontos separados pela distância h

NAA	Análise por ativação de nêutrons
PIXE	Emissão de raios-x por partículas induzidas
Q	valores passados de um processo de ruído Branco
Q1	valor do primeiro quartil
R	filtro carregado
RH	variação percentual da umidade relativa
Ro	filtro não carregado
S	período sazonal da série
SARIMA	Modelo auto-regressivo integrado sazonal
TCSI	movimentos de tendência, cíclicos, por estação e irregulares
TPM	Fração torácica
W	população
Xá	média aritmética anual
Xm	concentração máxima (24 horas) ocorrida no ano
Zt	observações da série

Símbolos Gregos

$\phi(B)$	operador auto-regressivo não sazonal
Δ^d	operador diferença não sazonal de ordem d
Δ^D	operador diferença sazonal de ordem D
Θ^S	operador de médias móveis sazonal
$\theta(B)$	operador de médias móveis não sazonal
ΦB^{SP}	operador auto regressivo sazonal de ordem p
Υ_t	Componente de Tendência
$\Upsilon(h)$	semivariância

RESUMO

A cidade de Uberlândia é uma das mais populosas de Minas Gerais e possui a segunda maior frota de veículos automotores do estado. Os automóveis são responsáveis por uma grande quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera. Somando a poluição veicular com as diversas fontes de poluentes existentes, inclusive a industrial, acelera a preocupação com os possíveis danos à saúde humana e ao meio ambiente, decorrentes do agravamento desse problema. No período de 2003 a 2006, foram realizadas amostragens de material particulado em suspensão, utilizando amostradores de grandes volumes, para coleta de partículas totais (PTS), partículas inaláveis (MP_{10}). No período de julho de 2006 a junho de 2007 foram realizadas também medidas de concentração de partículas superfinais ($MP_{2,5}$) por meio de um amostrador de pequenos volumes. O presente trabalho visou a obtenção do cenário da concentração de material particulado suspenso e a caracterização química elementar do ar atmosférico de Uberlândia. Para o PTS, os padrões secundários anuais de concentração, dispostos na Resolução do CONAMA 003/90, foram ultrapassados em todo o período de estudo. O padrão primário foi ultrapassado em 2003 e 2004. No caso das partículas respiráveis, o padrão anual (primário e secundário) foi ultrapassado em 2004 e 2005. Foram realizados testes de hipóteses para comprovar a significância estatística das diferenças das concentrações de particulados nos anos estudados, bem como nas estações de cada ano. Para analisar o comportamento temporal do material particulado MP_{10} e PTS, foram utilizados modelos de semivariograma na determinação do alcance da dependência temporal entre os dados e foram utilizados modelos de séries temporais para estimar valores das variáveis de concentração de PTS e MP_{10} no período de janeiro a junho de 2007. No estudo da decomposição da série, verificou-se a presença das componentes sazonal e de tendência. Entre os modelos de série temporais estudados, o que melhor representou o comportamento da série, tanto para o PTS quanto para o MP_{10} , foi o SARIMA. A previsão dos dados pelo modelo ajustado, quando comparado com os dados experimentais mostrou boa concordância. Os filtros do MP_{10} foram analisados por um plasma térmico induzido com espectrometria de emissão ótica (ICP-OES), os elementos que se destacaram foram o Al, Ca, K, Zn e S. A ressuspensão do solo, a poluição veicular e da indústria são fontes geradoras destes elementos químicos e fazem parte da região estudada. Realizou-se, também, uma análise multivariada dos dados de composição, utilizando a técnica dos componentes principais e dois componentes principais explicaram os resultados em mais de 86%.

ABSTRACT

The city of Uberlândia is one of the most populous of Minas Gerais State, and has the second greatest fleet of motor-vehicles of the State. The motor-vehicles are responsible for a great amount of pollutants emitted to the atmosphere. The vehicular pollution added to the diverse sources of existing pollutants, including from industries, speeds up the concern with possible damages to human health and to environment, came from the aggravement of this problem. By the period of 2003 to 2006, samplings of particle material in suspension were made using great volume samplers, in order to collect total particles (PTS), inhalable particles (MP_{10}), and a sampler of small volumes collecting even more fine particles ($MP_{2.5}$). The work envisioned getting the scenario of suspended particle material concentration and the elemental chemical characterization of the atmospheric air of Uberlândia. For PTS, the annual secondary standards of concentration, available in CONAMA 003/90 Resolution, were surpassed in the whole period of study. The primary standard were surpassed in 2004 and 2005. In the case of inhalable particles, the annual standard was surpassed in 2004. The international standards to the even more fine particles ($MP_{2.5}$), was not surpassed in none of the occasions in the period of July/06 to June/07. In order to analyse the temporal behaviour of the particle material MP_{10} and PTS, one used semivariogram models in determining the reach of temporal dependence among data and models of temporal series were used to estimate values of the PTS and MP_{10} concentration variables in the period from January to June/2007. In the study of series' decomposition, one realized the presence of sazonal and of tendency components. Among the temporal series models studied, the one which better represented the behaviour of the series, as for the PTS as for the MP_{10} , was the SARIMA model. The MP_{10} 's filters were analysed by a thermal plasma, induced with optical emission spectrometry (ICP-OES), and the elements which pointed out were Al, Ca, K, Zn and S. The re-suspension of the soil, the vehicular and industry pollution are generating sources of these chemical elements and are part of the region studied. One also made a multivaried analyses of composition data using the technique of the main components, and two of the main components explained the results in more than 86%.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O estudo da poluição do ar e seu controle têm sido um tema pesquisado extensivamente nas últimas décadas. Atualmente, as informações obtidas nestes estudos são consideradas de grande importância na elaboração das políticas de desenvolvimento sustentável e na busca da preservação do meio ambiente.

Entendendo que o ar atmosférico é indispensável para os processos físico-químicos que proporcionam o desenvolvimento da vida, a poluição do mesmo afeta de diversas maneiras o ecossistema, os materiais e a saúde humana (CETESB, 2001). Dentre os vários tipos de poluentes existentes na atmosfera, o material particulado em suspensão (MPS) possui uma importância significativa, tanto pela sua complexidade em termos de composição química, quanto pelas suas propriedades físicas.

O conhecimento do tamanho das partículas em suspensão é essencial e bastante significativo nos estudos recentes, através dele se obtêm informações sobre sua fonte geradora e o alcance do mesmo no trato respiratório. Assim, os órgãos gestores do meio ambiente definiram os parâmetros particulados totais em suspensão (PTS), compostos por partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 100 μm e o MP_{10} que é constituído de partículas menores que 10 μm , partículas finas (COURY, 1997). Estudos indicam que as partículas com diâmetros maiores que 10 μm ficam retidas no aparelho respiratório superior (nariz, faringe, laringe e traquéia). Porém, partículas menores podem alcançar o pulmão e sedimentar nos alvéolos e na região traqueobronquial (HINDS, 1982).

A poluição provocada por material particulado é um problema comprovado nos grandes centros urbanos e cada vez mais se estende para regiões em expansão populacional e industrial (AMORIM, 2004). O crescimento das cidades, muitas vezes de forma desordenada, onde os planejamentos urbanos levam em consideração a malha viária, favorecendo mais a mobilidade dos veículos do que a da população resulta na redução da qualidade de vida das pessoas, sob vários aspectos.

O crescimento populacional de Uberlândia segue um ritmo acelerado de 3,4 a 3,6% ao ano, enquanto a média nacional é de 1,4% (Figura 1.2), a população atual está em torno de 600000 habitantes e a expectativa é atingir 1 milhão de habitantes em 10 anos. Neste mesmo ritmo acontece o aumento da frota de veículos, a correlação é de 3,5 habitantes por veículo, enquanto a média nacional é de 5,5. A frota atual de veículos de Uberlândia, 168.700, é a segunda maior do estado de Minas Gerais, ficando atrás apenas da capital do estado (IBGE, 2007).

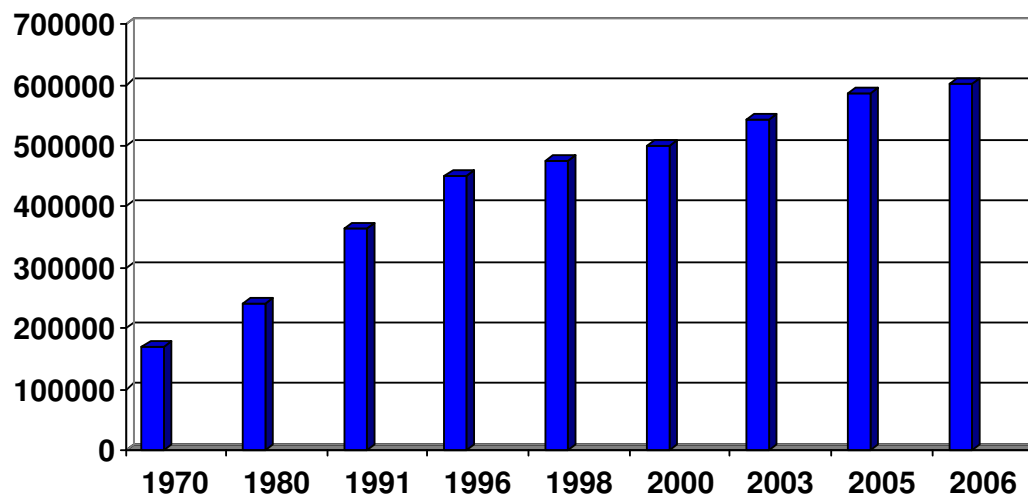


Figura 1.2 - Crescimento Populacional de Uberlândia (IBGE,2007).

A motivação desse estudo deve-se à necessidade do conhecimento da concentração de particulados totais e respiráveis no ar de Uberlândia, tendo em vista os aspectos mencionados anteriormente. Sendo assim, estudos sobre a qualidade do ar de Uberlândia vêm sendo realizados pelo grupo de pesquisa em sistemas particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia desde 2002.

Devido à necessidade da análise da evolução e tendências da poluição do ar em Uberlândia, ao longo dos anos e das respectivas estações, procurou-se neste trabalho realizar um tratamento estatístico que revelasse a significância das possíveis diferenças no período analisado, bem como encontrar previsões para dados futuros. Estas ações são importantes, pois o conhecimento do comportamento temporal da poluição do ar pode contribuir com o planejamento das ações por parte dos órgãos ambientais.

A significância estatística entre a diferença das médias dos anos estudados, bem como de estações podem ser verificadas por meio de testes de hipóteses. Uma das formas de avaliar e estimar este comportamento temporal é por meio de análises do tipo geoestatística, e também através da técnica de séries temporais. Além desses procedimentos, a técnica dos

componentes principais é útil para identificar quais são os principais elementos presentes nos particulados do ar atmosférico dessa cidade.

A técnica da geoestatística tem como característica principal analisar a distribuição espacial e/ou temporal entre as observações, determinando, através de semivariogramas, a distância ou período de tempo de dependência entre elas.

Uma série temporal é um conjunto de observações de uma determinada variável aleatória gerada sequencialmente ao longo do tempo. A análise estatística por séries temporais permite descrever o comportamento geral dos dados e também possibilita a realização de previsões de comportamentos futuros (MORETTIN e TOLOI, 2004; e EHLERS, 2005).

1.2 – Objetivos

Diante do que foi apresentado nesta introdução, o objetivo desta tese é analisar o comportamento temporal do material particulado total (PTS) e respirável (MP₁₀), na cidade de Uberlândia no período de 2003 a 2006. As diferenças entre as médias dos anos e das respectivas estações foram analisadas por meio de testes de hipóteses usando uma estatística *t* de *Student*, sendo os elementos presentes tratados pela técnica dos componentes principais. O comportamento temporal foi analisado por semivariogramas (técnica da geoestatística), bem como por modelos de séries temporais. Com o ajuste dos modelos que representam as séries do PTS e MP₁₀, foram realizadas previsões para as respectivas concentrações do ano de 2007. Essas previsões foram comparadas com os dados experimentais obtidos no mesmo ano (2007). Além dessas análises foram feitas medidas e análises para a concentração de particulado superfino (MP_{2,5}) de julho de 2006 a junho de 2007.

1.3 – Divisão da Tese em Capítulos

No capítulo II deste trabalho, encontra-se uma revisão bibliográfica do assunto, onde é apresentada as principais técnicas de monitoramento e tratamento dos dados experimentais utilizados nos estudos atmosféricos.

A metodologia utilizada para coleta, análise e tratamento dos dados, os materiais e equipamentos usados neste estudo foram dispostos no capítulo III.

Os resultados experimentais obtidos, bem como o tratamento estatístico e a análise dos mesmos estão apresentados no capítulo IV.

No capítulo V são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – O ar atmosférico

A cada dia que se passa o ser humano aumenta a necessidade de ampliar seus horizontes. Neste processo, ele descobre, embora nem sempre em tempo hábil, a necessidade de interagir com seu hábitat como forma de preservar seus recursos de substâncias, entre os quais se destaca o ar, e melhorar a sua qualidade de vida.

A atmosfera é a denominação dada à camada de gases que envolvem a terra que se estende até a altitude de 9600 quilômetros e que é constituída principalmente de nitrogênio e oxigênio. Metade da massa atmosférica está contida dentro da altitude de 5 km e 99% dela está contida dentro da altitude de 30 km.

A densidade e a pressão da atmosfera diminuem com a altitude, sendo que a sua temperatura varia para mais ou para menos dependendo da altitude considerada.

A camada de ar onde o homem desenvolve suas principais atividades é a troposfera. Esta região situa-se cerca de 12 Km acima da crosta terrestre. A composição média da troposfera, no que diz respeito aos componentes materiais é: oxigênio com 20,95%, nitrogênio, 78,0%, argônio, 0,93%, dióxido de carbono, 0,0345% e ainda por vários outros gases em pequenas concentrações. Além dos componentes materiais tradicionalmente estudados, existem outros de origem natural, ou artificial, como por exemplo, os CFCs (clorofluorcarbonos) cuja concentração pode apresentar modificações na composição básica da troposfera. Os óxidos de nitrogênio produzidos pelas descargas elétricas durante as tempestades são exemplos de substâncias naturais no ar (DERISIO, 1992).

Acima da Troposfera se encontra a estratosfera, chegando até cerca de 100 km. Sobre ela encontra-se a ionosfera, onde a radiação ultravioleta da luz solar provoca reações fotoquímicas, com formação de moléculas ativadas ou decomposição das moléculas em átomos ou íons (DERISIO, 1992).

2.2 – Usos do Ar

O homem, os animais e a vegetação necessitam do recurso ar para desenvolverem suas funções vitais, mais, além disto, de maneira geral o ar atmosférico é utilizado, em grandes quantidades, pelas comunidades de uma forma não parcimoniosa, devido o fato do mesmo estar disponível livremente sem que seu uso exija qualquer ônus ou esforço. Outros usos importantes do ar podem ser acrescentados, tais como: comunicação, transporte, combustão, processos industriais e, principalmente, a utilização do mesmo como receptor e transportador de resíduos da atividade humana.

A atmosfera tem recebido agentes contaminantes de processos naturais, como vulcanismo e incêndio de grandes proporções, desde a formação da terra, cerca de 4,6 bilhões de anos atrás. Entretanto, processos naturais na atmosfera e na biosfera reduzem e removem poluentes através da diluição, precipitação, filtração e reações químicas. Quando as atividades humanas superam a capacidade dos processos naturais de remover ou reduzir os contaminantes, a poluição do ar se torna um problema, conforme ocorre nas cidades. Estas vias de regra, se caracterizam por serem ambientes desequilibrados, em função do excessivo consumo de energia e material com correspondente geração de poluição atmosférica (MILANO e DALCIN, 2000).

Como resultado do uso indiscriminado ou abusivo deste recurso, sobretudo em áreas geográficas limitadas ou confinadas, surge a poluição atmosférica.

2.3 - Poluição Atmosférica

A poluição do ar pode ser definida como o resultado da alteração das características físicas, químicas ou biológicas normais da atmosfera, de forma a causar danos ao ser humano, à fauna, à flora aos materiais ou restringir o pleno uso e gozo da propriedade, ou afetar negativamente o bem-estar da população (CONAMA 03, 1990).

Na maioria das cidades desenvolvidas, observa-se que o seu crescimento foi de forma desordenada e sem planejamento, portanto, estas cidades atravessam momentos de avaliação e recuperação constante dos danos causados ao meio ambiente. Tais avaliações inicialmente foram estudadas envolvendo apenas os corpos hídricos, pois de imediato estes foram os que mais sofreram com o desenvolvimento. Segundo CELLI et al. (1998), a poluição atmosférica apresenta efeitos consideráveis, também relevantes em situações meteorológicas desfavoráveis, tendo como conseqüências o surgimento dos fenômenos de inversão térmica, devido aos ventos fracos e do período de seca.

O uso básico do recurso natural ar é para manter a vida. Todos os outros usos devem sujeitar-se à manutenção de uma qualidade do ar que não degradará, aguda ou cronicamente, a saúde ou o bem estar humano.

2.4 – Poluentes Atmosféricos

Considera-se poluente atmosférico qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torná-la poluída. A variedade de substâncias que podem estar presentes na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação, entretanto os poluentes atmosféricos podem ser classificados inicialmente em função do estado físico, em dois grupos: *material particulado e gases e vapores*.

De acordo com a sua origem, os poluentes podem ser classificados em poluentes primários, emitidos já na forma de poluentes, e poluentes secundários, que são formados na atmosfera por reações químicas ou mesmo fotoquímicas como é o caso da formação de ozônio no *smog* fotoquímico.

Os poluentes podem também ser classificados segundo a classe química em poluentes orgânicos e poluentes inorgânicos.

Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (seres humanos, outros animais, plantas, materiais) como resultado final do processo de lançamento deste poluente na atmosfera por suas fontes de emissão e suas interações na atmosfera, do ponto de vista físico (diluição) e químico (reações químicas) (CETESB, 2000).

A emissão de poluentes no ar por fontes naturais e por atividades humanas ocorre de forma contínua e a formação de partículas no ar através da condensação de vapores e por reação química de gases. Já a remoção das partículas da atmosfera ocorre por fenômenos naturais como a chuva, granizo, neblina e cerração. A chuva e o granizo agem como uma forma de lavagem do ar atmosférico quando partículas dispersas no ar podem ser coletadas por impactação nas gotas de chuva ou pedras de granizo. A neblina e a cerração podem também levar a limpeza do ar, quando promovem a aglomeração de partículas dispersas favorecendo a sedimentação.

2.5 – Aerossol

O aerossol é definido em sua forma mais simples como um sistema físico constituído de partículas sólidas e ou líquidas em suspensão em um fluido. Assim, os aerossóis são

sistemas bifásicos constituídos tanto de partículas como do fluido na qual estão suspensas. A atmosfera está repleta de partículas sólidas e líquidas, portanto constitui um grande aerossol (WILLEKE e BARON, 1993; MARQUES, 2000). Sendo assim a atmosfera torna-se alvo de relevantes estudos, os quais procuram descrever microscópica e macroscopicamente esse sistema.

2.6 – Material Particulado

O termo material particulado geralmente é utilizado quando se trata de partículas sólidas em suspensão. Quanto a sua origem podem ser natural (ressuspensão do solo, *spray* marinho e etc.) ou ainda proveniente de atividades humanas (antropogênicas). As fontes antropogênicas mais comuns são as automotivas ou veiculares (móveis), as industriais e agrícolas (fixas).

O tamanho é um dos parâmetros mais importantes para a caracterização do comportamento das partículas. Assim, segundo DERISIO (1992), existe o parâmetro poeira total em suspensão, definido como sendo composto de partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 100 μ m. Conforme MANAHAN (1994), entende-se por diâmetro aerodinâmico de partícula, o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possua a mesma velocidade de sedimentação da partícula em estudo.

A distribuição de tamanho de partículas pode variar de 0,02 a 1000 μ m com pelo menos três faixas de tamanho, o que torna a tarefa de amostragem bastante complexa. As faixas variam de acordo com a origem, composição química e tempo de residência na atmosfera. É importante considerar que as partículas presentes no ar podem afetar o meio ambiente e o ser humano de diferentes formas, por isso os métodos de amostragem devem ser selecionados de acordo com os objetivos propostos em cada trabalho (MARK, 1998; AMORIM, 2004).

Definida a metodologia a ser empregada no trabalho, os efeitos a serem estudados, podem-se escolher o tipo de equipamento que melhor captura a faixa de tamanho a ser analisada. Cabe ressaltar que partículas menores que 10 μ m são as mais prejudiciais ao ser humano porque são inaláveis e as partículas maiores que 10 μ m são menos prejudiciais ao ser humano. Partículas maiores possuem tempo de residência menor na atmosfera e embora causem menores danos aos seres humanos provocam destruição de patrimônios históricos e as vegetações (AMORIM, 2004).

As partículas emitidas para a atmosfera podem ainda ser classificadas em (MANAHAN, 1994; MARQUES, 2000):

- **Inorgânicas** - formadas pela combustão de minerais ou combustíveis contendo metais, por veículos automotores, por processos de esfoliação, pelas atividades industriais das mais diversificadas possíveis e por fontes naturais.

As partículas inorgânicas são compostas por vários elementos, alguns emitidos por fontes naturais como alumínio, potássio, iodo, sódio, silício, ferro, cloro e outros introduzidos pelas atividades humanas como bromo, cobre, manganês, bário, zinco, magnésio, chumbo, ferro, cálcio, vanádio, titânio, berílio, antimônio, selênio, bismuto, lítio, cério, cádmio, cobalto, níquel, mercúrio e outros.

- **Orgânicas** - as partículas orgânicas são produzidas por combustão, esfoliação de materiais poliméricos, material biológico e transformações químicas em diferentes processos, envolvendo vários compostos orgânicos de classes e estruturas diferentes. Estas partículas são as mais preocupantes, pois em contato com a atmosfera, envolvendo processos fotoquímicos ou de catálises por metais, estas podem sofrer várias transformações físico-químicas tornando-se radicais livres e comprometendo seriamente a qualidade de vida na Terra.

O primeiro padrão de qualidade do ar referente ao material particulado total em suspensão (TSP), foi criado em 1971 nos Estados Unidos. Somente em 1987 a agência americana de proteção do meio ambiente (USEPA) promulgou o padrão para material particulado inalável, que compreende partículas com diâmetros menores que 10 μm (MP_{10}). Partículas finas (10 μm) são mais prejudiciais ao aparelho respiratório do ser humano (MARQUES, 2000).

A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre alguns padrões internacionais de concentração de material particulado respirável.

Verifica-se uma equivalência entre os padrões nacionais e da agência americana (USEPA) a menos do controle de particulado fino, ainda não incluído no padrão nacional.

Um esquema idealizado de distribuição bimodal de material particulado suspenso (PTS, MP_{10}) em atmosferas urbanas, em função do diâmetro aerodinâmico e da concentração mássica por unidade de diâmetro é apresentado na Figura 2.1, (CELLI, 1999).

Na Figura 2.1 pode se ver ainda a presença do padrão $\text{MP}_{2,5}$, partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 2,5 μm . Esse padrão foi proposto pela USEPA e representa a fração fina do MP_{10} . A proposta do referido padrão foi baseada em revisões que consideraram a fração fina de grande importância patogênica, (CELLI, 1999). No Brasil ainda não existe um padrão estabelecido para o $\text{MP}_{2,5}$.

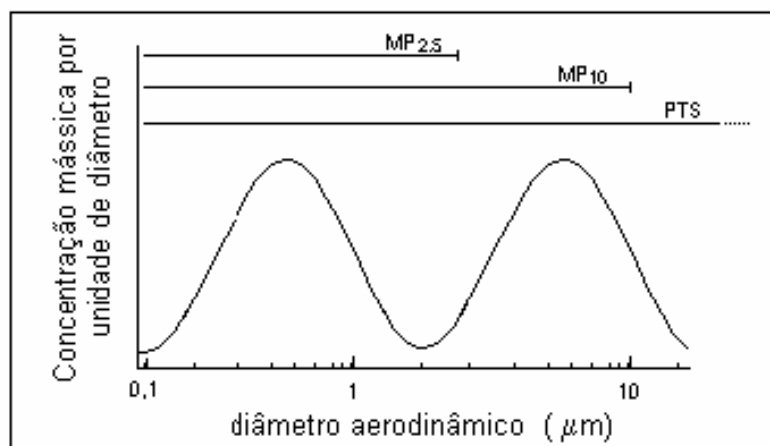


Figura 2.1 - Esquema de distribuição bimodal do material particulado suspenso à atmosferas urbanas CELLI (1999).

Tabela 2.1 – Comparação entre padrões internacionais de MP_{10} . CELLI (1999) modificada.

Instituição	Descrição	Critério de medição	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
OMS	Padrão primário MP_{10}	Média 24 horas	50*
Especialistas em poluição do ar ^a	Padrão primário MP_{10}	Média 24 horas	50
	Padrão primário MP_{10}	Média anual ^b	50
USEPA	Padrão primário MP_{10}	Média 24 horas ^c	150
	Padrão primário $MP_{2,5}$	Média anual ^d	15
	Padrão primário $MP_{2,5}$	Média 24 horas ^e	65
	Padrão primário MP_{10}	Média anual	30
Califórnia	Padrão primário MP_{10}	Média 24 horas	50
	Padrão primário MP_{10}	Média anual ^f	50
Brasil	Padrão primário MP_{10}	Média 24 horas ^g	150
	Padrão secundário MP_{10}	Média anual ^f	50
	Padrão secundário MP_{10}	Média 24 horas ^g	150

a - UK Expert Panel on Air Quality Guidelines: grupo de médicos especialistas em poluição do ar que recomenda padrões de qualidade do ar para o governo do Reino Unido.

b - o padrão é cumprido se a média tri-anual das médias aritméticas anuais das amostras de 24 horas não o exceder.

c - o padrão é cumprido se 99% das médias de 24 horas num período de três anos não o excedam, em cada ponto de monitoramento.

d - a média tri-anual das concentrações de 24 horas não pode exceder o padrão.

e - 98% das médias de 24 horas de um período de três anos não podem exceder o padrão.

f - média aritmética das concentrações de 24 horas.

g - não deve ser excedido mais de uma vez por ano.

* - válido a partir de 2006.

A Tabela 2.2, apresentada a seguir, ilustra as principais diferenças entre a fração fina ($MP_{2,5}$ μm) e a grossa ($MP_{2,5-10}$ μm).

Tabela 2.2 – Principais diferenças entre as frações do Material Particulado (CELLI, 1999).

Características	MP _{2,5}	MP ₁₀
Diâmetro aerodinâmico	<2,5µm	2,5<10µm
Formação	Reações químicas ou vaporização. Nucleação, condensação de núcleos, coagulação. Evaporação de gotículas nas quais os gases dissolvem e reagem.	Quebras mecânicas (moagem, esmagamento, abrasão de superfície, etc.). Suspensão de poeira e “spray” marinho.
Composição	Sulfatos, nitratos, amônia, carbono, compostos orgânicos (e. aromáticos) e metais (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn etc.)	Poeira ressuspensa do solo, cinzas de combustão. Óxidos de elementos da crosta terrestre (Si, Al, Ti, Fe) CaCO ₃ , NaCl, polén, esporos fúngicos, fragmentos vegetais e animais.
Solubilidade	Muitos solúveis, higroscópicos.	Pouco solúveis e não higroscópicos
Fontes	Combustão de carvão, óleos combustíveis automotivos, transformações atmosféricas de NO _x , SO _x e compostos orgânicos. Processos de alta temperatura, fundições e moinhos de aço.	Ressuspensão de poeira industrial e do solo. Suspensão por atividades ligadas ao solo (mineração, agricultura, trânsito em locais sem pavimentação). Construção e demolição, fontes biológicas, combustão incompleta de carvão e óleos. “Spray marinho”.
½ vida na atmosfera	Dias, até semanas.	Minutos a horas
Distância de dispersão	Centenas a milhares de km	Menos de um a dez metros.

2.7 – Fontes de emissão de material particulado

Dentre as principais fontes de emissão de material particulado podemos citar o solo, *spray* proveniente do mar, além de partículas de origem vegetal provenientes de polens e esporos emitidos pelas plantas (SEINFELD e PANDIS, 1998; BRUNO, 2004).

A ressuspensão de poeira por veículos automotores ou do solo pela ação dos ventos constitui uma fonte importante de material particulado nas cidades. Ainda nos centros urbanos, os veículos automotores a diesel são grandes responsáveis pela emissão de particulados em função do elevado consumo de combustível. As indústrias por sua vez

contribuem com o aumento da poeira suspensa através da queima de combustíveis, além de lançarem outros componentes tóxicos na atmosfera.

Nos últimos anos no Brasil a demanda por biomassa tem aumentado consideravelmente. Se por um lado ocorre redução nas emissões atmosféricas com a queima de combustíveis alternativos, por outro pode se ver o fortalecimento de uma fonte altamente poluidora que é proveniente da queima de cana de açúcar para posterior colheita.

É importante frisar que, mesmo mantidas as emissões atmosféricas, a qualidade do ar pode mudar em função basicamente das condições meteorológicas que determinam uma maior ou menor diluição dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar piora nos meses de inverno, quando as condições atmosféricas 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 (DERISIO, 1992).

A Tabela 2.3 mostra um quadro de fontes, características e efeitos dos principais poluentes indicadores de qualidade do ar (CETESB, 2005).

2.7.1 Queimadas

As queimadas no Brasil têm sido objeto de preocupação e polêmica. Elas atingem os mais diversos sistemas ecológicos e tipos de agricultura, gerando impactos ambientais em escala local e regional.

A EMBRAPA realiza desde 1991, com apoio da Fapesp, monitoramento circunstanciado e efetivo das queimadas em todo o Brasil, conjugando sensoriamento remoto, cartografia digital e comunicação eletrônica.

Os satélites utilizados pela EMBRAPA são da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) 12 e 14. Os estudos realizados no Brasil possibilitam uma visualização aprofundada a respeito do problema das queimadas. Monitoramentos por satélite revelam que os meses mais críticos de queimadas são os de agosto a outubro, em 2006 foram registrados mais de 70.000 focos de queimada.

A origem das queimadas é essencialmente agrícola e em geral ocorrem em áreas já desmatadas, com padrões espaciais diferenciados e dinâmica temporal variável. Considerou-se queimadas inequívocas e realmente preocupantes, que atingem uma certa magnitude e em geral, ainda estão ativas no início da noite, bem como a intensidade e a constância temporal ou não, do evento em cada local (EMBRAPA, 2006).

Tabela 2.3 – Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera.

POLUENTE	CARACTERÍSTICAS	FONTES PRINCIPAIS	EFEITOS GERAIS SOBRE A SAÚDE	EFEITOS GERAIS SOBRE O MEIO AMBIENTE
Partículas totais em suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensos no ar na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. faixa de tamanho <100 micra.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite.	Danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas inaláveis (MP ₁₀) e fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensos no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. faixa de tamanho < 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotivos), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Aumento do atendimento hospitalar e mortes prematuras.	Danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima do palito de fósforo. Pode ser transformado a SO ₃ que na presença de vapor de água passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É importante precursor de sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, polpa e papel.	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO ₂ .	Pode levar a formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos a vegetação: folas e colheitas.
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar a formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incineração.	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, abaixar a resistência às infecções respiratórias.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e às colheitas.
Monóxido de carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, no aprendizado do trabalho e visual.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente à atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração. O O ₃ tem sido associado a admissões hospitalares.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas: plantas ornamentais.

Fonte: CETESB, 2005

2.7.2 – Despalha da cana de açúcar através da queimada

A queima da palha do canavial visando facilitar a colheita ainda é muito praticada no Brasil. Esta prática vem sendo questionada pela alta emissão de CO₂ (gás carbônico) e gases de nitrogênio e enxofre. A queima deste material representa uma perda de vários nutrientes, principalmente de nitrogênio (30-60 kg/ha) e enxofre (15-25 kg/ha). Considerando-se os 3,5 milhões de hectares de cana queimada e uma produção média de cana de 60 t/ha, são perdidos ao redor de 150 mil toneladas de nitrogênio a cada ano (MARQUES, 2000).

Além disto, a queima da palha lança na atmosfera cerca de 64,8 milhões de toneladas de gás carbônico por ano, que contribuem para a diminuição da qualidade do ar nas cidades e ao aumento do efeito estufa. A emissão de gases de nitrogênio e enxofre à atmosfera possibilita o surgimento das chuvas ácidas, que provoca perdas significativas de nutrientes para as plantas e facilita o aparecimento de ervas daninhas e a erosão, devido à redução da proteção do solo (EMBRAPA, 2006).

A Cultura da cana é muito importante no país, pois apresenta um alto grau de emprego e geração de tecnologia. No entanto, a prática da despalha vem sendo contestada por membros do Ministério Público em vários estados do Brasil, através de ações judiciais e pela ação das comunidades preocupadas com os efeitos dessa prática agrícola sobre a saúde, a segurança, o meio ambiente e qualidade de vida nos meios urbanos próximos às plantações (MARQUES, 2000).

O Governo do Estado de São Paulo aprovou a Lei 11.241, em 19/09/2002, que determina os prazos para o fim das queimadas, para 2021 nas áreas mecanizáveis e 2031 nas áreas não mecanizáveis.

Em Minas Gerais, no município de Uberlândia, serão instaladas atualmente duas empresas do setor sucroalcooleiro e pelo menos 22 usinas serão instaladas no triângulo mineiro até 2010. As reuniões com fazendeiros da região já estão acontecendo, por intermédio do Sindicato Rural de Uberlândia. A discussão entorno do arrendamento das terras para o cultivo da cana já faz parte do cotidiano dos agricultores e pecuarista, causando euforia e apreensão.

2.8 – Inversões Térmicas

As inversões térmicas são fenômenos meteorológicos que ocorrem durante todo o ano, sendo que, no inverno elas são mais baixas, principalmente no período noturno. Em um ambiente com um grande número de indústrias e de circulação de veículos, como o das

idades, a inversão térmica pode levar a altas concentrações de poluentes, podendo ocasionar problemas de saúde (CETESB, 2006).

As chamadas inversões térmicas, que são importantes em termos de poluição do ar, são as de irradiação e as de subsidiência. A por irradiação acontece frequentemente quando o solo esfria por irradiação durante a noite. A presença destas inversões noturnas por irradiação impede a dispersão de emissões de poluentes nas cidades. A de subsidiência é aquela que ocorre quando da existência do processo de afundamento e compressão da massa de ar. Quanto maior for a convergência de massa e altitude, maior o movimento descendente (afundamento), havendo conseqüentemente maior grau de compressão da atmosfera e maior aumento de temperatura (DERISIO, 1992).

Nos primeiros 10 quilômetros da atmosfera, normalmente, o ar vai se resfriando a medida que nos distanciamos da superfície da terra. Assim o ar mais próximo à superfície, que é mais quente, portanto mais leve, pode ascender, favorecendo a dispersão dos poluentes emitidos pelas fontes, conforme se verifica na Figura 2.2. A inversão térmica é uma condição meteorológica que ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que, o ar abaixo dessa camada fica mais frio, portanto, mais pesado, fazendo com os poluentes se mantenham próximos da superfície, como pode ser observado na Figura 2.3 (CETESB, 2006).



Figura 2.2 – Condição favorável de dispersão de poluentes.
(Fonte: CETESB, 2006).

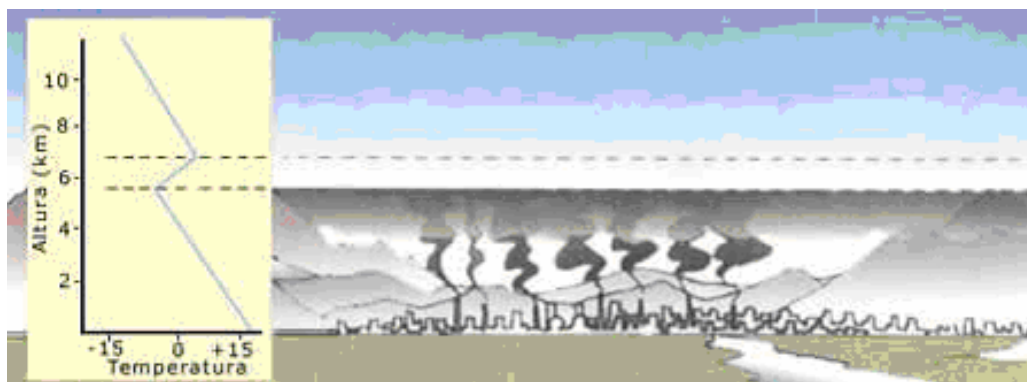


Figura 2.3 – Condição desfavorável de dispersão de poluente – Inversão Térmica.
(Fonte: CETESB, 2005).

2.9 – Legislação Ambiental – Aspectos Legais e Institucionais

A legislação ambiental traduz um sistema de princípios e normas jurídicas que disciplinam as relações do homem com o meio que o envolve, objetivando a conservação da natureza, a manutenção dos equilíbrios ecológicos, o combate às diversas formas de poluição em busca do desenvolvimento sustentado.

Os aspectos legais e institucionais constituem ferramentas imprescindíveis à implantação e bom andamento dos programas de controle da poluição do ar.

Quanto aos aspectos legais, a clareza, a simplicidade, a dinamicidade e a viabilidade de aplicação dos dispositivos a serem editados são importantes fatores a serem considerados (DERISIO, 1992).

No Brasil, dispositivos legais relacionados à poluição do ar, tem sido editado nas esferas federal, estaduais e municipais.

2.9.1 – Nível Federal

A legislação ambiental brasileira começa a ser consolidada enquanto ordenamento dirigido, a partir da década de 80. A Lei n ° 6938, de 31 de agosto de 1981, dispõem sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), estabeleceu os princípios e objetivos dessa Política e considerou o meio ambiente como “patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido, tendo em vista o uso coletivo”. Com fundamento nos dispositivos desta Lei, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por ela criada, passou a editar normas administrativas relativas à proteção ambiental.

A Constituição Federal de 1988, através do artigo 225 inclui um capítulo inteiro dedicado à proteção do meio ambiente e a conservação dos recursos naturais.

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e próximas gerações.”

Artigo 225, Constituição Federal de 1988.

A seguir serão apresentadas algumas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente, importantes instrumentos legais editados com relação ao recurso ar.

2.9.1.1 – Resolução CONAMA 001 de 1986

Esta Resolução foi criada em 23 de janeiro de 1986 e instituiu a avaliação de impactos ambientais como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente. Estabelecendo a obrigatoriedade da elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto no Meio Ambiente (RIMA), a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e do IBAMA em caráter supletivo, previamente ao licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, com significativo impacto ambiental, conforme listado na Resolução.

2.9.1.2 – Resolução CONAMA 018 de 1986

Criada em 6 de maio de 1986 instituiu o programa Nacional de Controle da Poluição do ar por veículos automotores (PROCONVE), com limites máximos de emissão para motores e veículos novos, bem como regras e exigências para o licenciamento para fabricação de uma configuração de veículo ou motor, e para a verificação da conformidade da produção.

2.9.1.3 – Resolução CONAMA 005 de 1989

Essa Resolução foi criada em 15 de julho de 1989, e instituiu o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR). O PRONAR é um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar das populações e melhoria da qualidade de vida. Tem como objetivo permitir o desenvolvimento econômico e social do país, de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de

poluição atmosférica, com vista à melhoria da qualidade do ar. Garantia do atendimento aos padrões estabelecidos e o não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas.

2.9.1.3 – Resolução CONAMA 003 de 1990

Através da Portaria Normativa n.º 348 de 14/03/90 o IBAMA estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar e os respectivos métodos de referência, ampliando o número de parâmetros anteriormente regulamentados através da Portaria GM 0231 de 27/04/76. Os padrões estabelecidos através dessa portaria foram submetidos ao CONAMA em 28/06/90 e transformados na Resolução CONAMA n.º 03/90 (CETESB, 2005).

São estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários. São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo. São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo.

O objetivo do estabelecimento de padrões secundários é criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar. Devem ser aplicados às áreas de preservação (por exemplo: parques nacionais, áreas de proteção ambiental, estâncias turísticas, etc.). Não se aplicam pelo menos a curto prazo, a áreas de desenvolvimento, onde devem ser aplicados os padrões primários. Como prevê a própria Resolução CONAMA n.º 03/90, a aplicação diferenciada de padrões primários e secundários requer que o território nacional seja dividido em classes I, II e III conforme o uso pretendido. A mesma resolução prevê ainda que enquanto não for estabelecida a classificação das áreas os padrões aplicáveis serão os primários.

Os parâmetros regulamentados são os seguintes: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio. Os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA n.º 03 de 28/06/90 são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Padrões de Qualidade do ar – Resolução CONAMA 03/90.

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PADRÃO SECUNDÁRIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas totais em suspensão	24 horas ¹	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA ²	80	60	
Partículas inaláveis	24 horas ¹	150	150	Separação inercial/filtração
	MAA ³	50	50	
Fumaça	24 horas ¹	150	100	Refletância
	MAA ³	60	40	
Dióxido de enxofre	24 horas ¹	365	190	pararosanilina
	MAA ³	80	100	
Dióxido de nitrogênio	1 hora ¹	320	190	quimiluminescência
	MAA ³	100	100	
Monóxido de carbono	1 hora ¹	40.000	40.000	Infravermelho Não dispersivo
	8 horas ¹	35ppm	35ppm	
		10.000	10.000	
		9ppm	9ppm	
Ozônio	1 hora ¹	160	160	quimiluminescência

1 – não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

Fonte: CETESB, 2005.

2 – média geométrica anual.

3 – média aritmética anual.

Com o intuito de divulgar dados da qualidade do ar de forma simplificada, foi estabelecido pela CETESB o índice de qualidade do ar. O índice é obtido através de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar. A função relaciona a concentração do poluente com o valor índice e resulta um número adimensional referido a uma escala com base em padrões de qualidade do ar. Para cada poluente medido é calculado um índice conforme a Figura 2.4 (CETESB, 2005).

Essa Resolução estabelece ainda os critérios para episódios agudos de poluição do ar. Ressalta-se que a declaração dos estados de atenção, alerta e emergência requer, além dos níveis de concentração atingidos, a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Os critérios para episódios agudos são apresentados na Tabela 2.5.

Qualificação/ Índice	Nível de Qualidade do Ar	SO ₂ Média 24 h µg/m ³	PTS Média 24 h µg/m ³	Produto da Média de SO ₂ x PTS Média 24 h µg/m ³	MP ₁₀ Média 24 h µg/m ³	Fumaça Média 24 h µg/m ³	CO Média 8 h ppm	O ₃ Média 1 h µg/m ³	NO ₂ Média 1 h µg/m ³	Descrição dos Efeitos Sobre a Saúde
0										
Boa (0 - 50)										
50	50% PQAR	80(a)	80(a)		50(a)	60(a)	4,5	80	100(a)	
Regular (51 - 100)										
100	PQAR	365	240		150	150	9,0	160	320	
Inadequada (101 - 199)										Leve agravamento de sintomas em pessoas suscetíveis, com sintomas de irritação na população sadia.
200	ATENÇÃO	800	375	65.000	250	250	15,0	200	1130	
Má (200 - 299)										Decréscimo da resistência física, e significativo agravamento dos sintomas em pessoas com enfer- midades cardíaco-respiratórias. Sintomas gerais na população sadia.
300	ALERTA	1600	625	261.000	420	420	30,0	800	2260	
Péssima (300 - 399)										Aparecimento prematuro de certas doenças, além de significativo agravamento de sintomas. Decréscimo da resistência física em pessoas saudáveis
400	EMERGÊNCIA	2100	875	393.000	500	500	40,0	1000	3000	
Crítica (> 400)										Morte prematura de pessoas doentes e pessoas idosas. Pessoas saudáveis podem acusar sintomas adversos que afetam sua atividade normal
500	CRÍTICO	2620	1000	490.000	600	600	50,0	1200	3750	

SO₂ - dióxido de enxofre
 PTS - partículas totais em suspensão
 MP₁₀ - material particulado
 CO - monóxido de carbono
 O₃ - ozônio
 NO₂ - dióxido de nitrogênio
 (a) - PQAR anual

Figura 2.4 - Estrutura do Índice de Qualidade do ar (CETESB, 2005).

Tabela 2.5 – Critérios para episódios agudos de poluição do ar – CONAMA 003/90.

PARÂMETROS	ATENÇÃO	ALERTA	EMERGÊNCIA
Partículas totais em suspensão (µg/m ³) – 24 horas	375	625	875
Partículas inaláveis (µg/m ³) – 24 horas	250	420	500
Fumaça (µg/m ³) – 24 horas	250	420	500
Dióxido de enxofre (µg/m ³) – 24 horas	800	1.600	2.100
Dióxido de nitrogênio (µg/m ³) – 1 hora	1.300	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) – 8 horas	15	30	40
Ozônio (µg/m ³) – 1 hora	400*	800	1.000

Fonte: CETESB, 2005.

2.9.1.4 – Resolução CONAMA 008 de 1990

Estabeleceu os limites máximos de emissão (Padrões de Emissão) de poluentes no ar, para processos de combustão externa em fontes novas fixas.

2.9.1.5 – Resolução CONAMA 382 de 2006

Criada em 26 de dezembro de 2006, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas considerando o disposto na Resolução CONAMA 05/89 - PRONAR.

Para a criação dessa Resolução do CONAMA, foram considerados os altos níveis de poluição atmosférica já alcançada, principalmente nas regiões metropolitanas, e seus reflexos negativos sobre a saúde, o meio ambiente e a economia. Considerou também, a crescente industrialização de várias regiões do país com o conseqüente aumento do nível de emissões atmosféricas, a degradação da qualidade do ar, a necessidade da compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico.

Definem estratégias para o controle, recuperação da qualidade do ar e a prevenção da sua degradação. Explicitou a necessidade do controle da poluição na fonte geradora, por meio de equipamentos de controle do tipo “fim de tubo”, ou processos menos poluentes, principalmente, devido à disponibilidade de tecnologia existente para redução da emissão para diversos processos produtivos.

Em alguns estados brasileiros os limites máximos permitidos para poluentes atmosféricos são bem mais restritivos do que na esfera federal, porém, as restrições chegam a ser excessivas. Por esses motivos, essa Resolução estabeleceu base de referencia nacional sobre os limites de emissão de poluentes atmosféricos, visando coibir excessos não condizentes com a defesa do meio ambiente. Propôs critérios orientadores para definição dos limites de emissão de poluentes atmosféricos e desta forma proveu os órgãos ambientais de instrumentos adequados para análise de processos e licenciamento de empreendimentos. Essas considerações garantem, de certa forma, um equilíbrio no custo ambiental e diminui o impacto nas economias regionais.

2.9.2 – Nível Estadual

O órgão responsável pelo controle ambiental no Estado de Minas Gerais é a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. A FEAM é um dos órgãos seccionais de apoio do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e atua vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). No âmbito federal, esse órgão integra o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

O Decreto 18.466 de 29 de abril de 1977 instituiu a Comissão de Política Ambiental (COPAM) cujas competências são:

- Formular, para cumprimento das unidades do Sistema Operacional de Ciências Tecnologia, normas técnicas de proteção ao meio ambiente, observadas as

diretrizes federais pertinentes aos objetivos definidos no Plano Mineiro de Desenvolvimento Econômico e Social ou documento que venha suceder.

- Compatibilizar os planos, programas projetos e atividades de proteção ambiental com as normas estabelecidas.
- Propor a criação de sistemas de controle e medição de qualidade do meio ambiente para aprovação do Secretário de Ciências e Tecnologia.
- Supervisionar a ação fiscalizadora de observância das normas que tenham por finalidade a preservação e melhoria do meio ambiente e da qualidade de vida.
- Aprovar relatórios de impactos ambientais.
- Estabelecer os mecanismos de fiscalização ambiental
- Submeter ao Secretario de Estado de Ciência e Tecnologia o seu Regime Interno.

Compete ao COPAM as atribuições de Licenciamento Ambiental e Autorização de Funcionamento (AAF), por intermédio das câmaras Especializadas, das Unidades Regionais Colegiadas (URCs), das Superintendências Regionais de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Suprams), da FEAM e do Instituto Estadual de Florestas (IEF), de acordo com o Decreto Estadual 44.309/06.

Uberlândia é sede de uma das Superintendências Regionais (Suprams) que atende toda região do triângulo mineiro e Alto Paranaíba. A partir da criação da Supram Triângulo, houve um avanço nos processos de licenciamentos da região, redução no tempo de espera para definição dos processos ambientais, bem como, o surgimento de uma fiscalização mais intensa nos empreendimentos potencialmente poluidores.

A seguir serão apresentadas algumas das Deliberações Normativas mais relevantes com relação a poluição atmosférica.

2.9.2.1 – Deliberação Normativa (DN) 01 de 1981

A DN 01/81 foi a primeira do estado que fixou normas e padrões para qualidade do ar. Os padrões estabelecidos para todo o Estado de Minas Gerais são os demonstrados na Tabela 2.6.

A DN 01/81 é anterior a CONAMA 03/90 e por sua vez não contempla todos os parâmetros apresentados na Resolução nacional. Uma grande diferença entre elas é que essa DN não considera distinção entre padrão primário e secundário.

Tabela 2.6 – Padrões estaduais de qualidade do ar (Deliberação Normativa 01/81).

Poluente	Tempo de amostragem ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Método de Medição
Partículas Totais em Suspensão	24 horas ⁽¹⁾ MGA ²	240 80	Amostrador de grandes volumes
Partículas sedimentáveis	1 mês	10 g/m ² ⁽³⁾ 5 g/m ² ⁽⁴⁾	Método do Jarro de deposição de poeira
Dióxido de enxofre	24 horas ⁽¹⁾ MAA ⁽⁵⁾	365 80	Pararosanilina
Monóxido de carbono	1 hora ⁽¹⁾	40.000	Infravermelho não dispersivo
	8 horas	35 ppm 10.000 9 ppm	
Oxidantes fotoquímicos	1 hora ⁽¹⁾	160 0,08 ppm	Luminescência química ⁽⁶⁾

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

2 – Média geométrica anual

3 – Áreas industriais

4 – Demais áreas inclusive residenciais e comerciais

5 – Média aritmética anual

6 - Corrigido para interferência para óxidos de nitrogênio e óxido de enxofre

Fonte: FEAM, 2007.

2.9.2.2 – Deliberação Normativa 011 de 1986

Criada em 16 de dezembro de 1986 estabelece normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera, para fontes fixas, móveis e dá outras providências.

Proíbe a emissão de fumaça por parte de fontes de poluição estacionária com densidade colorimétrica superior ao padrão 1 da escala de Ringelmann, ou equivalente salvo por: um único período de 15 minutos por dia, para operação de aquecimento da fornalha, um período de 3 minutos em qualquer período de uma hora por dia.

Proíbe a emissão pelo cano de descarga dos veículos, fumaça com densidade colorimétrica superior ao padrão 2 da escala Ringelmann ou equivalente, por mais de 5 segundos consecutivos, exceto para partidas a frio.

Estabelece critérios para emissões em áreas residenciais tais como tipo de combustível e temperatura dos gases. Regulamenta ainda as fontes de emissão de substâncias odoríferas.

O Anexo I dessa Deliberação especifica os padrões de emissão para diversas fontes de poluição.

2.9.2.3 – Deliberação Normativa 01 de 1992

A DN 01/92 reformula as normas e padrões para lançamento de poluentes na atmosfera.

2.9.3 – Nível Municipal

Uberlândia possui em sua estrutura organizacional uma Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Compete a essa secretaria as atribuições do poder deliberativo de polícia, em todas as ações públicas ou privadas com potencial de degradar a qualidade ambiental, nos limites do território municipal.

As deliberações e decisões adotadas pela Secretaria de Meio Ambiente no nível de programas, são efetivadas mediante consulta prévia ao Conselho Municipal de Conservação do Meio Ambiente – CODEMA.

A Lei aprovada para orientar a Secretaria Municipal é a Lei Complementar 017 de 1991.

2.9.3.1 – Lei Complementar 017 de 1991

Criada em 04 de dezembro de 1991 dispõe sobre a política de proteção, controle e conservação do meio ambiente e dá outras providências.

A Lei complementar 017/91 foi dividida em Títulos da seguinte forma:

- Título 1 – do meio ambiente
- Título 2 – dos recursos hídricos
- Título 3 – do ar
- Título 4 – do solo
- Título 5 – da fauna e flora
- Título 6 – disposições gerais
- Título 7 – disposições finais.

Os padrões de qualidade do ar da Lei 017/91 estão em conformidade com a legislação estadual, mas deve sofrer alterações em função da Resolução do CONAMA 382/2006, que entre outras definições estabelece padrões para treze tipos de fontes fixas.

2.10 – Danos Causados pela Poluição do Ar

Os principais aspectos que devem ser considerados no estudo dos danos ou efeitos da poluição do ar são: saúde, materiais, propriedades da atmosfera, vegetação e economia (DERISIO, 1992)

2.10.1 – Saúde

Comparando com outras necessidades da vida, o ar tem um consumo obrigatório, sendo essencial para os sentidos da visão, olfato e audição. Um homem adulto requer diariamente cerca de 15 kg de ar, 1,5 kg de alimento sólido e 2 litros de água. Esta quantidade diária de ar inspirado entra em contato com 70 m² de superfície alveolar, nos pulmões. Estima-se que uma pessoa pode viver 5 semanas sem alimento, 5 dias sem água, mas não mais do que 5 minutos sem ar (DERISIO, 1992).

A convivência dos seres vivos, em especial a do homem, com a poluição do ar tem trazido consequências sérias para a saúde. Os efeitos dessa exposição têm sido marcantes e plurais quanto à abrangência. Em países desenvolvidos e em desenvolvimento, crianças, adultos e idosos, previamente doentes ou não, sofreram e ainda sofrem seus malefícios.

Os efeitos da poluição do ar sobre a saúde podem provocar: doença aguda ou morte; doença crônica, encurtamento da vida, ou dano ao crescimento; alteração de importantes funções fisiológicas, tais como ventilação do pulmão, transporte de oxigênio pela hemoglobina, adaptação ao escuro, ou outras funções do sistema nervoso; sintomas adversos, tal como irritações sensoriais, que na ausência de uma causa óbvia, como a poluição do ar, pode levar uma pessoa a procurar um médico; desconforto, odor, prejuízo de visibilidade ou outros efeitos da poluição do ar suficientes para levar indivíduos a trocar de residência ou local de emprego.

A poluição do ar provoca doenças respiratórias (asma, bronquite e enfisema pulmonar) e desconforto físico (irritação dos olhos, nariz e garganta, dor de cabeça, sensação de cansaço, tosse), agrava doenças cardiorespiratórias e contribui para o desenvolvimento de câncer pulmonar.

Nos últimos 20 anos vários estudos foram realizados para quantificar a fração de partículas suspensas no ar que realmente entram no sistema respiratório, procurando estabelecer uma analogia direta dos instrumentos de amostragem com o que acontece durante a inalação humana, concluindo-se que partículas maiores que 100 µm possuem pequena probabilidade de penetração no sistema respiratório (LIDÉN, 1994; VICENT, 1990; SANTOS, 2001).

Para melhor compreensão das frações estabelecidas por convenção, o trato respiratório foi dividido, como mostra a Tabela 2.7, em regiões consideradas bases anatômicas para identificação das frações de partículas relevantes. As especificações para construção de instrumentos de amostragem e definição de limites de exposição para amostragem e definição

de limites de exposição para amostragens por seleção de tamanho de partícula também são baseadas nessa referência (SANTOS, 2001).

Tabela 2.7 – Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas.

Região	Estrutura anatômica	localização	Doenças relacionadas
1. Vias aéreas superiores	Nariz, boca, laringe nasofaringe, orofaringe, laringofaringe.	Extratorácica (inalável)	Irritação do septo nasal, faringe e laringe Câncer de faringe e laringe
2. Região traqueobronquial	Traquéia, brônquios, bronquíolos (bronquíolos terminais)	Torácica (pulmonar)	Broncoconstrição Bronquite crônica Câncer bronquial
3. Região de troca de gases	Bronquíolos respiratórios, dutos alveolares, sacos alveolares e alveolos.	Alveolar (respirável de alto risco – HRPm)	Pneumoconioses Enfisema, Alveolite Câncer pulmonar

SANTOS, 2001

As definições das frações relevantes de material particulado são mostradas abaixo e foram propostas pela ACGIH (American Conference Of Governmental Industrial Hygienists), tendo sido adotadas internacionalmente (BRUNO, 2005):

- *Fração inalável, IPM*, é a fração mássica do material particulado atmosférico que é inalado através do nariz e da boca, e é dada por:

$$IPM = 0,5[1 + \exp(-0,06D_{ae})] \quad (2.1)$$

onde D_{ae} é o diâmetro aerodinâmico da partícula, em μm .

- *Fração torácica, TPM*, a fração mássica do material particulado atmosférico inalado que penetra no sistema respiratório além da laringe, e é dada por:

$$TPM = IPM * [1 - F_1(x)] \quad (2.2)$$

onde $F_1(x)$ é a função probabilidade acumulada da variável x dada por:

$$x = \ln(D_{ae}/\Gamma) / \ln \sigma \quad (2.3)$$

onde $\Gamma = 11.64 \mu\text{m}$ e $\sigma = 1,5$.

- *Fração respirável de alto risco, HRPm*, é a fração mássica de partículas inaláveis mais sensível aos idosos, enfermos e crianças. A fração mássica HRPm é dada por:

$$HRPM = IPM * [1 - F(x)] \quad (2.4)$$

onde x é dado pela equação (2.3), com $\Gamma = 2,50 \mu\text{m}$ e $\sigma = 1,5$.

Segundo BRUNO (2005), A legislação internacional referente a níveis máximos de material particulado na atmosfera tem seguido essas diretrizes de perto. Ainda relata que a USEPA tem adotado desde 1987 a fração de partículas com diâmetro menor que $10\text{ }\mu\text{m}$ como PM_{10} , convenção muito similar à fração torácica, TPM, adotada pela ACGIH. Para a fração fina do PM_{10} a USEPA adota $\text{PM}_{2,5}$, que é muito similar à fração respirável de alto risco, HRP. A Figura 2.5 mostra uma importante comparação entre as denominações adotadas pela ACGIH e USEPA, evidenciando as similaridades.

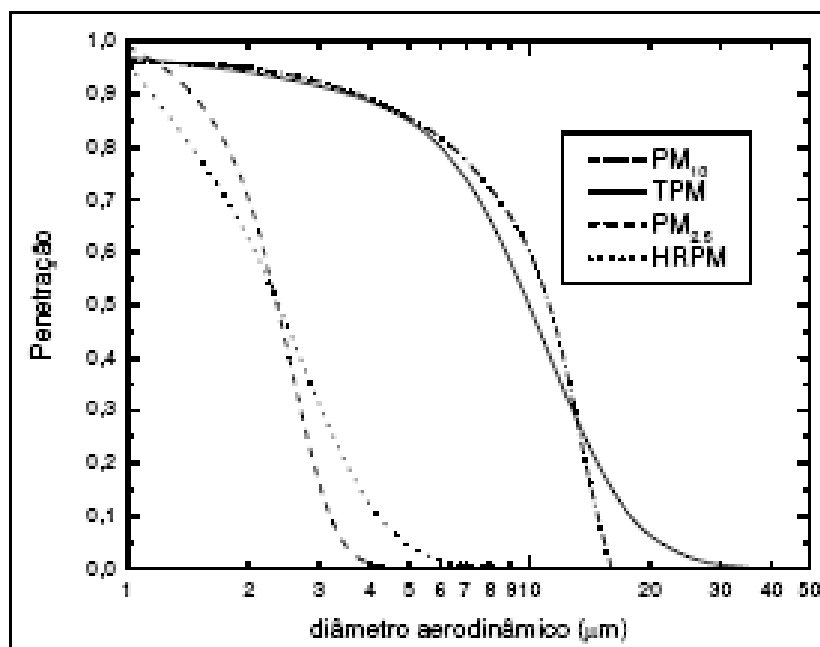


Figura 2. 5 - Frações de material particulado inalável definido pela ACGIH e USEPA (Fonte: BRUNO, 2005).

O aparelho respiratório humano sofre com a inalação de poluentes presentes no ar atmosférico, das mais variadas formas, devido à sua complexidade e sensibilidade. Doenças como silicose (causada pelo acúmulo de partículas de sílica no pulmão) podem ser evitadas, diminuindo consideravelmente gastos com o tratamento hospitalar de indivíduos. Partículas grandes são depositadas na região nasal por impactação nos pêlos do nariz e nos desvios das passagens nasais. Partículas pequenas passam através da região nasal, são depositadas na traquéia bronquial e regiões pulmonares. Partículas maiores que $10\text{ }\mu\text{m}$ são geralmente adsorvidas pela cavidade nasal e garganta, enquanto que 90% das partículas maiores que $5\text{ }\mu\text{m}$ precipitam nas partes superiores das vias respiratórias. Partículas de tamanho entre 1 e $5\text{ }\mu\text{m}$

μm precipitam na traquéia e brônquios. Partículas finas menores que $1\ \mu\text{m}$ alcançam os brônquios e os alvéolos (KIKUO, 1977; HINDS, 1982).

De acordo com BAIRD (2002) a razão das partículas pequenas serem mais prejudiciais que as grandes são:

- Como as partículas grossas sedimentam rapidamente, a exposição humana a essas partículas por inalação é reduzida;
- Quando inalada, as partículas grossas são filtradas de modo eficiente pelo nariz e pela garganta e geralmente não são transportadas até os pulmões. Ao contrário, as partículas finas inaladas usualmente chegam até os pulmões e, uma vez ali, podem ser adsorvidas nas superfícies das células e, em razão disso, causar danos à saúde;
- A área superficial por unidade de massa para as partículas grandes é menor que para as pequenas, e assim, quando comparamos uma mesma massa, a capacidade das partículas maiores em transportar moléculas de gás adsorvidas até os órgãos do sistema respiratório, onde podem catalisar reações químicas e biológicas, é menor.
- Provoca um ataque mais distribuído em muitos alvéolos.

A Figura 2.6 representa esquematicamente o sistema respiratório humano e suas partes constituintes.

Nas últimas três décadas, o melhor conhecimento das origens, composições, comportamentos, interações e, do ponto fulcral, os mecanismos de ação desses verdadeiros inimigos da saúde pública têm mobilizado esforços e recursos tecnológicos e financeiros diversos (SALDIVA, 2007).

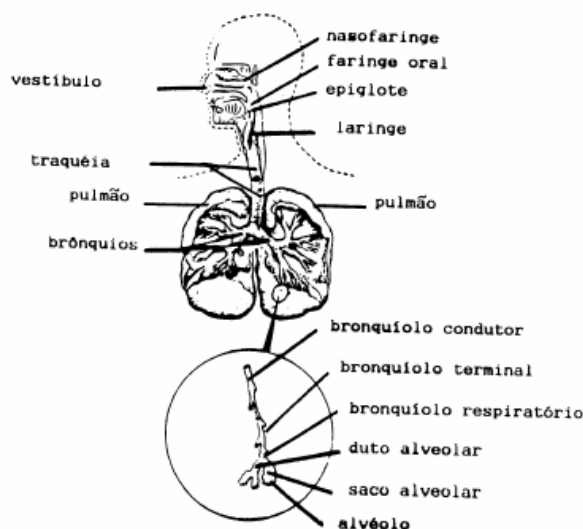


Figura 2.6 – Sistema respiratório humano e suas partes constituintes (INNOCENTINI, 1993).

Estudos observacionais têm procurado mostrar, com resultados cada vez mais significativos, efeitos de morbidade e mortalidade associados aos poluentes do ar. No entanto, para se avaliar a plausibilidade biológica destes achados, tem sido necessária a realização de estudos de intervenção e experimentais.

LIPFERT (1997), CELLI (1999) orientam que os estudos sobre mortalidade diária devem ser realizados em períodos longos de amostragem para que se tenham resultados estatísticos significantes. Somente desta forma torna-se possível a detecção dos efeitos sobre a saúde, provenientes da poluição atmosférica.

O aprimoramento de técnicas de análise estatística de séries temporais, o tipo de estudo ecológico predominante quando se analisa mortalidade e sua associação com poluentes, conferem confiabilidade aos resultados (SALDIVA, 2007).

CELLI (1999) apresenta os resultados de estudo de Utah Valley (Utah - EUA) onde a mortalidade em dias de concentração de MP_{10} superior a $100 \mu g/m^3$ é 11% maior que em dias de concentração inferior a $50 \mu g/m^3$. Posteriormente, considerando a tendência temporal das variáveis meteorológicas, o aumento na mortalidade diária para a concentração de $100 \mu g/m^3$ (média de 5 dias) foi para 16%.

MARQUES (2000) apresenta um levantamento sobre estudos que relacionam o aumento da taxa de mortalidade por doenças respiratórias. Este levantamento aponta a década de 50, nos Estados Unidos como início desses estudos. A partir daí, relata o crescente interesse de diversos pesquisadores pelo tema, os quais utilizaram informações regionalizadas para verificação da correlação entre as doenças e crescimento da taxa de mortalidade.

A Tabela 2.8 apresenta alguns resultados de trabalhos executados em três continentes que correlacionaram a poluição por material particulado MP_{10} com a mortalidade, inclusive no Brasil (CELLI, 1999).

VEDAL (1997) e CELLI (1999) relatam que os estudos citados na Tabela 2.8 podem ficar comprometidos devido características que não variam ao longo do período, como por exemplo, o tabagismo. Por outro lado, fatores que variam com o tempo, como a presença de outros poluentes pode atribuir seus efeitos ao material particulado, obtendo-se estimativas de resultados inválidos para o estudo dos efeitos do material particulado na saúde. Portanto, fatores que variam diferenciadamente da concentração de material particulado, na função tempo, podem introduzir erro no estudo de séries temporais.

Tabela 2.8 – Estudos de séries temporais longitudinais correlacionando mortalidade /MP₁₀ (LIPFERT, 1997; VEDAL, 1997; CELLI, 1999*).

Local período	Média (µg/m ³)	Co-poluentes analisados	% de mudança na mortalidade por aumento de 10 µg/m ³ (95% IC)	Referência*
St. Louis EUA 1985-86	28	SO ₂ , NO ₂ , O ₃	1,5	DOCKERY (1992)
Kingston – EUA 1985-86	30	SO ₂ , NO ₂ , O ₃	1,6	DOCKERY (1992)
Utah Valley – EUA 1985-89	47		1,5	POPE (1992)
Birmingham – EUA 1985-88	48		1,0	SCHWARTZ (1992)
Cook Conty – EUA 1985-92	37		0,5	STYER (1995)
São Paulo – Brasil 1990-01	82	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , CO	1,2	SALDIVA (1995)
Santiago Chile 1989-91	115	SO ₂ , NO ₂ , O ₃	0,7	OSTRO (1995)
Amsterdã – Holanda 1986-92	38	CO, NO ₂ , O ₃	0,6	VERHOEF (1996)

A consideração das chamadas covariáveis, como os fatores meteorológicos, que muitas vezes não tem controle efetivo são importantes nestes estudos. Por outro lado, a principal crítica de VEDAL (1997) e CELLI (1999) é feita a falta de caracterização química do material particulado.

Outras dificuldades são verificadas pela presença de covariáveis de controle mais difíceis como aquelas relacionadas com a saúde ocupacional, ou seja, ambientes de trabalho adversos e fatores dependentes da diversidade populacional de uma região, que modulam a probabilidade de contração de doenças respiratórias de natureza infecciosa (SALDIVA, 2002).

Segundo SALDIVA (2002), o aprimoramento de técnicas de análises estatísticas de séries temporais de estudos ecológicos que analisam a mortalidade associada com poluentes confere mais confiabilidade aos resultados.

Não só a mortalidade pode ser um marcador de efeitos sobre a saúde, mas outros parâmetros de morbidade também podem sê-lo, uma vez que pessoas levadas à morte, certamente apresentaram uma história de alterações clínicas anterior. Essas alterações clínicas têm sido documentadas, em função dos diversos sintomas relacionados com a poluição (SALDIVA, 2002).

Através da análise de estudos realizados em diversos centros urbanos, que utilizaram desenhos epidemiológicos relacionados com a poluição, pode-se concluir que (SALDIVA, 2002):

- As concentrações de poluentes atmosféricos encontradas em grandes cidades acarretam afecções agudas e crônicas no trato respiratório, mesmo em concentrações abaixo do padrão de qualidade do ar. A maior incidência de patologias, tais como asma e bronquite, está associada com as variações das concentrações de vários poluentes atmosféricos;
- A mortalidade por patologias do sistema respiratório apresenta uma forte associação com a poluição atmosférica;
- As populações mais vulneráveis são as crianças, idosos e aquelas que apresentam doenças respiratórias;
- O material particulado inalável, com dimensão inferior a 10 μm e mais recentemente 2,5 μm , é apontado como o poluente mais freqüentemente relacionado com danos à saúde;
- Sinais, cada vez mais evidentes, mostram ser os padrões de qualidade do ar inadequados para a proteção da população mais susceptível à poluição atmosférica. Vários estudos demonstraram ocorrência de efeitos mórbidos em concentrações abaixo dos padrões de qualidade do ar;
- A mortalidade por doenças cardiovasculares também tem sido relacionada à poluição atmosférica urbana, sendo novamente o material particulado inalável, o poluente freqüentemente associado;
- Estudos experimentais e toxicológicos têm dado sustentação aos resultados encontrados em estudos epidemiológicos.

2.10.2 – Materiais

Alguns fenômenos podem ser identificados no processo de danos da poluição do ar sobre materiais. Entre eles destacam-se a abrasão, a deposição e a remoção, o ataque químico direto e indireto e a corrosão eletroquímica.

Além dos fenômenos apontados podem ser ressaltados alguns fatores que influenciam os danos a materiais por atmosferas poluídas: umidade relativa, temperatura, luz solar, velocidade do ar, a posição no espaço do material. A título de exemplo pode-se mencionar que não havendo umidade praticamente não haverá corrosão eletroquímica, mesmo em

atmosfera muito poluída. Para vários metais existe uma umidade atmosférica crítica, que quando excedida, produz abrupto aumento na velocidade de corrosão. Para atmosferas poluídas com dióxido de enxofre foram observadas as seguintes umidades críticas relativas: alumínio – 80%, Níquel – 70% e cobre 63% (DERISIO, 1992).

A Tabela 2.9 apresenta alguns exemplos de danos provocados pela poluição do ar a diversos materiais (DERISIO, 1992).

Tabela 2.9 – Danos provocados pela poluição do ar em materiais

Tipo de material	Manifestação típica do dano	Poluente danificante	Fator ambiental
Vidros e Enameis	Alteração da aparência	Substâncias ácidas	Umidade
Metais	Danos à superfície	Dióxido de enxofre	Umidade
	Perda do metal embaçamento	Substâncias ácidas	Temperatura
Materiais de Construção	Descoloração	Dióxido de enxofre; Substância ácidas; partículas	Umidade
Pintura	descoloração	Dióxido de enxofre; Substâncias ácidas; partículas	Umidade fungos
Couro	Desintegração	Dióxido de enxofre; Substâncias ácidas	-
Papel	Torna-se quebradiço	Dióxido de enxofre; Substâncias ácidas	Luz solar
Tecido	Redução de resistência à tensão;	Dióxido de enxofre;	Umidade; Luz solar;
	Formação de manchas	Substâncias ácidas	fungos
Corantes	Desbotamento	Dióxido de nitrogênio e de enxofre oxidantes	Umidade; Luz solar
borracha	Redução de resistência enfraquecimento	oxidantes	Luz solar

Fonte: DERISIO, 1992.

2.10.3 – Propriedades da natureza

Segundo DERISIO (1992), a deterioração da visibilidade é a primeira indicação da existência da poluição do ar para um cidadão comum. Defini-se visibilidade como a maior distância, numa dada direção, na qual é possível ver e identificar “a olho nu”, durante o dia, um proeminente objeto escuro contra o céu no horizonte e durante a noite, uma conhecida e, moderadamente, intensa fonte de luz. Após a determinação das visibilidades em todo o círculo do horizonte, registra-se um único valor, que representa a visibilidade predominante. A visibilidade urbana pode ser afetada principalmente pelos seguintes fatores meteorológicos:

- Altura da inversão e velocidade dos ventos: quanto maior a altura de inversão e a velocidade dos ventos, melhor a visibilidade. No entanto, velocidades de ventos excessivamente altas diminuem a visibilidade em virtude de levantamento de pó.
- Elevadas condições de umidade: propiciam aumento no tamanho de partículas higroscópicas o que resulta em redução da visibilidade.

A redução de visibilidade ocorre devido à presença de partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera, que absorvem e dispersam a luz. Esta redução de visibilidade está relacionada com o tamanho, concentração e características físicas das partículas poluentes presentes.

Levantamentos climatológicos em áreas urbanas têm mostrado que as neblinas nas cidades são mais frequentes e persistentes nas áreas circunvizinhas devido à poluição do ar.

Por outro lado, a quantidade de radiação recebida por uma cidade com poluição é menor do que para uma área sem poluição, sendo os comprimentos de onda mais curtos mais afetados que os mais longos (DERISIO, 1992).

2.10.4 – Vegetação

Os poluentes que causam danos à vegetação são denominados de fitotóxicos. Entre os fitotóxicos severos encontram-se o dióxido de enxofre, peroxiacetil nitrato (PAN), eteno e o ozônio. Outros fitotóxicos menos severos são o cloro, ácido clorídrico, amônia e o mercúrio (LORA, 2002).

As plantas podem ser afetadas pelos poluentes atmosféricos através dos seguintes mecanismos (DERISIO, 1992):

- Redução da penetração da luz (redução da capacidade de fotossíntese) por sedimentação de partículas nas folhas ou por interferência de partículas em suspensão na atmosfera.
- Deposição de poluentes no solo, por sedimentação ou por carreamento pelas chuvas, permitindo a penetração dos poluentes pelas raízes e alterando as condições do solo.
- Penetração dos poluentes pelos estômatos das plantas (pequenos poros na superfície das plantas, geralmente na face inferior das folhas).

Qualquer que seja a forma pela qual uma planta tenha sido afetada, o efeito poderá ser visível ou não. Os sintomas de danos visíveis sobre as folhas das plantas, atribuídas à poluição do ar, podem ser consideradas em três categorias gerais (não mutuamente exclusivas):

- Colapso do tecido foliar.

- Clorose ou outras alterações da cor normal das folhas.
- Alterações no crescimento e produção das plantas importantes não só para a agricultura como também para a floricultura.

Segundo DERISIO (1992) os danos causados às plantas pelo dióxido de enxofre podem ser agudos ou crônicos e geralmente apenas nas folhas. Os efeitos agudos são caracterizados pela morte de áreas bem definidas marginais ou intravenais das folhas. Quando a quantidade de dióxido de enxofre absorvido não chega a causar danos agudos, pode causar marcas crônicas ou cloróticas, devido a absorção lenta do enxofre, em forma de sulfeto ou sulfato, que irá se acumular até matar células.

O *Smog* fotoquímico é constituído de poluentes fitotóxicos severos como o ozônio e o peroxiacetil nitrato e ainda de óxidos de nitrogênio. A exposição das plantas ao *Smog* pode causar severos danos às mesmas. As lesões são características e ocorre geralmente em legumes, cujas folhas adquirem inicialmente cor prateada ou bronzeada devido o colapso das células sub-epiteliais. As lesões se estendem pela folha, formando áreas esbranquiçadas na superfície superior.

2.10.5 – Economia

Os efeitos adversos diretamente provocados pela poluição do ar são extremamente onerosos para os habitantes de áreas urbanas industrializadas. O custo acurado destes efeitos é complexo de se determinar, principalmente porque os bens e serviços ambientais não estão sujeitos às leis de Mercado (DERISIO, 1992). Duas razões básicas podem explicar esta complexidade, a primeira é que até pouco tempo os bens e serviços ambientais eram considerados bens livres, ou seja, inexauríveis, portanto de preço zero. A outra é que não é possível, em muitos casos, estabelecer direitos de propriedade sobre os bens ambientais. Ninguém poderia arrogar o direito sobre bens e serviços ambientais, não havendo como cobrar pelo seu uso. Por estas razões os bens e serviços ambientais eram considerados como de preço zero, ou seja, não eram objeto de transações nos mercados econômicos.

A ocorrência de fenômenos agudos de poluição, dada a saturação da capacidade de assimilação do meio ambiente, trouxe a percepção sobre sua limitação em continuar fornecendo a mesma qualidade ambiental.

DERISIO (1992) apresenta algumas estimativas de custo devido à poluição:

- Pittsburg (E.U.A.) estimou-se um custo de perdas devido à poluição do ar em 20 dólares por habitante por ano. Outras estimativas nos Estados Unidos apontaram valores entre 10 e 60 dólares por habitante por ano.
- Inglaterra, 1954, estudos mostraram que a perda econômica total devido à poluição do ar foi da ordem de 250 milhões de libras esterlinas.
- França, 1957, a perda devido à poluição do ar foi da ordem de 6000 francos por habitante ano.
- Atualmente em São Paulo, segundo a Faculdade de Medicina da USP, os gastos com mortes que acontecem antes do tempo são da ordem de US\$ 450 milhões por ano. De acordo com o Prof. Paulo Saldiva, viver em São Paulo corresponde a fumar quatro cigarros diariamente em virtude das partículas em suspensão no ar, o que resulta em média a perda de dois anos de vida.

Um fator importante a ser considerado são os custos relativos à prevenção e controle da poluição do ar. Neste caso devem ser considerados tanto os gastos governamentais como os das empresas privadas. Nos Estados Unidos, em 1968, por exemplo, em algumas comunidades o gasto médio do controle e prevenção da poluição do ar foi de cerca de 10 *cents* por habitante ano.

Em termos de custo-benefício, estima-se que, para cada um dólar gasto no controle da poluição do ar, se evitará o gasto de dezesseis dólares decorrentes dos danos causados (DERISIO, 1992).

2.11 – Monitoramento do Material Particulado

Dentre as várias formas de avaliação da qualidade do ar de uma determinada região, destaca-se o monitoramento atmosférico. Neste, deve-se observar o cuidado com os métodos analíticos e equipamentos de forma que produzam resultados apropriados aos propósitos aos quais se destinam, levando-se em conta, também, a quantidade de estações de amostragem, bem como, a frequência das mesmas (AMORIM, 2004).

Vários métodos têm sido propostos para o cálculo do número adequado de estações de amostragem e se localizarem numa dada região e a frequência com que as amostras devem ser coletadas (DERISIO, 1992).

Com relação à frequência de amostragem, a USEPA fixou um valor mínimo para alguns parâmetros importantes apresentados na Tabela 2.10.

De acordo com a metodologia adotada, a amostragem de material particulado pode ser realizada através da determinação do material particulado, em conformidade com a legislação vigente e a identificação das propriedades físico-químicas (HINDS, 1982).

As informações a serem obtidas quando se realiza uma amostragem de partículas na atmosfera devem ser a concentração mássica, o tamanho e a composição elementar das partículas.

Tabela 2.10- Frequência mínima de amostragem (DERÍSIO, 1992).

Parâmetro	Método analítico	Duração	Frequência
Dióxido de enxofre	Absorção	24 horas	1 cada 6 dias
Poeira em suspensão	Hi-vol	24 horas	1 cada 6 dias
Poeira em suspensão	fita	Variável	1 cada 2 horas
Monóxido de carbono	infravermelho	continua	Contínua
Oxidante (O ₃)	iodeto	30 minutos	1 cada 6 dias
Óxidos de nitrogênio	Christie	24 horas	1 cada 14 dias

Em relação ao dimensionamento do tamanho da rede de monitoramento, diversos métodos têm sido propostos. A USEPA propôs um método baseado em relações empíricas, testadas do ponto de vista prático. Tal critério leva em consideração o tamanho da população, a concentração atual do poluente e o método analítico do poluente. A Tabela 2.11 apresenta para o parâmetro poeira em suspensão o dimensionamento do tamanho mínimo da rede de monitoramento de material particulado, conforme a USEPA (DERÍSIO, 1992).

Tabela 2.11 - Dimensionamento do tamanho mínimo da Rede de Monitoramento para material particulado (DERÍSIO, 1992).

Poluente	Características da área	Método	População	Número mínimo de estações
Poeira em suspensão	$x_a > 95 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Hivol (24 horas)	$<10^5$	4
			$10^5 - 10^6$	$4 + 0,6W$
		1 cada 6 dias	$10^6 - 5 \times 10^6$	$7,5 + 0,25W$
			$>5 \times 10^6$	$12 + 0,16W$
	$x_m > 325 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Fita 1 cada 2 horas	-	1 para cada 250.000 habitantes até máximo de 8 locais
	$x_a (60 - 95) \mu\text{g}/\text{m}^3$	Hivol	-	3
	$x_m (150 - 325) \mu\text{g}/\text{m}^3$	Fita	-	1
		Hivol	-	1
	$x_m < 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Hivol	-	1

Onde: x_a =média aritmética anual; x_m =concentração máxima (24 horas) ocorrida no ano e W =população/ 10^6

A estação de amostragem deve ser instalada num determinado local visando avaliar a qualidade do ar de uma área ou região. A escolha do local adequado para a estação de amostragem, além de contemplar as características de distribuição dos poluentes, objetos do estudo, deve levar em consideração a segurança, a proteção dos equipamentos contra intempéries, vandalismo e a disponibilidade de recursos como a energia elétrica.

Segundo DERISIO (1992) algumas das recomendações para a localização e implantação de estações de amostragem de poluentes atmosféricos são:

- Prioridade para as áreas mais poluídas;
- Prioridade para as áreas mais povoadas;
- Instalações de estações nos locais de entrada de ar para a região (a direção predominante dos ventos é importante neste caso);
- Todas as estações devem estar na mesma altura do solo;
- Evitar proximidade de obstáculos tais como prédios etc.
- Evitar proximidade de chaminés.

Em geral, para estimar a concentração de poluentes na atmosfera são utilizadas determinações de médias horárias, de oito horas, diárias, mensais e anuais. A escolha de uma ou mais destas medidas de tendência central, depende de fatores tais como: o tipo de efeito causado pelo poluente, o tipo de padrão de qualidade do ar utilizado, a variação das concentrações com os parâmetros meteorológicos dentre outros.

2.11.1 – Métodos de Amostragens

A determinação do material particulado em suspensão pode ser considerada como um processo de duas fases. Primeira, o ar ambiente carregado de particulados é amostrado através de amostradores específicos que possuem um apropriado orifício de entrada por onde o fluxo de ar passa, depositando o material particulado sobre um filtro. Em seguida, realiza-se a análise do material coletado. O conceito de método de amostragem se torna um tanto genérico se levarmos em consideração apenas a configuração do orifício de entrada do equipamento e o fluxo de ar amostrado. Programas de monitoramentos específicos são caracterizados pela escolha prévia do método de amostragem em associação com o subsequente método de análise a ser utilizado (ALMEIDA, 1999).

Dentre os vários métodos de amostragens os mais utilizados são aqueles que possuem como instrumentação, amostradores do tipo *High Volume Sampler* (HVS), *Médium Volume*

Sampler (MVS) e *Low Volume Sampler* (LVS). Esses equipamentos não realizam uma amostragem seletiva de tamanho de partículas, apenas fornecem dados como o volume de ar amostrado por unidade de tempo, esse dado é essencial para o cálculo da concentração do material particulado no ar ambiente. A configuração do orifício de entrada desses equipamentos é projetada essencialmente para capturar o material particulado (ALMEIDA, 1999).

Serão a seguir citados métodos, técnicas de análises e equipamentos para amostragem seletiva e não seletiva, cujas metodologias já são consagradas, para amostragem de 24 horas ininterruptas. As escalas de amostragens geralmente são do sexto dia, isto é, uma amostragem de duração de 24 horas a cada seis dias.

2.11.1.1 – Uso de impactadores na separação de material particulado

Tendo em vista o estudo da concentração de material particulado de faixas específicas de diâmetro, torna-se necessária sua classificação. Para a classificação dimensional, podem ser utilizadas, dentre outras, as técnicas: classificação inercial, sedimentação gravitacional, centrifugação e precipitação térmica.

Os classificadores inerciais, que incluem impactadores, impactadores virtuais e ciclones, são amplamente empregados na amostragem de particulados. Câmaras sedimentadoras, que incluem centrífugas e câmaras gravitacionais, são menos utilizadas. Já precipitadores são raramente empregados (WILLEKE e BARON, 1993).

O princípio da classificação inercial utiliza a inércia natural das partículas para sua seleção. Nos impactadores a classificação é realizada fazendo com que as partículas com inércia suficiente para atravessar as linhas de corrente gasosa sejam capturadas. Partículas com menor inércia irão permanecer na corrente gasosa.

Em aplicações de impactação inercial, as linhas de fluxo incidem em um plano coletor, geralmente coberto por um substrato que impede a ruptura do particulado. As partículas com diâmetro aerodinâmico superior ao diâmetro de corte ficam retidas no substrato, enquanto que as menores seguem com o fluxo para serem retidas posteriormente em um meio filtrante. Na Figura 2.7 é mostrado um esquema funcional de um classificador inercial convencional (WILLEKE e BARON, 1993; MARQUES, 2000).

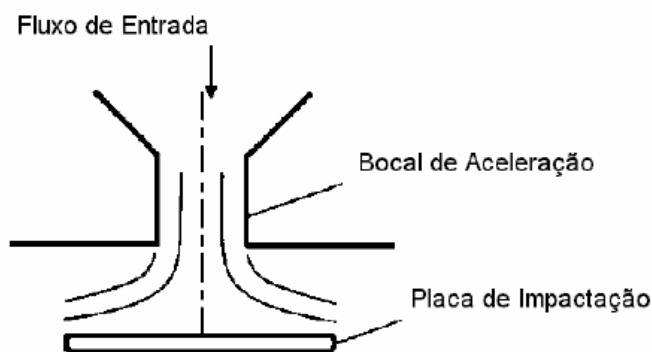


Figura 2.7- Impactação inercial convencional (MARQUES, 2000).

Impactadores virtuais pertencem a categoria de impactadores inerciais mais recentemente desenvolvida e possui uma característica não contemplada pelos impactadores convencionais; isto se deve ao fato de que as partículas permanecem na forma de aerossol após sua seleção, diferentemente dos impactadores convencionais nos quais as partículas são coletadas em uma superfície sólida. Esta característica de manter as partículas sendo transportadas pelo ar é muito importante, permitindo direcionar o fluxo para outros equipamentos de análise, ou para filtros, concentrando as partículas maiores que o diâmetro de corte numa fração menor da vazão total (WILLEKE e BARON, 1993). O esquema funcional de um impactador virtual é demonstrado na Figura 2.8.

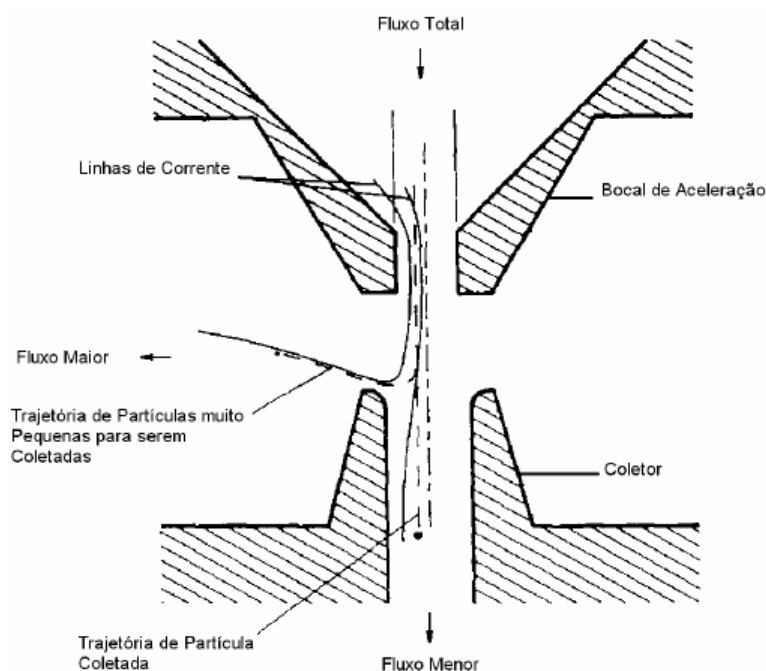


Figura 2.8 - Esquema de um impactador virtual (MARQUES 2000).

2.11.1.2 - Amostradores de Grandes Volumes (AGV)

Constituídos basicamente de um moto-aspirador, os equipamentos de grandes volumes sugam o ar através de um meio filtrante pouco higroscópico, inerte e de baixa resistência à passagem do ar, retendo o material particulado. A vazão aproximada de sucção é de 1000 litros por minuto. A Figura 2.9 mostra um desenho esquemático ilustrativo de um AGV.

O método dos Amostradores de Grandes Volumes (AGV) é o mais apropriado para amostragem de material particulado total e respirável em suspensão. É referência para a legislação brasileira, norte americana, e atende às normas de outras instituições como a ABNT, CETESB e FEEMA (CELLI, 1999).

O primeiro AGV foi desenvolvido por um engenheiro norte americano, Silverman, na década de 40. O equipamento construído por ele era composto por um motor de aspirador de pó doméstico, encaixado em um abrigo hermético constituído por uma lâmina de metal. Todo este aparato foi acoplado para dar suporte a um filtro de 4 polegadas de diâmetro. O nome amostrador de grande volume se deve ao fato do equipamento operar a vazões mais elevadas que os equipamentos existentes.

A empresa Staplex desenvolveu um equipamento com porta filtros de 8x10 polegadas, possibilitando a amostragem de partículas bem maiores. Em 1957 a empresa General Metal Works, desenvolveu um equipamento que é a base dos atuais.

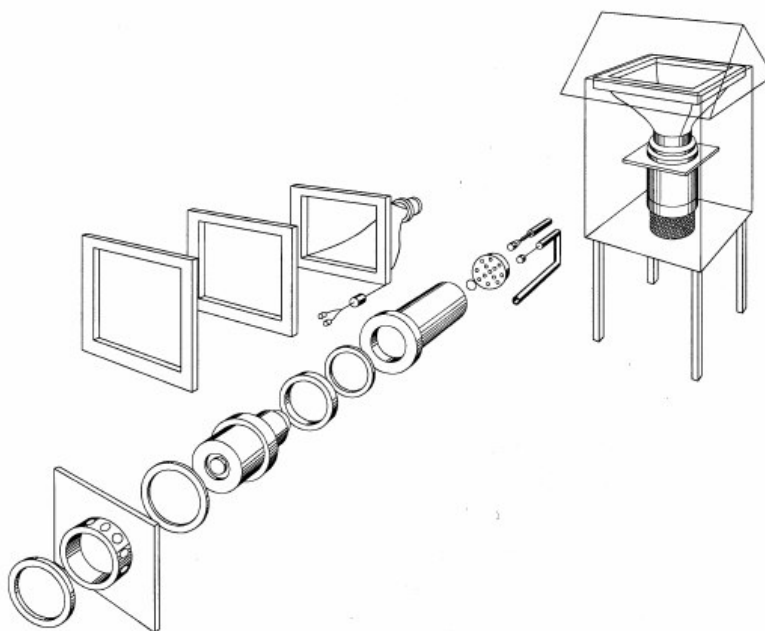


Figura 2.9 - AGV para PTS, com detalhamento do sistema suporte de filtro/moto-aspirador (Grasiby GMW, 1988; CELLI, 1999).

Geralmente encontram-se dois tipos de amostradores como esses no mercado. O que diferencia os dois é o tamanho das partículas que são coletadas. O equipamento responsável pela coleta de partículas com diâmetro aerodinâmico na faixa de 0,1 μm a 100 μm (Partículas Totais em Suspensão) é o AGV-PTS. Para a coleta de partículas menores que 10 μm utiliza-se o AGV-MP₁₀.

O AGV-MP₁₀ é constituído basicamente pelos mesmos componentes do AGV-PTS, a principal diferença entre eles é que para o MP₁₀ o ar adentra um cabeçote, que possui a região de entrada de partículas, perfazendo um ângulo de 360°. O escoamento é acelerado por 9 bocais que projetam o ar para a câmara de impactação inercial, onde o particulado com diâmetro aerodinâmico superior a 10 μm , com o impacto, se dividam em partículas menores e sejam amostrados (AMORIM, 2004).

2.11.1.3 - Amostradores de Pequenos Volumes (APV)

São constituídos de bombas de vácuo de baixa vazão, com média de 16,7 litros por minuto, durante o período de amostragem de 24 horas. A vazão deve ser mantida mesmo com perdas de carga significantes no meio filtrante. Possuem a habilidade de coletar partículas finas e grossas separadamente, sendo assim preferencialmente utilizados em estudos de modelagem de receptores, porque a separação discrimina as partículas que possuem tempos de residência diferentes na atmosfera (ANDRADE, 1986). A Figura 2.10 mostra uma fotografia de um dicotômetro (APV).



Figura 2.10- Amostrador de pequenos volumes, Dicotômetro, marca Andersen (Energética, 2006).

Na Figura 2.10 que mostra o dicotômetro, pode-se observar na parte superior da armação a entrada para amostragem, a qual possui um impactador inercial que separa o MP₁₀ do PTS. Após o fracionamento inicial, o escoamento ar-partícula é impelido a um impactador virtual, onde é subdividido em duas correntes, uma com diâmetro de corte menor ou igual a 2,5 µm (15 lpm) e a outra com a fração grossa do particulado respirável (MP₁₀ – MP_{2,5}), 1,67 lpm. Cada uma destas correntes segue para um meio filtrante onde o material particulado é retido.

2.12 – Análise Estatística

2.12.1 - Análise por Box Plot

A representação gráfica da análise exploratória de dados que mostra o intervalo dos 50% de valores centrais, a mediana, a amplitude e os valores anômalos ou aberrantes é chamado de *box plot*. Esta técnica fornece informações sobre a dispersão da medida.

Quando se utiliza o diagrama box plot, pode-se detectar com precisão a presença de pontos extremos e valores de *outliers*.

A representação de um *box plot* (Figura 2.11) é um retângulo alinhado verticalmente com duas semi-retas, uma em cada um dos lados do retângulo. A altura do retângulo é definida pelo valor do primeiro quartil (Q₁), o qual representa 25% de todos dados, organizados em ordem crescente. O valor que está na posição que representa 75% de todos os dados é o Q₃. O valor compreendido entre Q₁-Q₃ representa 50% de todos os dados. Os dados situados entre o Q₃ e o final da semi-reta (cauda) acima do retângulo (limite superior - LS), determinam o conjunto de valores máximos dos dados sem os valores extremos, ou seja, o alcance. Já os dados que estão entre Q₁ e a cauda inferior (limite inferior – LI) representa os valores mínimos do conjunto de dados. Os pontos situados acima do limite superior ou abaixo do limite inferior são considerados pontos extremos ou *outliers* (MORETTIN e BUSSAB, 2002).

As caudas que aparecem no diagrama *box plot* são calculadas da seguinte maneira:

$$LS = Q_3 + (1,5)(Q_3 - Q_1) \quad LI = Q_1 - (1,5)(Q_3 - Q_1)$$

A posição central é dada pela mediana e a dispersão por Q₃-Q₁. As posições relativas de Q₁, Q₂ e Q₃ dão uma noção da assimetria da distribuição, ou seja, quanto mais central estiver Q₂, mais simétrico será o conjunto de dados analisados.

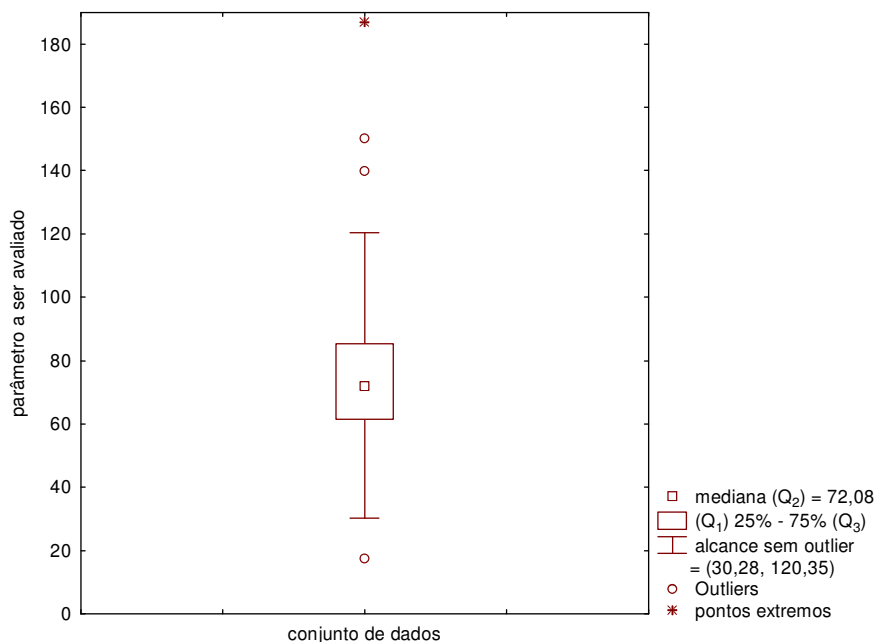


Figura 2.11- Descrição de um diagrama box plot.

2.12.2 - Geoestatística

Geoestatística é um conjunto de métodos úteis para a compreensão e modelagem da variabilidade espacial inerente em um processo de interesse. Embora ela tenha sua origem na mineração, a geoestatística é uma parte básica de muitas outras áreas incluindo as ciências do solo, hidrologia e engenharia. A parte central da geoestatística é a idéia de que medidas mais próximas tendem a serem mais parecidas do que valores observados em locais distantes. A geoestatística fornece métodos para quantificar esta correlação espacial ou temporal e incorporá-la na estimação e na inferência (GOTWAY, 1996).

Após análise do comportamento de uma série avaliada pela geoestatística, calculam-se as semivariâncias dos dados conforme a Equação 2.5. A semivariância, $\gamma(h)$, avalia a variância de uma observação com seu vizinho separado por uma distância h (quer seja no espaço ou no tempo). As observações na posição x_i e x_i+h são $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ respectivamente, $N(h)$ é o número de pontos separados pela distância h .

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2}{N(h)} \quad 2.5$$

O gráfico de $\gamma(h)$ em função de h é chamado de semivariograma. Analisando a expressão da função semivariância, pode-se inferir que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, portanto menor a semivariância. E

quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a dispersão. Teoricamente para a distância $h=0$ a semivariância $\gamma(0)=0$ e, a semivariância $\gamma(h)$ cresce com o incremento de h , até atingir um valor constante para $\gamma(h)$ que corresponde às variações aleatórias, ou seja, variações que não são justificadas pela semelhança de um ponto com outro.

A distância h a partir da qual $\gamma(h)$ se torna aproximadamente constante é chamada de alcance da dependência espacial ou temporal (**a**) sendo que as medições realizadas a distâncias maiores que **a**, tem distribuição aleatória e, portanto, são independentes entre si. O valor de $\gamma(h)$ constante é chamado de patamar (**C**).

A utilização de dados amostrais na estimativa da semivariância e na construção do semivariograma, revela que, freqüentemente, para $h = 0$ a semivariância $\gamma(0)$ difere de zero. A impossibilidade de se fazer reamostragem exatamente sobre um ponto já amostrado (nestes casos pode ocorrer variações a distâncias menores do que a menor distância de amostragem) e erros como erros de amostragem, erros de análise de laboratório, etc., são justificativas dessa descontinuidade na origem. Quando $\gamma(0) \neq 0$, surge um novo termo no semivariograma chamado de **efeito pepita** (C_0) e, neste caso, o **patamar** é dado por: $C_0 + C$.

O patamar do semivariograma ($C_0 + C$) é uma estimativa sem tendência da variância (σ^2) da variável $Z(t)$.

Analisando as Figuras 2.12 A e 2.12 B pode-se verificar o comportamento ideal de um semivariograma e também quando existe a ocorrência do **efeito pepita**.

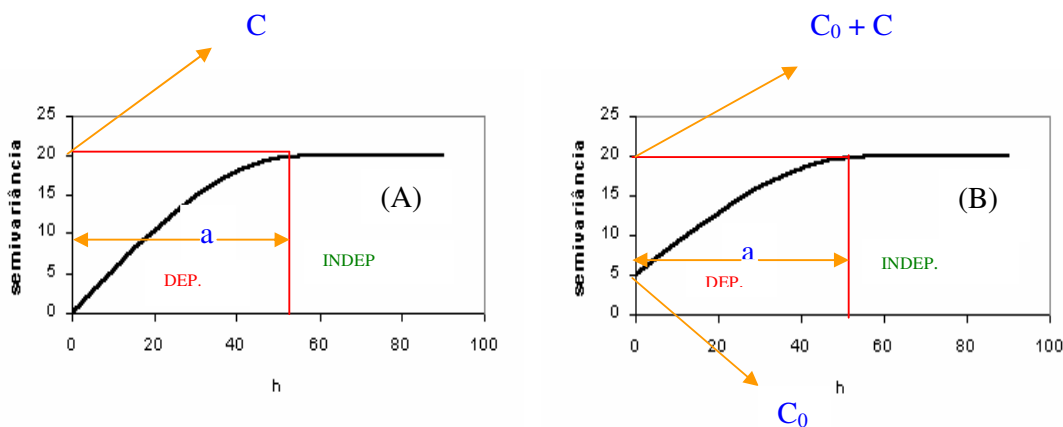


Figura 2.12 - Semivariogramas: (A) sem efeito pepita; (B) com efeito pepita

Os semivariogramas apresentados nas Figura 2.12 (A) e (B) indicam estacionaridade de segunda ordem para a variável, porque apresenta patamar claro e bem definido. Se o **semivariograma** for **constante** e igual ao patamar para qualquer valor de h , tem-se o **efeito**

pepita puro e, neste caso, tem-se a ausência total de dependência espacial, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada à distância ou tempo menor do que o menor espaçamento entre amostras.

Um outro tipo de semivariograma é aquele que apresenta a semivariância com flutuações. Este semivariograma é chamado de **semivariograma periódico ou cíclico** e indica uma **periodicidade nos dados** que pode ser explicada por algum fator conhecido e analisada por meio da densidade espectral.

Outro tipo de semivariograma é aquele em que as semivariâncias crescem, sem limites, para todos os valores de h , ou seja, **semivariogramas sem patamar** definido. Esse semivariograma indica que a hipótese de estacionaridade de segunda ordem não foi atendida e, provavelmente, esta-se trabalhando com a hipótese intrínseca (fenômeno com capacidade infinita de dispersão). Ele indica também que a máxima distância h entre as amostras não foi capaz de exibir toda a variância dos dados e provavelmente existe tendência dos dados para determinada direção. Se for verificada a tendência remove-se esta tendência e verifica-se se a variável resíduo apresenta semivariograma com patamar (estacionaridade de segunda ordem). Outra alternativa é trabalhar com a hipótese de tendência nos dados originais. Vale ressaltar que a primeira alternativa é a mais simples e a mais utilizada (VIEIRA et al., 1983).

Se o semivariograma dos resíduos apresenta efeito pepita puro, pode-se dizer que a superfície de tendência é a melhor representação espacial da variável. Uma metodologia de se ajustar superfícies de tendência é a utilização de **regressão múltipla**.

Pode-se ter ainda um semivariograma com mais de uma estrutura de variância, que são chamados de **semivariogramas com estruturas entrelaçadas** ou **semivariogramas imbricados**. Nesse caso uma explicação para este caso poderia estar associada ao fato de estar trabalhando com mais de uma população, ou seja, até uma distância X trabalha-se com uma determinada população e a partir daí outra ou outras populações.

As Figuras 2.13 A, B, C, D e E, mostram respectivamente, semivariogramas experimentais com patamar definido, efeito pepita puro, sem patamar, cíclico e com estruturas entrelaçadas.

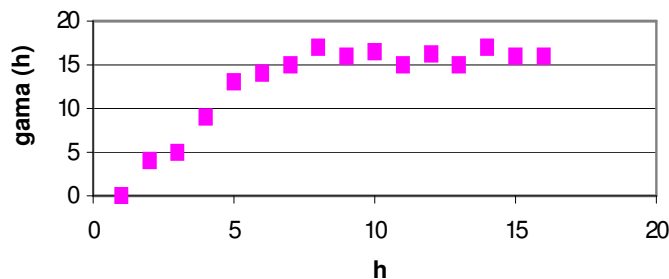


Figura 2.13 (A) – Semivariograma com patamar definido

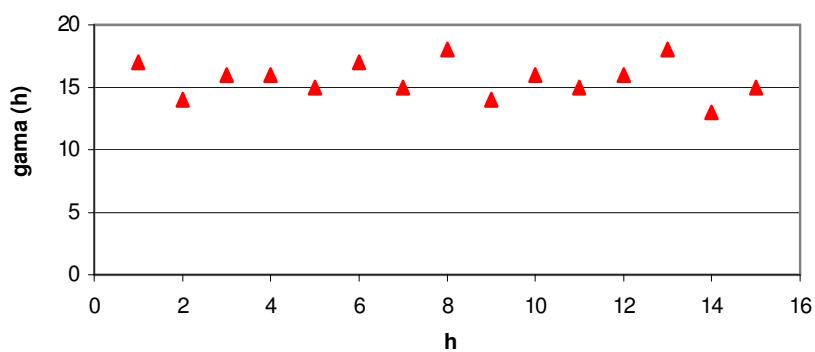


Figura 2.13 (B) – Semivariograma com efeito pepita puro

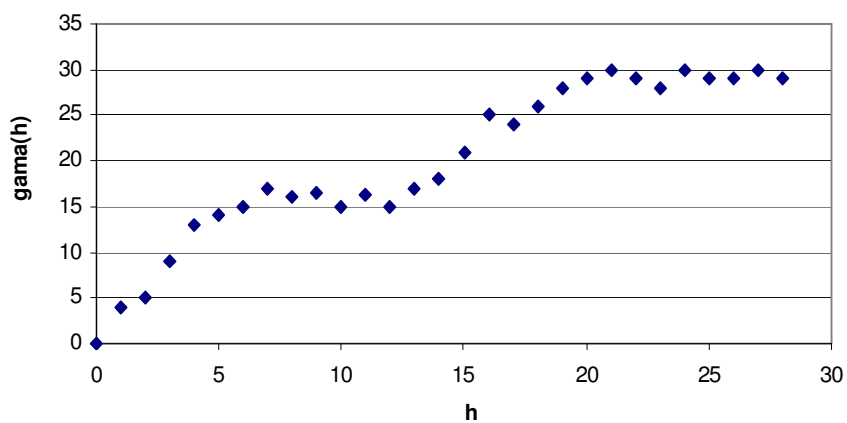


Figura 2.13 (C) – Semivariograma sem patamar

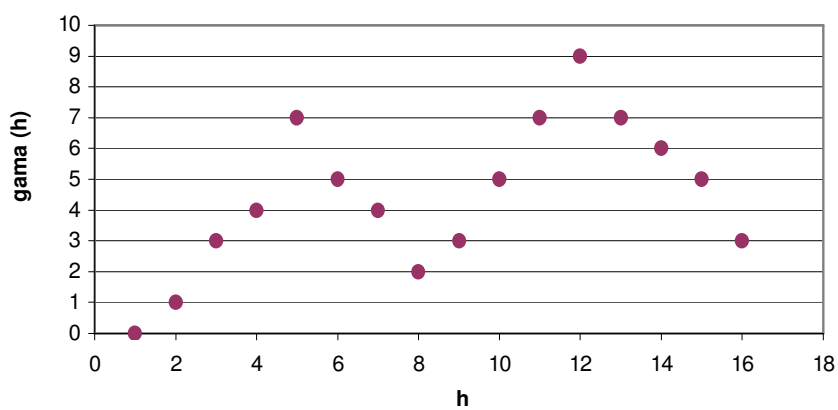


Figura 2.13 (D) – Semivariograma cíclico

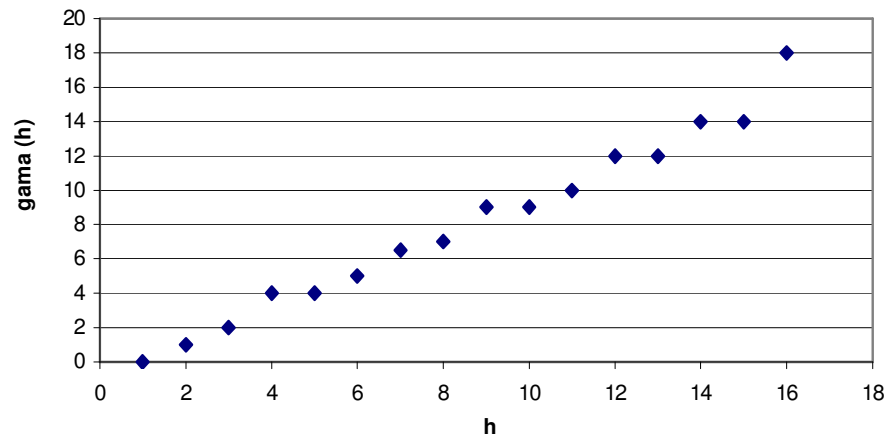


Figura 2.13 (E) – Semivariograma com estruturas entrelaçadas

No estudo utilizando a geoestatística pode-se ainda avaliar o grau de dependência espacial da variável em questão. O grau de dependência pode ser classificado da seguinte forma:

- **variável com forte dependência espacial ou temporal** – se o efeito pepita for menor ou igual a 25% do patamar $\left(\frac{C_0}{C_0 + C} < 0,25 \right)$;
- **variável com moderada dependência espacial ou temporal** – se o efeito pepita representar entre 25% e 75% do patamar $\left(0,25 \leq \frac{C_0}{C_0 + C} \leq 0,75 \right)$;
- **variável com fraca dependência espacial ou temporal** – se a relação entre efeito pepita e patamar estiver entre 75% e 100% $\left(0,75 < \frac{C_0}{C_0 + C} < 1,00 \right)$;
- **variável independente** – se a relação entre efeito pepita e patamar for igual a 100%, neste caso temos o semivariograma com efeito pepita puro $\left(\frac{C_0}{C_0 + C} = 1,00 \right)$.

Na aplicação da teoria geoestatística a dados experimentais, ajusta-se modelos teóricos de semivariogramas às semivariâncias experimentais, e desta forma, trabalha-se com modelos estatísticos de semivariogramas.

O gráfico da semivariância ($\gamma(h)$) em função da distância (h) da série de pontos experimentais é chamado de semivariograma experimental, os pontos aparecem na forma discreta. Uma função contínua deve ser ajustada às semivariâncias experimentais.

A escolha do modelo de semivariograma que será utilizado é um dos aspectos mais importantes da geoestatística. Todos os cálculos da geoestatística dependem do modelo de semivariograma ajustado e, conseqüentemente, se o modelo ajustado não for apropriado, todos os cálculos seguintes conterão erros que poderão afetar as inferências.

Vários métodos são utilizados para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais.

Definindo C_0 como efeito pepita, $C_0 + C$ como patamar e a como alcance, os principais modelos de semivariogramas utilizados na geoestatística são:

- **modelo linear com patamar**

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C}{a}h & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2.6)$$

Neste caso C/a é o coeficiente angular para $0 \leq h \leq a$

- **modelo esférico**

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2.7)$$

- **modelo exponencial**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3(h/a)} \right] \quad 0 < h < d \quad (2.8)$$

Nos modelos exponencial e gaussiano, d é a distância máxima na qual o semivariograma é definido e nestes modelos o patamar (a) é atingido apenas assintoticamente. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza.

- **modelo gaussiano**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3(h/a)^2} \right] \quad 0 \leq h \leq d \quad (2.9)$$

- **modelos sem patamar**

$$\gamma(h) = C_0 + Ah^B \quad 0 < B < 2 \quad (2.10)$$

Neste modelo, os parâmetros A e B são constantes que definem o modelo, onde B tem que ser estritamente maior que zero e menor que dois para garantir a condição de positividade definida condicional.

Dependendo da escala de trabalho e do espaçamento entre amostras, pode-se ter mais de um modelo de semivariograma para os dados. Nestes casos têm-se as estruturas entrelaçadas.

As Figuras 2.14 (A) e (B) mostram os aspectos gerais dos modelos de semivariogramas discutidos anteriormente.

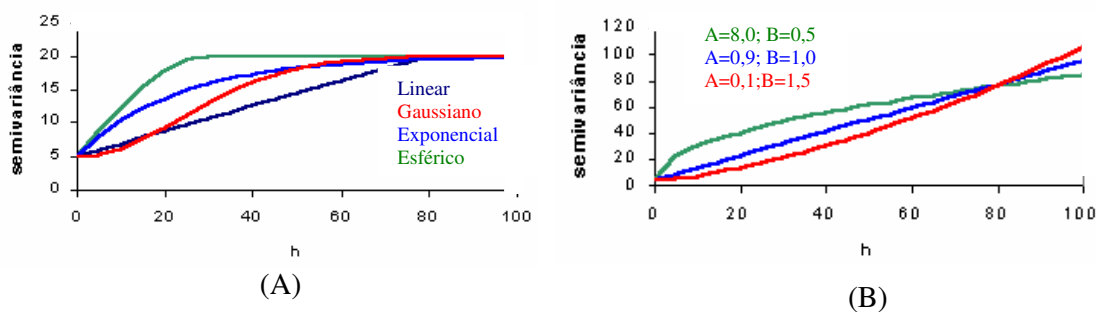


Figura 2.14- Modelos de semivariograma: (A) com patamar; (B) sem patamar

2.12.3 - Séries Temporais

Segundo MORETTIN e TOLOI (2004), o estudo de séries temporais tem por filosofia a idéia básica de que o passado é o melhor elemento para se estimar o futuro; assim os valores passados e presentes da série serão projetados para o futuro. Nesse sentido, entende-se por previsões a tentativa de prever o comportamento de um sistema em um instante $t + h$, com base nas informações até o momento t , ou seja, passados e presentes.

O primeiro passo na investigação de uma série temporal deve sempre ser um cuidadoso escrutínio dos dados registrados em um gráfico ao longo do tempo. Isso sugere o método de análise, assim como um resumo estatístico geral dos dados observados.

Uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas em intervalos equidistantes no tempo; entretanto, tempo pode ser substituído por qualquer variável como espaço, profundidade, etc. As observações apresentam uma dependência serial entre elas, e o estudo de uma série temporal consiste em analisar e modelar esta dependência.

Matematicamente, uma série temporal é definida pelos valores $y_1, y_2, y_3, \dots$ de uma variável y , nos tempos $t_1, t_2, \dots$. Portanto y é uma função de t simbolizada por $y = f(t)$, ou Z_t .

Alguns exemplos de séries temporais são: o consumo de energia elétrica de uma residência, valores diários do preço das ações de uma empresa, valores mensais de temperatura de uma localidade, valores diários do índice de produto industrial no Brasil, eletrocardiograma de uma pessoa e registro de movimento da crosta terrestre (FERRAZ, 1999).

Para STEVENSON (1981) quando se analisa uma série temporal, tem-se como objetivos básicos a modelagem do fenômeno sob consideração; obtenção de conclusões em termos estatísticos e avaliação da adequação do modelo em termos de previsão.

Uma série temporal é estacionária quando ela desenvolve-se no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante.

A maioria das séries encontradas na prática apresenta alguma forma de não estacionariedade, enquanto que, por outro lado, a maior parte dos procedimentos de análise supõe que essas séries são estacionárias (MORETTIN e TOLOI, 2004). Assim, caso os dados originais não formem uma série estacionária, é necessário transformá-los, sendo que, a transformação mais comum consiste em tomar diferenças sucessivas da série original, até se obter uma série estacionária.

A primeira diferença de uma série $Z(t)$ é definida pela Equação 2.11.

$$\Delta Z(t) = Z(t) - Z(t - 1) \quad (2.11)$$

A segunda diferença de uma série temporal é dada pela Equação 2.12.

$$\Delta^2 Z(t) = \Delta[\Delta Z(t)] = \Delta[Z(t) - Z(t - 1)] = Z(t) - 2Z(t - 1) + Z(t - 2) \quad (2.12)$$

Generalizando, a n -ésima diferença de $Z(t)$ é dada pela Equação 2.13.

$$\Delta^n Z(t) = \Delta[\Delta^{n-1} Z(t)] \quad (2.13)$$

2.12.3.1- Etapas fundamentais na análise das séries temporais

- Coletar os dados das séries temporais, fazendo assegurar que os dados sejam fidedignos.

- Representar graficamente a série temporal, assinalando-se qualitativamente a presença da tendência em longo prazo e as variações cíclicas e por estação.
- Construir a curva ou a reta de tendência em longo prazo e obter valores adequados da tendência, mediante o emprego de um dos métodos: dos mínimos quadrados, a sentinela, exponencial, das médias móveis ou das semimédias.
- Se há variações por estações, obter um índice por estação e ajustar os dados àquelas variações, isto é, desestacionalizar os dados.
- Ajustar os dados desestacionalizados à tendência.
- Representar graficamente as variações cíclicas obtidas anteriormente.
- Mediante a combinação dos resultados das etapas anteriores, fazer uma previsão se for possível, discutir as fontes de erro e a grandeza deles.

2.12.3.2- Representação gráfica das séries temporais

Uma série temporal é representada por meio da construção de um gráfico de y em função de t . Estes tipos de gráficos são chamados, na estatística descritiva, de gráficos de dispersão e mostram, de uma maneira geral, o comportamento dos dados ao longo do tempo. A Figura 2.15 ilustra o comportamento da série temporal de precipitação mensal de Uberlândia - MG, no período de 1981 a 1999 (GUIMARÃES, 2005).

Informações básicas como a presença ou ausência de tendência e de sazonalidade, que são componentes de uma série temporal, podem ser extraídas desse tipo de gráfico.

Outros tipos de análises gráficas preliminares como histogramas, Box-plot, entre outros, usados na estatística descritiva, também podem ser utilizados nesse tipo de análise.

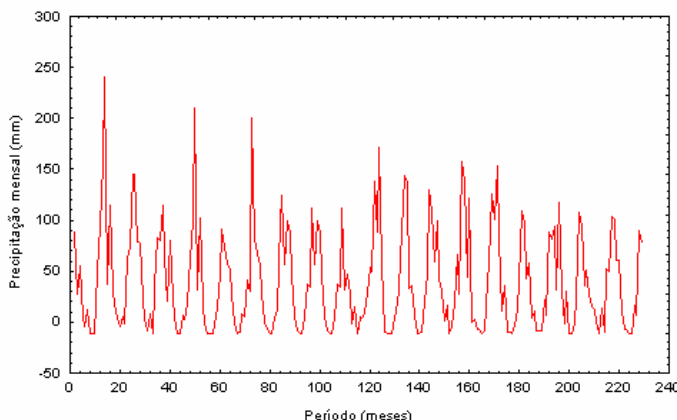


Figura 2.15 - Comportamento da série temporal da precipitação mensal (mm) de Uberlândia-MG, no período de 1981 a 1999 (GUIMARÃES, 2005).

2.12.3.3- Movimentos característicos das séries temporais

O gráfico de uma série temporal é descrito por um ponto que se move com o decorrer do tempo, de forma análoga à trajetória de uma partícula que se desloca sob influência de forças físicas, econômicas, sociológicas, psicológicas e outras. De uma forma geral, consideram-se as séries temporais compostas por quatro padrões, ou elementos básicos que irão definir os movimentos dessas séries. São eles: Tendência, Variações Cíclicas, Variações sazonais e variações irregulares (MORETTIN e TOLOI, 2004).

a - Movimentos a longo prazo ou seculares (tendência da série)

Refere-se à direção geral, segundo o qual parece que o gráfico da série temporal se desenvolve, em um longo intervalo de tempo. Para algumas séries temporais, pode ser adequada uma reta de tendência que poderá ser encontrada, por exemplo, pelo método dos mínimos quadrados, mas não necessariamente, o modelo de tendência deve ser o linear. Nesse caso os fatores observados influenciam os dados e eles tendem apresentar um padrão que pode ser explicado por um modelo de regressão.

Um exemplo de séries temporais com tendência de crescimento é a série que avalia a população mundial, por exemplo, de 1900 a 2000.

b - Variações cíclicas

Refere-se às oscilações a longo prazo ou aos desvios em torno da reta ou da curva de tendência. Esses ciclos podem ser periódicos ou não, isto é, podem ou não seguir padrões análogos, depois de intervalos de tempos iguais. Graficamente são oscilações para cima ou para baixo ao longo da série. A demanda por bens duráveis e por produtos agrícolas são exemplos de séries que, geralmente, apresentam a variação cíclica.

c - Variações por estações (variações sazonais)

São variações cíclicas observadas em prazos relativamente curtos (um ano ou menos). Refere-se a padrões idênticos, ou quase, que uma série temporal parece obedecer durante, por exemplo, os mesmos meses de anos sucessivos. Esses movimentos são resultados de eventos periódicos. Um exemplo de variações sazonais são as vendas no comércio ao longo dos anos, ou a poluição do ar influenciada pelas condições climáticas de uma estação que se repete anualmente (sazonalidade anual).

d - Movimentos irregulares ou aleatórios (variações irregulares)

Referem-se aos deslocamentos esporádicos das séries temporais, provocados por eventos casuais.

As Figuras 2.16 A, 2.16 B e 2.16 C mostram as componentes de tendência, cíclica e sazonal, respectivamente.

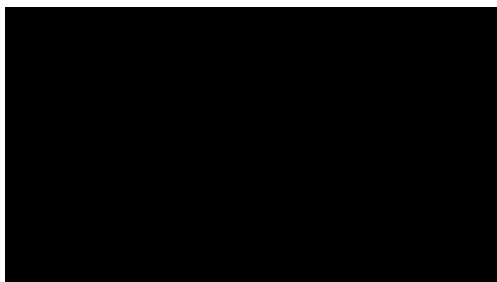


Figura 2.16 A - Séries que apresentam tendência nos dados.

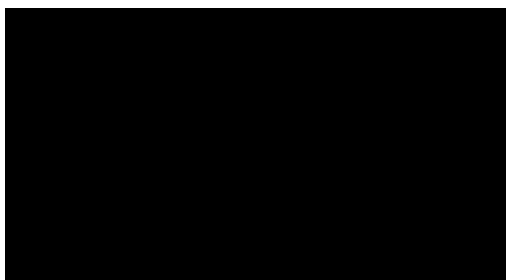


Figura 2.16B - Variações cíclicas

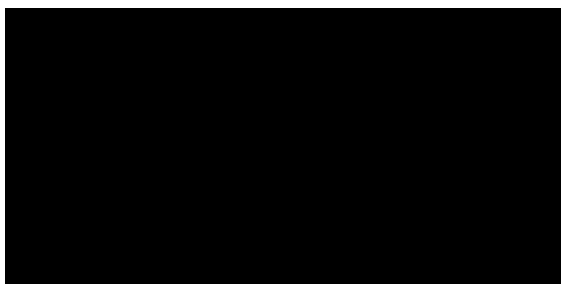


Figura 2.16 C- Variações sazonais

Uma série temporal pode apresentar, simultaneamente, mais de uma componente e não raro encontramos séries que apresentam as componentes de tendência, cíclica, sazonal e irregular.

2.12.3.4 - Análise de séries temporais

No modelo clássico de séries temporais, o processo consiste em decompor uma série em cada uma de suas componentes, analisar cada componente separadamente e então combinar a série a fim de descrever as variações observadas na variável de interesse.

Há duas variantes do modelo clássico. Uma é chamada de multiplicativa e a outra de aditiva. No modelo multiplicativo admite-se que a variável Y , que representa o comportamento da série temporal, é produto das variáveis T , C , S , I , que produzem, respectivamente, os movimentos de tendência, cíclicos, sazonais e irregulares, conforme a Equação 2.14.

$$Y = T \times C \times S \times I = TCSI \quad (2.14)$$

No modelo aditivo admite-se que a série é a soma das componentes individuais e, portanto, o modelo é representado pela Equação 2.15.

$$Y = T + C + S + I \quad (2.15)$$

A análise das séries temporais consiste em uma investigação dos fatores T , C , S , I e é freqüentemente classificada como a decomposição de uma série temporal em seus movimentos.

a- Componente de Tendência (T)

Os dois principais objetivos de se isolar a componente de tendência em uma série temporal são: a) remover a tendência de modo a permitir a análise de outras componentes e b) identificar a tendência de modo a utilizá-la como suporte em planejamentos e decisões.

- A forma mais simples de tendência é apresentada na Equação 2.16.

$$Y_t = \alpha + \beta + \varepsilon_t \quad (2.16)$$

- Outras formas de tendência são: função polinomial, curva de Gompertz e curva logística, apresentadas nas Equações 2.17, 2.18 e 2.19 respectivamente.

$$Y_t = \alpha + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \dots \beta_k t^k + \varepsilon_t \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \log Y_t &= \alpha + \beta r^t \\ 0 < r < 1 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$Y_t = \frac{\alpha}{1 + \beta e^{-ct}} \quad (2.19)$$

Os principais métodos de avaliar a tendência dos dados são os **métodos de regressão** e o **método das médias móveis** (MORETIN e TOLOI, 2004).

O **método de regressão** é bastante usado nos trabalhos atuais e consiste inicialmente de uma inspeção visual do gráfico da série. A tendência pode ser linear ou não. Uma vez identificada a forma do gráfico, aplica-se o modelo de regressão mais adequado, obtendo os coeficientes da equação é possível fazer uma previsão para a variável analisada.

Um segundo método de análise de tendência é o **método das médias móveis** (MORETTIN e TOLOI 2004). Uma média móvel é uma média dos últimos k pontos observados. Por exemplo, se a média é composta das 4 últimas observações (k =4), então, a medida que se considera cada nova observação, despreza-se a mais antiga (Uma média móvel é a média aritmética das últimas k observações (Equação 2.20).

$$MM = \frac{\sum_{i=t-K}^t Y_i}{k} \quad (2.20)$$

O efeito da média móvel é remover variações sazonais, cíclicas e irregulares e o que restar é considerado tendência. O problema é que na prática é impossível remover completamente as variações cíclicas e irregulares. O ideal seria escolher um período bastante longo para a média móvel a fim de permitir a remoção das variações cíclicas e irregulares. Entretanto, quanto mais dados forem incluídos na média, menos sensível se torna ela a valores recentes.

A vantagem do método de médias móveis sobre o de regressão é que ele abrange tendências tanto lineares como não lineares. A desvantagem está no fato de que os primeiros e os últimos valores não possuem valores correspondentes na média móvel, embora apresentem valores para a regressão (MORETTIN e TOLOI 2004).

A determinação da tendência pode também ser feita usando diferenciação. Esse método consiste em efetuar a diferença entre os valores de uma série X_t defasada de uma unidade, ou seja, X_{t-1} .

Como mencionado anteriormente, deve-se efetuar diferenças até que a série torne-se estacionária. Para dados não sazonais, geralmente a primeira diferença é suficiente. A nova série Y_t é formada a partir da serie original X_t .

As Equações 2.21 e 2.22 representam uma série diferenciada de ordem 1 e 2, respectivamente.

$$y_t = x_t - x_{t-1} = \nabla x_t \quad (2.21)$$

$$y_t = \nabla^2 x_t = \nabla(x_t - x_{t-1}) = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2} \quad (2.22)$$

b) Componentes cíclicas e irregulares

As variações cíclicas são variações periódicas de amplitude superior a um ano. É praticamente impossível separar as variações cíclicas das variações irregulares e, portanto, essas são analisadas em conjunto. Para isolar as variações cíclicas e irregulares, as demais variações (tendência e sazonal) devem ser removidas dos dados.

c) Componentes sazonais

As variações sazonais são aquelas que ocorrem regularmente dentro de um curto período de tempo (por exemplo, um ano). Os objetivos de isolar a componente sazonal são: remover o padrão sazonal para estudar as variações cíclicas; identificar os fatores sazonais de forma que eles possam ser levados em conta na hora de uma decisão.

Para prever os padrões sazonais é preciso primeiro identifica-los e determinar-lhes o alcance. A técnica mais usada para esta análise é o **método da razão para a média móvel** (MORETIN e TOLOI, 2004).

d) Função autocorrelação (fac)

Uma ferramenta tradicionalmente empregada na etapa de identificação do modelo e estimação de sua ordem é a função de autocorrelação (fac) (VANDAELE, 1983).

A identificação inicialmente é realizada através da comparação do comportamento da fac gerada a partir da série temporal com o comportamento teórico característico das diversas classes possíveis de modelos. Por basear-se na comparação visual entre dois comportamentos gráficos, tal procedimento é bastante subjetivo. Por sua vez, a estimativa das ordens dos modelos a serem testados é baseada no número de atrasos estatisticamente significantes da fac. Assim, caso os dados apresentem funções fac com no máximo 3 ordens de atraso significantes, deduz-se que valores defasados de mais de três instantes de tempo não exercem influencia significativa sobre o valor presente. Então, apenas modelos de ordem 3 ou inferior necessitariam ser testados.

A função autocorrelação é uma função que associa a cada valor de uma distância entre tempo, que é chamado de “lag” k , o seu respectivo coeficiente de correlação. A representação gráfica da autocorrelação é chamada de autocorrelograma ou simplesmente correlograma.

Espera-se um decréscimo da função autocorrelação à medida que a distância entre as observações aumenta e, no caso das séries temporais, à medida que o tempo passa. Pode-se dizer que valores vizinhos guardam mais semelhanças entre si do que valores muitos distantes.

A função autocorrelação é, portanto, uma medida de interdependência entre as observações e também é importante para verificar a estacionaridade da série.

Se ao construir o correlograma o coeficiente não diminui rapidamente para zero à medida que k cresce, tem-se uma série não estacionária, caso contrário tem-se a série estacionária.

A estimação dos parâmetros que compõe o modelo pode ser efetuada através do método dos mínimos quadrados (VANDAELE, 1983). Para que seja possível realizar as etapas de identificação e estimação, é necessário utilizar certa quantidade de dados históricos. Esses dados devem ser representativos do comportamento das variáveis envolvidas, permitindo uma correta sintonia dos parâmetros do modelo. Esse trecho da série temporal usada na fase de estimação é denominado “fase de treino”. Após, segue-se a “fase de teste”, na qual se realiza a etapa de diagnóstico segundo a metodologia de Box & Jenkins (MORETIN e TOLOI, 2004).

A Figura 2.17 apresenta o correlograma de uma série estacionária.

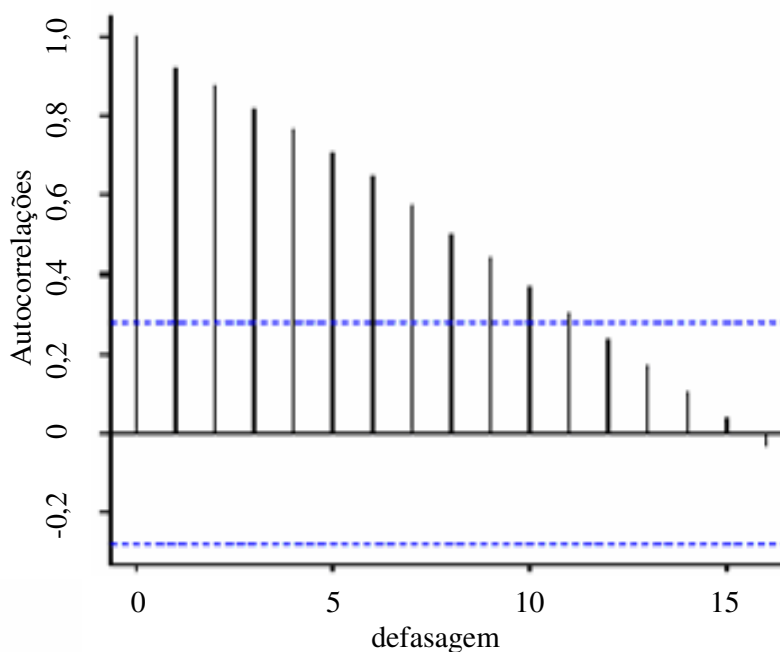


Figura 2.17 - Correlograma de uma série estacionária (EHLRS, 2004).

2.12.3.5- Modelos de previsão

O estudo matemático na área de previsão e controle teve seu grande impulso no início da década de setenta, após trabalhos de Box & Jenkins que, a partir dos resultados de Wold, propuseram uma classe geral de modelos lineares conhecidos por modelos Box & Jenkins, baseados em operações de filtros lineares. Tal método consiste em ajustar modelos auto-regressivos integrados e de médias móveis, a um conjunto de dados (FERRAZ, 1999).

A seguir será apresentado um resumo dos principais modelos utilizados em estudos do comportamento de séries e previsões de valores futuros.

a) Modelo auto-regressivo (AR)

O processo auto-regressivo de ordem p é simbolizado por $AR(p)$. Este é um processo iterativo onde há a identificação da ordem p através da função auto-correlação, a partir daí, faz-se a estimativa dos resíduos para a avaliação da existência de vieses e/ou grandes erros de estimativas (MORETIN e TOLOI, 2004).

As primeiras “ p ” observações são consideradas diferentes de zero, a observação Z_t (Equação 2.23) é gerada pela média ponderada das “ p ” primeiras observações próximas passadas da variável, acrescida de um termo a_t (ruído branco). Uma condição necessária (porém não suficiente) para que o processo seja estacionário (média é independente do tempo) é que sua média seja finita e determinada.

As Equações 2.23 e 2.24 são representações básicas dos modelos auto-regressivos.

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t \quad (2.23)$$

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (2.24)$$

Onde, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p, B$ são parâmetros do modelo e a_t é o ruído branco.

A Equação 2.25 apresenta o caso mais simples de modelo auto-regressivo, para ordem “ p ” igual a 1, ou seja, $AR(1)$.

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + a_t \quad (2.25)$$

b) Modelo de média móveis (MA)

É um processo linear e consiste simplesmente de uma soma ponderada dos ruídos (MORETIN e TOLOI, 2004). Considerando as primeiras “q” ponderações diferentes de zero, então o processo descrito pelas Equações 2.26 e 2.27 é chamado de processo de média móveis de ordem “q”, simbolizado por MA(q).

$$\tilde{Z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2.26)$$

$$\tilde{Z}_t = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q) a_t = \theta(B) a_t \quad (2.27)$$

Onde, θ_q são os parâmetros do modelo e a_t é o ruído branco.

Assim, no processo de média móveis de ordem “q”, cada observação da série é gerada por uma média ponderada do presente, e “q” são os valores passados de um processo de ruído branco. O processo de médias móveis de ordem “q”, MA(q), apresenta a média independente do tempo.

Historicamente, adquirem especial importância os processos de médias móveis de primeira e segunda ordem, MA (1) e MA (2), mostrados nas Equações 2.28 e 2.29, respectivamente.

$$\tilde{Z}_t = (1 - \theta_1 B) a_t \quad (2.28)$$

$$\tilde{Z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} \quad (2.29)$$

c) Modelos mistos: auto-regressivos e médias móveis (ARMA)

Em muitas séries, na prática, o uso de processos AR e MA puros com um número muito grande de parâmetros é insuficiente para representar o comportamento de um sistema. Assim, segundo KASSOUF (1988), combinando-se os dois processos AR e MA, obtém-se um modelo auto-regressivo de média móvel simbolizado por ARMA (p,q) no qual os valores correntes da série temporal dependem dos valores passados da série e dos erros correntes e passados.

A Equação 2.30 representa o modelo auto-regressivo de médias moveis.

$$\tilde{Z}_t = \phi_1^{-1}(B)\theta(B)a_t \quad (2.30)$$

d) Modelo auto-regressivo integrado (ARIMA)

Tanto o modelo AR, quanto o MA, quanto o ARMA são utilizados para descrever séries estacionárias. Entretanto, quando o processo é não estacionário homogêneo, ou seja, possui tendência, uma das maneiras de analisá-lo é incorporando um processo de diferença $\Delta^d Z_t$ no modelo ARMA (p,q). Este novo modelo recebe o nome de auto-regressivo integrado de médias móveis, ARIMA (p,d,q), onde p é a ordem do modelo AR, q a ordem do modelo MA e d é a ordem das diferenças necessárias para eliminar a tendência da série, ou seja, a raiz do polinômio formado pelo modelo ARIMA.

e) Modelo auto-regressivo integrado sazonal (SARIMA)

Os modelos ARIMA podem resolver o problema da sazonalidade quando há lags (períodos) de baixa ordem. Porém, quando a sazonalidade ocorre em múltiplos períodos, é necessário que se considere no modelo um componente de sazonalidade.

As séries sazonais são caracterizadas por mostrarem alta correlação da variável distanciada pelo período da sazonalidade e pela correlação entre observações próximas. Muitas vezes, mesmo após eliminar a componente sazonal determinística, ainda resta correlação significativa em “lags” de baixa ordem ou em “lags” sazonais, isto é, múltiplos (FERRAZ, 1999).

Para séries estocásticas, pode-se aplicar sem grandes dificuldades um modelo ARIMA sazonal, ou seja, o modelo SARIMA (MORETTIN e TOLOI, 2004). Primeiramente deve-se calcular diferenças com lag 1 e com lag s, ou seja, tem-se que tomar d diferenças simples e D diferenças sazonais de série Z_t , a fim de produzir estacionaridade.

O próximo passo é observar as funções de autocorrelação amostrais da série W_t (Equação 2.29), nos lags 1,2, ... para obter os valores de p e q e nos lags s, 2s, ..., e assim obter P e Q, selecionando-se então, um modelo prévio SARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)^s, onde: (p,d,q) são os parâmetros do modelo associados a componente não sazonal e (P,D,Q) os parâmetros associados à componente sazonal, sendo que p e P são os parâmetros autoregressivos, d e D são os de diferenças, q e Q os de médias móveis.

A Equação 2.31 representa o modelo SARIMA.

$$W_t = \phi(B)\Phi(B^s)(1-B^s)^D(1-B)^d Z_t = \theta(B)\Theta(B^s)a_t \quad (2.31)$$

Onde:

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ é o polinômio auto regressivo de ordem p ;

$\Phi(B^S) = 1 - \Phi_1 B^S - \Phi_2 B^{2S} - \dots - \Phi_P B^{PS}$ é o polinômio auto regressivo sazonal de ordem P ;

$(1-B^S)^D = \Delta^D$ é o operador de diferença sazonal, onde D representa o número de “diferenças sazonais”;

$(1-B)^d = \Delta^d$ é o operador de diferença não sazonal, onde d representa o número de “diferenças não sazonais”;

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_p B^p$ é o polinômio de média móvel não sazonal de ordem p ;

$\Theta(B^S) = 1 - \Theta_1 B^S - \Theta_2 B^{2S} - \dots - \Theta_Q B^{QS}$ é o polinômio de média móvel sazonal de ordem Q ;

B é o coeficiente que considera a ordem da diferença feita no modelo SARIMA (d e D); S é o período sazonal da série; Z_t são as observações da série e a_t são os erros aleatórios ou ruídos brancos (SÁFADI, 2004 e TÁPIA et al, 2000).

2.12.4. – Análise dos Componentes Principais (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) é um dos métodos estatísticos mais usados quando se pretendem analisar dados multivariados. Ela permite transformar um conjunto de variáveis originais, intercorrelacionadas, num novo conjunto de variáveis não correlacionadas, as componentes principais. O objetivo mais imediato da ACP é verificar se existe um pequeno número das primeiras componentes principais que seja responsável por explicar uma proporção elevada da variação total associada ao conjunto original.

A análise de componentes principais consiste em reescrever as variáveis originais em novas variáveis denominadas componentes principais, através de uma transformação de coordenadas. Cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais. Por exemplo, um sistema com oito variáveis, após a transformação, terá oito componentes principais. Cada uma destas componentes principais, por sua vez, será escrita como uma combinação linear das oito variáveis originais. Nestas combinações, cada variável terá uma importância ou peso diferente.

Duas são as características das componentes principais que as tornam mais efetivas que as variáveis originais para a análise do conjunto das amostras (PRADO et al., 2002). As variáveis podem guardar entre si correlações que são suprimidas nas componentes principais. Ou seja, as componentes principais são ortogonais entre si. Deste modo, cada componente

principal traz uma informação estatística diferente das outras. A segunda característica importante é decorrente do processo matemático-estatístico de geração de cada componente que maximiza a informação estatística para cada uma das coordenadas que estão sendo criadas. As variáveis originais têm a mesma importância estatística, enquanto que as componentes principais têm importância estatística decrescente. Ou seja, as primeiras componentes principais são tão mais importantes que podemos até desprezar as demais. Destas características podemos compreender como a análise de componentes principais: a) podem ser analisadas separadamente devido à ortogonalidade, servindo para interpretar o peso das variáveis originais na combinação das componentes principais mais importantes b) podem servir para visualizar o conjunto da amostra apenas pelo gráfico das duas primeiras componentes principais, que detêm maior parte da informação estatística.

Algebricamente os componentes principais representam combinações lineares de p variáveis aleatórias $X_1, X_2, \dots, X_p$. Geometricamente, essas combinações lineares representam a seleção de novos eixos coordenados, os quais são obtidos por rotações do sistema de eixos original, representados por $X_1, X_2, \dots, X_p$ e representam as direções de máxima variabilidade.

Inicialmente construiu-se uma matriz $(n \times p)$, onde n é o número de variáveis (elementos químicos no nosso caso) e p suas respectivas medidas, no nosso caso as concentrações nas diversas análises dentro de cada ano. Depois, deve-se construir a matriz simétrica $(p \times p)$ de covariância, matriz “S”. A partir daí, os componentes principais são determinados resolvendo-se a equação característica da matriz de covariância (S).

As raízes da equação características são os autovalores da matriz S, para cada autovalor foi calculado um autovetor, o somatório entre o produto dos autovetores e sua respectiva variável resulta em um componente principal.

Os componentes principais dependem somente da matriz de covariância e das variáveis: $X_1, X_2, \dots, X_p$ (FERREIRA, 1996).

Seja o vetor aleatório $\underline{X}' = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ amostrado de uma população com covariância Σ , cujos autovalores são $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$, então, os componentes principais ($Y_1, Y_2, \dots, Y_p$) são as combinações lineares dadas pela Equação 2.32.

$$\begin{aligned}
Y_1 &= e'_{\sim 1} X = e_{11}X_1 + e_{12}X_2 + \dots + e_{1p}X_p \\
Y_2 &= e'_{\sim 2} X = e_{21}X_1 + e_{22}X_2 + \dots + e_{2p}X_p \\
&\vdots \\
Y_p &= e'_{\sim p} X = e_{p1}X_1 + e_{p2}X_2 + \dots + e_{pp}X_p
\end{aligned} \tag{2.32}$$

A variância e a covariância de Y podem ser calculadas conforme demonstrado em FERREIRA (1996). A matriz de variância e covariâncias pode ser representada através da Equação 2.33, onde tem-se a variância na diagonal principal e a covariância nos demais constituintes da matriz.

$$S = \begin{bmatrix} \hat{\text{Var}}(x_1) & \hat{\text{Cov}}(x_1 x_2) & \hat{\text{Cov}}(x_1 x_3) & \dots & \hat{\text{Cov}}(x_1 x_p) \\ \hat{\text{Cov}}(x_2 x_1) & \hat{\text{Var}}(x_2) & \hat{\text{Cov}}(x_2 x_3) & \dots & \hat{\text{Cov}}(x_2 x_p) \\ \hat{\text{Cov}}(x_3 x_1) & \hat{\text{Cov}}(x_3 x_2) & \hat{\text{Var}}(x_3) & \dots & \hat{\text{Cov}}(x_3 x_p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\text{Cov}}(x_p x_1) & \hat{\text{Cov}}(x_p x_2) & \hat{\text{Cov}}(x_p x_3) & \dots & \hat{\text{Var}}(x_p) \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

Posteriormente são obtidas as estimativas dos autovalores (raízes características) e os autovetores (coeficientes dos componentes principais). Os autovalores são simbolizados por λ .

Seja Σ a matriz de covariância entre as p variáveis X, cujos pares de autovalores e autovetores são dados por (λ_i, e_i) . O componente principal Y_i é definido por $Y_i = e'_{\sim i} X$, o qual possui variância igual a λ_i .

E, finalmente, a porcentagem da variação total explicada pelo k-ésimo componente principal é dado pela Equação 2.34.

$$\% \text{ var } Exp(Y_k) = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100 \tag{2.34}$$

Segundo ARTES (1998) e CARDOSO et al. (2004), quando a porcentagem atribuída aos primeiros r componentes principais atingirem em torno de 70%, então, esses podem substituir as p variáveis originais sem perda de uma quantidade demasiada de informações.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi dividida basicamente em quatro fases. A primeira foi a escolha do local de amostragem, posteriormente a coleta de dados, depois a caracterização e finalmente, o tratamento dos dados experimentais.

A amostragem de material particulado total (PTS) e particulado menor que 10 µm (MP₁₀), utilizadas neste trabalho tiveram início em 2003 e foram realizadas de três em três dias. A coleta das partículas superfínas (MP_{2,5}), foi feita de seis em seis dias com início em julho de 2006.

O estabelecimento da frequência de amostragem adotada neste trabalho, teve como base as recomendações indicadas pela Agencia Americana EPA – (*Environmental Protection Agency*).

3.1 – Local de Amostragem

Inicialmente foi necessário estabelecer o número de pontos de coleta. Segundo a agência norte americana de proteção ao meio ambiente (EPA – *Environmental Protection Agency*), o número de pontos de coleta deve ser determinado em função do número de habitantes da cidade (H). A definição do número de pontos de amostragem foi feita em um trabalho prévio a esta tese realizado em 2001, que foi desenvolvido pelo autor dessa tese e outros colaboradores. Este trabalho prévio está inserido como anexo a esta tese (Anexo I). De acordo com o IBGE, Uberlândia contava em 2001 com uma população de aproximadamente 500 mil habitantes, portanto, o número de pontos de coleta (N) para esta cidade, calculado através da Equação 3.1 (DERISIO, 1992) foi igual a cinco (5).

$$N = 4 + 0,6 * 10^{-6} * H \quad (3.1)$$

Neste estudo prévio, foi utilizado um AGV-PTS, sendo que os cinco (5) pontos selecionados para amostragem foram os seguintes: dois pontos no setor industrial, um ponto na estação climatológica da Universidade Federal de Uberlândia, um no centro da cidade e

ainda outro na zona rural. Os resultados do referido trabalho e a análise estatística realizada mostraram que o ponto na região central da cidade possui um nível de concentração de material particulado total (PTS) estatisticamente equivalente ao do distrito industrial, ambos com índice de qualidade de bom a regular (considerando os limites do intervalo de confiança de 95%), na UFU a concentração de MP foi menor que nos três pontos citados anteriormente, porém o índice de qualidade também ficou de bom a regular. Somente na zona rural o índice de qualidade do ar foi considerado bom, e como esperado, foi obtida neste ponto a menor concentração entre todos os pontos estudados.

Em função do número de transeuntes que circulam no setor central, do número de veículos e da existência de apenas um amostrador de cada, (AGV-PTS, AGV-MP₁₀ e APV MP_{2,5}), adotou-se nesta tese o ponto localizado na região central da cidade como o sendo o de maior relevância para o estudo proposto, sendo assim, os equipamentos foram instalados de forma permanente neste local a partir de 2003.

O mapa de localização contendo o ponto de amostragem adotado neste trabalho (ponto A), a Universidade Federal de Uberlândia (B), os pontos do distrito industrial - CDI (C e D) e o da Asufub (E) é apresentado pela Figura 3.1.

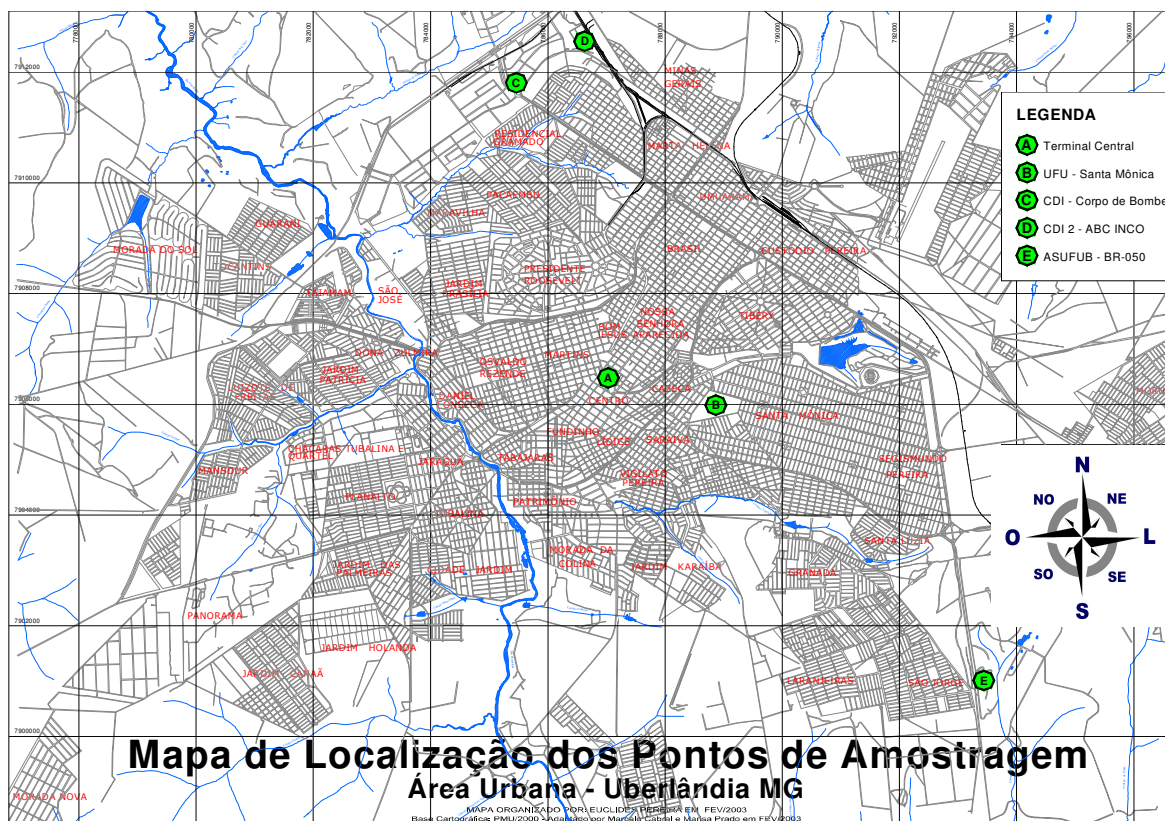


Figura 3.1 – Mapa de localização dos pontos de amostragem.

O ponto fixo de amostragem fica na confluência das avenidas João Naves de Ávila e João Pinheiro, um cruzamento onde circulam cerca de 30 mil veículos por dia, sendo 26,4% desses de motores do ciclo diesel e 47,8% do ciclo Otto (SILVA, 2007). A Figura 3.2 apresenta uma foto de satélite onde foi destacado o ponto de amostragem (terminal de integração-SIT) e a estação climatológica da UFU e a Figura 3.3 apresenta uma foto dos amostradores utilizados no ponto de coleta. Estes amostradores serão descritos no próximo item.



Figura 3.2 – Foto do ponto de amostragem (Fonte: Site da Prefeitura de Uberlândia).



Figura 3.3 – Foto do Ponto de Amostragem: 1 - AGV-PTS; 2- AGV-MP₁₀; 3 – APV (MP_{2,5}).

3.2 – Coleta de dados

Conforme pode ser observado na Figura 3.3, para a coleta dos dados experimentais foram utilizados três tipos de amostradores. O primeiro foi o amostrador de grandes volumes (1) para partículas totais em suspensão (AGV-PTS), o amostrador de grandes volumes para partículas menores que 10 μm (2-AGV-MP₁₀) e o amostrador de pequenos volumes (APV) para partículas menores que 2,5 μm (3). Que serão detalhados a seguir.

Além dos dados de concentração de particulados foram obtidos para cada dia de amostragem os dados climáticos, medidos pelo Laboratório de Climatologia do Instituto de Geografia da UFU. As variáveis medidas foram: temperatura, amplitude térmica, umidade relativa, índice pluviométrico, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos.

3.2.1 – Amostrador de Grandes Volumes para Partículas Totais em Suspensão (AGV-PTS)

Para as coletas de material particulado total em suspensão na atmosfera (PTS), foi utilizado um amostrador de grandes volumes (AGV-PTS), também conhecido como HI-VOL, marca ENERGÉTICA, modelo AGV-PTS2 (220 V).

O amostrador de grandes volumes é utilizado para a determinação das concentrações ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas totais em suspensão (PTS) no ar ambiente e coleta partículas com diâmetro aerodinâmico na faixa de 0,1 μm a 100 μm .

O equipamento é composto dos seguintes componentes principais:

- Teto de entrada (para a separação das partículas totais em suspensão).

- moto-aspirador
- Porta-filtro
- Transdutor de pressão (responsável pelo cálculo do volume de ar amostrado).
- Painel feito de alumínio anodizado, contendo o variador de tensão (Varivol), timer, horômetro, chave liga-desliga, sinaleiro e porta fusível.
- Casinhola que serve de abrigo para todos os componentes e instrumentação.
- Kit de calibração

A cabeça de separação possui teto de entrada confeccionado em duas águas para captação das partículas totais em suspensão, a vazão varia entre 1,1 e 1,7 m³/min. Toda a base do amostrador é envolvida por um abrigo de alumínio anodizado. A base tem cerca de 110 cm de altura, 38 cm de largura e 38 cm de fundo. O porta-filtro é de fibra de vidro, com telas de aço inox, junta de borracha, e é alojado num furo retangular localizado na bandeja rebaixada na parte superior da base. O porta-motor é de fibra de vidro, forma cilíndrica, com moto - aspirador que é mantido preso pela abraçadeira fixada no fundo da casinhola.

O material particulado em suspensão é succionado pelo moto-aspirador e passa através de um filtro de fibra de vidro. O volume de ar amostrado é calculado através da vazão de ar medida (carta gráfica do registrador) e do tempo de amostragem (horômetro).

A concentração de material particulado em suspensão ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) é calculada através da diferença entre a massa final e inicial (gravimetria) dividida pelo volume de ar coletado. Um desenho esquemático e uma fotografia do AGV-PTS são mostrados na Figura 3.4

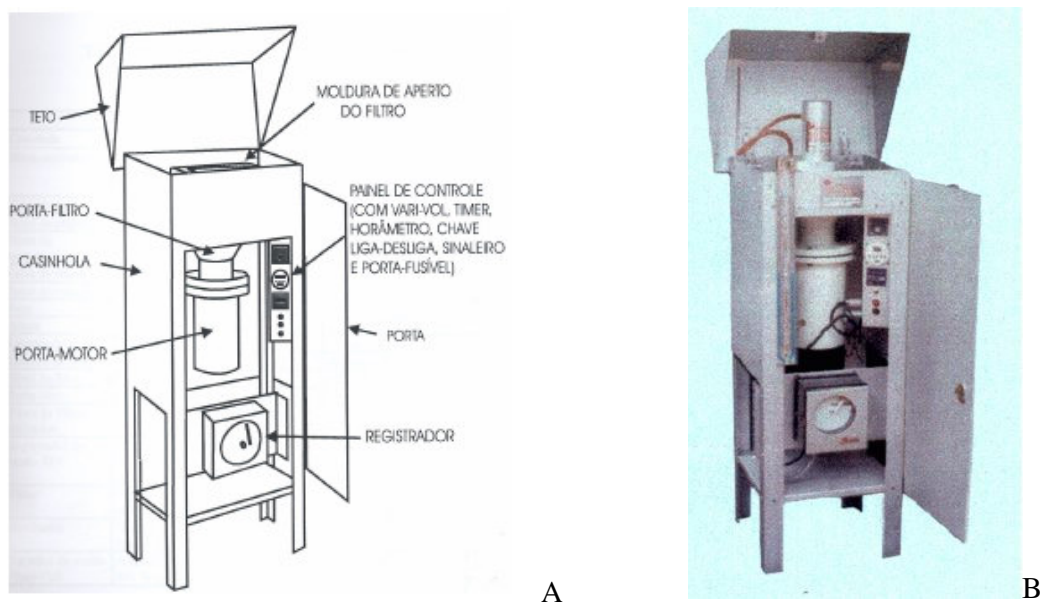


Figura 3.4 – Desenho esquemático (A) e fotografia (B) do Amostrador AGV-PTS.

3.2.2 – Amostrador de Grandes Volumes para Partículas Respiráveis (AGV-MP₁₀)

Para as coletas de material particulado respirável em suspensão na atmosfera (MP₁₀), foi utilizado um amostrador de grandes volumes para partículas de 10 µm (AGV- MP₁₀), marca Thermo Andersen modelo G10557PM10.

O AGV- MP₁₀ é utilizado para a determinação das concentrações (µg/m³) de partículas respiráveis em suspensão no ar ambiente e coleta partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 10 µm. É um equipamento semelhante ao AGV-PTS, com a adição de uma cabeça de separação.

A Figura 3.5 apresenta um desenho esquemático (A) e uma fotografia (B) do AGV-MP₁₀ e a Figura 3.6 apresenta com mais detalhes a cabeça de separação inercial.

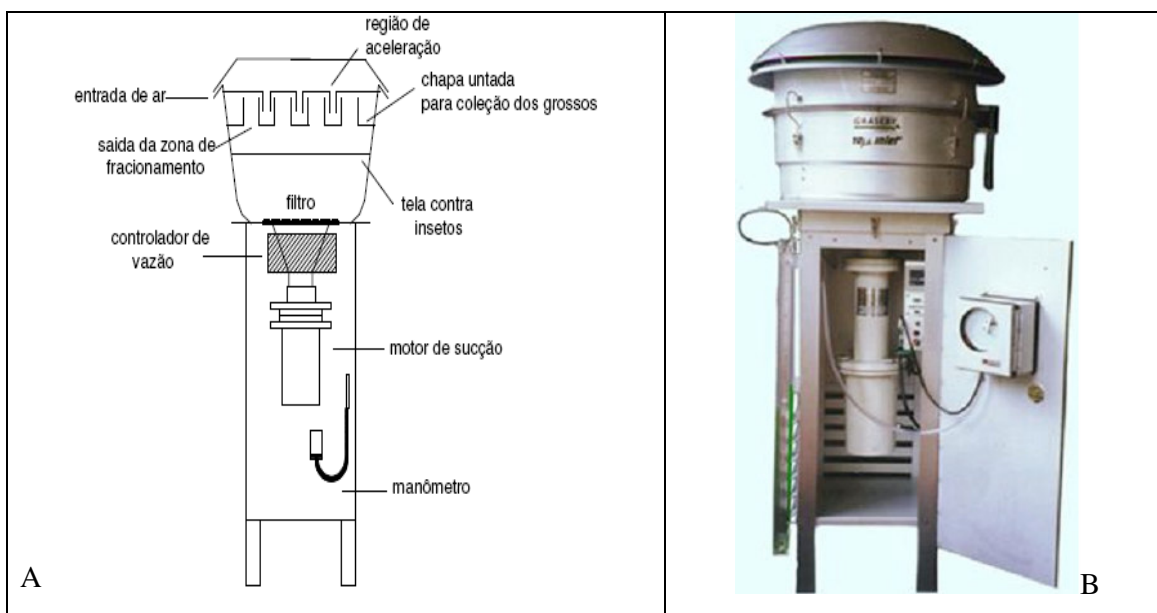


Figura 3.5 – Desenho esquemático (A) e fotografia (B) do Amostrador AGV- MP₁₀.



Figura 3.6 – Cabeça de separação inercial do AGV- MP₁₀. Fonte: Energética.

3.2.3 – Amostrador de Pequenos Volumes (APV-MP_{2,5})

O equipamento utilizado na coleta de material particulado superfino foi construído com base no projeto proposto por HOPKE et al. (1997), um esquema deste sistema está apresentado na Figura 3.7. A cabeça de entrada do equipamento age pelo princípio de impactação inercial, possuindo duas seções, uma para classificação de partículas menores que 10 μm e a outra, menores que 2,5 μm . A Figura 3.8 A e B mostra o equipamento respectivamente montado e desmontado.

O impactador foi confeccionado em polietileno de acordo com as dimensões apresentadas na Figura 3.7. O APV foi conectado através de mangueiras de silicone a um medidor de fluxo (rotâmetro), calibrado para uma vazão de 16 L/min, succionados por meio de uma bomba de vácuo (FANEM – modelo 089-CAL – série 7589). O volume do gás que atravessa o sistema foi medido através de um gasômetro (Figura 3.9).

Com o fluxo estabelecido e em função da geometria do sistema, as partículas maiores que 10 μm ficam retidas em uma placa de impactação colocada anteriormente ao meio filtrante e o fluxo de ar com partículas com diâmetro menores que 10 μm é direcionado para o primeiro filtro, onde são coletadas. O fluxo de ar que atravessa o meio filtrante, carregado de partículas superfina, passa através do segundo filtro, com porosidade menor, o qual retém partículas com diâmetros menores que 10 μm e maiores que 2,5 μm . O ar passa então por um medidor de volumes e posteriormente é expelido pela saída da bomba de vácuo.

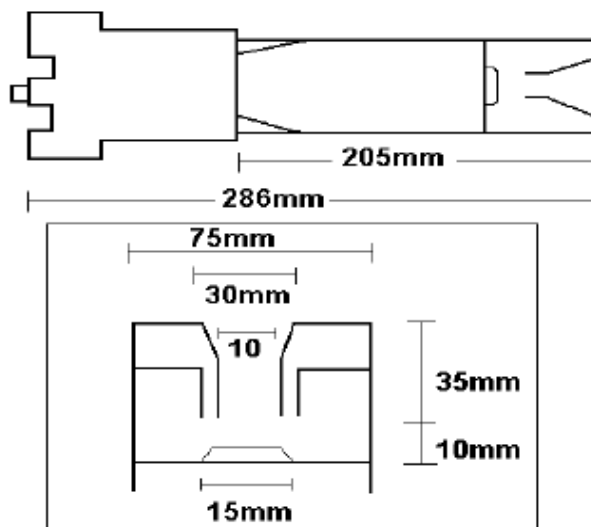


Figura 3.7 – Esquema do sistema proposto por HOPKE et al. (1997).

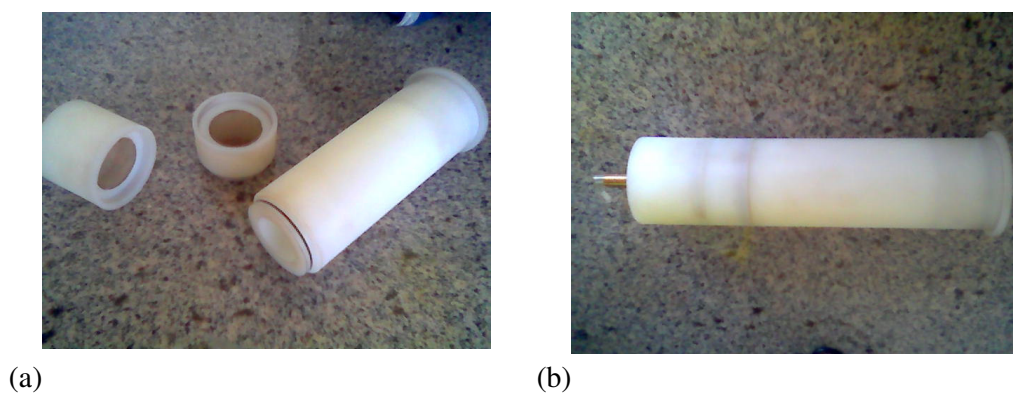


Figura 3.8 – Amostrador de Pequenos Volumes (APV) – (a) desmontado; (b) montado.

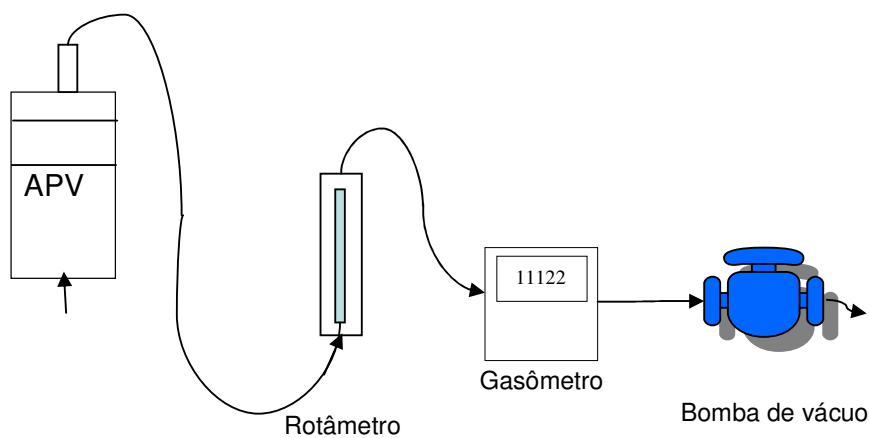


Figura 3.9 – Desenho esquemático do sistema de amostragem do APV

3.3 – Meios Filtrantes, Medidas de Concentração e Caracterização Química

3.3.1 – Meios Filtrantes

Segundo ALMEIDA (1999), a escolha de um filtro para a realização de uma campanha de amostragem de partículas em suspensão, deve-se levar em consideração a disponibilidade em apresentar certas propriedades, como possibilitar a retenção de partículas ao mesmo tempo em que permita a passagem ao fluxo de ar, prover a coleta de certa quantidade de amostra que facilite uma posterior caracterização da composição química e determinação da concentração do material particulado em suspensão.

Os filtros utilizados neste trabalho para o AGV-PTS e AGV- MP_{10} foram de fibra de vidro dimensão de 254x203 mm, marca Energética. Foram escolhidos por apresentarem características desejáveis, tais como eficiência de coleta de no mínimo 99% para partículas com diâmetro aerodinâmico superior ou igual a $0,3 \mu m$, baixa resistência a passagem do ar e pouca afinidade por umidade.

Para o amostrador de pequenos volumes, foram utilizadas membranas de polycarbonato Nuclepore[®] da Whatman. Na coleta da fração grossa do APV a porosidade do filtro foi de 8,0 μm e na da fração fina de 0,4 μm , ambos com diâmetro de 47 mm, os mesmos utilizados por HOPKE et al. (1997).

3.3.2 – Medidas de Concentração de Particulados

A metodologia utilizada para a determinação da concentração mássica do material particulado em suspensão consiste na filtração do ar para posterior cálculo da razão entre a diferença de massas do filtro pré e pós-coleta e o volume de ar amostrado, onde o volume de ar amostrado consiste na vazão volumétrica de operação do equipamento multiplicada pelo tempo da coleta. Os procedimentos de pesagem, transporte e instalação dos meios filtrantes devem ser executados com o máximo de cuidado para se evitar inutilização dos mesmos. O procedimento padrão, de minimização da interferência da umidade relativa em análises gravimétricas é manter o filtro nas mesmas condições de temperatura e umidade durante as pesagens pré e pós-coleta.

Para a pesagem dos filtros de fibra de vidro utilizou-se uma balança analítica dotada de câmara de pesagem com sensibilidade de 0,1 mg. Os filtros limpos e amostrados eram deixados em recipiente contendo sílica gel durante vinte quatro horas para estabilização antes da pesagem. Devido à sensibilidade dos filtros, deve-se tomar muito cuidado quanto ao manuseio no momento da pesagem, no transporte e principalmente na operação de amostragem (os filtros eram colocados em suportes adequados, com tampa, marca Andersen).

A pesagem das membranas Nuclepore[®] foram realizadas em uma balança eletrônica Mettler Toledo(R) MT-5 com sensibilidade de 1 μg . Os filtros eram colocados em suportes adequados para transporte (placas de petri) até o local de amostragem e posteriormente para o laboratório de pesagem. O manuseio das membranas do APV exige cuidados ainda mais rigorosos, devido à pequena massa amostrada, não é tolerável qualquer tipo de contaminação.

3.3.3 – Caracterização da Composição Química do MP₁₀

Para a caracterização dos filtros de fibra de vidro provenientes da amostragem do MP₁₀, quanto à composição elementar foi utilizada a técnica de Espectrometria de emissão ótica com plasma térmico acoplado induzido (ICP-OES).

As técnicas mais comumente usadas para determinar concentrações de traços de elementos em amostras baseiam-se na espectrometria atômica (AES). Para dissociar

moléculas em átomos livres, são utilizadas fontes térmicas como chamas, fornos e descargas elétricas.

Recentemente, foram usados outros tipos de descargas elétricas chamadas plasmas como fontes de atomização / excitação para AES. Estas técnicas incluem o plasma acoplado por indução e o plasma acoplado diretamente. Na técnica por indução, uma fonte de excitação (calor gerado pelo gás argônio ionizado) é usada para a excitação de elementos químicos, os quais emitem radiações de comprimento de onda característicos das transições eletrônicas de cada elemento. Isso permite a análise quantitativa dos elementos em estudo nas amostras sólidas, líquidas e gasosas. O gradiente de temperatura do plasma pode variar entre 6000 a 10000 K (GINÉ, 1998).

A introdução de amostras líquidas é a forma mais comum de análise e essa introdução se dá por meio de nebulização das amostras. É possível gerar um plasma acoplado por indução ao dirigir a energia de um gerador de frequência de rádio a um gás apropriado, comumente argônio ICP. Outros gases de plasma utilizados são Hélio e Nitrogênio. É importante que o gás de plasma seja puro, pois os contaminantes no gás podem apagar a tocha.

As fontes de plasma oferecem algumas vantagens se comparadas com os métodos de chama e eletrotérmicos. A análise é multielementar simultânea, possui sensibilidade e precisões altas, rapidez, bem como ampla faixa dinâmica linear (MORGANO et al., 1999). O espectro para vários elementos pode ser registrado ao mesmo tempo, o que é muito importante quando amostra é pequena. As fontes de plasma também permitem determinar não metais como cloro, bromo, iodo e enxofre.

A preparação dos filtros para análise com ICP-OES foi realizada seguindo-se a Norma L-8.015 da CETESB. Os filtros eram cortados e colocados em béquers, em solução de ácido nítrico 3M, sob aquecimento brando. Após o processo de extração, uma alíquota da amostra era então colocada em um frasco de polietileno e encaminhada para leitura no plasma, juntamente com uma amostra do ácido e de um filtro branco para cada batelada.

No presente trabalho as análises de ICP-OES foram realizadas no CEA (Centro de Estudos Ambientais) - UNESP em Rio Claro SP. Utilizou-se um espectrômetro marca GBC modelo integra XL, com nebulizador concêntrico instalado em uma câmara de spray ciclônica.

A Figura 3.10 é um diagrama que explica de forma simplificada o processo de amostragem e análise estatística realizadas neste trabalho. As técnicas utilizadas no tratamento estatístico dos dados serão apresentadas no próximo item.

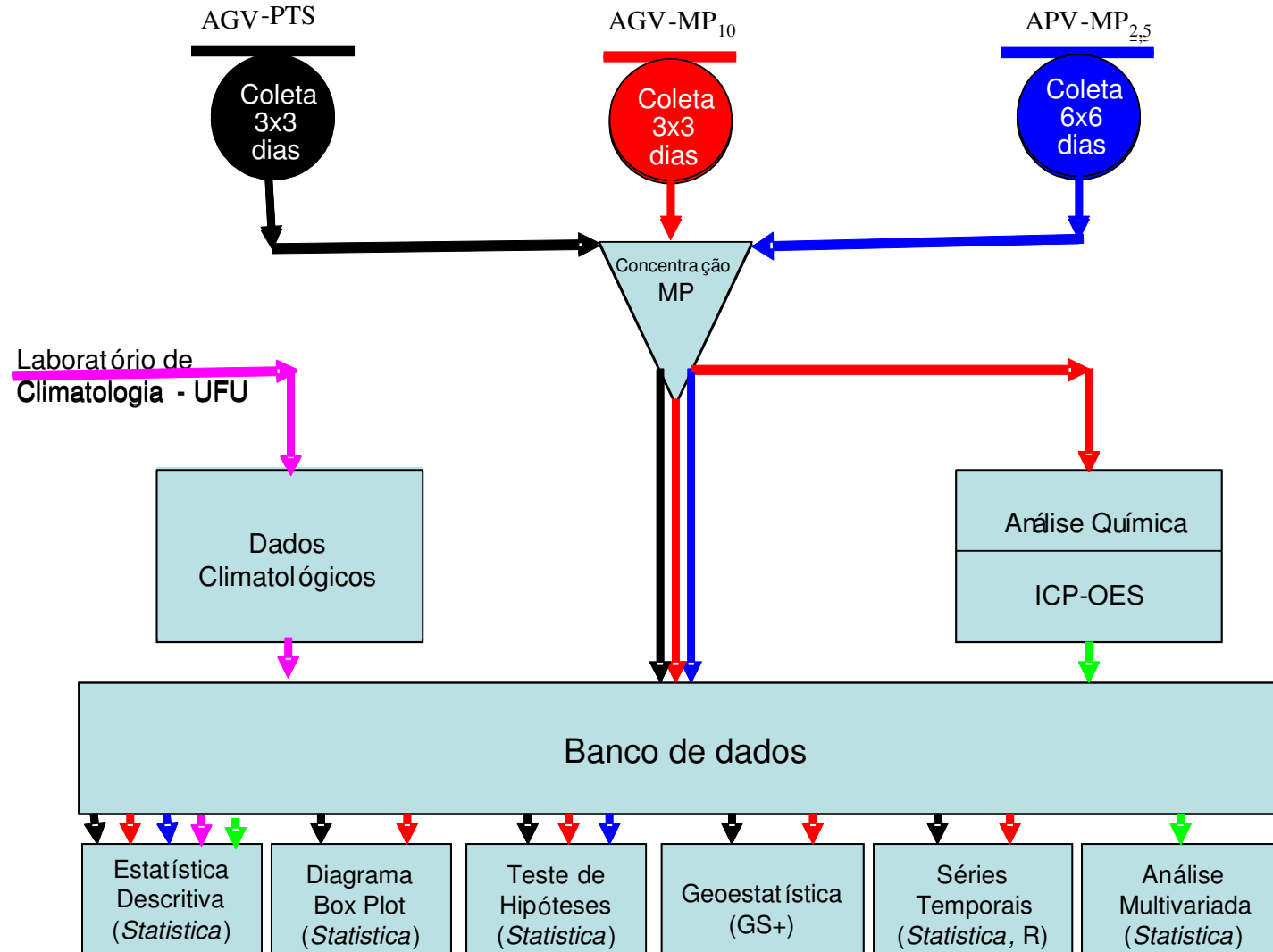


Figura 3.10 - Diagrama simplificado de coleta e análise do monitoramento da qualidade do ar

3.4 – Tratamento Estatístico dos Dados Experimentais

Para o tratamento estatístico dos dados experimentais de concentração de particulados (PTS e MP_{10}) foram utilizadas as seguintes técnicas: determinação da estatística descritiva; obtenção de gráficos do tipo de Box-Plot; realização de testes de hipóteses; análise por geoestatística e por séries temporais. Para análise da composição química foi utilizado a análise multivariada pela técnica dos componentes principais (ACP). O fundamento dessas técnicas foi descrito no Capítulo II desta tese.

Para a maioria dos cálculos estatísticos pelas técnicas supra-mencionadas foi utilizado o software Statistica 7.0. O software GS+ (versão 7) também foi utilizado para a técnica da Geoestatística e o software R para as séries temporais.

Na estatística descritiva foram calculados os seguintes parâmetros: cálculos de médias, desvio padrão, valores mínimos e máximos, coeficientes de variação, coeficiente de curtose e assimetria, dentre outros.

No tratamento dos dados de concentração de partículas no ar, tanto para o PTS, como para o MP_{10} , a identificação de *outliers* foi realizada com o auxílio de diagramas de Box-Plot. Na análise da evolução temporal pelas técnicas da geoestatística e séries temporais, os pontos *outliers* foram excluídos.

Os testes de hipóteses foram realizados para identificação da significância entre as diferenças das médias dos anos estudados, bem como das respectivas estações. Os testes foram construídos utilizando a estatística t de Student, com um nível de significância de 10%.

Para avaliar a dependência temporal entre os dados amostrados utilizou-se a geoestatística. Inicialmente fez-se a análise descritiva da série utilizando o gráfico de comportamento e estatísticas das séries. Em seguida, realizou-se o cálculo das semivariâncias e a plotagem do semivariograma de cada série para os anos avaliados.

Os dados obtidos para PTS e MP_{10} , foram ajustados a modelos de séries temporais, levando-se em conta a acentuada variabilidade dos fenômenos climatológicos. Na fase de análise exploratória das séries efetuou-se a decomposição das mesmas por modelos multiplicativos e aditivos. Para garantir que as séries em estudo fossem estacionárias, realizou-se diferenciações nos dados experimentais, conforme detalhado no Capítulo II.

Considerou-se o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2006 para ajuste dos modelos de séries temporais, e as observações, do período de janeiro a junho de 2007, foram utilizadas para verificação da qualidade da previsão pelo modelo ajustado.

A metodologia usada para ajustar modelos de séries temporais à série de concentração de material particulado total e MP_{10} foi a seguinte:

a) Etapa inicial:

- construção de gráficos para descrição do comportamento do conjunto de dados através da inspeção visual;
- verificação da existência de tendência e de sazonalidade através dos testes: análise de variância, método de regressão e através da análise da função autocorrelação;
- verificação da periodicidade através da análise do periodograma da série.

b) Estimativa da tendência e sazonalidade:

- a tendência foi estimada pelo método de ajuste polinomial;
- a sazonalidade foi estimada por regressão;

c) Ajuste de modelos:

- o modelo que melhor se adequou aos dados de PTS e MP_{10} foi o SARIMA, sendo os parâmetros deste ajustados aos dados;
- as estimativas das funções de autocorrelações foram utilizadas para testar a adequabilidade dos parâmetros do modelo.
- foi realizada uma análise de resíduos para verificar a adequação do modelo.

d) Previsões:

- foram obtidas previsões para o ano de 2007 com os modelos ajustados (SARIMA) para o PTS e MP_{10} a partir dos dados de 2003 a 2006;
- os modelos foram testados quanto ao desempenho através da análise gráfica, do coeficiente de correlação e da soma dos quadrados dos erros de previsão.

Para o estudo dos componentes principais foram utilizados os filtros do amostrador de grandes volumes do MP_{10} (AGV- MP_{10}), após terem sido submetidos a uma extração nítrica seguida de análise de concentração, utilizando um plasma térmico induzido (ICP), conforme detalhado anteriormente. Neste estudo avaliou-se nos filtros do MP_{10} a presença dos seguintes elementos químicos: Al, Cu, Cr, Ca, Fe, P, Mn, Pb, Ti, Zn, K e S.

Os dados avaliados neste trabalho são referentes apenas à concentração, ou seja, somente uma grandeza, portanto, utilizou-se para o estudo de análise multivariada, a matriz de variância e covariância no cálculo dos componentes principais.

Conforme indicado no Capítulo II, inicialmente construiu-se uma matriz ($n \times p$), onde **n** são as 12 variáveis (elementos químicos) e **p** suas respectivas concentrações nas diversas análises dentro de cada ano. Depois, obteve-se a matriz simétrica ($p \times p$) de covariância, matriz “S”. No caso deste estudo, não houve a necessidade de se fazer uma padronização dos dados, por se tratar apenas de amostras com a mesma dimensão. A partir daí, os componentes principais foram determinados resolvendo-se a equação característica da matriz de covariância (S).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a avaliação da qualidade do ar atmosférico da cidade de Uberlândia, no período de janeiro de 2003 até junho de 2007. Neste intervalo, estudou-se a concentração de material particulado em suspensão para partículas totais (PTS) e respiráveis (MP_{10}). Serão apresentados ainda os resultados da concentração de material particulado superfino ($MP_{2,5}$), avaliados de julho de 2006 à junho de 2007. Também serão apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de composição do material coletado para o MP_{10} .

Conforme apresentado no capítulo anterior, no tratamento dos dados experimentais deste estudo, foram utilizadas as técnicas de geoestatística, series temporais, análises multivariadas, teste de hipóteses, diagrama de Box plot e a estatística descritiva.

4.1 – Dados meteorológicos de Uberlândia de janeiro de 2003 a dezembro de 2006

A cidade de Uberlândia está localizada na porção sudoeste do Estado de Minas Gerais, na região do triângulo Mineiro, na intersecção das coordenadas geográficas de 18°55'23" de latitude sul e 48°17'19" de longitude oeste de Greenwich, no domínio dos planaltos e chapadas da bacia sedimentar do Paraná, na porção sudoeste do Cerrado brasileiro, a uma altitude média de 865 m, ocupando uma área de 219 km² dentro do município de 41115 km².

Uberlândia, com latitude de 18°55'23" Sul e também por estar situada a uma altitude média de 865m, está exatamente na faixa de temperatura considerada moderada. O clima da região do Triângulo Mineiro na qual está inserida é do tipo Aw (classificação de Köppen), ou seja possui um inverno seco e um verão chuvoso.

Sabe-se que as atividades sócio-econômicas realizadas no meio urbano são fatores de formação do clima urbano, que somado ao adensamento humano e urbano e a localização geográfica da cidade, conforme mencionado anteriormente, desempenham forte influência. A urbanização reflete mudanças globais em que o uso intensivo do território para práticas industriais, comerciais, de transportes e serviços urbanos geram um “ambiente geográfico artificial”, desrespeitando as condições ambientais naturais (SILVA e ASSUNÇÃO, 2004).

É recorrente entre os habitantes de Uberlândia o sentimento que o clima tem sofrido alterações nos últimos anos. Em cidades, como Uberlândia, que sofreu um processo de crescimento acentuado e de algumas formas desordenado este dado merece uma análise mais aprofundada. A urbanização altera o clima do espaço ocupado pelas cidades, pois modifica a superfície física do solo com impermeabilização (construções e pavimentações), causando uma elevação térmica e a alteração no efeito dos ventos. Em cidades de porte médio e grande as modificações do comportamento atmosférico podem ser mais intensas, pois este funciona como um sistema aberto, por onde transitam fluxos de energia, porém os processos de absorção e difusão de energia são perturbados (SILVA e ASSUNÇÃO, 2004).

Os dados meteorológicos deste trabalho foram obtidos no laboratório de climatologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia e são apresentados a partir da Figura 4.1 até a Figura 4.8, para os anos de 2003 a 2006.

A Tabela 4.1 apresenta uma síntese da estatística descritiva para os dados climatológicos para todo período estudado e a Tabela 4.2 apresenta a média para cada ano. As médias de cada ano foram obtidas a partir da média diária. Dessa forma, quando for, por exemplo, afirmado que o maior valor da temperatura em um determinado ano foi de 30°C, isto significa que está é a maior média de temperatura em um dia daquele ano.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva para os dados climatológicos de 2003 a 2006.

PARÂMETRO	PONTOS	MÉDIA	IC -95%	IC +95%	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO	ERRO PADRÃO
Temperatura (°C)	1461	24	23	24	24	15	30	2,5	0,06
Umidade relativa (%)	1461	67	66	68	67	26	97	14,3	0,37
Índice pluviométrico (mmca)	1461	5	4	5	0	0	99	11,4	0,30
Velocidade do vento (m/s)	1461	2	2	2	2	0	8	1,2	0,03
Direção do vento (graus)	1461	59	56	61	45	0	315	46,2	1,21
Pressão atm. (mbar)	1461	923	923	923	923	915	931	2,6	0,07
Insolação (h)	1461	7	7	7	8	0	13	3,3	0,09

Tabela 4.2 – Estatística descritiva para os dados climatológicos de 2003 a 2006. Dados individuais obtidos pela média diária de cada variável

ANO	PARÂMETRO	PONTOS	MÉDIA	IC -95%	IC +95%	MEDIANA	MÍNIMO	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
2003	Temp. (°C)	365	23,66	23,41	23,91	23,60	15,78	30,30	2,45
	U. R. (%)	365	67,92	66,47	69,37	67,50	28,75	96,50	14,09
	A. T. (°C)	365	32,91	25,40	40,41	11,10	0,00	19,40	72,88
	I. Pluv.(mmca)	365	4,65	3,47	5,84	0,00	0,00	92,60	11,53
	V. vento (m/s)	365	1,71	1,61	1,82	1,50	0,00	5,75	1,04
	D.vento(graus)	365	65,94	61,20	70,68	56,25	0,00	247,50	46,05
	P. atm. (mbar)	365	922,98	922,74	923,21	922,78	917,78	929,53	2,27
2004	Insolação (h)	365	7,05	6,71	7,39	8,20	0,00	11,60	3,33
	Temp. (°C)	366	23,46	23,19	23,72	23,60	15,15	29,90	2,59
	U. R. (%)	366	65,40	63,82	66,99	67,00	26,33	97,00	15,44
	A. T. (°C)	366	10,59	10,29	10,89	10,60	3,20	22,00	2,90
	I. Pluv.(mmca)	366	4,26	3,04	5,48	0,00	0,00	99,40	11,86
	V. vento (m/s)	366	1,73	1,56	1,91	1,50	0,00	25,25	1,67
	D.vento(graus)	366	66,81	61,81	71,82	67,50	0,00	270,00	48,69
2005	P. atm. (mbar)	366	922,45	922,17	922,74	922,24	915,63	929,18	2,73
	Insolação (h)	366	6,79	6,45	7,13	8,05	0,00	11,40	3,29
	Temp. (°C)	365	23,82	23,57	24,07	23,75	15,58	30,35	2,41
	U. R. (%)	365	68,27	66,90	69,63	67,50	30,25	95,25	13,26
	A. T. (°C)	365	10,43	10,16	10,71	10,60	0,00	25,80	2,67
	I. Pluv.(mmca)	365	4,03	3,11	4,95	0,00	0,00	54,80	8,95
	V. vento (m/s)	365	1,85	1,71	1,99	1,50	0,00	7,50	1,36
2006	D.vento(graus)	365	54,08	49,73	58,44	45,00	0,00	236,25	42,30
	P. atm. (mbar)	365	920,80	919,02	922,58	922,53	741,58	931,35	17,33
	Insolação (h)	365	6,81	6,48	7,14	7,60	0,00	12,50	3,22
	Temp. (°C)	365	23,44	23,20	23,69	23,58	16,53	30,20	2,38
	U. R. (%)	365	66,53	65,08	67,98	66,00	28,00	94,75	14,13
	A. T. (°C)	365	11,00	10,63	11,37	10,50	1,60	21,00	3,60
	I. Pluv.(mmca)	365	5,73	4,41	7,04	0,00	0,00	83,90	12,79
2006	V. vento (m/s)	365	1,39	1,27	1,51	1,25	0,00	5,75	1,14
	D.vento(graus)	365	47,99	43,37	52,60	45,00	0,00	315,00	44,83
	P. atm. (mbar)	365	922,57	921,87	923,27	922,90	837,13	930,33	6,81
	Insolação (h)	365	6,93	6,60	7,26	7,80	0,00	11,60	3,19

Negrito: **vermelhos**: maiores valores – **pretos**: menores valores

Para a maioria das variáveis ambientais, listadas na Tabela 4.2, os intervalos de confiança de 95% para os dados avaliados indicam valores próximos à média. Isto se deve ao desvio padrão que também não foi elevado para a maioria das variáveis. As maiores

variabilidades ocorreram para a direção dos ventos. Cabe novamente ressaltar que os dados utilizados para o cálculo da média anual foram as médias diárias de cada variável.

O ano que apresentou maior média de temperatura foi 2005 (23,82°C) e a menor média de temperatura foi obtida em 2006 (23,44°C). O valor mínimo de temperatura no período estudado foi de 15,15°C e o máximo foi de 30,35°C. Cabe novamente ressaltar que estes valores não são pontuais, mas referem-se às médias de um dia. Observa-se na Figura 4.1 que a temperatura do ar da cidade de Uberlândia apresenta uma tendência sazonal, atingindo valores menores no inverno (como era esperado) e maiores na primavera (nos meses que antecedem as chuvas).

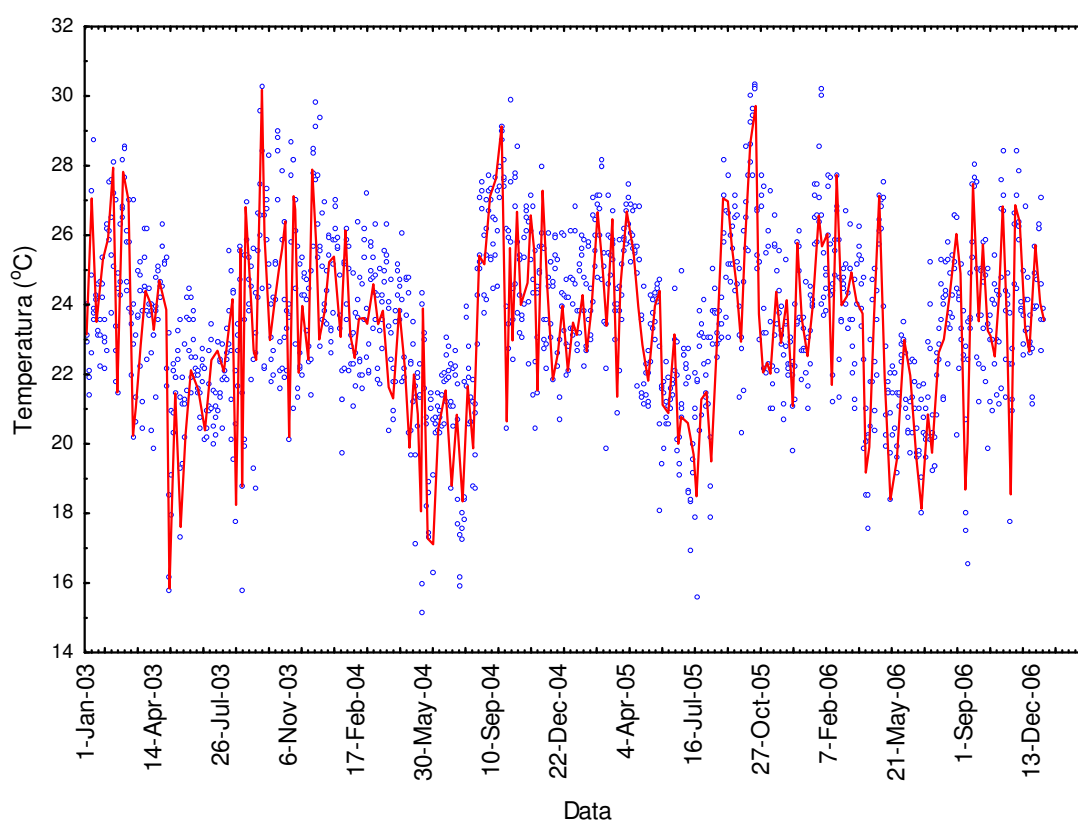


Figura 4.1 – Médias diárias da temperatura do ar de 2003 a 2006.

A umidade relativa do ar apresentou menor valor médio em 2004 (65,40%) e maior em 2005 (68,27%). No período analisado, o valor mínimo (26,33%) e máximo (97%) foram obtidos no mesmo ano (2004). Pode-se observar na Figura 4.2 que os menores níveis de umidade relativa são obtidos na primavera e em seguida no inverno. Como esperado os maiores valores para esta variável são obtidos no verão. A maior umidade promove aglomeração das partículas fazendo com que as mesmas aumentem de diâmetro e sedimentem

com mais facilidade. Além disso, uma umidade mais elevada pode provocar um aumento de densidade das partículas, provocada pela maior adsorção de água.

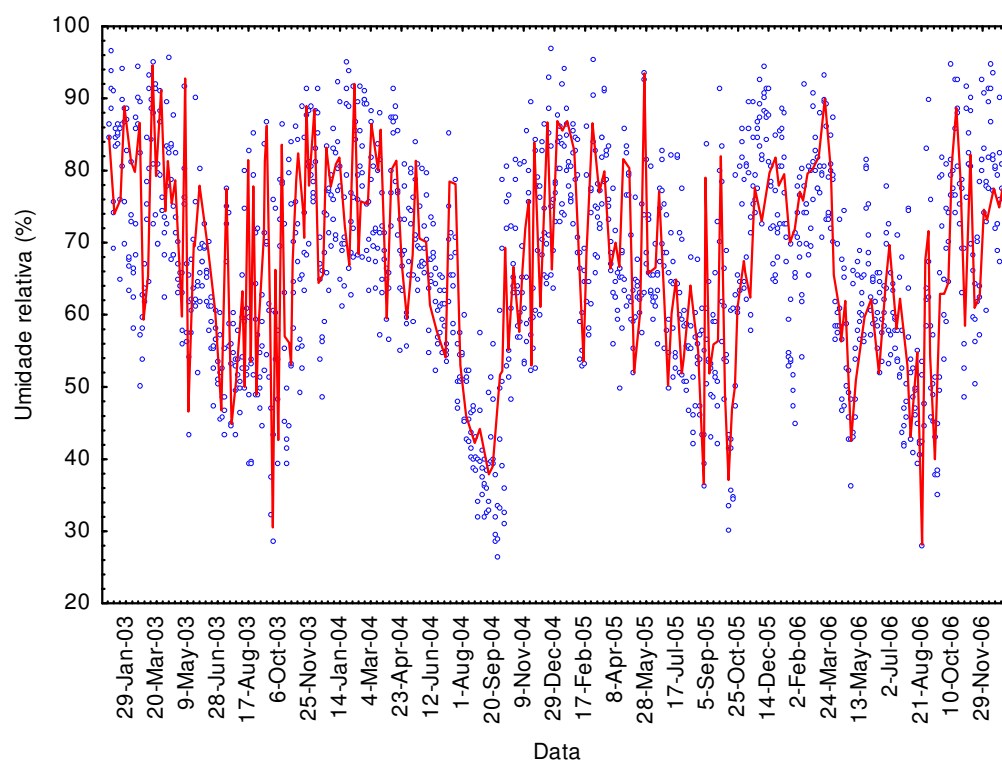


Figura 4.2 – Médias diárias da Umidade Relativa do ar de 2003 a 2006.

A precipitação (índice pluviométrico) variou entre 0 e 99,4 mm, tendo como maior valor médio 5,73mm, observado em 2006. O menor valor médio foi registrado em 2005 com 4,03 mm. Pode se verificar nitidamente na Figura 4.3 que no inverno e no início da primavera a precipitação foi praticamente nula. Os maiores índices pluviométricos ocorreram no verão e em alguns casos também no final da primavera (no início do período chuvoso). Os maiores índices pluviométricos favorecem a redução da concentração de material particulado, pois a precipitação “limpa” a atmosfera removendo as partículas presentes no ar. Ocorre uma interação direta do aerossol com a chuva através dos mecanismos de lavagem e nucleação, que são mais eficientes para partículas maiores. A precipitação faz também com que ocorra uma diminuição da suspensão de poeira no solo, devido à fixação desta pela chuva.

Sabe-se que a umidade do ar aumenta devido à ocorrência de precipitação, isto pode ser verificado comparando as Figuras 4.2 e 4.3, onde se pode comprovar que os perfis dessas variáveis são muito semelhantes.

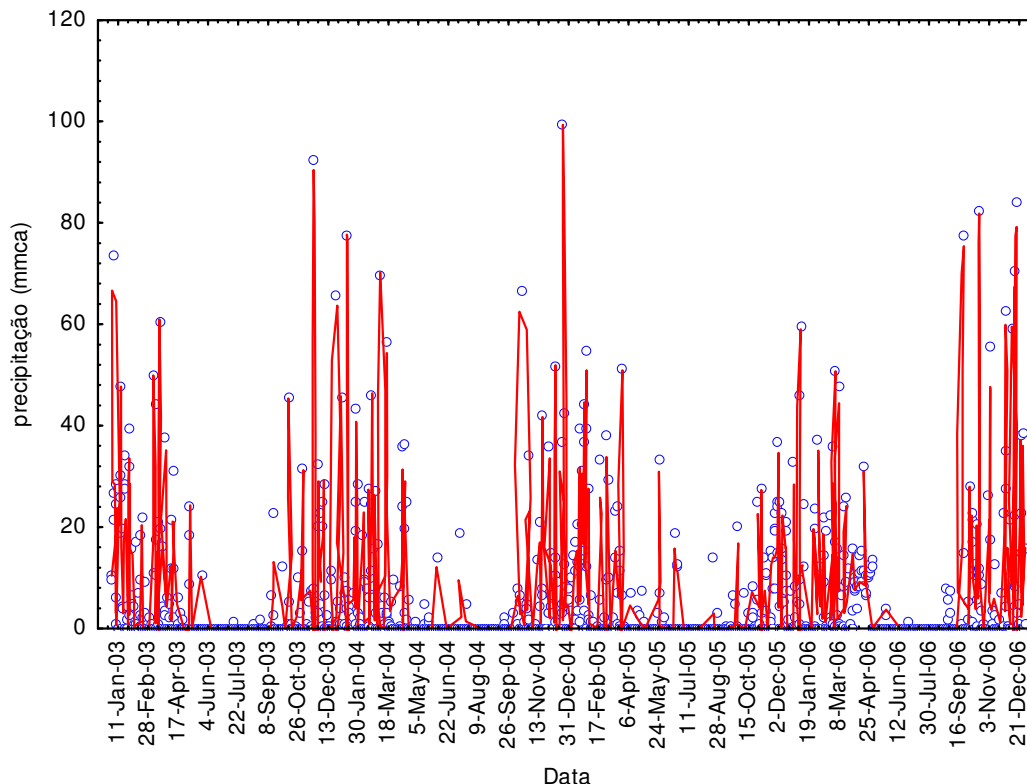


Figura 4.3 – Médias diárias da precipitação de 2003 a 2006.

A Tabela 4.1 mostra uma média de velocidade do vento em todo o período de estudo de 2 m/s, variando de no mínimo 0 e máximo de 8 m/s. A Tabela 4.2 mostra que a maior média de velocidade do ar por ano de estudo foi encontrada em 2005 (1,85 m/s).

A velocidade de queda de partículas no ar depende de duas forças: a da gravidade (peso) e a de atrito. Quando uma partícula é acelerada para baixo pela força da gravidade, sua velocidade cresce e a resistência do ar também cresce (no sentido contrário), até eventualmente igualar a força da gravidade e então a partícula cai com velocidade constante, chamada de velocidade terminal. Quanto maior for o diâmetro da partícula, maior será sua velocidade terminal, ou seja, partículas superfinais (diâmetros inferiores a 2,5 μm) permanecem mais tempo no ar, do que partículas respiráveis (diâmetros de 10 μm), devido à menor velocidade terminal apresentadas pelas mesmas (Amorim, 2004). Os resultados da Tabela 4.1 e 4.2 mostram que a velocidade do ar da região é relativamente baixa, o que dificulta bastante a dispersão de poluentes suspensos. Os resultados das médias diárias da velocidade do vento são apresentados na Figura 4.4.

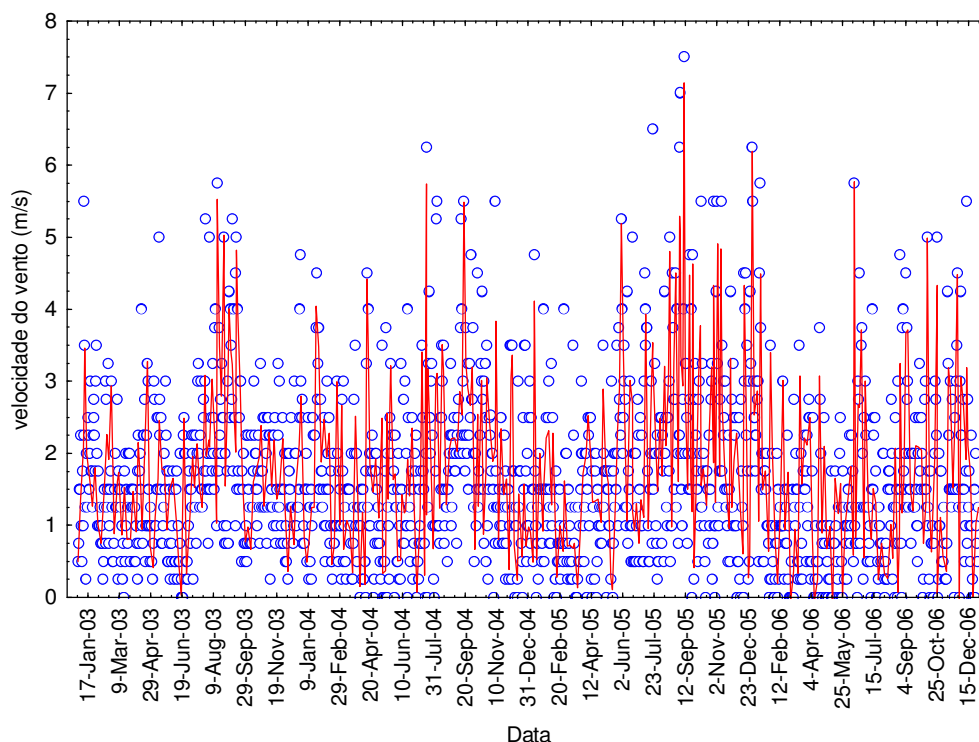


Figura 4.4 – Média diária da velocidade dos ventos de 2003 a 2006.

Um fator importante para avaliação da influência de fontes fixas de poluentes atmosféricos em uma região e o conhecimento da direção dos ventos.

No caso deste estudo, as direções predominantes dos ventos foram a Nordeste (NE) e a **ler-nordeste** (ENE), conforme pode ser observado na rosa dos ventos apresentada na Figura 4.5, para o período de 2003 a 2006. Este fator é importante, pois quando se considera o mapa da localização de Uberlândia (Figura 3.1) nota-se que na direção Nordeste, é o setor onde está localizado o distrito industrial, portanto, as partículas do setor industrial podem ser arrastadas para o centro da cidade, local onde está situado o ponto de amostragem deste trabalho.

A pressão atmosférica média diária de Uberlândia variou de 915 a 931 mbar no período estudado, tendo como média o valor de 923 mbar (692,3 mmHg). A distribuição das médias diárias de pressão no período considerado é apresentada na Figura 4.6. Esse perfil mostra claramente uma correlação entre as pressões máximas e o inverno/primavera e mínimas com o verão e outono.

Nota-se na Tabela 4.2 que o ano de 2005 foi o de menor média de pressão, 920,8 mbar, o que promove melhor dispersão de poluentes. A maior média de pressão atmosférica foi registrada em 2003.

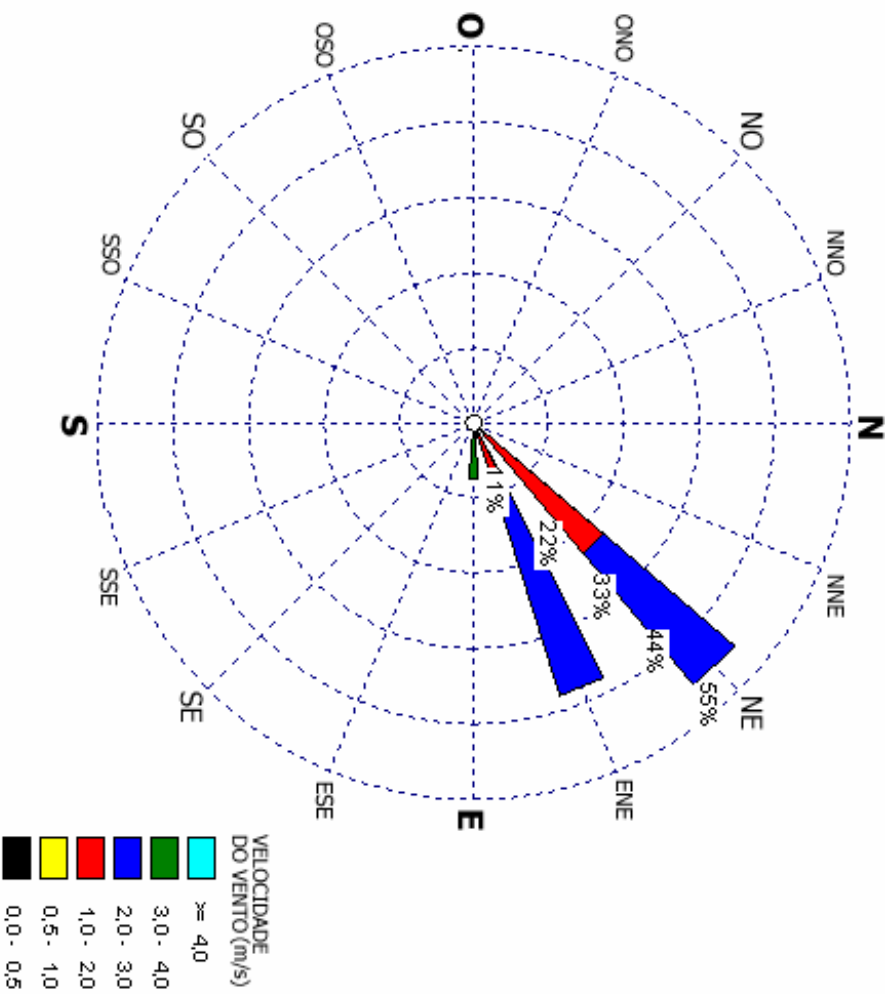


Figura 4.5 – Rosa dos Ventos para o período de 2003 a 2006

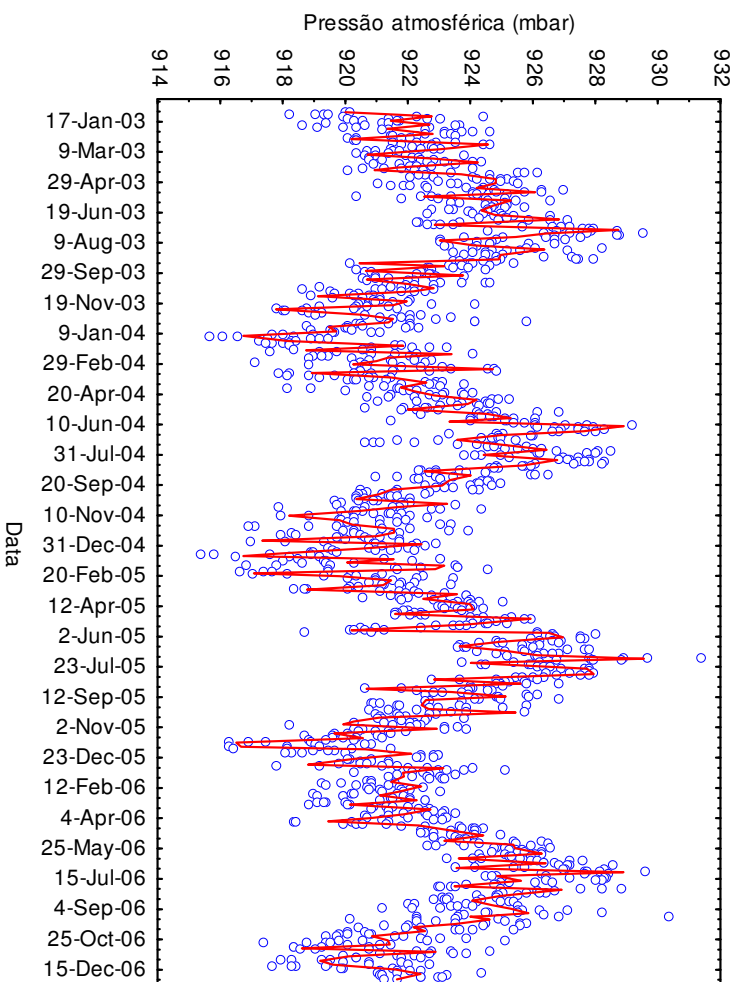


Figura 4.6 – Média diária da pressão atmosférica de 2003 a 2006.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1, Uberlândia recebeu uma insolação média diária de 7 horas/dia nos anos amostrados, considerando as médias diárias, e teve um mínimo de 0 e máximo de 13 horas de sol. A Figura 4.7 apresenta os resultados das médias diárias da insolação no período de estudo.

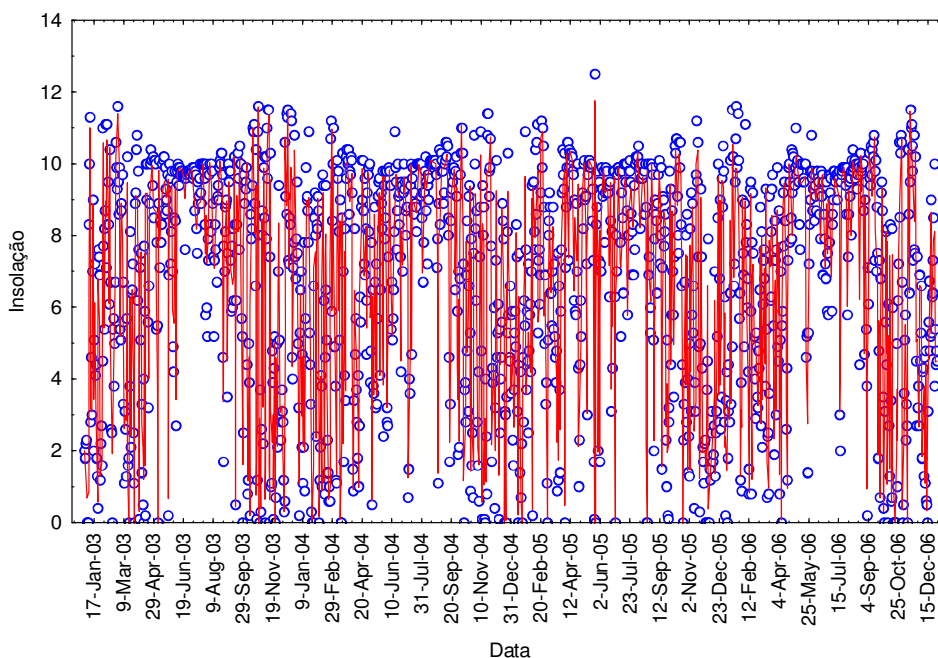


Figura 4.7 – Médias diárias de insolação de 2003 a 2006.

4.2 – Resultados de concentração de material particulado em suspensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de concentração de material particulado em suspensão, obtidos utilizando-se os amostradores de grandes volumes para partículas totais (AGV-PTS), partículas respiráveis (AGV-MP₁₀) e para o amostrador de pequenos volumes (APV-MP_{2,5}).

4.2.1 – Amostrador de grandes volumes para partículas totais (AGV-PTS) – 01/2003 a 12/2006.

Os resultados das medidas de concentração de partículas totais obtidos utilizando o AGV-PTS, ainda sem tratamento estatístico, são apresentados na Figura 4.8.

Observando a Figura 4.8 verifica-se que a concentração de material particulado apresenta valores maiores no inverno (entre os dias 170 e 260) para todos os anos. No inverno a frequência de chuvas é menor, consequentemente a umidade do ar é baixa, o que dificulta a deposição de partículas. Associado a estes fatores, a região de Uberlândia possui ventos fracos (abaixo de 5 m/s) praticamente o ano todo, condição esta que proporciona uma baixa dispersão de poluentes.

Verificam-se ainda na Figura 4.8 que o padrão secundário diário (CONAMA 003/90) foi ultrapassado quatro vezes em 2003, duas vezes em 2004, três vezes em 2005 e 2006. A Resolução do CONAMA recomenda que o padrão secundário ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) não deve ser ultrapassado mais do que uma vez ao ano.

As ocorrências acima do padrão foram observadas nas estações de clima mais secos, períodos que coincidem com grande aumento de queimadas urbanas e rurais, dificuldades de dispersão de poluentes e aumento de internações nos hospitais devido às doenças respiratórias.

O padrão primário ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi ultrapassado no ano de 2004, atingido o valor de $514 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Verificam-se ainda valores próximos ao padrão primário nos anos de 2004 e 2006.

A maioria dos resultados de concentração de partículas totais está compreendida na faixa de 50 a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo o padrão anual de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o secundário e $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o primário, este cenário apresenta preocupações. A comparação com os padrões anuais será feita após um tratamento estatístico visando à eliminação de pontos de *out-liers*.

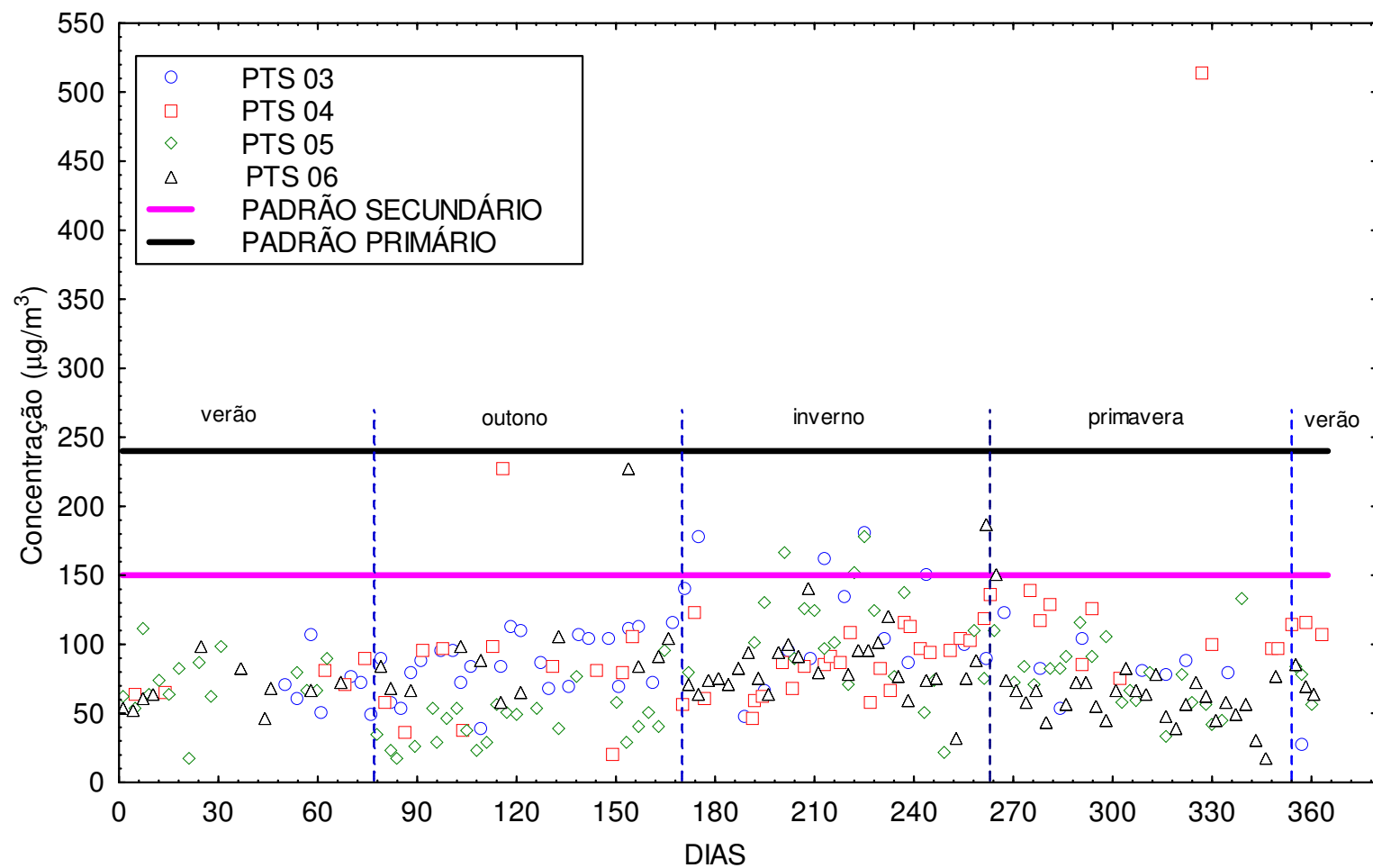


Figura 4.8 - Resultado da concentração de PTS – 2003-2006.

4.2.2 – Amostrador de grandes volumes para partículas respiráveis (AGV-MP₁₀) – 01/2003 a 12/2006.

A Figura 4.9 apresenta os resultados de concentração de material particulado respirável, obtidos a partir das medidas realizadas no AGV-MP₁₀.

Da mesma forma que para o PTS, observa-se também uma tendência de sazonalidade da concentração de MP na região central do gráfico, a qual coincide com a estação mais seca do ano.

Tanto o padrão primário quanto o secundário, segundo a Resolução CONAMA 003/90 é de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nota-se então que somente no ano de 2004 estes padrões foram ultrapassados, mas por duas vezes, sendo que o recomendado é no máximo uma vez ao ano. No ano de 2005, por cinco vezes a concentração de MP ficou acima de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, despertando então certa preocupação. Porém, no ano de 2006, os valores ficaram sempre abaixo de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com exceção de uma única ocasião, o que indica certa estabilidade na concentração de particulado.

Verifica-se ainda na Figura 4.9 que a maior concentração de partículas respiráveis está na faixa de 30 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e que embora o padrão diário não tenha sido ultrapassado no último ano, a faixa de concentração observada compreende o padrão anual (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), provocando preocupações para a saúde humana e para o meio ambiente. As comparações com os padrões anuais serão feitas após um tratamento estatístico, no qual serão eliminados os pontos de *outliers*.

4.2.3 – Amostrador de pequenos volumes para MP_{2,5} (APV) – 07/2006 a 07/2007.

A Figura 4. 10 apresenta os resultados de concentração de MP_{2,5} para o período de um ano de amostragem, utilizando um amostrador de pequenos volumes (APV)

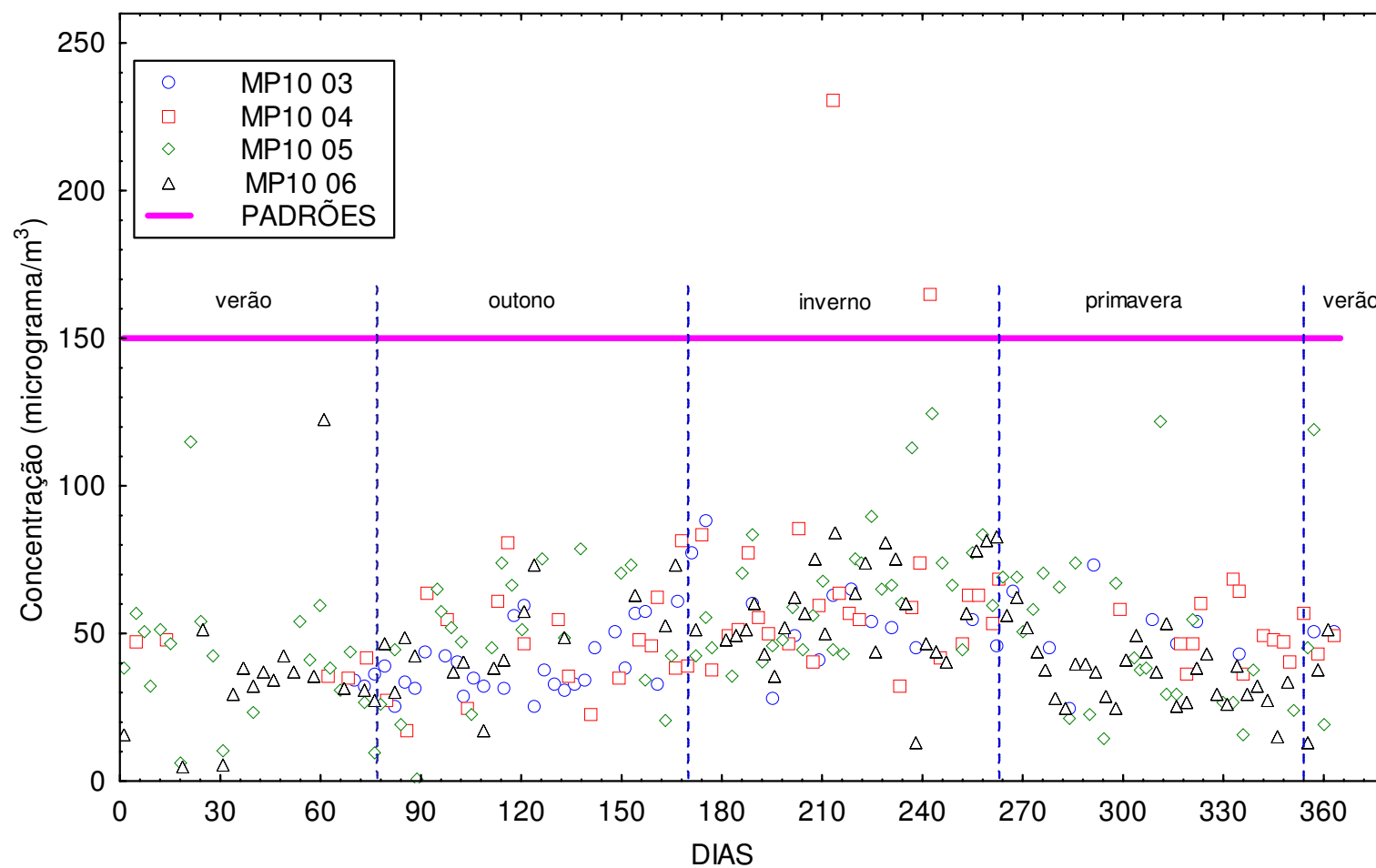


Figura 4.9 - Resultado da concentração de MP10 – 2003-2006.

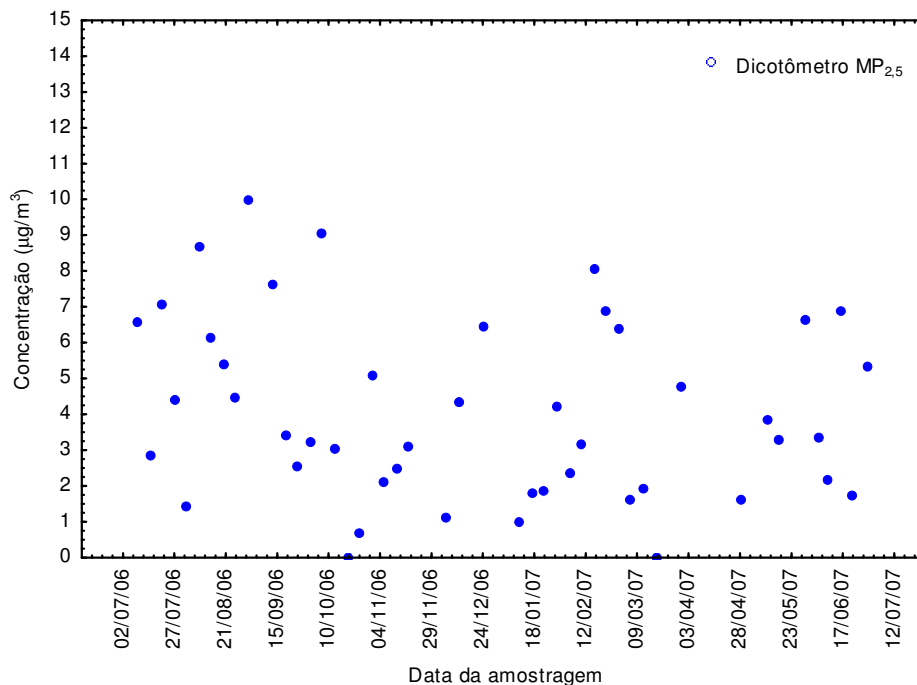


Figura 4. 10 - Resultado de concentração de $MP_{2.5}$ – 07/2006 - 06/2007.

No monitoramento realizado com o APV, o limite diário adotado na E.P.A.- *Environmental Protection Agency*, $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não foi excedido nenhuma vez no período amostrado para o $MP_{2.5}$, cabe ressaltar que para esse tamanho de partícula não existe padrão nacional.

Como esperado a estação que apresentou os maiores índices de concentração de material particulado foi também o inverno.

As comparações com os padrões anuais serão feitas após um tratamento estatístico, no qual serão eliminados os pontos *outliers*.

4.3 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais

A seguir serão apresentados os tratamentos dos dados experimentais de concentração, para o período estudado.

4.3.1 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais PTS

Os resultados das análises estatísticas descritivas da concentração de material particulado total para os anos estudados estão dispostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise estatística descritiva para o PTS de 2003 a 2006.

Estatísticas	PTS			
	2003	2004	2005	2006
Média aritmética ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	88,1	89,6	72,9	76,4
Int. confiança (- 95%)	79,9	80,0	65,5	69,6
Int. confiança (+ 95%)	96,1	99,1	80,3	83,3
Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	86,7	86,3	69,0	72,1
Desvio padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	30,9	33,3	34,1	30,5
Coeficiente de variação	0,35	0,37	0,47	0,39
Variância	957,2	1112,1	1159,8	931,6
Curtose	1,66	4,9	0,60	8,69
Assimetria	0,96	1,29	0,76	2,26
Número de pontos	59	50	84	79
Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27,6	20,9	17,2	17,5
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	181,7	227,8	178,3	226,6
Média Geométrica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	82,9	83,6	64,9	71,5

Todas as médias geométricas para o PTS (Tabela 4.3) apresentaram valores acima do padrão secundário anual (CONAMA 003/90), que é de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A ultrapassagem deste padrão indica que o meio ambiente no entorno do local de amostrado está sujeito a sofrer alterações.

O padrão do CONAMA mais crítico para a saúde humana é o primário ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ele foi ultrapassado nos anos de 2003 e 2004, atingido os valores de 82,9 e $83,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Em 2005 obteve-se a menor média geométrica para a concentração de particulados totais (PTS) que foi de $64,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A explicação para este fato pode vir das condições climatológicas. Conforme apresentado anteriormente (Tabela 4.2), o ano de 2005 apresentou os maiores valores para a umidade relativa, para as velocidades dos ventos e para temperatura, bem como os mais baixos valores para a pressão atmosférica.

Conforme discutido anteriormente, a maior umidade promove aglomeração das partículas fazendo com que as mesmas aumentem de diâmetro e sedimentem com mais facilidade. Além disso, uma umidade mais elevada pode também provocar um aumento de densidade das partículas. A maior velocidade dos ventos favorece a dispersão dos poluentes suspensos no ar. As condições de maiores temperaturas e menores pressões também favorecem a dispersão das partículas.

O ano de 2004 foi aquele que apresentou os maiores valores para as médias de concentração de particulados totais (PTS). Neste ano foram obtidos valores baixos para a média

da umidade relativa e do índice pluviométrico, condições essas que, conforme discutido anteriormente, favorecem ao aumento da concentração de particulados.

As figuras a seguir apresentam resultados de médias mensais da concentração de particulados totais (PTS) plotados conjuntamente com a média mensal do índice pluviométrico (Figura 4.11) e da umidade relativa (Figura 4.12). A análise dessas figuras mostra claramente a relação inversa entre a concentração de PTS e desses dois indicadores ambientais.

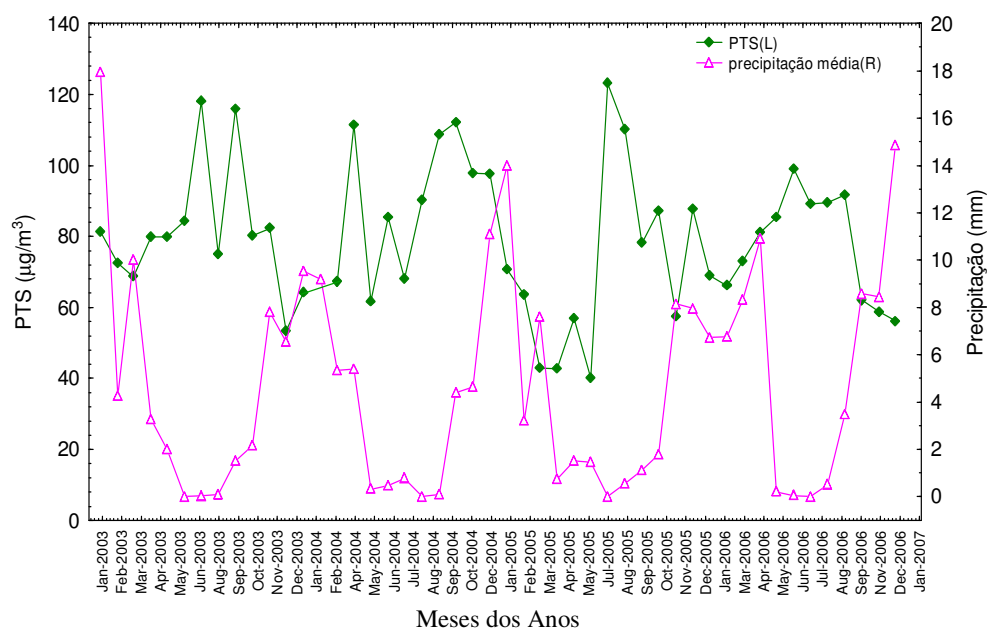


Figura 4.11 – Média mensal de concentração de PTS e de Precipitação

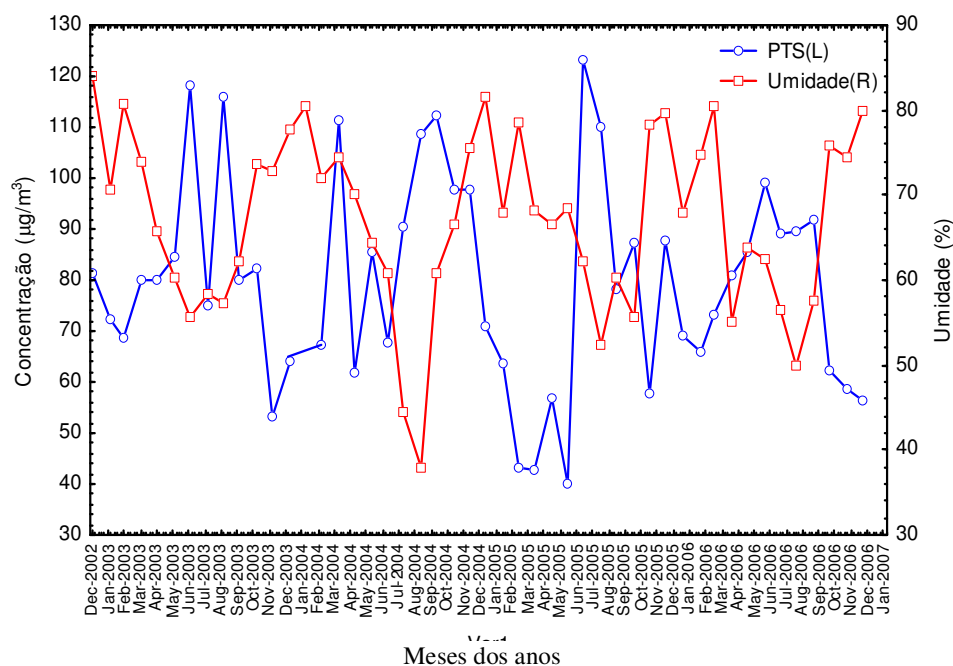


Figura 4.12 – Média mensal de concentração de PTS e de Umidade Relativa

Uma análise mais aprofundada sobre a qualidade do ar, considerando outros tratamentos estatísticos como teste de hipóteses será abordada nos próximos tópicos deste capítulo.

4.3.2 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais do MP₁₀.

O resultado das análises estatísticas descritivas da concentração de material particulado MP₁₀ para os anos estudados está disposto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Análise estatística descritiva para o MP₁₀ para o período de 2003 a 2006.

Estatísticas	MP ₁₀			
	2003	2004	2005	2006
Média aritmética ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	46,4	58,9	53,5	44,9
Int. confiança (- 95%)	42,2	50,9	48,6	40,8
Int. confiança (+ 95%)	50,6	66,9	58,4	48,9
Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44,3	53,9	50,4	42,3
Desvio padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15,1	31,9	23,7	19,2
Coeficiente de variação	0,33	0,54	0,44	0,43
Variância	227,2	1014,5	563,7	370,1
Curtose	-0,06	14,2	1,13	2,21
Assimetria	0,70	3,20	0,90	0,90
Número de pontos	52	64	92	89
Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24,7	16,9	14,1	4,51
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	88,4	230,7	124,2	122,5

Para o MP₁₀, Observa-se na Tabela 4.4 que o limite anual de concentração, estabelecido pela CONAMA 003/90 para os padrões primário e secundário ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), foi superado nos anos de 2004 e 2005.

Para o MP₁₀ a maior média anual foi obtida também para ano de 2004, analogamente ao que ocorreu com o PTS. As explicações são as mesmas dadas anteriormente, ou seja, neste ano as condições de baixa umidade relativa e índice pluviométrico favorecem ao aumento da concentração de particulados.

As menores médias anuais de MP₁₀ foram obtidas em 2006 e 2003. Estes anos foram aqueles que apresentaram as maiores médias do índice pluviométrico (Tabela 4.2). As figuras a seguir apresentam resultados de médias mensais da concentração de particulados respiráveis

(MP_{10}) plotados conjuntamente com a média mensal do índice pluviométrico (Figura 4.13) e da umidade relativa (Figura 4.14). A análise dessas figuras mostra também a relação inversa entre a concentração de MP_{10} e desses dois indicadores ambientais.

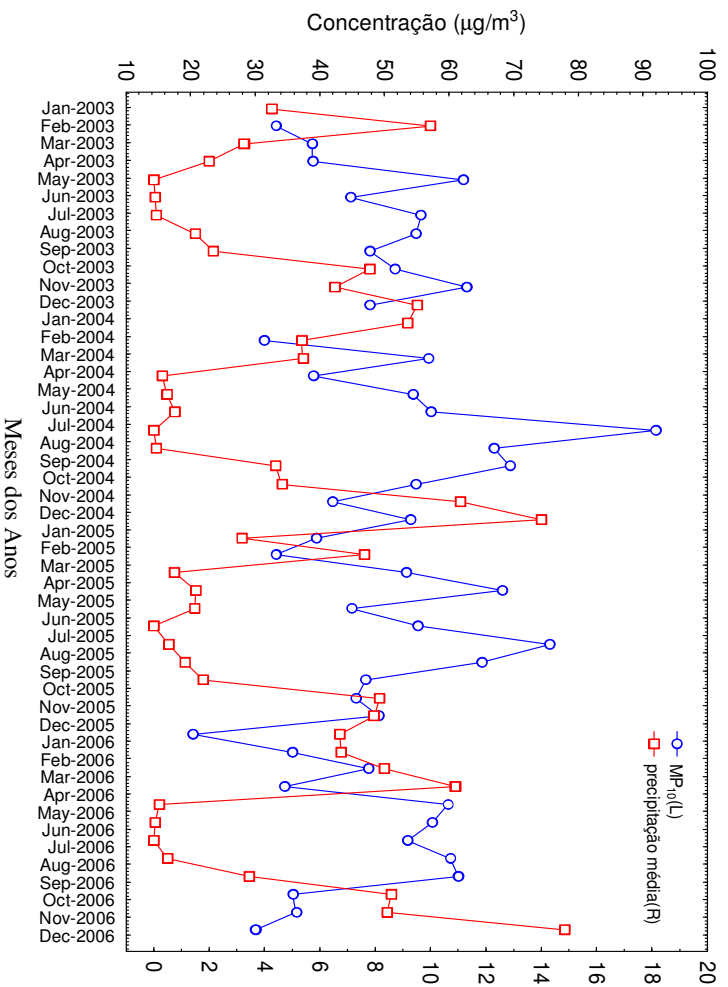


Figura 4.13 – Média mensal de concentração de MP_{10} e de Precipitação.

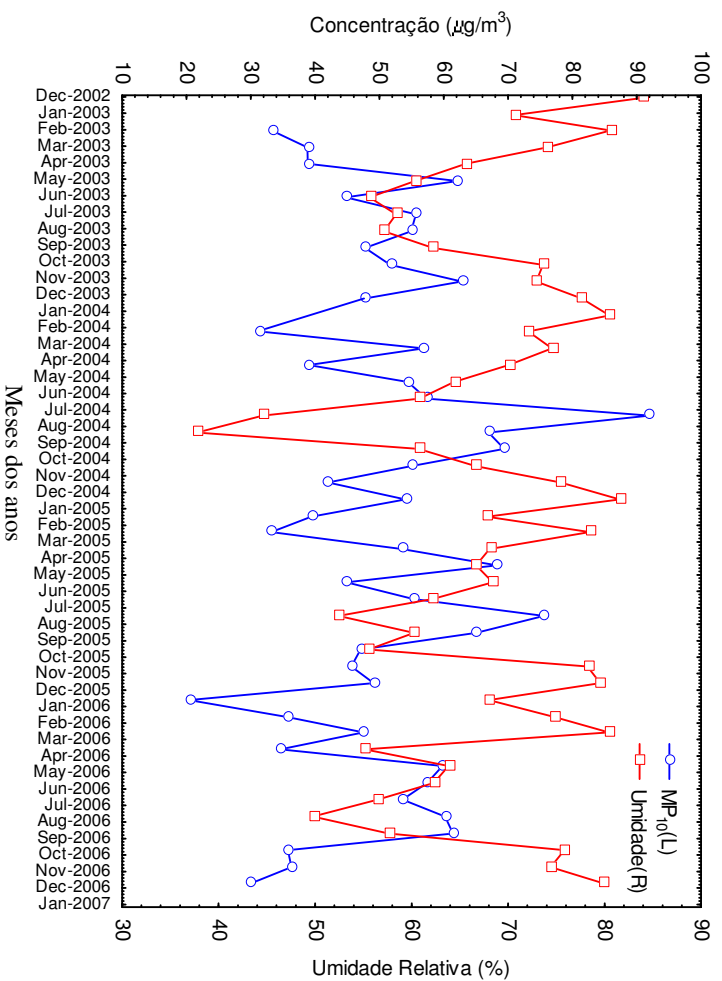


Figura 4.14 – Média mensal de concentração de MP_{10} e de Umidade Relativa

Analisando conjuntamente os dados das Tabelas 4.3 e 4.4, observa-se que os valores das médias e medianas foram relativamente próximos entre si, e que os coeficientes de assimetria e curtose ficaram próximos de zero, indicando que tanto os dados de MP_{10} (Tabela 4.4) quanto PTS (Tabela 4.3), apresentam distribuição que se aproximam da normal e, portanto, a média aritmética é uma medida representativa para a série estudada.

As variabilidades representadas pelo desvio padrão e pelo coeficiente de variação mostram que os dados de MP_{10} e PTS apresentam variações relativamente altas ao longo do ano, contribuindo com o indicativo de presença de sazonalidade nos dados.

4.3.3 – Resultados da análise estatística descritiva aplicada aos dados experimentais APV $MP_{2,5}$.

A estatística descritiva da concentração de material particulado superfino ($MP_{2,5}$), amostrados no APV no período de julho de 2006 a junho de 2007, está apresentada na Tabela 4.5, onde pode-se verificar que o padrão anual da EPA ($15,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) não foi excedido.

Tabela 4.5 – Estatística descritiva para $MP_{2,5}$ com dados de julho/06 a junho/07.

Média aritmética ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8,2
Erro padrão (-)	2,0
Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3,4
Desvio padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	14,3
Coeficiente de variação	174,4
Curtose	11,9
Assimetria	3,42
Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	75,6
Número de pontos (-)	51

Diferente do que ocorreu para o PTS e MP_{10} , Os valores da média e mediana para o $MP_{2,5}$, não foram próximos entre si e os coeficientes de assimetria e curtose foram diferente de zero, indicando que, para o período estudado os dados de $MP_{2,5}$ não apresentaram uma distribuição que se aproximam da normal e, portanto, a média aritmética não é uma medida representativa para a série estudada.

As médias das concentrações de $MP_{2,5}$ para cada estação estão listadas na Tabela 4.6. Nesta tabela, pode-se perceber a diferença de concentrações devido à sazonalidade das estações, sendo que no inverno e primavera são os períodos mais críticos. Como esperado e em

concordância com as outras medidas (PTS e MP_{10}), no verão foram registradas as menores médias de concentração de $MP_{2,5}$.

Tabela 4.6 – Médias de concentração por estação do ano, com respectivos intervalos de confiança 95% e desvio padrão para o $MP_{2,5}$.

Estação	Média	IC 95%	Desvio Padrão
inverno	7,3	$7,3 \pm 4,4$	7,3
primavera	9,3	$9,3 \pm 13,3$	21,0
verão	3,7	$3,7 \pm 1,3$	2,3
outono	6,2	$6,2 \pm 5,2$	7,7

4.4 – Diagramas BOX PLOTS aplicados aos dados experimentais de concentração de material particulado

A Figura 4.15 apresenta um diagrama de box plot para a concentração de material particulado total em suspensão. Nesta figura podemos verificar a presença de *outlier* em todos os anos estudados.

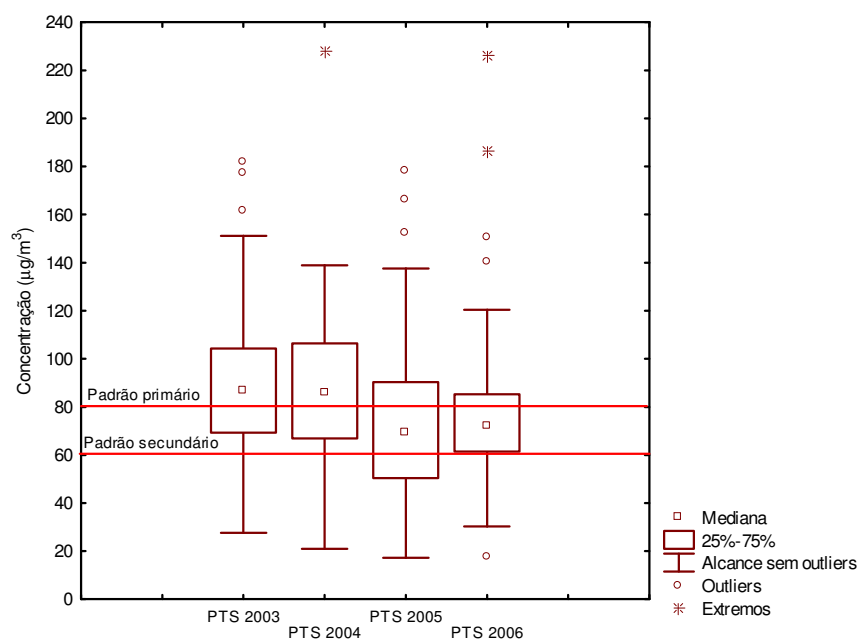


Figura 4.15 – Diagrama Box plot dos dados de PTS para os anos de 2003 a 2006

Na Figura 4.15, o diagrama de box foi construído utilizando como ponto central a mediana, para melhor constatação visual da simetria dos dados. Neste diagrama, os pontos externos são os *outliers*. Pode-se verificar nesta Figura que a distribuição dos pontos foi simétrica para todos os anos. Este resultado de simetria deve-se ao fato dos valores da média

serem próximos aos da mediana, conforme verificado na Tabela 4.3 e conseqüentemente ocorre uma tendência de distribuição normal, sendo assim a média aritmética pode ser uma média representativa para a série estudada.

Na Figura 4.15 foram inseridos também os padrões estabelecidos pela resolução CONAMA 03/90, para constatação visual da distância dos dados em relação aos padrões primários e secundários da referida legislação. Observa-se que, em todos os anos estudados, o padrão secundário foi ultrapassado. Observa-se também que nos anos de 2003 e 2004, o padrão primário também foi ultrapassado.

Analogamente, a Figura 4.16 apresenta o diagrama box plot para os dados de concentração do MP_{10} . Observa-se também para este caso a presença de *outliers* e certa simetria entre os dados para todos os anos estudados, exceto em 2005.

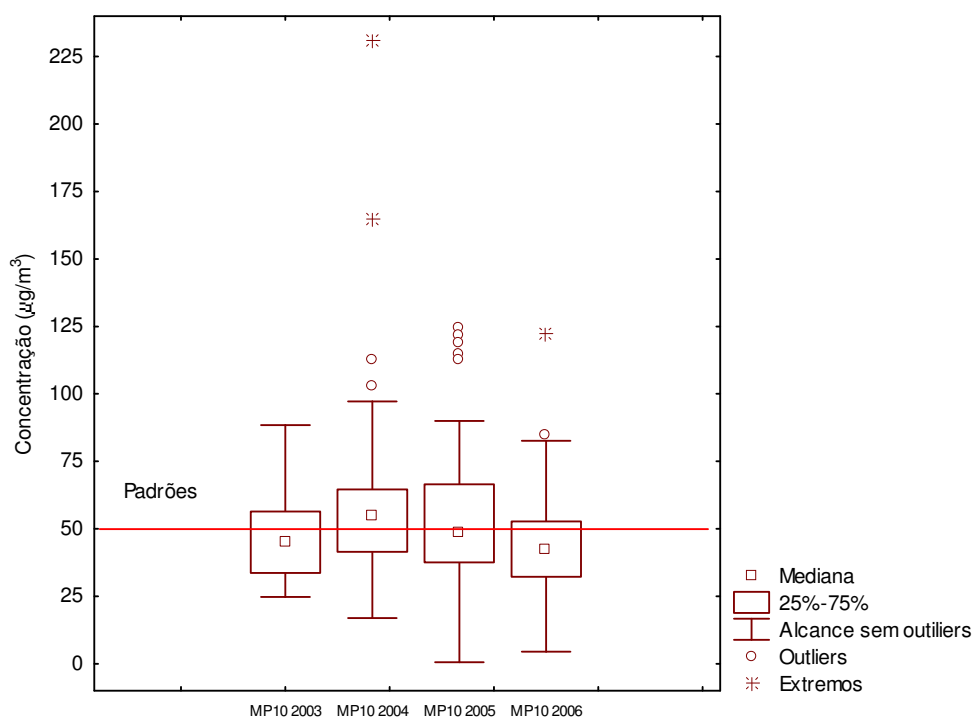


Figura 4.16 – Diagrama Box plot de 2003 a 2006 para MP_{10} .

O Padrão anual para o MP_{10} , estabelecido pela resolução CONAMA 03/90, é de $50\mu g/m^3$. Este padrão também foi plotado no diagrama. Observa-se que apenas para o ano de 2004, que foi o mais crítico entre os analisados, este padrão foi superado. Entretanto as médias aritméticas anuais estão próximas do padrão (Tabela 4.4) e a dispersão dos dados para estes anos indicam também preocupação.

Para os outros tratamentos estatísticos do presente trabalho, os valores *outliers* foram excluídos. De acordo com MORETTIN e TOLOI (2004) este procedimento deve ser realizado para a obtenção de modelos mais representativos.

4.5 – Testes de hipóteses para comparação de duas médias usando teste t de Student

Para comparação dos resultados estatísticos nos anos estudados, bem como nas respectivas estações, foram realizados testes de hipóteses utilizando uma distribuição t de Student. As informações estatísticas necessárias para a realização dos testes são as estatísticas descritivas, conforme apresentado nas Tabelas 4.3 e 4.4, para PTS e MP₁₀, respectivamente. Entretanto, para os testes realizados nesta seção os pontos *outliers* não foram considerados.

Os testes foram realizados comparando pares de anos ou de estações. A construção de um teste de hipótese é feita a partir da seleção da hipótese alternativa (H_1) e da hipótese de nulidade (H_0).

A hipótese alternativa (H_1) é a afirmação daquilo que queremos comprovar. Sendo assim, no nosso caso H_1 seria: *Existe diferença significativa entre a média da concentração de particulados em 2 anos ou 2 estações.*

A hipótese de nulidade (H_0) é a negação daquilo que queremos comprovar. Sendo assim, no nosso caso H_0 seria: *Não existe diferença significativa entre a média da concentração de particulados em 2 anos ou 2 estações.*

O nível de significância do teste, é definido como a probabilidade de erro do referido teste. Neste trabalho foi utilizado **um nível de significância de 10%**. Sendo assim, para a comparação de duas médias, se o valor do *nível p* calculado for inferior a 10%, tem-se que o valor encontrado está dentro da região de rejeição de H_0 , ou seja aceita-se H_1 , indicando que existe diferença significativa entre as médias analisadas.

4.5.1 – Teste de hipótese para comparação dos anos estudados

Quando o teste de hipóteses foi aplicado aos dados de concentração anuais para o PTS, as médias utilizadas foram as geométricas em função da recomendação da Resolução CONAMA 03/90. Já para os testes com os dados do MP₁₀ foram utilizadas as médias aritméticas, conforme a mesma Resolução. A Tabela 4.7 apresenta os resultados dos testes de hipóteses para os anos estudados.

Tabela 4.7 – Resultados dos testes de hipóteses para comparação entre as médias de concentração para o PTS e MP₁₀.

PTS			MP ₁₀		
H ₁	Nível p	Aceitação de H ₁	H ₁	Nível p	Aceitação de H ₁
$\eta_{2004} > \eta_{2003}$	0,4548	Não	$\eta_{2004} > \eta_{2003}$	0,0053	Sim
$\eta_{2004} > \eta_{2005}$	0,0012	Sim	$\eta_{2004} > \eta_{2005}$	0,1135	Não
$\eta_{2004} > \eta_{2006}$	0,0181	Sim	$\eta_{2004} > \eta_{2006}$	0,0005	Sim
$\eta_{2003} > \eta_{2005}$	0,0008	Sim	$\eta_{2005} > \eta_{2003}$	0,0041	Sim
$\eta_{2003} > \eta_{2006}$	0,0163	Sim	$\eta_{2006} > \eta_{2003}$	0,3151	Não
$\eta_{2006} > \eta_{2005}$	0,0978	Sim	$\eta_{2005} > \eta_{2006}$	0,0268	Sim

Observa-se nos resultados do teste de hipótese para o PTS, mostrados na Tabela 4.7 que as médias das concentrações dos anos de 2003 e 2004 foram estatisticamente iguais. Entretanto houve diferença significativa entre os resultados dos demais anos estudados. Observa-se também que as concentrações de PTS de 2003 e 2004 foram superiores aos anos de 2005 e 2006, e que ocorreu uma inversão dessa tendência, pois a concentração de PTS em 2006 foi significativamente maior que 2005.

Para o MP₁₀ observa-se nos resultados dos testes de hipóteses, apresentados na Tabela 4.7, que as concentrações dos anos intermediários (2004 e 2005) foram estatisticamente equivalentes, sendo maiores do que aquelas dos anos extremos do intervalo (2003 e 2006). As concentrações de MP₁₀ de 2003 e 2006 também não foram distintas. Ou seja, para as partículas respiráveis houve um aumento do primeiro para o segundo ano da pesquisa, estabilizando-se no terceiro ano e sofrendo uma redução no último ano. Conforme discutido anteriormente, estes resultados estão coerentes com os níveis das condições ambientais no período de estudo.

4.5.2 – Teste de hipótese para comparação das estações dos anos

Os dados da estatística descritiva, após eliminados os *outliers*, foram separados por estação para cada ano. Foram realizados os testes de hipóteses comparando pares de estação no mesmo ano. A Tabela 4.8 apresenta os dados de média e desvio padrão para cada estação nos 4 anos estudados e a Tabela 4.9 apresenta os resultados dos testes de hipóteses.

Cabe ressaltar que para o verão foi adotado o seguinte procedimento, o verão de 2004 começou em dezembro de 2003, entretanto no cálculo das médias foi considerada a estação completa, portanto, com dados também de dezembro de 2003. Este procedimento foi repetido para os demais anos.

Tabela 4.8 – Média aritmética e Desvio Padrão de PTS e MP₁₀ em cada Estação do ano

Ano	Estação	PTS		MP ₁₀	
		Média aritmética	Desvio padrão	Média aritmética	Desvio padrão
2003	Verão	69,6	21,2	35,5	2,9
	Outono	83,7	21,0	42,0	12,9
	Inverno	108,0	30,8	53,9	14,9
	Primavera	86,3	20,5	50,7	14,7
2004	Verão	66,5	21,6	47,6	17,0
	Outono	84,0	17,6	47,7	18,6
	Inverno	92,9	21,3	59,2	12,7
	Primavera	106,3	24,32	57,1	16,5
2005	Verão	69,7	20,6	42,5	22,4
	Outono	55,8	14,8	51,5	18,5
	Inverno	95,4	31,0	62,8	17,7
	Primavera	75,3	24,7	41,7	19,5
2006	Verão	69,2	14,8	36,5	24,6
	Outono	82,1	16,1	47,5	14,7
	Inverno	80,8	17,5	58,0	17,5
	Primavera	63,8	10,6	35,9	11,5

Valores em **vermelho**: maior média no ano.

Tabela 4.9 – Resultados de comparação das médias dentro do ano para o PTS e MP₁₀.

Ano	PTS			MP ₁₀		
	H ₁	Nível p	Aceitação de H ₁	H ₁	Nível p	Aceitação de H ₁
2003	$\eta_o > \eta_v$	0,0446	Sim	$\eta_o > \eta_v$	0,1656	Não
	$\eta_o > \eta_p$	0,3788	Não	$\eta_p > \eta_o$	0,0591	Sim
	$\eta_p > \eta_v$	0,0602	Sim	$\eta_p > \eta_v$	0,0366	Sim
	$\eta_i > \eta_o$	0,0048	Sim	$\eta_i > \eta_o$	0,0087	Sim
	$\eta_i > \eta_v$	0,0048	Sim	$\eta_i > \eta_v$	0,0154	Sim
	$\eta_i > \eta_p$	0,0535	Sim	$\eta_i > \eta_p$	0,3210	Não
2004	$\eta_o > \eta_v$	0,0540	Sim	$\eta_o > \eta_v$	0,4949	Não
	$\eta_p > \eta_o$	0,0184	Sim	$\eta_p > \eta_o$	0,0758	Sim
	$\eta_p > \eta_v$	0,0026	Sim	$\eta_p > \eta_v$	0,1067	Sim
	$\eta_i > \eta_o$	0,139	Não	$\eta_i > \eta_o$	0,0150	Sim
	$\eta_i > \eta_v$	0,0060	Sim	$\eta_i > \eta_v$	0,0277	Sim
	$\eta_p > \eta_i$	0,0623	Sim	$\eta_i > \eta_p$	0,3368	Não
2005	$\eta_v > \eta_o$	0,0283	Sim	$\eta_o > \eta_v$	0,0870	Sim
	$\eta_p > \eta_o$	0,0079	Sim	$\eta_o > \eta_p$	0,0536	Sim
	$\eta_p > \eta_v$	0,2460	Não	$\eta_v > \eta_p$	0,4517	Não
	$\eta_i > \eta_o$	0,0001	Sim	$\eta_i > \eta_o$	0,0188	Sim
	$\eta_i > \eta_v$	0,0064	Sim	$\eta_i > \eta_v$	0,0005	Sim
	$\eta_i > \eta_p$	0,0174	Sim	$\eta_i > \eta_p$	0,0001	Sim
2006	$\eta_o > \eta_v$	0,0266	Sim	$\eta_o > \eta_v$	0,0660	Sim
	$\eta_o > \eta_p$	0,0002	Sim	$\eta_o > \eta_p$	0,0025	Sim
	$\eta_v > \eta_p$	0,1134	Não	$\eta_v > \eta_p$	0,4549	Não
	$\eta_o > \eta_i$	0,4153	Não	$\eta_i > \eta_o$	0,0260	Sim
	$\eta_i > \eta_v$	0,0287	Sim	$\eta_i > \eta_v$	0,0009	Sim
	$\eta_i > \eta_p$	0,0001	Sim	$\eta_i > \eta_p$	0,0000	Sim

Os resultados dos testes de hipóteses para o PTS e MP_{10} mostram que as estações estão bem definidas. Ocorreram diferenças significativas entre as médias de concentração para o PTS e MP_{10} , na grande maioria dos pares analisados, mostrando que para cada estação do ano tem-se um nível específico de concentração de particulados. As pequenas exceções que ocorreram foram devido às flutuações nas condições climáticas, não previstas para uma determinada estação. Como por exemplo atraso ou antecipações em estações chuvosas.

4.6 – Classificação do ar de Uberlândia de acordo com o índice de qualidade do ar da CETESB

Uma outra forma de verificar a influência da estação do ano nos resultados da concentração de material particulado é realizar a classificação pelo critério de qualidade do ar da CETESB, mencionado no Capítulo 2 (Tabela 2.4). Apesar desse critério ser usado para médias anuais, neste trabalho foi feita a classificação por estação do ano, para verificar a influência das mesmas.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam, respectivamente para o PTS e MP_{10} , os resultados da classificação por estação do ano, para o período em estudo.

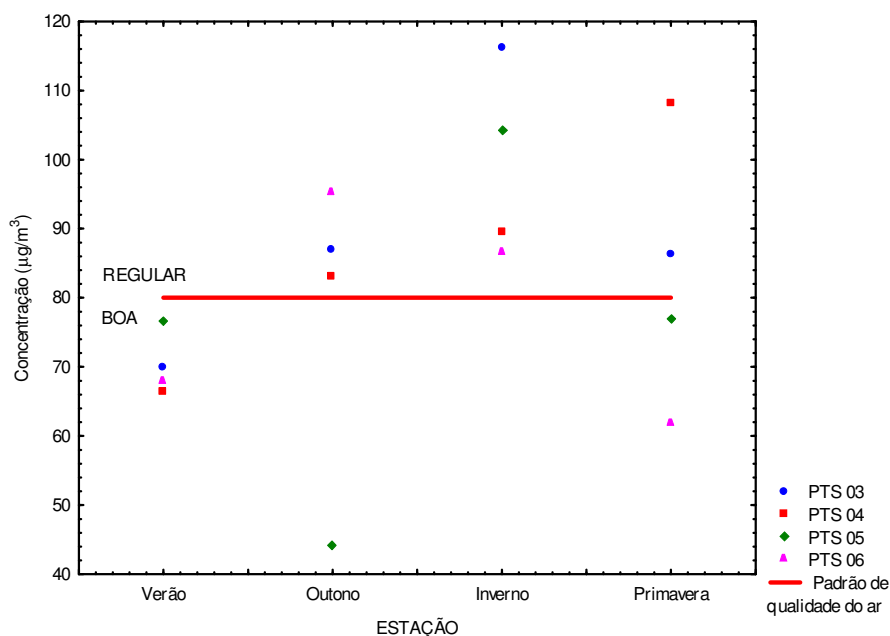


Figura 4.17 – Índice de qualidade do ar para o PTS em função das estações do ano

Os resultados da Figura 4.17 mostram que para o PTS, em todos os anos estudados, a qualidade do ar de Uberlândia pode ser sempre considerada boa no verão. Entretanto, para o

inverno e o outono a qualidade piorou consideravelmente, sendo classificada como regular para o período em estudo. A única exceção seria o outono de 2005, onde ocorreram chuvas em níveis superiores aos demais anos, conforme pode ser visto na Figura 4.3, apresentada anteriormente. A estação da primavera é a mais heterogênea das estações. Isto se deve ao início do período de maiores índices de chuvas que sempre ocorre nesta estação, sendo antecedido por um significativo período de estiagem. A antecipação ou atraso das chuvas na primavera interfere significativamente nos resultados de concentração de particulados. Isto pode ser constatado nos resultados da Figura 4.17, pois em dois anos (2005 e 2006) a qualidade do ar foi boa na primavera e em 2004 e 2003 foi regular.

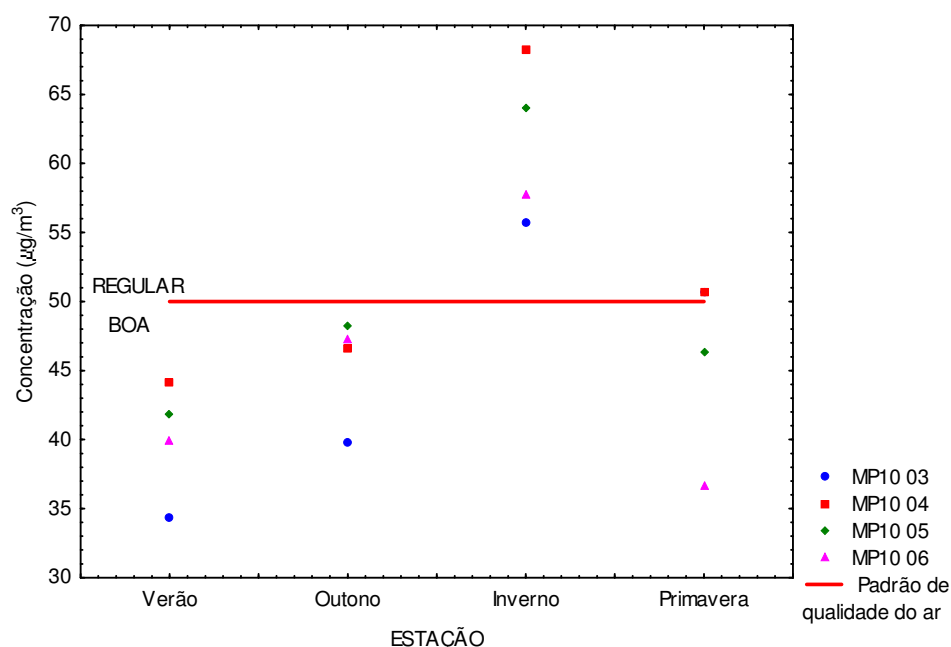


Figura 4.18 – Índice de qualidade do ar para o MP₁₀ em função das estações do ano.

Os resultados da Figura 4.18, mostram que para o MP₁₀ a qualidade do ar de Uberlândia pode ser sempre considerada boa no verão e no outono. Na estação do inverno, em todos os anos estudados o índice foi regular, confirmando assim, por mais um tipo de medida, ser esta a mais crítica das estações do ano para a qualidade do ar atmosférico. Observa-se também na Figura 4.14, que em dois anos da primavera o índice foi bom (2005 e 2006) e nos outros dois foi regular (2004 e 2003). Este resultado pode ser compreendido pelos testes de hipóteses apresentados no item anterior. Pode ser constatado na Tabela 4.9 que, para os anos de 2003 e 2004 os resultados da estação da primavera foram estatisticamente iguais ao do inverno. Isto se deve ao prolongamento do período de ausência de chuvas na primavera desses dois anos (Figura 4.3).

4.6 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística.

Os modelos de semivariogramas utilizados neste trabalho foram selecionados utilizando o critério da soma de quadrado de resíduos e do coeficiente de determinação. O software utilizado para este estudo foi o Gamma Design Software.

4.6.1 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística para o PTS.

As Figuras 4.19 a 4.22 a seguir, apresentam os semivariogramas da concentração de particulados totais (PTS) para os quatro anos estudados. A Tabela 4.10 sintetiza os resultados do tipo de modelo que melhor se ajusta, do alcance, do efeito pepita, do patamar, bem como do nível de dependência.

Pode-se notar nos semivariogramas que a medida que o tempo vai aumentando, os pontos observados vão se tornando independentes, ou seja, aproximam-se do patamar estável (variância), onde podemos avaliar o alcance ou a dependência temporal entre os dados. Por isso, os semivariogramas apresentados foram truncados no período de 200 dias.

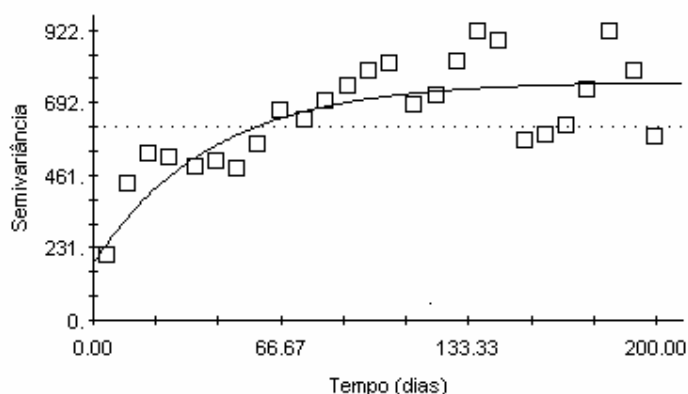


Figura 4.19 – Semivariograma para PTS do ano de 2003.

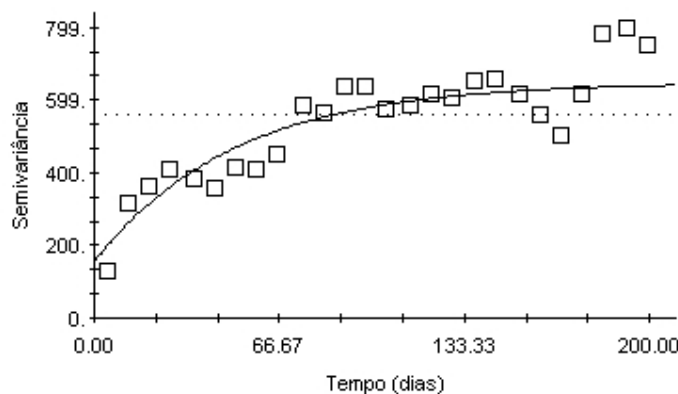


Figura 4.20 – Semivariograma para PTS do ano de 2004.

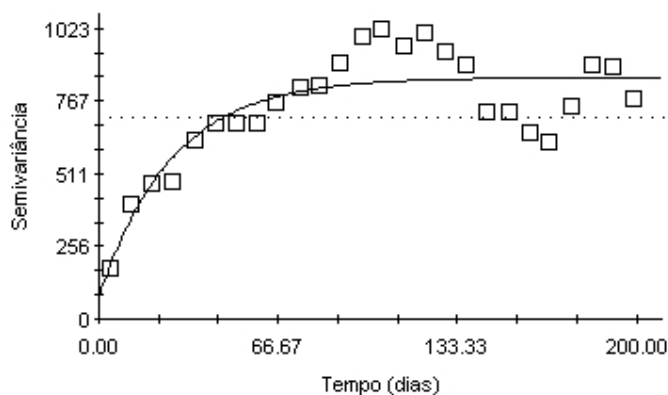


Figura 4.21 – Semivariograma para PTS do ano de 2005.

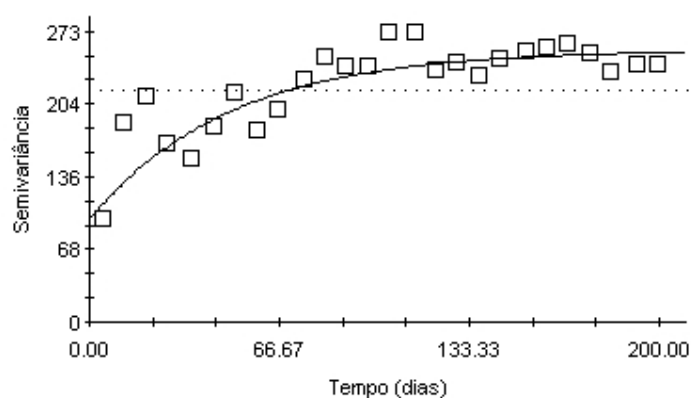


Figura 4.22 – Semivariograma para PTS do ano de 2006.

Tabela 4.10 – Resultado da análise dos semivariogramas para o PTS de 2003 a 2006.

	2003	2004	2005	2006
Modelo	Exponencial	Exponencial	Exponencial	Exponencial
Alcance (dias)	125	150	82	146
Co $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2]$	180,0	154,2	79,0	95,0
Co + C $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2]$	760,0	647,8	850,0	255,3
Dependência	0,24 = Forte	0,24 = Forte	0,09 = Forte	0,37 = Moderada

Observando os semivariogramas das Figuras 4.19 a 4.22, pode-se verificar a existência de flutuações das medidas de concentração em torno das semivariâncias ao longo do tempo, em

todos os anos do estudo. Estas flutuações revelam uma periodicidade das observações, que podem estar associadas com a sazonalidade das séries. Observa-se também que o modelo exponencial foi o que melhor representou as séries de dados considerando todo o período de estudo.

Os patamares dos semivariogramas são considerados uma estimativa da variância amostral ($C_0 + C$), no caso deste estudo, os patamares dos semivariogramas se mostraram bem definidos em todos os anos. Pela Tabela 4.10, pode-se observar que para o PTS, o ano que apresentou maior patamar foi o de 2005, isto significa que no referido ano, houve a maior variabilidade dos dados amostrais. Isso explica a menor dependência temporal (alcance) para o ano de 2005, como pode ser observado na mesma Tabela. Cabe ressaltar que o ano de 2005 apresentou a menor média de concentração de PTS e o maior desvio padrão (Tabela 4.3), mostrando a maior intensidade da variabilidade dos dados para este ano, comparando com os demais anos deste estudo.

As interseções (C_0) dos modelos de semivariograma com o eixo da semivariância (chamadas de efeito pepita), relacionados com o patamar ($C_0 + C$) do modelo (estimativa da variância da série) mostram que a componente de dependência temporal tem grau forte para os três primeiros anos e moderado para o ano de 2006, que foi o ano de menor variabilidade.

4.6.2 – Tratamento dos dados experimentais através da Geoestatística para o MP_{10} .

As Figuras 4.23 a 4.26 apresentam os semivariogramas da concentração de particulados respiráveis (MP_{10}) para os anos de 2003 a 2006, respectivamente. A Tabela 4.11 sintetiza os resultados do tipo de modelo que melhor se ajusta, do alcance, do efeito pepita, do patamar, bem como do nível de dependência.

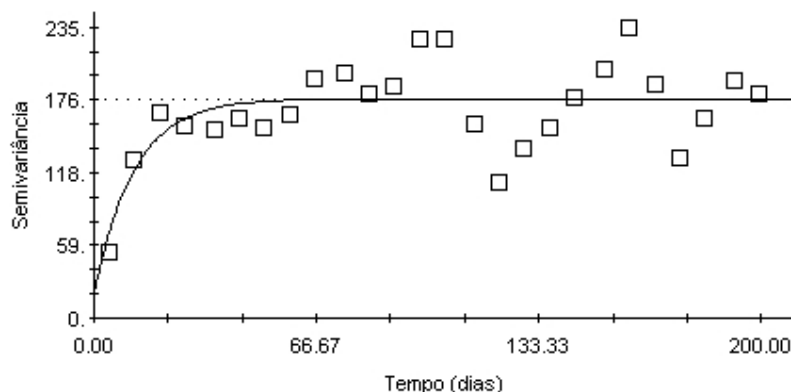


Figura 4.23 – Semivariograma para MP_{10} do ano de 2003.

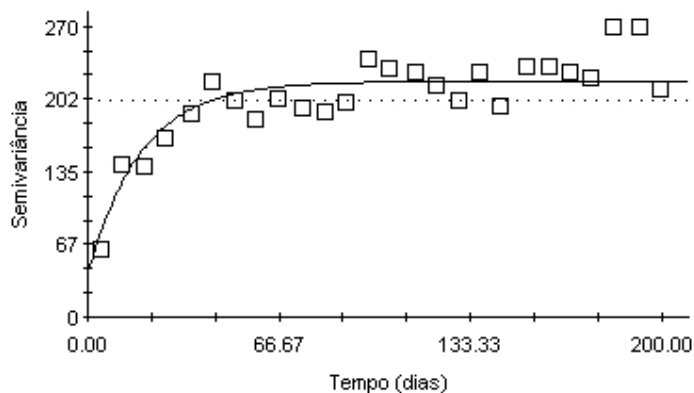


Figura 4.24 – Semivariograma para MP_{10} do ano de 2004.

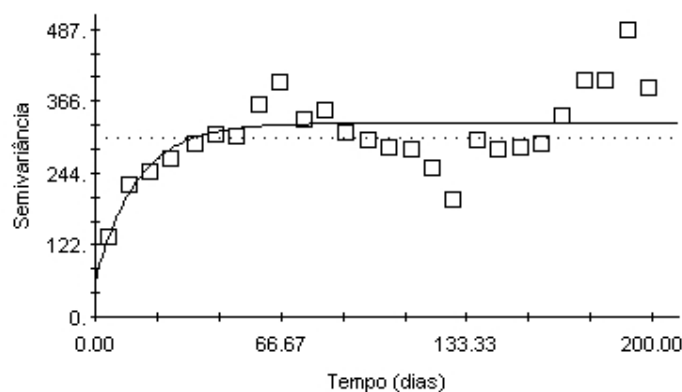


Figura 4.25 – Semivariograma para MP_{10} do ano de 2005.

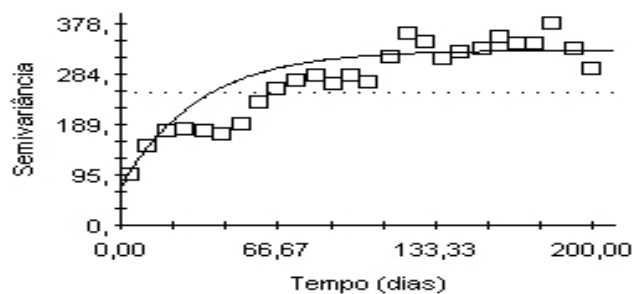


Figura 4.26 – Semivariograma para MP_{10} do ano de 2006.

Observando as Figuras 4.23a 4.26, pode-se verificar para o MP_{10} ocorreu um resultado análogo ao PTS, em termos de comportamento dos semivariogramas. Neste caso o modelo exponencial foi também o que melhor representou as séries de dados, considerando todo o período de estudo.

Tabela 4.11 – Síntese do tratamento geoestatístico para o MP_{10} de 2003 a 2006.

PARÂMETRO	2003	2004	2005	2006
Modelo	Exponencial	Exponencial	Exponencial	Exponencial
Alcance (dias)	36	56	44	97,6
Co $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2]$	17,3	40,0	58,2	69,6
Co + C $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2]$	177,4	218,5	330,0	328,5
DEPENDÊNCIA	0,10 = Forte	0,18 = Forte	0,18 = Forte	0,21 = forte

Observa-se na Tabela 4.11 que para o MP_{10} , assim como para o PTS, o ano que apresentou maior patamar (Co + C) foi o de 2005, isto indica também para os particulados respiráveis uma maior variabilidade dos dados amostrais neste ano. Uma diferença entre o comportamento dos dois tipos de concentrações de particulados (PTS e MP_{10}) está no alcance. Observa-se um menor alcance para a série de dados do MP_{10} .

Lembrando que na análise por geoestatística para dependência temporal, espera-se que a semivariância, em média, seja crescente com o tempo até um determinado ponto, a partir do qual se estabiliza num valor denominado patamar $C_0 + C_1$, que é aproximadamente igual à variância dos dados. Essa distância recebe o nome de alcance, e representa uma distância temporal, dentro da qual os valores são tão parecidos uns com os outros que se tornam correlacionados. Quando um semivariograma apresenta um alcance menor, significa que a correlação entre um grupo de dados também é menor, ou seja, para o MP_{10} , os dados sofrem mais rapidamente a influência de alterações devido a flutuações temporais das variáveis ambientais (apresentou menor alcance).

4.7 – Tratamento dos dados experimentais através de Séries Temporais.

Para avaliar as séries de MP_{10} e PTS, quanto às componentes de tendência, sazonalidade e aleatória, foram efetuadas as decomposições das mesmas. Utilizando a metodologia clássica de decomposição descrita anteriormente, as séries foram decompostas em cada uma de suas componentes separadamente. O modelo utilizado para avaliação dos movimentos das séries foi o aditivo, o qual considera a série como sendo a soma das componentes individuais. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam as séries dos dados observados experimentalmente, respectivamente para o PTS e o MP_{10} , onde pode ser observada a presença da componente sazonal significativa com periodicidade anual.

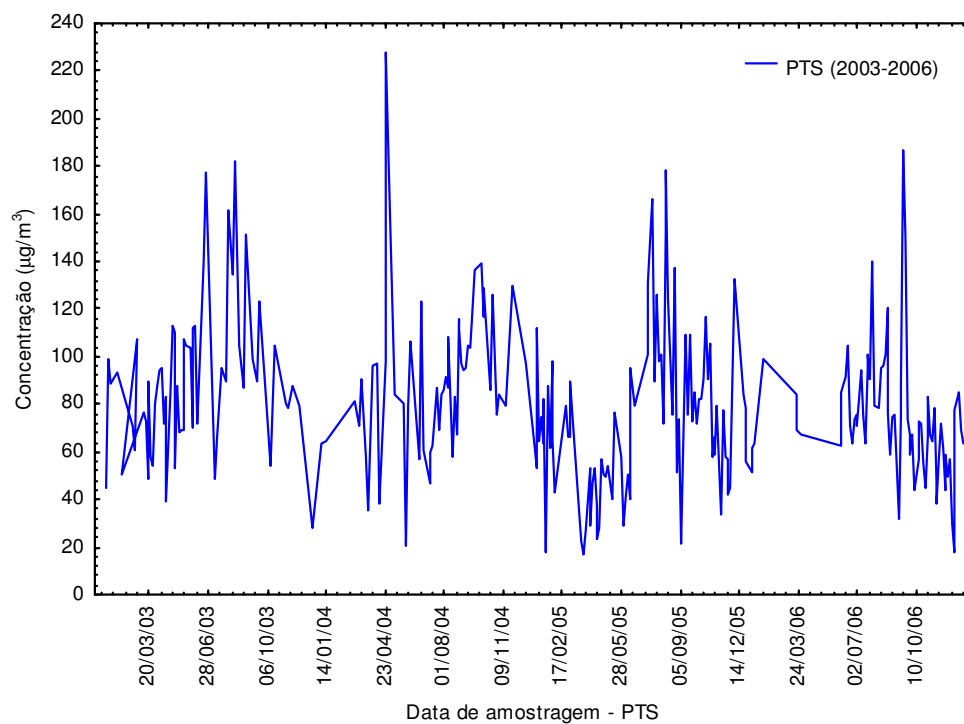


Figura 4.27 – Representação gráfica da concentração de particulados totais (PTS) no município de Uberlândia- MG nos anos de 2003 a 2006

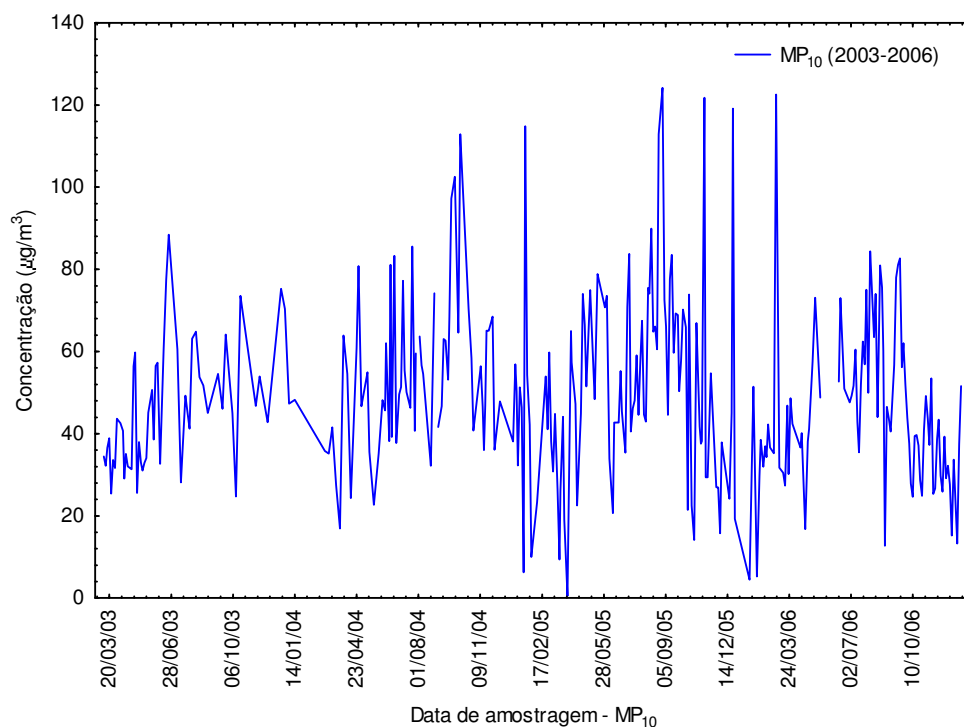


Figura 4.28 – Representação gráfica da concentração MP10 no município de Uberlândia- MG nos anos de 2003 a 2006

Após as análises dos gráficos das Figuras 4.27 e 4.28, para comprovação da existência de tendência, avaliou-se os gráficos da função autocorrelação para o PTS e MP_{10} , apresentados respectivamente nas Figuras 4.29 e 4.30.

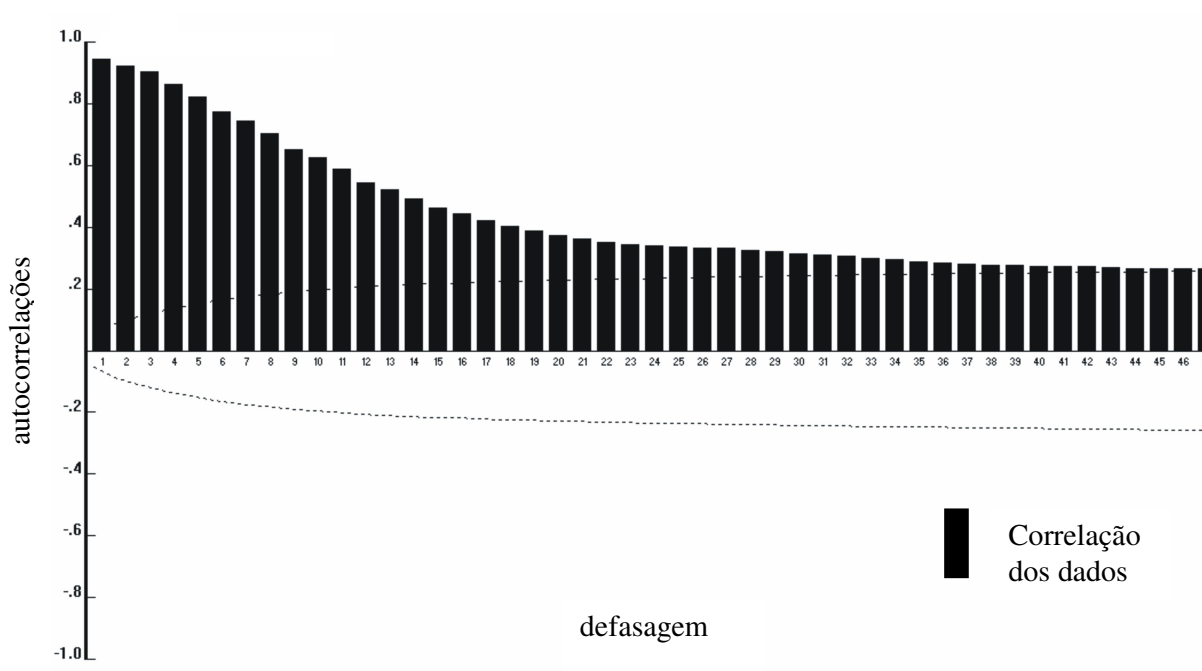


Figura 4.29 – Função autocorrelação da série original de dados do PTS.

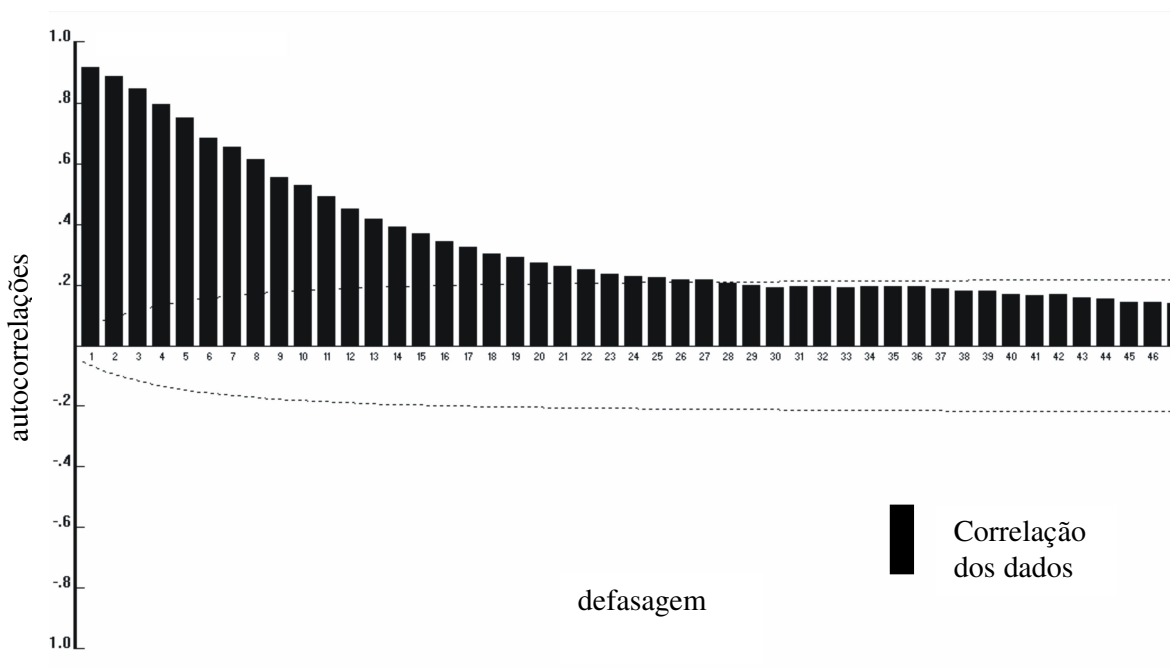


Figura 4.30 – Função autocorrelação da série original de dados do MP_{10} .

Como pode ser observado nas Figuras 4.29 e 4.30, existe um decaimento suave nas funções de auto-correlações do PTS e MP_{10} , comprovando a existência de tendência nas séries de estudadas.

Para encontrar um modelo de ajuste para os dados da série e previsão de dados futuros foram testados modelos baseados nos métodos de alisamento exponencial de Holt-Winters e também nos modelos de Box-Jenkins (MORETTIN e TOLOI, 2004).

O modelo que melhor se adequou aos dados foi o SARIMA, da estratégia de Box-Jenkins. Conforme visto no capítulo II, o modelo SARIMA é mais adequado do que o ARIMA, pois este último só pode resolver o problema da sazonalidade quando há períodos de baixa ordem. Porém, quando a sazonalidade ocorre em múltiplos períodos é necessário que se considere um componente específico de sazonalidade. Sendo assim, neste estudo foi utilizado modelo do tipo auto-regressivo integrado de médias móveis sazonal, ou seja, SARIMA (p,d,q) x (P,D,Q)^S. Onde p e P são os parâmetros autoregressivos; d e D são os parâmetros relativos as diferenciações; e q e Q são os parâmetros relativos às médias móveis.

Para o ajuste dos modelos de séries temporais, foram avaliados os coeficientes de correlação, os menores erros de previsão e os gráficos dos resíduos. Os gráficos dos resíduos das séries ajustadas estão dispostos na Figura 4.31, os resultados dos ajustes do modelo, bem como os respectivos coeficientes de correlação e os erros de previsão para as séries estudadas são apresentados a seguir:

- PTS: SARIMA (1,2,3) x (1,2,0)³⁶⁵

$$R^2 = 0,91$$

- MP_{10} : SARIMA (1,0,0) x (1,2,0)³⁶⁵

$$R^2 = 0,90$$

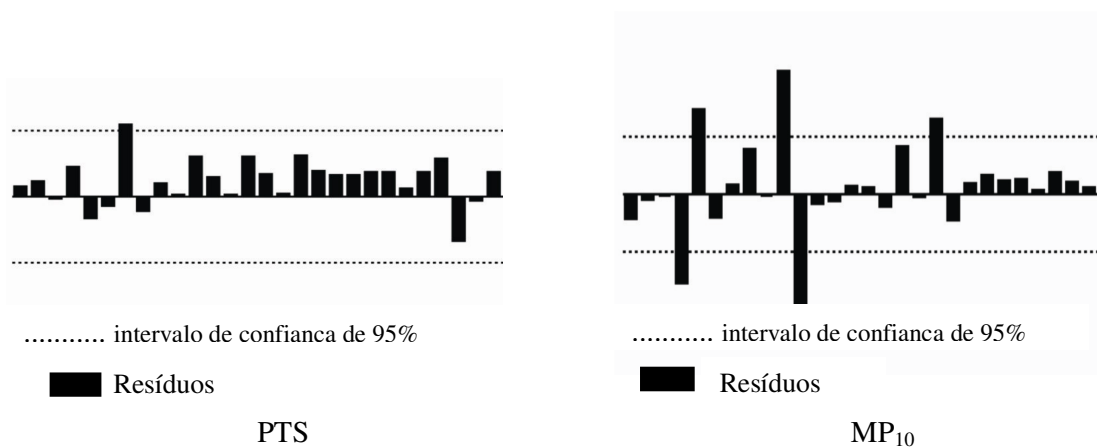


Figura 4.31 – Resíduos das séries ajustadas para o PTS e MP_{10} .

Como se pode observar na Figura 4.31, os resíduos apresentados pelas séries ajustadas, PTS e MP10, na sua maioria não ultrapassou os limites do intervalo de confiança de 95%, indicando que os resíduos não são significativos, portanto, os modelos ajustados são adequados para as séries em estudo.

Observa-se nos parâmetros ajustados do modelo SARIMA que para as duas séries (PTS e MP₁₀) a sazonalidade foi de 365 dias, ou seja, anual. Este resultado é coerente, pois as estações do ano são bem definidas, conforme discutido no item 4.5.2 (Tabela 4.9). Sendo assim o período da sazonalidade deve ser anual.

No ajuste foram realizadas duas (2) diferenciações para as componentes sazonal e não sazonal da série do PTS. Para o MP₁₀ foi necessário realizar duas (2) diferenciações apenas para a componente sazonal. As diferenciações são necessárias para eliminar os componentes de tendência (localizados na decomposição inicial) e tornar a série sem tendência. A verificação se o número de diferenciação foi suficiente para eliminar as tendências são realizadas por meio gráfico, pela constatação da *suavização* da série.

No modelo ajustado para o PTS, a suavização efetuada pela média móvel foi de ordem três (3) para a componente não sazonal e ordem zero (0) para a componente sazonal. Quanto ao alisamento influenciado pela parte auto regressiva do modelo, foi de ordem um (1) para as duas componentes, sazonal e não sazonal.

A equação que representa o modelo SARIMA, sob diferença é a seguinte:

$$(1 - \Phi_1 B^{365})(1 - \phi_1 B)\Delta^2 \Delta_{365}^2 Z_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)a_t \quad (4.1)$$

Na equação 4.1, Δ é o operador da diferença e $\Delta = (1-B)$, elevado ao número de vezes que foi aplicada a diferença. Como no modelo para o PTS o operador diferença simples foi aplicado duas vezes, tem-se que $\Delta^2 = (1-B)^2$. O operador diferença sazonal também foi aplicado duas vezes, por isso $\Delta_{365}^2 = (1-B^{365})^2$. Ainda na Equação 4.1, $\phi_1 B$ é o operador auto regressivo não sazonal, $\Phi_1 B^{365}$ é o operador auto regressivo sazonal, $\theta_1 B$, $\theta_2 B$ e $\theta_3 B$ são operadores de médias móveis, o valor 365 significa o período sazonal (S) da série, a_t representa os erros aleatórios e Z_t são as observações.

O modelo de séries temporais para o PTS, SARIMA(1,2,3)(1,2,0)³⁶⁵, com os parâmetros encontrados está representado pela Equação 4.2.

$$(1 + 0,924B^{365})(1 + 0,742B)(1 - B)^2(1 - B^{365})^2 Z_t = (1 - 0,493B - 0,710B^2 - 0,237B^3)a_t \quad (4.2)$$

No ajuste do modelo para o MP₁₀, para a suavização da série, foi necessária a realização de duas diferenciações na componente não sazonal e nenhuma na componente sazonal, indicando pouca influência da componente de tendência na avaliação da sazonalidade. Quanto à suavização por médias móveis, no caso do MP₁₀, não houve aplicação em nenhuma das componentes. Quanto ao alisamento influenciado pela parte auto regressiva do modelo, foi de ordem um (1) para as duas componentes.

A equação que representa o modelo SARIMA para o MP₁₀, é a seguinte:

$$(1 - \Phi_1 B^{365})(1 - \phi_1 B) \Delta_{365}^2 Z_t = a_t \quad (4.3)$$

Onde, $\Phi_1 B^{365}$ o operador auto regressivo sazonal, $\phi_1 B$ é o operador auto regressivo não sazonal, 365 significa o período sazonal (S) da série, $\Delta_{365}^2 = (1 - B^{365})^2$ é o operador diferença sazonal aplicado duas vezes a componente sazonal, a_t representa os erros aleatórios e Z_t são as observações.

O modelo SARIMA (1,0,0)(1,2,0)³⁶⁵ para a série de dados do MP₁₀, com os parâmetros inseridos, é apresentado através da Equação 4.4.

$$(1 + 0,989B^{365})(1 + 0,905B)(1 - B^{365})^2 Z_t = a_t \quad (4.4)$$

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam, respectivamente para PTS e MP₁₀, a série ajustada pelo modelo SARIMA para o período de 2003 a 2006, bem como os valores preditos pelo modelo e aqueles observados experimentalmente para o período de 01 de janeiro à 30 de junho de 2007.

A comparação entre as médias aritméticas dos valores observados e previstos pelo modelo, tanto para o PTS quanto para o MP₁₀, estão dispostas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Dados comparativos entre os modelos e valores observados para PTS e MP₁₀.

Comparações		Concentração Média (µg/m3)	*Erro percentual (%)
PTS	Observados	84,9	7,7
	(1,2,3)(1,2,0) ³⁶⁵	78,3	
MP ₁₀	Observados	38,6	6,5
	(1,0,0)(1,2,0) ³⁶⁵	41,4	

* erros médios.

Verifica-se através das Figuras 4.32 e 4.33 que as medidas experimentais foram relativamente próximas aos valores previstos pelos modelos, o que pode ser confirmado comparando-se as médias dos erros absolutos do período amostrado, mostrados na Tabela 4.12, que foram: 7,7% para o PTS e 6,5% para o MP₁₀.

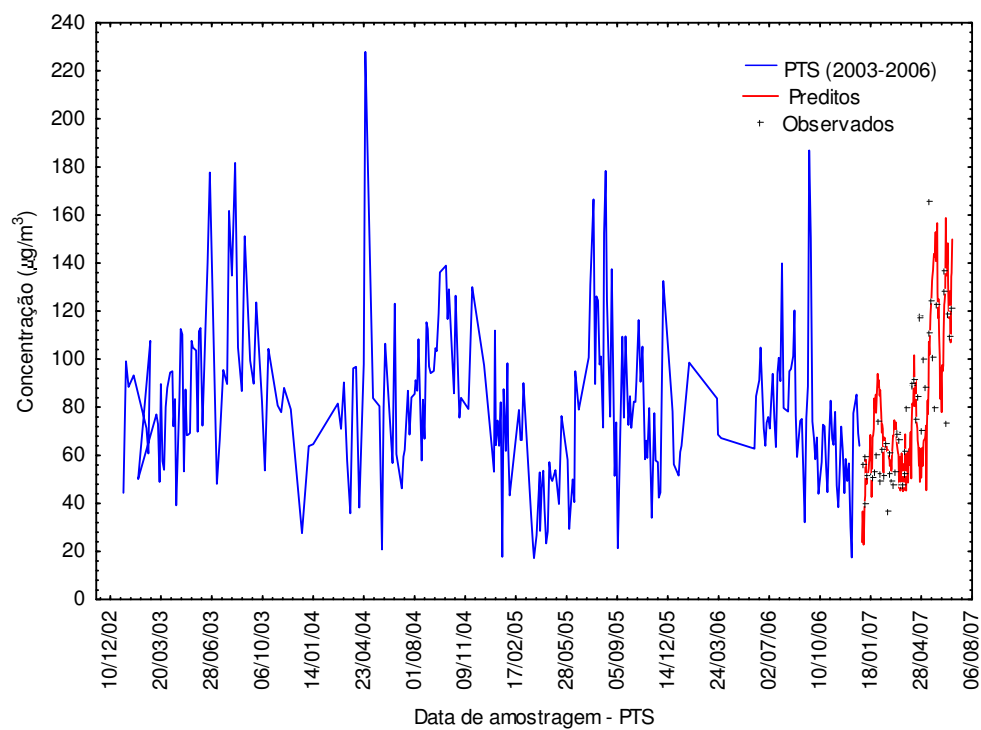


Figura 4.32 – Modelo SARIMA (1,2,3)(1,2,0) para o PTS, de janeiro a junho de 2007.

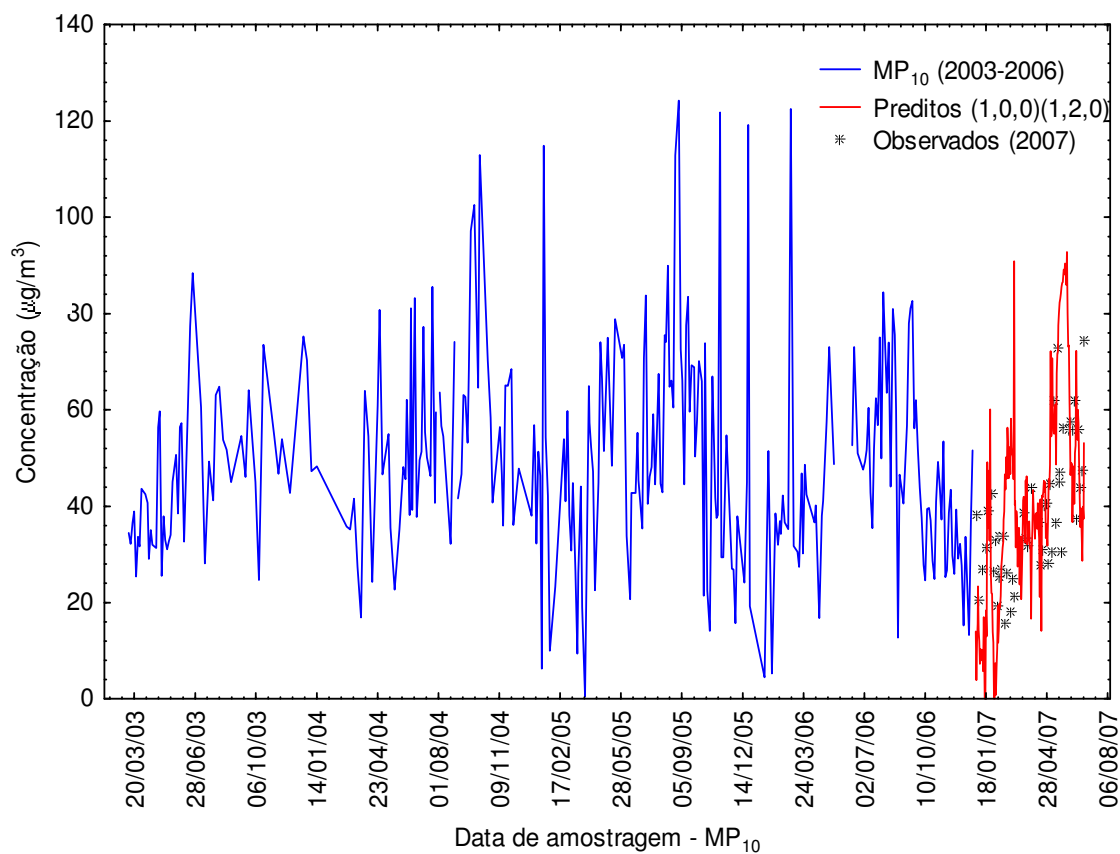


Figura 4.33 – Modelo SARIMA (1,0,0) (1,2,0) para o MP_{10} de janeiro a junho de 2007.

4.8 –Análises Multivariadas.

Após a realização da análise de concentração de material particulado nos filtros do MP₁₀, eles foram recortados e submetidos à extração nítrica. Em seguida, a amostra dissolvida foi analisada pelo equipamento plasma térmica induzido (ICP) de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo III. Foram testadas 12 variáveis (elementos químicos) neste estudo, são elas: Al, Cu, Cr, Ca, Fe, P, Mn, Pb, Ti, Zn, K e S.

4.8.1 – Resultados da Análise Estatística Descritiva Aplicada aos Dados Experimentais de Composição Química do MP₁₀.

Os resultados das análises estatísticas descritivas para as análises de composição química do MP₁₀ estão dispostos nas Tabelas 4.13 a 4.16, respectivamente para os anos de 2003 a 2006 e para o tratamento de todos os anos em conjunto, estão na Tabela 4.17.

Durante o período de 2003 a 2006, foram analisadas 117 amostras proveniente dos filtros do MP₁₀, distribuídas ao longo destes anos, com amostras em todas as estações.

Observando as Tabelas 4.13 a 4.17, verifica-se que houve uma variabilidade alta nos resultado de análises de concentração elementar, com elevados valores de desvio padrão.

Os elementos químicos que apresentaram as maiores médias de concentração foram:

2003: Al, Ca, Fe, P e S

2004: Al, Ca, Fe, Zn, K e S

2005: Al, Ca, Fe, Zn, K e S

2006: Al, Ca, Fe, Zn, K e S

Observa-se nos elementos que tiveram maior concentração em cada ano, uma tendência clara de ocorrerem maiores concentrações nos seguintes elementos: Al, Ca, Fe, Zn, K e S. Quando se realizou a análise dos quatro anos (Tabela 4.17), esta tendência foi confirmada.

Tabela 4.13 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP₁₀ de 2003.

Elemento	Amostras	C _{Média} (ng/m ³)	Int. de confiança		Mediana (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Coeficiente de variação	Desvio padrão (ng/m ³)	Assimetria	Curtose
			-95,0%	95,0%							
Al	26	832,4	648,8	1016,0	675,9	267,7	2104,4	54,6	454,6	1,1	1,0
Cu	26	14,5	5,9	23,0	0,0	0,0	72,0	146,2	21,1	1,3	0,9
Cr	26	13,1	0	30,5	0,0	0,0	199,9	331,1	43,2	3,8	15,1
Ca	26	1367,8	1132,8	1602,8	1140,8	800,6	2710,1	42,5	581,8	1,4	0,9
Fe	26	1273,6	997,8	1549,5	1116,7	493,1	3088,9	53,6	683,0	1,5	1,7
P	26	509,1	483,9	534,3	501,3	414,8	674,1	12,3	62,4	0,8	0,8
Mn	26	15,8	13,1	18,6	14,8	6,3	31,2	43,3	6,9	0,6	-0,3
Pb	26	19,0	0	58,2	0,0	0,0	494,7	509,9	97,0	5,1	26,0
Ti	26	25,3	20,5	30,1	21,2	11,2	61,8	47,4	12,0	1,4	2,1
Zn	26	117,6	87,2	148,0	106,6	25,7	398,0	63,9	75,2	2,2	7,1
K	26	414,6	269,3	560,0	469,8	0,0	1292,7	86,8	359,9	0,4	-0,3
S	26	935,9	778,3	1093,5	928,4	477,3	2089,8	41,7	390,1	1,8	3,9

Tabela 4.14 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP₁₀ de 2004.

Elemento	Amostras	C _{Média} (ng/m ³)	Int. de confiança		Mediana (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Coeficiente de variação	Desvio padrão (ng/m ³)	Assimetria	Curtose
			-95,0%	95,0%							
Al	31	3465,7	2285,4	4646,0	2385,8	237,4	14748,5	92,8	3217,8	2,0	4,0
Cu	31	35,7	0	75,8	0,0	0,0	579,7	306,6	109,4	4,5	21,8
Cr	31	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca	31	12407,8	9972,1	14843,5	13909,2	814,4	22484,9	53,5	6640,3	-0,6	-0,8
Fe	31	1260,2	943,5	1576,9	1089,2	246,5	5129,8	68,5	863,3	3,2	13,4
P	31	113,2	45,0	181,4	56,7	0,0	565,0	164,2	185,9	1,8	1,6
Mn	31	18,0	14,4	21,6	15,8	6,1	60,8	54,0	9,7	3,0	12,4
Pb	31	8,0	0	16,1	0,0	0,0	89,0	276,1	22,1	2,7	6,7
Ti	31	42,3	32,3	52,3	34,9	8,7	154,5	64,5	27,3	2,4	8,8
Zn	31	4285,7	988,7	7582,8	109,2	50,8	30143,6	209,7	8988,5	1,9	2,1
K	31	6085,7	4053,2	8118,3	4624,5	0,0	22388,2	91,1	5541,3	1,6	2,1
S	31	4746,0	3637,6	5854,4	5332,9	535,1	11232,5	63,7	3021,8	0,1	-1,0

Tabela 4.15 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP₁₀ de 2005.

Elemento	Amostras	C _{Média} (ng/m ³)	Int. de confiança		Mediana (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Coeficiente de variação	Desvio padrão (ng/m ³)	Assimetria	Curtose
			-95,0%	95,0%							
Al	30	7715,8	5413,7	10017,9	6501,1	1153,6	19946,3	79,9	6165,1	0,4	-1,4
Cu	30	119,9	40,1	199,8	36,6	0,0	764,1	178,2	213,8	2,1	3,3
Cr	30	3,1	0	8,2	0,0	0,0	72,1	436,0	13,6	4,9	24,8
Ca	30	10983,8	9966,3	12001,2	11278,8	4597,9	15632,2	24,8	2724,9	-0,6	0,5
Fe	30	1297,0	1026,9	1567,1	1101,7	366,3	3257,5	55,8	723,4	1,2	0,8
P	30	47,6	26,9	68,3	27,8	0,0	187,9	116,5	55,5	0,9	-0,2
Mn	30	22,6	18,5	26,8	19,0	8,6	57,5	49,0	11,1	1,5	2,4
Pb	30	10,7	1,2	20,1	0,0	0,0	88,6	236,6	25,2	2,2	3,4
Ti	30	38,7	29,8	47,7	32,3	12,5	125,0	62,0	24,0	2,2	5,4
Zn	30	15786,5	9812,7	21760,4	15388,7	48,8	39731,5	101,3	15998,2	0,2	-1,8
K	30	13143,9	9567,0	16720,8	11515,0	2150,6	28409,0	72,9	9579,1	0,3	-1,7
S	30	3561,3	2360,1	4762,5	1919,6	613,9	14554,9	90,3	3216,8	1,7	3,3

Tabela 4.16– Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP₁₀ de 2006.

Elemento	Amostras	C _{Média} (ng/m ³)	Int. de confiança		Mediana (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Coeficiente de variação	Desvio padrão (ng/m ³)	Assimetria	Curtose
			-95,0%	95,0%							
Al	30	10734,5	9853,2	11615,8	11022,7	1759,2	14150,7	22,0	2360,2	-1,9	6,3
Cu	30	131,5	60,2	202,8	60,2	0,0	924,0	145,2	191,0	3,0	10,2
Cr	30	1,8	0	5,4	0,0	0,0	53,3	547,7	9,7	5,5	30,0
Ca	30	8142,9	7159,9	9125,9	8802,3	623,5	10768,4	32,3	2632,5	-2,0	3,4
Fe	30	1067,8	847,1	1288,4	856,8	136,6	2718,7	55,3	590,9	1,1	0,8
P	30	71,4	51,3	91,5	83,4	0,0	152,1	75,5	53,9	-0,3	-1,4
Mn	30	17,5	14,8	20,1	15,8	2,6	33,6	40,8	7,1	0,7	0,4
Pb	30	2,1	0	6,3	0,0	0,0	62,4	547,7	11,4	5,5	30,0
Ti	30	30,1	24,7	35,5	25,5	4,3	66,2	47,8	14,4	0,9	0,4
Zn	30	20024,2	18536,4	21512,0	20934,9	3366,2	25446,0	19,9	3984,4	-2,6	10,1
K	30	23206,9	20777,5	25636,3	24976,1	1982,6	31390,2	28,0	6506,0	-2,1	5,3
S	30	1848,8	1684,0	2013,6	1817,8	318,1	3124,1	23,9	441,2	-0,5	6,1

Tabela 4.17 – Resultados da análise estatística descritiva dos filtros do MP₁₀ de 2003 à 2006.

Elemento	Amostras	C _{Média} (ng/m ³)	Int. de confiança		Mediana (ng/m ³)	Mínimo (ng/m ³)	Máximo (ng/m ³)	Coeficiente de variação	Desvio padrão (ng/m ³)	Assimetria	Curtose
			-95,0%	95,0%							
Al	117	5834,1	4867,8	6800,4	2641,6	237,4	19946,3	90,5	5277,3	0,6	-1,0
Cu	117	77,1	47,4	106,8	22,6	0,0	924,0	210,3	162,2	3,2	10,9
Cr	117	4,2	0,1	8,2	0,0	0,0	199,9	536,2	22,3	7,0	54,7
Ca	117	8495,8	7457,1	9534,4	9190,9	623,5	22484,9	66,8	5672,4	0,2	-0,8
Fe	117	1223,3	1091,2	1355,3	997,2	136,6	5129,8	58,9	721,1	2,1	7,0
P	117	173,6	135,1	212,2	79,5	0,0	674,1	121,2	210,4	1,0	-0,7
Mn	117	18,6	16,9	20,3	16,8	2,6	60,8	49,4	9,2	1,9	5,8
Pb	117	9,6	0,7	18,5	0,0	0,0	494,7	507,7	48,8	8,8	85,8
Ti	117	34,5	30,5	38,4	27,5	4,3	154,5	62,5	21,5	2,5	9,8
Zn	117	10343,9	8071,6	12616,2	163,3	25,7	39731,5	120,0	12409,4	0,7	-1,0
K	117	11025,3	9080,7	12969,9	4700,6	0,0	31390,2	96,3	10620,0	0,5	-1,5
S	117	2852,7	2361,3	3344,1	1800,1	318,1	14554,9	94,1	2683,6	1,7	2,9

4.8.2 – Resultados da Análise de Componentes Principais Aplicados aos Dados Experimentais de Composição Química do MP₁₀.

Os resultados encontrados através da análise de composição química do MP₁₀ foram tratados pela técnica de análise multivariadas com a finalidade de identificar os elementos químicos que mais influenciam na qualidade do ar, bem como, o número de componentes principais necessários para explicá-los. Inicialmente efetuou-se a análise de componentes principais para cada ano individualmente e depois com todos os anos juntos, utilizando-se para isso o *software Statistica*.

Neste estudo os dados avaliados são referentes apenas à concentração, ou seja, somente uma grandeza, portanto, utilizou-se na análise multivariada a matriz de variância e covariância para o cálculo dos componentes principais.

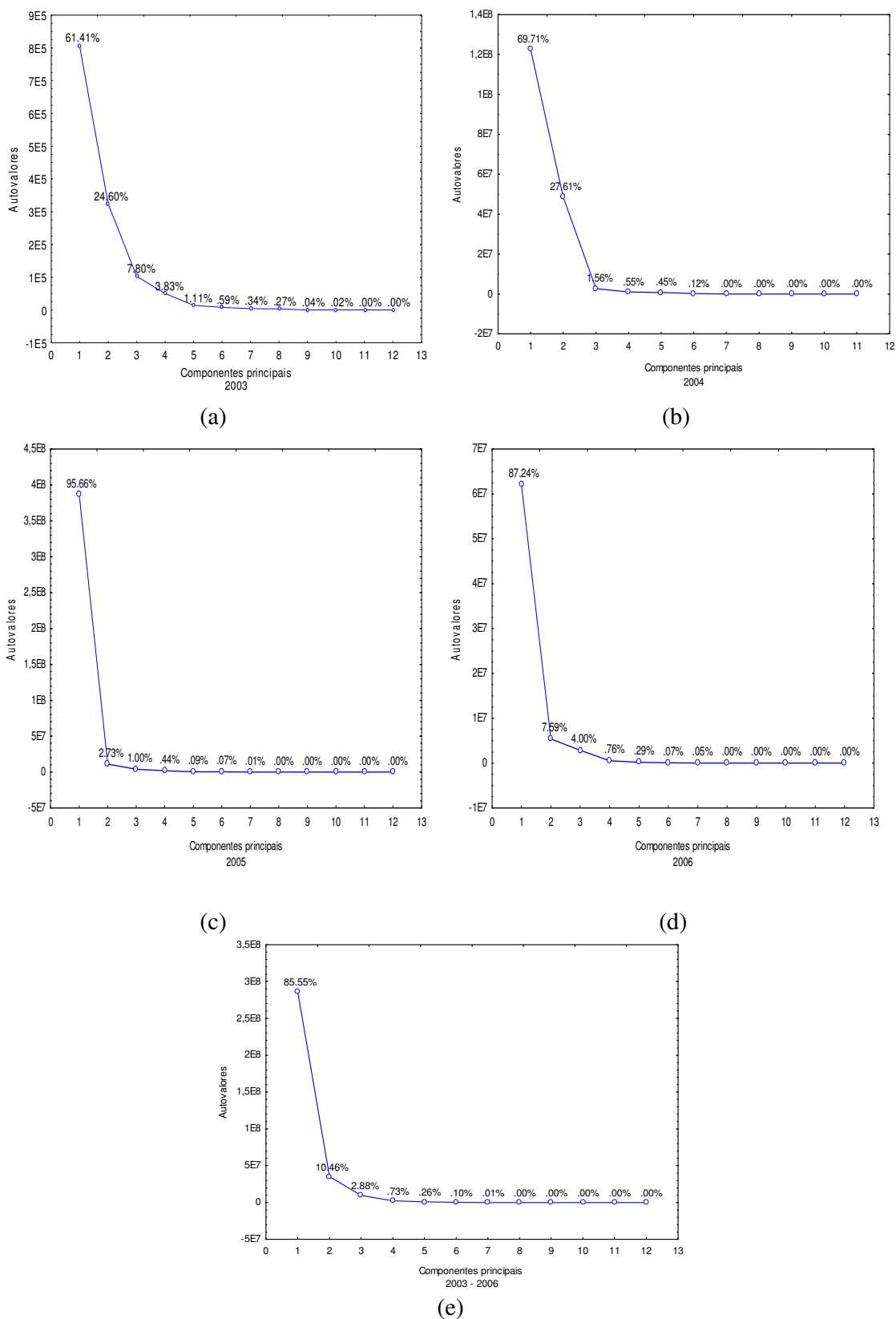
Conforme descrito no Capítulo III construiu-se uma matriz ($n \times p$), onde n são as 12 variáveis e p suas respectivas concentrações nas diversas análises dentro de cada ano. Depois, obteve-se a matriz de covariância, matriz S . Resolvendo as equações características da matriz de covariância, determinaram-se os componentes principais, os autovalores e autovetores.

Os resultados dos componentes principais para cada ano e para o todo o período de estudo são apresentados na Figura 4.34. A Tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos para quatro (4) componentes principais, bem como os respectivos acúmulos de variância.

Verifica na Tabela 4.18, que no ano de 2003, ocorreu o menor percentual de acúmulo de variância, mesmo assim para este ano, com dois componentes principais podem ser explicadas 86% da variância acumulada. Para os demais anos, a variância explicada pelos dois primeiros componentes principais anos foram sempre superiores a 94%.

Tabela 4.18– Matriz dos componentes principais de 2003 a 2006.

Ano	Variância	Componentes Principais (CP)			
		CP1	CP2	CP3	CP4
2003	% variância	61,41	24,60	7,80	3,83
	% acumulada	61,41	86,01	93,81	97,64
2004	% variância	69,71	27,61	1,56	0,55
	% acumulada	69,71	97,32	98,89	99,43
2005	% variância	95,66	2,73	1,00	0,44
	% acumulada	95,66	98,39	99,39	99,83
2006	% variância	87,24	7,59	4,00	0,76
	% acumulada	87,24	94,83	98,83	99,59
2003 a 2006	% variância	85,55	10,46	2,88	0,73
	% acumulada	85,55	96,01	98,89	99,62



Os valores percentuais destacados nos gráficos representam os componentes principais (CP1, CP2,...CP12).

Figura 4.34 – Porcentagem de contribuição dos componentes principais nas series estudadas: 2003(a); 2004 (b); 2005 (c); 2006 (d) e de 2003 a 2006 (e).

A Figura 4.35 apresenta a composição química dos dois componentes principais (CP1 e CP2) para os anos de 2003 a 2006. Observam-se nesta Figura que os elementos destacados anteriormente na estatística descritiva foram aqueles que estiveram em maior concentração nos dois componentes principais, são eles: Al, Ca, Fe, Zn, K e S.

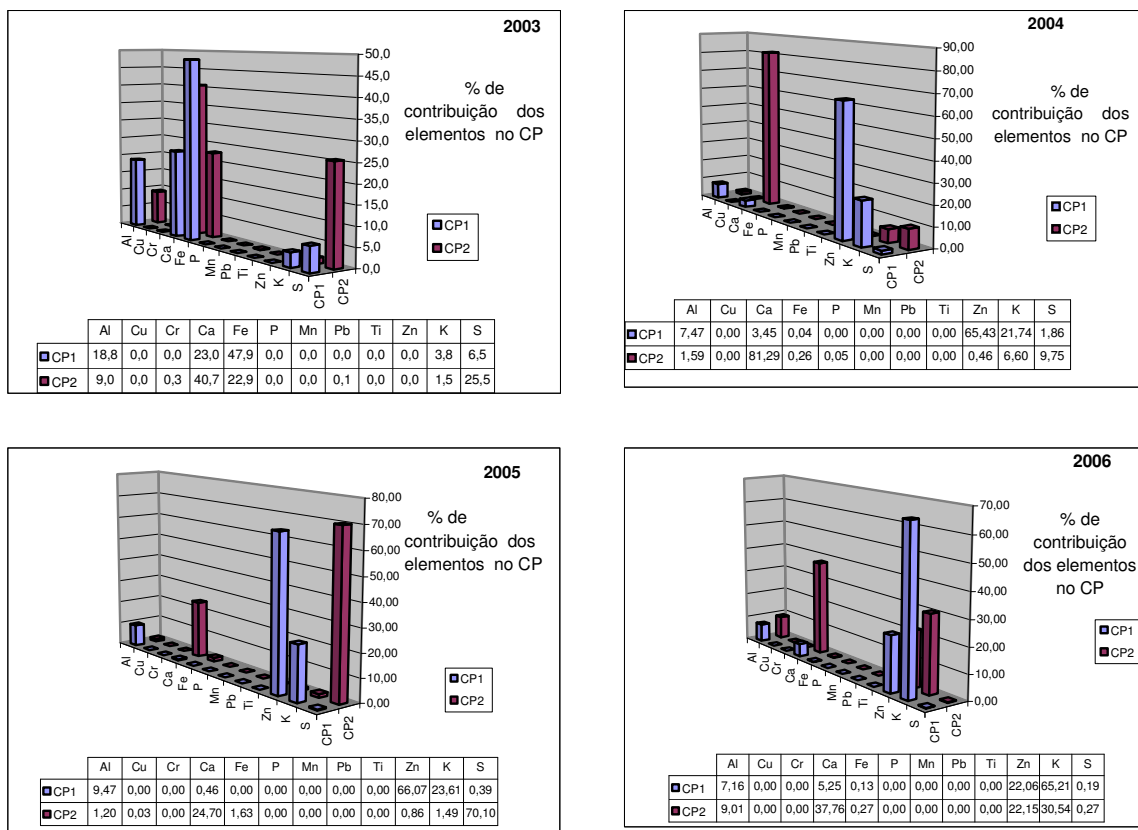


Figura 4.35 – Composição química dos dois componentes principais para os quatro anos do estudo.

A presença dos elementos químicos K, Al, Ca e Fe, nos resultados de componentes principais nos anos avaliados pode estar associada à ressuspensão do solo, como já havia sido relatado em outros estudos. O Elemento enxofre (S) encontrado, pode ser associado à queima de combustíveis fósseis, comum na região estudada. O elemento Zn pode estar associado à fontes industriais (discutir).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Por meio dos resultados obtidos neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A temperatura do ar da cidade de Uberlândia apresenta uma tendência sazonal, atingindo valores menores no inverno e maiores na primavera (nos meses que antecedem as chuvas).

- O ano que apresentou a menor média de umidade relativa do ar foi 2004 (65,40%) e a maior em 2005 (68,27%). No período analisado, o valor mínimo de umidade relativa do ar foi de 26,33% e o máximo 97%, ambos obtidos no mesmo ano (2004). Os menores níveis de umidade relativa, nos anos analisados, foram obtidos na primavera e no inverno.

- Durante o período de estudo, a precipitação (índice pluviométrico) variou entre 0 e 99,4 mm, tendo como maior valor médio 5,73mm, observado em 2006. No inverno e no início da primavera a precipitação foi praticamente nula. Os maiores índices pluviométricos ocorreram no verão e em alguns casos também no final da primavera (no início do período chuvoso).

- As partículas suspensas provenientes do setor industrial podem ser facilmente arrastadas para o centro da cidade, em função da localização deste setor e da predominância das direções dos ventos. As direções predominantes dos ventos no período de 2003 a 2006 foram a Nordeste (NE) e a **ler-nordeste** (ENE).

- O padrão secundário diário ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estabelecido pela Resolução do CONAMA 003/90, para o PTS, foi ultrapassado em todos os anos deste estudo. Sendo que em 2003 foi ultrapassado quatro vezes, em 2004 duas vezes, três vezes em 2005 e 2006. A Resolução do CONAMA recomenda que o padrão secundário não deve ser ultrapassado mais do que uma vez ao ano. As ocorrências acima do padrão foram observadas nas estações de climas mais secos.

- O padrão primário da Resolução do CONAMA 003/90 ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PTS), foi ultrapassado uma vez atingindo o valor de $514 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no ano de 2004.

- O limite de concentração de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para os padrões primário e secundário, estabelecido pela Resolução do CONAMA 003/90, para as partículas respiráveis (MP_{10}) foi ultrapassado por duas vezes no ano de 2004.

- Utilizando o teste de hipótese para o PTS observou-se que as concentrações médias de 2003 e 2004 foram estatisticamente iguais, porém, superiores aos demais anos do estudo

Já para o MP_{10} , as concentrações médias dos anos de 2004 e 2005 foram estatisticamente equivalentes e maiores do que as de 2003 e 2006.

- Os resultados dos testes de hipóteses aplicados às estações do ano mostraram que as estações estão bem definidas. Ocorreram diferenças significativas entre as médias de concentração para o PTS e MP_{10} , na grande maioria dos pares analisados, mostrando que para cada estação do ano tem-se um nível específico de concentração de particulados.

- A análise por geoestatística mostrou que ocorreram diferentes faixas de alcance nos dois tipos de concentrações de particulados (PTS e MP_{10}). Observou-se um menor alcance para a série de dados do MP_{10} . Ou seja para o MP_{10} , os dados sofrem mais rapidamente (menor alcance) a influência de alterações devido a flutuações temporais das variáveis ambientais

- Os patamares dos semivariogramas mostraram-se bem definidos em todos os anos. Para o PTS e MP_{10} , o ano que apresentou maior patamar foi o de 2005, isto significa que no referido ano, houve a maior variabilidade dos dados amostrais. Isso explica os baixos valores de dependência temporal (alcance) para o ano de 2005.

- No tratamento dos dados do PTS e do MP_{10} por séries temporais, verificou-se a existência das componentes de tendência, sazonalidade e aleatórias. O modelo que melhor se adequou aos dados experimentais foi do tipo auto-regressivo integrado de médias móveis sazonal, ou seja, o SARIMA (p,d,q) x (P,D,Q)^S. Os parâmetros deste modelo foram ajustados aos dados experimentais do PTS e do MP_{10} .

- A previsão pelo modelo ajustado de séries temporais, quando comparados com os dados experimentais obtidos no primeiro semestre de 2007, mostraram boa concordância. As médias dos desvios absolutos entre as observações e os valores preditos foram 7,7% para o PTS e 6,5% para o MP_{10} .

- No estudo da composição elementar dos filtros do MP_{10} , os elementos químicos que apresentaram resultados mais significativos foram: Al, Ca, Fe, Zn, K e S. A técnica de análises multivariadas aplicada a estes dados mostrou que no mínimo 86% da variância acumulada foi explicada por dois componentes principais. A presença dos elementos químicos K, Al, Ca e Fe, pode estar associada a ressuspensão do solo e o elemento S pode ser relacionado à queima de combustíveis fósseis, comum na região estudada.

Sugestões para futuros trabalhos

- Continuar realizando o monitoramento do material particulado para o PTS, MP₁₀ e MP_{2,5}, tendo em vista o expressivo crescimento sócio-econômico da cidade e principalmente devido ao enorme crescimento das usinas de açúcar e álcool na região.
- Realizar análises de difração de raio x por energia dispersiva nos filtros do MP_{2,5} para comparar com os resultados deste trabalho.
- Realizar tratamento utilizando séries temporais e análise multivariadas, inserindo os dados climatológicos e os resultados de concentração, subseqüentes a este estudo.
- Elaborar inventário das fontes de poluição da cidade de Uberlândia, estudando correlações entre a composição química do material particulado e as fontes de poluição.
- Inserir novas análises nos filtros amostrados: compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs).
- Realizar biomonitoramento do ar atmosférico.
- Utilizar outras técnicas de análise e previsão dos dados de concentração de material particulado, tais como redes neurais.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACGIH, American Conference of Governamental Industrial Higienists. 1989.
- ALMEIDA, I.T., A Poluição Atmosférica por Material Particulado a Céu Aberto. São Paulo, 1999. (Dissertação de Mestrado) 194p.
- AMORIM, W. B., Monitoramento da Concentração e caracterização de Material Particulado Suspenso na Atmosfera. Campinas, SP. 2004 (Tese, Doutorado) 165 p.
- ANDRADE, M. F. Propriedade da Matéria Particulada Inalável do Aerosol Atmosférico de São Paulo. USP/IF, 1986, (Dissertação, Mestrado).
- ARTES, R., Aspectos estatísticos da análise factorial de escalas de avaliação. Revista de psiquiatria clinica, São Paulo, V25, n5, 1998, p 223-228.
- BAIRD, C., Química Ambiental, 2ª edição, Porto Alegre, Bookman, 2002.
- BRUNO R. L., Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos – SP: quantificação e identificação de fontes. São UFSCar - Carlos/SP. 2005, (Tese,Doutorado) 187p.
- BRUNO R.L.; POZZA, S.A.; SANTOS, F.M.; TREVISAN, J.E.; TAZINASSI, M.G.; GONÇALVES, J.A.S.; COURY, J.R., Perfis de fontes poluidoras obtidos na cidade de São Carlos, S.P., Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – XXXI ENEMP, Uberlândia, CD-ROM, 2004.
- CARDOSO et al, Temas em métodos quantitativos, Lisboa, Edições Silabo, 2004, 274p.
- CELLI, C. E.; COURY, J. R.; AGUIAR, M. L.; MACHADO, A. P. G.; MARQUES, K. A.; MANOSSO, F. G.; MÜLLER, E. B.; CARVALHO, W. M. Monitoramento e Caracterização do Material Particulado Suspenso na Atmosfera de São Carlos – SP. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP) Vol. 2, 1998.
- CELLI, C. E. Monitoramento do Material Particulado Respirável Suspenso na Atmosfera no Centro da Cidade de São Carlos. SP. UFSCar/DEQ, 1999. (Dissertação, mestrado) 122p.
- CETESB, Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 1999. São Paulo. CETESB 2000, 63 p.
- CETESB, Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2000. São Paulo. CETESB 2001, 120 p.
- CETESB, Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2004. São Paulo. CETESB 2005, 128p. Disponível na internet: <http://www.cetesb.sp.gov.br>.

- CETESB, Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2005. São Paulo. CETESB 2006, 140p. Disponível na internet: <http://www.cetesb.sp.gov.br>.
- CETESB, Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo, 2006. São Paulo. CETESB 2007, 167p. Disponível na internet: <http://www.cetesb.sp.gov.br>.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº. 03 de 28/06/90. s.n.t.
- COURY, J.R.; MARQUES, K.A.; MANOSSO, F.G.; MACHADO, A.P.G.; AGUIAR, M.L., Monitoramento e análise da carga de material particulado no ar atmosférico no município de São Carlos, XXV ENEMP, v.1, 1997, pag. 164-171.
- DERISIO, J. C. Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. São Paulo, CETESB. 1992.
- EHLERS, R. S., Análise de séries temporais. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: www.est.ufpr.br/~ehlers , 2005, 53 p.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, 2006. Disponível na internet em <http://www.embrapa.br>
- ENERGÉTICA Ind. e Com. Ltda. , Rio de Janeiro. PTS com Registrador de Vazão - Dicotômico MP10/2,5. Rio de Janeiro, 2006. Disponível na internet em <http://www.energetica.ind.br>
- FERRAZ, M. I. F. Uso de modelos de séries temporais na previsão de precipitações pluviiais mensais no município de Lavras MG. Lavras. UFLA, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999, (Dissertação, Mestrado) 97p.
- FERREIRA, D.F., Análise Multivariada, apostila, UFLA, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Lavras MG., 1996, 368p.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+. Geoestatistics for the Environmental Sciences. Plainwell, Gamma Design Software, 2004.
- GINÉ, M.F. Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente, série didática, vol. 3 CENA/USP, Piracicaba, 1998.
- GOTWAY, C.A.; R.B. FERGUSON; G.W. HERGERT; T.A. PETERSON. Comparisons of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters, Soil Science Society of America Journal. 60:1237–1247, 1996.
- GRASEBY/GMW. Operator's and Instruction Manual: High Volume PM₁₀ Sampler.; Village of Cleves. Graseby/GMW, julho 1988, 99p.
- GUIMARÃES, E. C. , Geoestatística básica e aplicada. Uberlândia, Notas de aula, Faculdade de Matemática da Universidade Federal de Uberlândia, 2005, 77 p., Disponível na internet <http://www.famat.ufu.br/prof/ednaldo/ednaldo.htm>.
- HINDS, W. C. Aerosol Technology, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- HOPKE, P.K.; XIE, Y.; RAUNEMAA, T.; BIEGALSKI, S.; LANDSBERGER, S.; MAENHAUT, W.; ARTAXO, P.; COHEN, D. Characterization of the Gent Stacked Filter Unit PM10 Sampler. Aerosol Science and Technology. v:27 n.6, dezembro 1997, p. 726-735,

- INNOCENTINI, M.D.M., Estudo do desempenho de três monitores de aerossóis na faixa respirável, UFSCar/DEQ, 1993, (Dissertação, Mestrado), 128p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, 2007. Disponível na internet <http://www.ibge.gov.br>.
- KASSOUF, A.L., Previsões de preços na pecuária de corte do estado de São Paulo. Piracicaba, ESALQ/USP, 1988 (Dissertação, Mestrado).
- KIKUO, O., Trace Analysis of Atmospheric Samples. Tokyo, Japão, 1977.
- LIDÉN, G. Performance parameters for assessing the acceptability of aerosol sampling equipment. Analyst, v 119, 1994.
- LIPFERT F.W.; WYZGA, R.E. Air Pollution and Mortality: The Implications of Uncertainties in Regression Modeling and Exposure Measurement. Journal of the Air and Waste Management Association. v:47 n.4, 1997, p. 517-523.
- LORA, S. E. E.; Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte. 2ª ed.- Rio de Janeiro, Interciência, 2002, 481p.
- MANAHAN, S. E. “Environmental Chemistry” 6th ed., CRC Press, USA, 1994.
- MARK, D. BOOKER, D. R. GRIFFITHS, W. D., LYONS, C. P. UPTON, S. L. Aerosol Sampling Guidelines. Aerosol Science Centre, AEA Technology, Harwell, Oxfordshire, UK, 1998.
- MARQUES, K. A. Caracterização do material particulado suspenso na atmosfera da cidade de São Carlos (SP). São Carlos, UFSCar/SP, 2000. (Dissertação, Mestrado) 168p.
- MAZZEI, J. A.; POSSE, C.A.R.; GENE, R.J Mortalidad por asma em la Argentina. Por que es tan alta?. Medicina V. 48 Argentina, 1989.
- MILANO, M.; DALCIN, E., Arborização de vias públicas. Rio de Janeiro, Ligth, 2000. 226 p.
- MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W. O., Estatística básica. Saraiva, São Paulo, 5. ed. 2002. 526p.
- MORETTIN P. A.; TOLOI, C. M. C. Análise de séries temporais. São Paulo, Edgard Blucher, 2004, 535 p.
- MORGANO, M. A.; QUEIROZ, NASCIMENTO S. C.; FERREIRA.; CASTRO, M. M.. Determinação dos teores de minerais em sucos de frutas por espectrometria de emissão óptica em plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Ciência Tecnologia Alimentos, Campinas, v. 19, n. 3, 1999.
- PRADO, P. I.; Lewinsohn, T. M.; Carmo, R.L.; Hogan, D.J., Ordenação multivariada na ecologia e seu uso em ciências ambientais. Ambiente e Sociedade, Campinas, SP: v.10, 2002, p. 69-83.
- SÁFADI, T., Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de furnas. Ciências e agrotecnologia. Lavras, v. 28, n.1, 2004. p.142-148.
- SALDIVA, P.H. Poluição atmosférica e saúde: uma abordagem experimental. Greenpeace. São Paulo, 2002, 19p.

- SALDIVA, P.H. Poluição do ar e saúde Humana. Disponível em, <http://ambiente.sp.gov.br/EA/adm/admarqs/PauloSaldiva.pdef>>. Acesso em : 13 junho, 2007.
- SANTOS, A. M. A., O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho, Fundacentro, S.P. ,2001. 96p.
- SEINFELD E PANDIS. S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate changes. New York, John Wiley e Sons, 1998, 1326p.
- SILVA, M.E.; ASSUNÇÃO, W.L., O clima na cidade de Uberlândia M.G., Sociedade e Natureza, v. 16, 2004, p. 91-107.
- SILVA, M.G., Análise da qualidade do ar com base no fluxo de veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia M.G. FACIF/UFU, 2007, (Dissertação, Mestrado). 99p.
- STEVENSON, W.J., Estatística aplicada à administração. São Paulo, Harbra, 1981, 498p.
- TÁPIA, M.; MAURO, R.; JORGE, M.B., Aplicação de redes neurais diretas na previsão de preços de ovos, Congresso e mostra de agroinformática, Ponta Grossa Pr., 2000.
- VANDAELE, W., Applied time series and Box-Jenkins Models. Academic Press, 1983, 417 p.
- VEDAL, S. Ambient Particles and Health: Lines That Divide. Journal of the Air and Waste Management Association. v:47 n. 5, 1997, p. 551-581.
- VICENT J. H.; Mark, D. Entry characteristics of practical workplace aerosol samplers in relation to the ISO recommendations. Ann. Occup. Hyg. V. 34, 1990;
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J. L.; NIELSON, D. R.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties, Hilgardia. 31, 1983, 75 p.
- WILLEKE, K.; BARON, P. A. Aerosol Measurement: Principles Technics and Application, New York. Van Nostrand Reinold, 1993, 876p.

ANEXO I

Um Estudo Sobre a Qualidade do Ar Atmosférico da Cidade de Uberlândia-MG

UM ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO DA CIDADE DE UBERLÂNDIA-MG

E. A. Barbosa¹, R. M. Rodrigues¹, S. M. Andrade¹,
E. A. L. Pereira², J. J. R. Damasceno², M. A. S. Barrozo².

Faculdade de Engenharia Química – FEQUI – UFU, Bloco K, Campus Santa Mônica,
38400-902 Uberlândia-MG -email: masbarrozo@ufu.br

RESUMO – Uberlândia é a cidade mais populosa do triângulo mineiro, com mais de meio milhão de habitantes e com intensa movimentação industrial. Diante disso, foi realizado um estudo sobre a qualidade do ar atmosférico nessa cidade em termos de MP_{Total} durante a estação de inverno, a mais crítica das estações do ano devido a ausência de chuvas e ao período de safra na região, quando se verifica a ocorrência das maiores concentrações de material particulado total em suspensão no ar atmosférico. As medidas de material particulado presente na atmosfera, podem ser divididas em dois grupos principais: MP_{10} , ou seja a quantificação das partículas com diâmetro aerodinâmico menor que $11,6 \mu m$ e o MP_{Total} que é a concentração das partículas menores que $100 \mu m$. O equipamento utilizado na coleta dos dados experimentais foi um amostrador de grandes volumes (“Hi-Vol”). O número de pontos de coleta foi estabelecido de acordo com uma norma da “Environmental Protection Agency”(EPA). Os resultados obtidos durante o inverno mostraram que a concentração de MP_{Total} em suspensão no ar atmosférico da cidade de Uberlândia encontra-se, de acordo com a classificação da EPA, em níveis regulares no centro e no setor industrial da cidade.

INTRODUÇÃO

A cidade de Uberlândia-MG experimentou uma expressiva industrialização nas últimas décadas, motivada principalmente pela sua privilegiada posição geográfica, o que ocasionou um grande aumento populacional, como pode ser visto na Figura 1 a seguir.

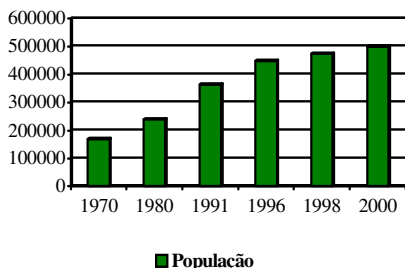


Figura 1: Crescimento populacional de Uberlândia nas últimas décadas

O crescimento da cidade, sob alguns parâmetros de forma desordenada, pode causar alguns problemas na qualidade de vida da

população. Um dos pontos preocupantes é a qualidade do ar. Diante de tal fato, o objetivo deste trabalho foi o estudo da qualidade do ar nessa cidade no período do inverno, tendo em vista a concentração de particulados.

O inverno é a estação mais crítica do ano, devido à falta de chuvas e por coincidir com o período de safra na região, fato que faz com que se atinja as maiores concentrações de material particulado total em suspensão no ar atmosférico.

Há dois tipos principais de medidas de material particulado, o MP_{Total} que engloba partículas com diâmetro aerodinâmico menor que $100 \mu m$ e o MP_{10} com partículas menores que $10 \mu m$ (Coury, 1997).

Sabe-se que partículas com diâmetros aerodinâmicos maiores que $10 \mu m$ ficam retidas no nariz, faringe, laringe e traquéia. Porém partículas menores podem alcançar o pulmão e sedimentar nos alvéolos e na região traqueobronquial (Hinds, 1982). Partículas menores que $5 \mu m$ e maiores que $0,5 \mu m$ podem se depositar no saco alveolar e provocar fibrose (Robins, 1975).

1 – alunos de IC; 2 – Orientadores.

No Brasil, a resolução CONAMA 003/90 é a lei que estabelece os limites dos padrões primário e secundário de 240 e 150 μg de pó/ m^3 de ar, respectivamente, para amostras de 24 horas. Esses padrões não devem ser excedidos mais de uma vez ao ano. Concentrações de material particulado total em suspensão acima do padrão primário podem ocasionar danos à saúde da população. Já concentrações abaixo do padrão secundário ocasionam o mínimo dano ao meio ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento utilizado na coleta dos dados experimentais foi um amostrador de grandes volumes (“Hi-Vol”), o qual consta de um motoaspirador, um porta filtro, um transdutor de pressão para o cálculo da vazão amostrada e um painel contendo um variador de voltagem para controlar a vazão de ar durante a amostragem, um horômetro para marcar o tempo de amostragem, e um timer para ligar e desligar o equipamento pelo período definido pelo operador do mesmo. O equipamento conta ainda com um kit de calibração que permite calibrar o equipamento toda vez que o mesmo é mudado de lugar ou a cada 400 horas de funcionamento. Esse kit é fornecido e calibrado anualmente pela própria fábrica do equipamento. As amostragens são feitas em períodos de 24 horas, de acordo com as normas estabelecidas pela ABNT. A Figura 2 mostra o equipamento.



Figura 2: Amostrador de grandes volumes (“Hi-Vol”)

O número de pontos de coleta foi estabelecido de acordo com a norma da agência americana “Environmental Protection

Agency” (EPA) (Derísio, 1992). Essa norma estabelece que o número de pontos de coleta é dado por $N=4+0,6.10^{-6}H$, onde H é o número de habitantes.

Assim, para cidade de Uberlândia, com $H=500000$ habitantes, o número de pontos de coletas encontrado foi igual a 5. Estes pontos foram distribuídos da seguinte forma: um no centro da cidade, um no campus da UFU, dois no setor industrial e um na zona rural, servindo como branco.

Os dados meteorológicos foram obtidos junto à estação climatológica da UFU, gentilmente fornecidos pelo departamento de geografia.

No tratamento dos dados, o ar de Uberlândia foi classificado de acordo com o índice de qualidade do ar desenvolvido pela EPA. O índice é calculado de acordo com gráfico da Figura 3 a seguir e a classificação do ar feita de acordo com a Tabela 1.

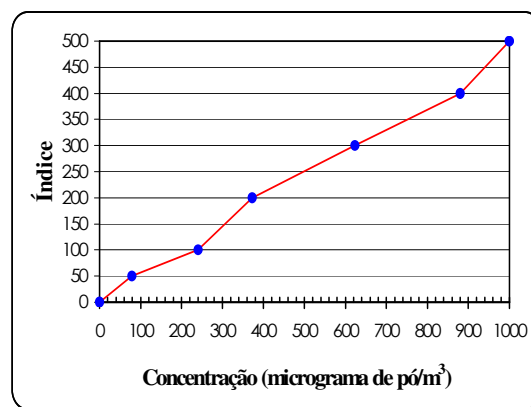


Figura 3: Índices qualidade do ar e concentração de pó

Tabela 1: Índices de qualidade do ar

Índice	Qualidade do ar
0 → 50	Boa
51 → 100	Regular
101 → 199	Inadequada
200 → 299	Má
300 → 399	Péssima
400	Crítica

Os resultados foram comparados através de um quadro de Análise de variância (ANOVA), sendo realizados testes de hipóteses com comparação de mais de 2 tratamentos usando o teste F para verificar a influência local da medida. Também foi feito um teste de hipóteses para analisar a diferença

entre duas médias usando o teste t de Student (Box, 1978).

RESULTADOS

Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos referentes ao período de inverno podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Dados meteorológicos de Uberlândia no inverno de 2001

Temperatura média (°C)	21,3
Umidade Relativa (%)	56,0
Temperatura máxima absoluta (°C)	30,4
Temperatura mínima absoluta (°C)	12,6
Umidade relativa máxima absoluta (%)	89,0
Umidade relativa mínima absoluta (%)	28,0
Número de dias de chuva	0

Dados experimentais

Os resultados experimentais obtidos durante o período de inverno na cidade de Uberlândia-MG encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados experimentais de concentração de partículas durante o inverno em Uberlândia-MG em μg de $\text{pó}/\text{m}^3$ de ar.

Concentração (μg de $\text{pó}/\text{m}^3$ de ar)				
Zona Rural (ZR)	UFU (U)	Setor Ind 1 (SI1)	Setor Ind. 2 (SI2)	Centro (C)
22,90	96,17	166,50	81,99	60,42
13,19	74,42	167,90	78,01	66,77
58,78	81,64	91,64	91,98	79,53
43,29	51,03	57,73	141,45	102,92
39,11	98,32	55,37	228,40	150,04
	90,88		162,26	
	60,26			
	62,72			
	62,98			
Intervalo de confiança (95 %)				
35,6 $\pm$ 22,14	75,38 $\pm$ 13,24	107,9 $\pm$ 69,62	130,68 $\pm$ 61,74	91,94 $\pm$ 45,1

Os resultados da Tabela 3 mostraram duas extrapolações do padrão secundário no setor industrial 2 e duas no setor industrial 1, sendo uma delas registrada em dia de queimada próximo ao local de coleta. Foi observado que o centro da cidade também registrou uma concentração acima do padrão secundário. Os demais pontos obtiveram concentrações abaixo daquelas estabelecidas por lei.

Classificação do ar de Uberlândia:

A Tabela 4 mostra a classificação do ar atmosférico de Uberlândia de acordo com o índice de qualidade do ar, tendo em vista o intervalo de confiança dos resultados obtidos nos diversos locais de medida.

Tabela 4: Qualidade do ar de Uberlândia-MG

Ponto	Qualidade
Zona Rural	Boa
UFU	Boa-Regular
Centro	Regular
Setor Industrial 1	Regular
Setor Industrial 2	Regular

Os resultados da Tabela 4 mostram que segundo a classificação da EPA, o índice de qualidade do ar na região urbana da cidade encontra-se em níveis regulares.

Testes de hipóteses com comparação de mais de dois tratamentos:

Para avaliar a influencia do local de medida, foi usado o quadro de ANOVA e as seguintes hipóteses estatísticas:

$$H_1 \dots \eta_{RURAL} \neq \eta_{UFU} \neq \eta_{SI-1} \neq \eta_{SI-2} \neq \eta_{CENTRO}$$

$$H_0 \dots \eta_{RURAL} = \eta_{UFU} = \eta_{SI-1} = \eta_{SI-2} = \eta_{CENTRO}$$

onde, H_1 é a hipótese alternativa, que seria o que desejaríamos verificar, ou seja se existe diferença entre os resultados nos diversos locais de medida. A hipótese H_0 é a hipótese de nulidade, é a negação deste fato, ou seja independente do local os resultados são iguais. Os resultados foram tratados com o auxílio do software estatística 5.0 e podem ser

vistos através da Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Quadro de ANOVA para comparação de todos os locais simultaneamente.

	Efeito	Resíduo
Soma dos Quadrados	25346,72	44836,89
GL	3	29
Quadrado Médio	8448,91	1546,10
F	5,46	
Nível de significância p	0,004	

O tratamento estatístico dos resultados mostram, com erro menor que 1%, que existe diferença significativa nas concentrações de material particulado entre as regiões estudadas (pode-se rejeitar H_0). Partindo desta constatação, o próximo passo foi a comparação dois a dois dos resultados obtidos nos locais de medida, que será apresentado a seguir.

Testes de hipóteses para comparação de duas médias usando teste t de Student:

Esse teste visa comparar as médias de cada região. Foi realizado um teste unicaudal, com o objetivo de verificar se o resultado de um local é significativamente maior que o de outro local (H_1). Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Resultados da comparação de duas médias usando teste t de Student.

H_1	H_0	Nível de significância	Rejeição H_0
$\eta_U > \eta_{ZR}$	$\eta_U \leq \eta_{ZR}$	0,0007	Sim
$\eta_C > \eta_{ZR}$	$\eta_C \leq \eta_{ZR}$	0,0071	Sim
$\eta_{SI1} > \eta_{ZR}$	$\eta_{SI1} \leq \eta_{ZR}$	0,0125	Sim
$\eta_{SI2} > \eta_{ZR}$	$\eta_{SI2} \leq \eta_{ZR}$	0,0036	Sim
$\eta_C > \eta_U$	$\eta_C \leq \eta_U$	0,1312	Não
$\eta_{SI1} > \eta_U$	$\eta_{SI1} \leq \eta_U$	0,0620	Não
$\eta_{SI2} > \eta_U$	$\eta_{SI2} \leq \eta_U$	0,0092	Sim
$\eta_{SI1} > \eta_C$	$\eta_{SI1} \leq \eta_C$	0,3037	Não
$\eta_{SI2} > \eta_C$	$\eta_{SI2} \leq \eta_C$	0,1197	Não
$\eta_{SI2} > \eta_{SI1}$	$\eta_{SI2} \leq \eta_{SI1}$	0,2650	Não

Os resultados da Tabela 6 mostram que os resultados de concentração de todos os locais de medidas do setor urbano da cidade foram significativamente maiores do que no setor rural. Entretanto, entre os quatro locais de medida da região urbana, apenas o setor industrial 2 (SI2) apresentou resultados de concentração de partículas superiores aos obtidos nas medidas realizadas na UFU.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

- O setor industrial apresenta as maiores concentrações de material particulado total em suspensão, seguido pela região central da cidade;
- Pode-se afirmar com erro máximo de 1 % que existe diferença significativa entre as concentrações das regiões estudadas.
- Eventos externos como queimadas, ventos, aumento ou diminuição da circulação de veículos, promovem a ocorrência de altos valores de desvios padrão.
- Baseado nos intervalos de confiança obtidos e nos índices estabelecidos pela EPA, a qualidade do ar na zona rural de Uberlândia pode ser considerada boa, ao passo que os demais pontos apresentaram uma qualidade regular.

BIBLIOGRAFIA

- Box E. P., Hunter W. G., Hunter J. S., An introduction to Design, Data Analysis, and Models Building, 1978.
- Coury et al, "Monitoramento e análise da carga de material particulado no ar atmosférico no município de São Carlos I", XXV ENEMP, pag. 164-171, 1997.
- Derísio, J. C. Introdução ao controle da poluição ambiental, CETESB, SP, 1992.
- Hinds, W. C., Aerosol Technology, John Wiley & Sons, USA, 1982.
- Robins, S. L., Patologia Estrutural e funcional, Ed. Interamericana Ltda, RJ, 1975.