

JOSE AIRTON DA SILVA

**UM ESTUDO DA QUALIDADE DO AR
NA CIDADE DE FORTALEZA**

Dissertação apresentada à coordenação do Curso de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas - MCFA da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Santana dos Santos

FORTALEZA - CEARÁ

2010

Ficha Catalográfica

Silva, José Airton

Um Estudo da Qualidade do Ar na Cidade de Fortaleza (CE)

[Fortaleza, Ceará, Brasil]

...., 112p., 210×297 mm (MCFA/CCT/UECE, Qualificação, Projeto de Mestrado – Universidade Estadual do Ceará. Centro de Ciências e Tecnologia).

Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas

1. Poluição Atmosférica
2. Aerossol Atmosférico
3. Qualidade do Ar

JOSE AIRTON DA SILVA

**UM ESTUDO DA QUALIDADE DO AR
NA CIDADE DE FORTALEZA**

Dissertação apresentada à coordenação do Curso de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas - MCFA da Universidade Estadual do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Aprovada em: ___/___/___ Em Fortaleza, Ceará, Brasil

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira (Orientador)
Universidade Estadual do Ceará - UECE

Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Prof. Dra. Maria de Fátima Andrade
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-IAG (USP)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela minha existência.

À minha família pela compreensão nas “minhas ausências e demoras por aí” para realizar este trabalho.

À Universidade Estadual do Ceará pela oportunidade ímpar de fazer este curso.

A todos do MCFA (professores, coordenadores, colegas e funcionários)

Aos amigos de profissão pela ajuda e experiência nesse caminho.

Ao IFCE (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará), na pessoa do prof. ORIÁ e a todos da oficina mecânica, pelo apoio técnico prestado.

Em especial, ao amigo, colega e orientador prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira pelas orientações, horas de estudo e paciência na confecção desse trabalho.

À Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), na pessoa da engenheira Magda Kokay, pelas medidas e fornecimento dos dados.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) pela disponibilidade dos dados de pluviosidade.

Ao professor Dr. Antonio Carlos Santana dos Santos pela co-orientação e enorme ajuda nos problemas computacionais.

Ao colega e amigo Prof. Dr. Jose Carlos Parente de Oliveira (UFC) pela colaboração prestada.

Ao LERCA – IFCE, na pessoa do prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva pelos valiosos dados de gases fornecidos.

Ao prof. Dr. Alexandre Costa pelos ensinamentos teóricos e colaboração através do CONBINE.

Ao CONBINE – Convecção sobre o Nordeste Brasileiro: variabilidade em múltiplas escalas – Proc 620057/2008-4 pelos resultados de MP_{2,5} e Fumaça Preta

À Profa. Dra. Maria de Fátima Andrade do IAG – USP pela cooperação nas análises dos filtros e empréstimo dos equipamentos (*Minivol*).

Aos colegas Wagner (IAG) e Gleidson (IAG) pelas análises dos filtros e cálculos de concentrações dos poluentes.

RESUMO

A qualidade de vida das populações em todo o mundo mantém uma relação direta com a qualidade do ar atmosférico, recurso indispensável à vida. O crescimento populacional nos grandes centros urbanos tem contribuído profundamente para o aumento da emissão de poluentes na atmosfera, principalmente através da queima de combustíveis fósseis e outras ações de natureza antropogênica. Cidades como Tóquio, Pequim, Nova Iorque, Cidade do México e São Paulo estão entre as que apresentam maiores índices de poluição atmosférica do mundo. O efeito da poluição atmosférica se traduz notoriamente na degradação do meio ambiente, nas mudanças climáticas e na diminuição da qualidade de vida das populações. Nesse contexto, a poluição atmosférica se torna um dos grandes problemas da humanidade e amplo tema de investigação científica. Neste trabalho, são realizadas análises estatísticas de valores das concentrações de poluentes atmosféricos na cidade de Fortaleza, medidos através de processos físico-químicos, além de previsões computacionais, a fim de caracterizar, no momento atual e prognosticar no futuro, o estado do ar atmosférico. Os resultados desse estudo objetivam alertar os órgãos responsáveis pelo monitoramento da poluição atmosférica para que novas políticas de planejamento urbano e controle ambiental possam ser criadas e implementadas com o objetivo de mitigar as ações que contribuem para o aumento dos níveis de poluição atmosférica, preservar a qualidade de vida das populações e evitar a degradação do meio ambiente.

Palavras chaves: Poluição atmosférica. Aerossol atmosférico. Qualidade do ar.

ABSTRACT

The quality of life for people around the world has a direct relationship with the ambient air quality, resource essential to life. Population growth in urban centers has contributed profoundly to the increased emission of pollutants into the atmosphere, mainly by burning fossil fuels and other actions of anthropogenic nature. Cities like Tokyo, Beijing, New York, Mexico City and Sao Paulo are among those with higher levels of air pollution in the world. The effect of air pollution is reflected notably in the environmental degradation, climate change and reduction in quality of life of populations. In this context, air pollution becomes a major problem of humanity and broad topic of scientific research. In this work, performed statistical analysis of values of concentrations of air pollutants in the city of Fortaleza, measured by physical and chemical processes, and computational predictions in order to characterize, at present and predict the future, the state of atmospheric air . The results of this study intended to alert the agencies responsible for monitoring air pollution for new policies for urban planning and environmental control can be created and implemented with the objective of mitigating actions that contribute to increased levels of air pollution, preserve the quality of living and prevent degradation of the environment.

Keywords: Air pollution. Atmospheric aerosol. Air quality.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VISÃO GERAL DA ESPESSURA APROXIMADA DAS CAMADAS E SUBCAMADAS DA ATMOSFERA TERRESTRE.....	22
FIGURA 2 - GRÁFICO DA ESTRUTURA VERTICAL DA ATMOSFERA TERRESTRE RELACIONANDO TEMPERATURA COM ALTITUDE E PRESSÃO.	23
FIGURA 3 - ESBOÇO DA TROPOSFERA MOSTRANDO A CAMADA LIMITE E A ATMOSFERA LIVRE. .	27
FIGURA 4 - SUBDIVISÃO DA CLP MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO VERTICAL MÉDIA DO VENTO HORIZONTAL E A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISLHAMENTO DENTRO DESSA CAMADA.	28
FIGURA 5 - RELAÇÃO ENTRE O Nº DE INTERNAÇÕES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS E CONCENTRAÇÕES DE MP _{2,5} – RIO BRANCO, ACRE. SETEMBRO DE 2005.	37
FIGURA 6 - FONTES E COMPOSIÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO MP	41
FIGURA 7 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR (PQAR) MATERIAL PARTICULADO, MP	51
FIGURA 8 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR (PQAR) DIÓXIDO DE ENXOFRE, SO ₂	51
FIGURA 9 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR (PQAR) FUMAÇA PRETA, FP	51
FIGURA 10 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR (PQAR) MONÓXIDO DE CARBONO, CO.....	52
FIGURA 11 - MAPA DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA E CENTRO DA CIDADE.....	54
FIGURA 12 – LOCAL DAS MEDIDAS: (ESQUERDA) MINIESTAÇÃO METEOROLÓGICA LERCA - (DIREITA) VISTA AÉREA DO IFCE	55
FIGURA 13 - VISÃO AÉREA DA TORRE DO RADAR NO MCFA (UECE)	56
FIGURA 14 – (A) AMOSTRADOR DE GRANDES VOLUMES (<i>Hi-VOL</i>) PARA MEDIDAS DE PTS E (B) SISTEMA DE FILTRAÇÃO	56
FIGURA 15 - AMOSTRADOR DE PEQUENO VOLUME (APV) PARA MEDIDA SIMULTÂNEA DE SO ₂ E FUMAÇA PRETA.	57
FIGURA 16 - ANALISADOR DA REFLETÂNCIA DA LUZ EM FILTROS PARA A DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FUMAÇA PRETA	57
FIGURA 17 - CARTA GRÁFICA PARA AVALIAÇÃO DO VOLUME DE AR AMOSTRADO.....	58
FIGURA 18 – FOTO: AMOSTRADOR DE MATERIAL PARTICULADO (MINIVOL) E SISTEMA DE FILTRAÇÃO.....	64
FIGURA 19 - PARTES DA ESTRUTURA INTERNA DO MINIVOL.....	64

FIGURA 20 – AETALÔMETRO – MEDIDOR DE FUMAÇA PRETA (<i>BLACK CARBON</i>) PERTENCENTE AO LAPAT (IAG – USP)	66
FIGURA 21 - VISÃO EXTERNA E INTERNA DA MINIESTAÇÃO DE CO E CO ₂ LERCA - IFCE.....	67
FIGURA 22 – <i>HOBO H-11</i> - SENSOR AUTOMÁTICO PARA MEDIR CO	68
FIGURA 23 - <i>TELAIRE 7001</i> - SENSOR AUTOMÁTICO PARA MEDIR CO ₂ COM <i>HOBO</i> LOGGER U12 013	68
FIGURA 24 - <i>HOBO H 08</i> SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE.....	69
FIGURA 25- PROTETOR EXTERNO DO SENSOR <i>HOBO H 08</i>	70
FIGURA 26 - DIAGRAMA DAS CONCENTRAÇÕES (MGA) DE PTS PARA ESTAÇÃO I.....	74
FIGURA 27 – DIAGRAMA DA VARIAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS MENSIS DE PTS - ESTAÇÃO I..	75
FIGURA 28 – CONCENTRAÇÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR	77
FIGURA 29 – CONCENTRAÇÕES DE CO ₂ - MÉDIAS DIÁRIAS -	78
FIGURA 30 – VALORES DAS CONCENTRAÇÕES DE MP _{2,5} EM REGIÕES DE CARACTERÍSTICAS DIFERENTES.	80
FIGURA 31 - VALORES MÁXIMO, MÍNIMO E AMPLITUDE DAS CONCENTRAÇÕES DE MP 2,5	81
FIGURA 32 – RESULTADOS DO PROGRAMA DE COMBATE À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: FUMAÇA PRETA (90 A 97):	82
FIGURA 33 - VALORES DE CONCENTRAÇÕES PARA FUMAÇA NEGRA (<i>BLACK CARBON</i>)	83
FIGURA 34 - VALORES MÁXIMO, MÍNIMO E AMPLITUDE DAS CONCENTRAÇÕES DE <i>BLACK CARBON</i> MEDIDAS NO IFCE.	84
FIGURA 35 – DIAGRAMA DA RELAÇÃO GEOMÉTRICA: PTS E TEMPO (1993 A 2001)	86
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE PTS EM FUNÇÃO DO TEMPO (1993 A 2001).....	87
FIGURA 37 – DIAGRAMA DE REGRESSÃO GEOMÉTRICA PARA PTS E FROTA DE VEÍCULOS DE 1993 A 2001.	89
FIGURA 38 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO - PTS E DRA (MÉDIA MENSAL DE 1997 A 2001)	90
FIGURA 39 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO PARA PTSxDRA - 1996 A 2001.....	91
FIGURA 40 - DIAGRAMA DE ÁREA PARA PLUVIOSIDADE E PTS (1997 A 2001).	93
FIGURA 41 – DIAGRAMA DE ÁREA PARA PLUVIOSIDADE E DRA	94
FIGURA 42 - DIAGRAMA DE REGRESSÃO LINEAR MOSTRANDO AS VARIAÇÕES SOBRE A RETA AJUSTADA.	106
FIGURA 43 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL PARA AS VARIAÇÕES DA VARIÁVEL ALEATÓRIA Y.....	106

FIGURA 44 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DA VARIÂNCIA EM TORNO DA RETA DE REGRESSÃO LINEAR.	107
FIGURA 45 - PROBABILIDADE DA VARIÁVEL Y	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DA ATMOSFERA TERRESTRE - CONCENTRAÇÃO FRACIONAL POR VOLUME	34
TABELA 2 – PRINCIPAIS FONTES DE POLUENTES NATURAIS (AEROSSÓIS NATURAIS).....	39
TABELA 3 - FONTES ANTROPOGÊNICAS DE POLUENTES (AEROSSÓIS ANTROPOGÊNICOS).....	40
TABELA 4 – EMISSÕES ANUAIS DE CO ₂ DOS PAÍSES CONSIDERADOS MAIORES POLUIDORES ..	43
TABELA 5 - EMISSÕES PER CAPTA DE CO ₂ DOS PAÍSES CONSIDERADOS MAIORES POLUIDORES	43
TABELA 6 - CONCENTRAÇÕES E EFEITOS DE MONÓXIDO DE CARBONO NO SANGUE HUMANO	47
TABELA 7 - PADRÕES PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS DOS PRINCIPAIS POLUENTES E MÉTODO DE MEDIÇÃO -CONAMA 03/90.....	48
TABELA 8 - PADRÕES NACIONAIS DE QUALIDADE DO AR ATMOSFÉRICO.....	49
TABELA 9 – VALORES MÁXIMOS DAS EMISSÕES PARA EPISÓDIOS AGUDOS – CONAMA – 03/90.....	49
TABELA 10 - PADRÕES NACIONAIS DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DO AR - CONAMA 03/90 ..	50
TABELA 11 - VALORES DE VOLUME DE AR AMOSTRADO EM FUNÇÃO DA DEFLEXÃO DA PENA	59
TABELA 12 - QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 1993 A 2001 PARA PTS, SO ₂ E FUMAÇA PRETA NA ESTAÇÃO I	71
TABELA 13 - QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 1993 A 2000 PARA PTS, SO ₂ E FUMAÇA PRETA NA ESTAÇÃO II	72
TABELA 14 – QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 1993 A 2000 PARA PTS, SO ₂ E FUMAÇA PRETA- ESTAÇÃO III	73
TABELA 15 - QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 1997 A 2000 PARA PTS, SO ₂ E FUMAÇA PRETA- ESTAÇÃO IV	73
TABELA 16 - QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 1993 A 2001 - ESTAÇÃO I	74
TABELA 17 - CONCENTRAÇÕES PTS (µG/M ³) VALORES MÁXIMOS MENSAIS - ESTAÇÃO I CENTRO.....	75
TABELA 18 - MÉDIA DIÁRIA-CONCENTRAÇÕES DE CO ₂ (PPM), UR (%) E TEMPERATURA (°C)	78

TABELA 19 - CONCENTRAÇÕES DE MP _{2,5} E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS MEDIDAS NO IFCE	80
TABELA 20 - VALORES DAS CONCENTRAÇÕES DE <i>BLACKCARBON</i> E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS MEDIDAS NO IFCE	83
TABELA 21 – PARÂMETROS DA REGRESSÃO PARA VALORES MÉDIOS MENSIS DE PTS E TEMPO DE 1997 A 2001	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 22 – PARÂMETROS DE REGRESSÃO PARA CONCENTRAÇÃO DE PTS E TEMPO – 1993 A 2001 (VALORES ANUAIS)	87
TABELA 23 – PARÂMETROS DA REGRESSÃO - PTSXFROTA DE VEÍCULOS – VALORES ANUAIS DE 1993 A 2001.	88
TABELA 24 – PARÂMETROS DA REGRESSÃO PARA PTS E DRA (MÉDIA MENSAL DE 1997 A 2001)	90
TABELA 25 - REGRESSÃO PTSXDRA (VALORES ANUAIS 1996 A 2001)	91
TABELA 26 - PARÂMETROS DE REGRESSÃO PTS E PLUVIOSIDADE (VALORES MENSIS DE 1997 A 2001)	92
TABELA 27 - QUALIDADE DO AR REFERENTE AOS POLUENTES AVALIADOS NO PERÍODO (1993 A 2001) E 2009	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	- Ceará
CETESB	- Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC	- Clorofluorcarbono
CH ₄	- Metano
CLA	- Camada Limite Atmosférica
CLP	- Camada Limite Planetária
CLS	- Camada Limite Planetária
CM	- Camada de Mistura
CO	- Monóxido de Carbono
CO ₂	- Dióxido de Carbono
CT	- Camada de Transição
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
COV	- Compostos Orgânicos Voláteis
DETRAN	- Departamento de Trânsito
DRA	- Doenças Respiratórias Agudas
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FP	- Fumaça Preta
H ₂ O	- Água
H ₂ SO ₄	- Ácido Sulfúrico
IBAMA	- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	- Índice de Confiança
IFCE	- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
LAPAt-	Laboratório de Análises e Pesquisas Atmosféricas.
LERCA	- Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Térmico
MP	- Material Particulado
NO	- Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	- Dióxido de Nitrogênio
O ₃	- Ozônio
OMS	- Organização Mundial da Saúde
OPS	- Organização Panamericana de Saúde
PA	- Para Análise
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PI	- Partículas Inaláveis
PR	- Paraná
PTS	- Partículas Totais em Suspensão
RJ	- Rio de Janeiro
SCI	- Subcamada Inercial
SCR	- Subcamada Rugosa
SEMACE	- Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SP	- São Paulo
Va	- Variável aleatória

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coeficiente Linear
λ	Comprimento de onda
ϵ	Variável Aleatória
Φ	Diâmetro de Aerossol
β	Coeficiente Angular
σ^2	Desvio Padrão
$E(\epsilon)$	Valor Esperado da Va ϵ
$V(\epsilon)$	Variância da Va ϵ
Va	Variável Aleatória
x	Variável Aleatória x
y	Variável Aleatória y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Caracterização do Problema	18
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 Estrutura do Trabalho	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 A Camada Limite Planetária - CLP	26
2.2 Estabilidade Atmosférica (Inversão Térmica)	29
2.2.1 Dispersão dos poluentes atmosféricos.....	30
2.2.2 Apresentação do modelo matemático da dispersão.....	31
2.3 Composição Química do Ar Atmosférico.....	34
2.4 Estatística e Probabilidade	35
2.5 A poluição atmosférica no mundo	36
2.6 Poluentes atmosféricos e principais fontes emissoras	38
2.7 Conseqüências da poluição atmosférica	45
2.8 A Poluição Atmosférica e a Legislação.	48
2.9 O Programa de Combate à Poluição em Fortaleza.	52
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 A região do estudo	53
3.2 Métodos de amostragem I (TPS, SO ₂ e Fumaça Preta - 1993 a 2001).....	56
3.2.1 Determinação das concentrações de PTS.....	58
3.2.2 Determinação das concentrações de SO ₂	60
3.3 Métodos de amostragem II - MP _{2,5} , CO , CO ₂ e Fumaça Preta (<i>black carbon</i>)	63
3.3.2 Determinação de Fumaça Preta (<i>black carbon</i>)	65
3.4 Análise estatística dos poluentes.....	70
4 RESULTADOS e DISCUSSÕES	71
4.1 Resultados para PTS, SO ₂ e FP (1993 a 2001)	71
4.2 Resultados para CO, CO ₂ , MP _{2,5} e Fumaça Preta (<i>black carbon</i>) (2009).....	76
4.2.1 Resultados para Monóxido de Carbono, CO.....	76
4.2.2 Resultados para Dióxido de Carbono (CO ₂)	77

4.2.3 Resultados para MP _{2,5}	79
4.2.4 Resultados para Fumaça Preta (<i>black carbon</i>).....	82
4.3 Análise Estatística das Variáveis	84
4.3.1 Regressão: PTS (Estação I-centro) e Tempo.....	85
4.3.2 Regressão: PTS _{max anual} x FROTA de veículos.....	88
4.3.3 Regressão PTS x Número de Internações/DRA.....	89
4.3.5 Regressão: Pluviosidade x DRA	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1 O ar e a medida de sua qualidade.....	95
5.2 Sugestões e perspectivas de novos trabalhos	96
REFERÊNCIAS	99
ANEXO - A.....	104
Análise de Regressão e Correlação.....	104
ANEXO B	113
Procedimentos químico-analíticos para determinação de SO ₂ e Fumaça Preta (<i>black carbon</i>).....	113

1 INTRODUÇÃO

O ar atmosférico, essencial à existência dos seres humanos, animais e plantas, tem também uma importância fundamental na preservação do meio ambiente e, principalmente, na saúde das populações. A partir da revolução industrial, em meados do século XVIII, na Inglaterra, a mecanização dos sistemas de produção teve como consequência a queima de carvão mineral para alimentar usinas e máquinas térmicas. Essas ações, embora tenham apresentado grandes benefícios para as populações, em contra partida, contribuíram para elevar substancialmente os níveis de poluição atmosférica e, conseqüentemente, para a degradação do meio ambiente.

Após a invenção do motor à explosão, a queima de combustíveis fósseis foi intensificada através do uso do petróleo e de seus derivados.

Nas áreas metropolitanas dos grandes centros urbanos, o problema da poluição do ar tem se constituído numa das mais graves ameaças à qualidade de vida de seus habitantes. Os veículos automotores movidos, principalmente, a óleo diesel e a gasolina são as principais fontes causadoras dessa poluição em quase todo o mundo. As emissões causadas por esses móveis carregam diversas substâncias tóxicas que, em contato com o sistema respiratório, podem produzir vários efeitos negativos sobre a saúde dos seres vivos (DANNI-OLIVEIRA, 2000; BRASIL, CETESB, 2006).

Cidades como Nova Iorque, Tóquio, Cidade do México, Pequim e outras, fazem parte de uma lista das grandes metrópoles que enfrentam ou já enfrentaram grandes problemas com a poluição atmosférica no mundo.

Fortaleza, capital do Estado do Ceará e região de estudo deste trabalho, é uma cidade em desenvolvimento onde o crescimento populacional seguido da ocupação desordenada do solo, o aumento do número de veículos automotores em circulação e a construção de grandes edifícios, conduzem a um provável aumento nas emissões de poluentes, aspecto que têm despertado grandes preocupações sobre a

qualidade de vida das populações, a exemplo do que ocorre em algumas metrópoles do país como as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Atualmente, em Fortaleza, a relação habitante por veículo (2.505.552/637.313) é estimada em 3,93, ou seja, aproximadamente um veículo para cada quatro habitantes (BRASIL, IBGE (CE), 2007; BRASIL, DETRAN (CE), 2008). Essa relação, comparada com a de São Paulo, que é de um veículo para cada dois habitantes, é motivo suficiente para causar preocupações em relação aos níveis de concentrações de poluentes emitidos.

Para ratificar essas preocupações, uma análise estatística feita sobre dados de material particulado medidos pela Superintendência Estadual de Meio Ambiente - SEMACE, entre 1993 e 2001, revelou uma tendência de aumento nos valores médios mensais e anuais dessas concentrações. Além disso, foi verificado que alguns valores dessas concentrações se apresentam acima da média geométrica anual, considerada pela resolução nº 03/90 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, que é de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e se aproximam do valor médio diário do padrão secundário que é de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir do ano de 2001 o programa de monitoramento de qualidade do ar da SEMACE foi desativado devido a questões de ordem político-governamentais, e, a partir do ano 2002, nenhuma informação a respeito das emissões de poluentes e qualidade do ar em Fortaleza tem sido divulgada. Segundo o departamento de comunicação da SEMACE, com a aquisição de novos equipamentos, o programa de monitoramento deverá ser reativado, em breve.

1.1 Caracterização do Problema

Diante dos fatos relatados acima sobre a poluição atmosférica nas grandes cidades, e, especialmente, sobre a cidade de Fortaleza, fica evidente a necessidade de uma investigação da poluição atmosférica nessa cidade, no sentido de quantificar as concentrações de poluentes atmosféricos e suas variabilidades espaciais e temporais, na perspectiva de descobrir como estão e estarão os índices que determinam a

qualidade do ar, e qual a relação da poluição atmosférica com outros fatores que influenciam a qualidade de vida da população desta cidade.

1.1.1 Objetivo Geral

Vários são os poluentes antropogênicos em suspensão na atmosfera das grandes metrópoles. São exemplos, o dióxido de carbono, CO_2 , o ácido sulfúrico, H_2SO_4 , os fluorclorocarbonetos, CFC's, o ozônio troposférico, O_3 , alguns tipos de aerossóis, chamados de Material Particulado, etc.

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os níveis de qualidade do ar da cidade de Fortaleza (CE) em relação aos poluentes Partículas Totais em Suspensão, PTS, Dióxido de Enxofre, SO_2 , e Fumaça Preta, FP, a partir do ano de 1993 até 2001.

Os valores dessas concentrações foram obtidos nas estações meteorológicas da SEMACE no referido período.

Este estudo também avaliará os valores das concentrações de $\text{MP}_{2,5}$, medidos na Floresta Nacional do Araripe - Flona Araripe, na estação meteorológica da Universidade Estadual do Ceará - UECE e na miniestação meteorológica do Laboratório de Energias Alternativas e Conforto Ambiental - LERCA, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE.

Adicionalmente, serão avaliados valores de concentrações de Monóxido de Carbono, CO e Dióxido de Carbono, CO_2 medidos, recentemente, na miniestação meteorológica do LERCA.

1.1.2 Objetivos Específicos

Especificamente, os resultados das análises das amostras supracitadas serão utilizados para estimar possíveis valores futuros dos níveis de qualidade do ar e, através de métodos estatísticos e computacionais, mostrar as variações temporais dessas quantidades e estabelecer uma relação das mesmas com outras variáveis como

crescimento populacional, condições meteorológicas, número de veículos automotores em circulação e saúde da população.

De acordo com esses resultados, poderão, ainda, serem propostos novos estudos relacionados ao tema no sentido de melhorar e dar continuidade a este.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho tem estrutura constituída por capítulos, distribuídos da seguinte forma:

INTRODUÇÃO - corresponde ao capítulo 1 que apresenta uma visão geral do tema, a motivação para a realização do estudo e os objetivos do trabalho.

DESENVOLVIMENTO – é formado pelos capítulos 2 e 3 que apresentam os seguintes contextos:

- o capítulo 2 estabelece o estado da arte apresentando uma revisão teórica, histórica e empírica do tema, abordando as causas principais da poluição atmosférica nos grandes centros urbanos e suas principais conseqüências na saúde das populações e no meio ambiente. Nesse capítulo também são apresentados os valores e as leis que determinam os limites máximos atuais dos níveis de concentrações dos principais poluentes atmosféricos.

- o Capítulo 3, dividido em duas partes, trata da metodologia e das técnicas utilizadas na obtenção dos dados e na sua análise.

Na primeira parte são descritos os métodos e os procedimentos realizados pela SEMACE para coleta, avaliação e determinação dos valores das concentrações atmosféricas de Partículas Totais em Suspensão, PTS, do Dióxido de Enxofre, SO₂ e da Fumaça Preta, FP, no período compreendido entre 1993 e 2001.

A segunda parte desse capítulo descreve as técnicas e os processos utilizados na obtenção das concentrações atmosféricas de Material Particulado respirável, com diâmetro menor ou igual a 2,5 micra - MP_{2,5}, Dióxido de Carbono, CO₂ e Monóxido de Carbono, CO, em Fortaleza, além de citar os métodos estatísticos e computacionais utilizados para estimativa dos resultados finais do estudo.

CONCLUSÃO – formada pelos capítulos 4 e 5:

- o capítulo 4 apresenta os resultados deste estudo, as discussões relevantes sobre o estado da qualidade do ar em relação a cada um dos poluentes avaliados e as conclusões gerais estabelecidas sobre o problema estudado.

- o capítulo 5 apresenta as considerações finais e as propostas para futuros estudos que possam dar seqüência a este e a outros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Gerada a 4,5 bilhões de anos, a Terra possui uma camada atmosférica cuja estrutura está constantemente variando em consequência de processos naturais e antropogênicos. A atmosfera terrestre é uma camada de gases e vapores que envolvem toda a superfície terrestre e onde ocorrem todas as atividades que determinam o clima do planeta. Um dos fatores que influenciam o comportamento da atmosfera é a sua interação com a superfície da Terra através da atração gravitacional.

Essa camada é o principal sistema responsável pela transferência de energia entre o Sol e a superfície da Terra e de uma região para outra dessa superfície. Mesmo não existindo qualquer outra camada superposta à sua estrutura, a atmosfera é contida pelo campo gravitacional do planeta que, teoricamente, impediria a fuga de seus constituintes (massa) para o espaço (SALBY, 1996). No entanto, já é de conhecimento da comunidade científica que essa fuga ocorre através de um fenômeno chamado *escape atmosférico* (CATLING e ZAHNLE, 2009). A Figura 1 apresenta uma visão geral da espessura aproximada de cada uma das camadas e subcamadas da atmosfera terrestre.

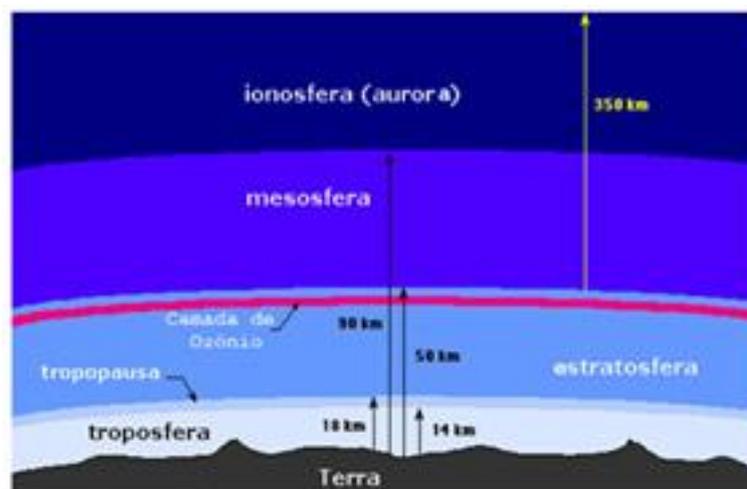


Figura 1 - Visão geral da espessura aproximada das camadas e subcamadas da atmosfera terrestre
 Fonte: http://www.passeiweb.com/saiba_mais/voce_sabia/atmosfera_terrestre (10/07/09)

A atmosfera terrestre possui uma estrutura vertical variável em relação a inúmeros aspectos como composição, temperatura, umidade, pressão, movimentos de massa (momento), etc. com estrutura disposta em camadas de características distintas.

Apesar de não haver um limite bem definido separando essas camadas, elas apresentam propriedades diferentes e estão em contínua interação entre si (AHRENS,1993).

No mesmo quadro da Figura 1, aparece em destaque (fora de escala) a subcamada de Ozônio Estratosférico que exerce um importante papel na proteção de animais, plantas e seres humanos contra os raios ultravioletas (dos tipos UV-C e UV-B, principalmente) emitidos pelo Sol. Por outro lado, o ozônio troposférico, presente em elevada concentração em regiões com grandes atividades industriais e intenso tráfego veicular, é um poluente atmosférico de grande toxicidade e um poderoso oxidante. Os principais efeitos nocivos à saúde são as irritações nos olhos e vias respiratórias e a diminuição da capacidade pulmonar. (CETESB, 2006).

A Figura 2 mostra um esboço da estrutura vertical da atmosfera terrestre, onde estão relacionadas temperatura com altitude e pressão, como também um esboço das distintas regiões que compõem sua estrutura.

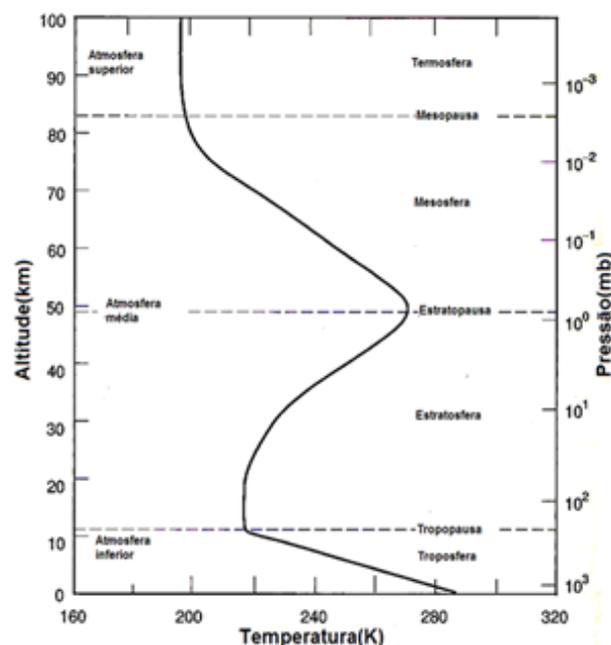


Figura 2 - Gráfico da estrutura vertical da atmosfera terrestre relacionando temperatura com altitude e pressão. Adaptado de LIOU, (2002)

De acordo com Seinfeld e Pandis (1997), a atmosfera terrestre é caracterizada pelas variações de temperatura e pressão com a altitude.

De fato, as variações do perfil de temperatura média com a altitude são a base da distinção das camadas da atmosfera da Terra

A pressão atmosférica e a densidade ρ variam exponencialmente com a altitude segundo a equação (1) a seguir:

$$p = p_0 e^{-z/H} \quad (1)$$

onde H é a altura de escala e p_0 é a pressão atmosférica em algum nível de referência que, em geral, é tomado ao nível do mar ($z = 0$)

Seinfeld e Pandis (1997) dividem a atmosfera terrestre em camadas como segue:

a) Troposfera

A troposfera é a camada mais baixa e mais relevante, pois é nela onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos importantes à vida dos seres vivos do planeta. Essa camada encontra-se em contato com a superfície da Terra e atinge uma altitude variável de 15 a 18 km no equador e de 6 a 8 km nos pólos. Sua espessura varia também com as estações do ano, com movimentos atmosféricos verticais (convecção e subsidência) e horizontais, bastante intensos. A troposfera é também responsável pela troca de energia entre o Sol e a Terra, deixando passar energia radiante em forma de ondas curtas ($0,2\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$) provenientes do Sol que aquecem a superfície da Terra e recebendo calor em forma de ondas longas ($3\mu\text{m} < \lambda < 200\mu\text{m}$) emitida pela superfície terrestre aquecida.

A temperatura da troposfera cai rapidamente com a altitude embora, em algumas ocasiões, durante a noite, possa ser observado um fenômeno conhecido como *inversão térmica* onde a temperatura do ar, em vez de diminuir, aumenta com a altitude. A espessura da camada de inversão térmica raramente ultrapassa 200m.

Nestas condições, a Terra atua como um sumidouro de energia térmica. Se o ar estiver bastante poluído, essa camada terá bastante influência na visibilidade.

b) Estratosfera

A estratosfera é a camada atmosférica imediatamente superior à troposfera. Ela caracteriza-se por um ligeiro aumento de temperatura com o aumento de altitude e pela ausência de nuvens. A estratosfera se estende desde a altitude aproximada de 15 km até 50 km da superfície da Terra. Somente as nuvens mais altas, os cirrus, cirrusestratus e cirruscumulus, estão na estratosfera inferior. Na estratosfera, em razão de seu perfil “frio por baixo e quente por cima”, observa-se uma ausência quase completa de movimentos verticais. Nessa camada encontra-se a subcamada de Ozônio que tem espessura variável e aproximada de 20 km e situa-se entre 16 e 30 km de altitude, com a concentração máxima em torno de 22 km.

c) Mesosfera

A mesosfera é a camada atmosférica que apresenta um perfil semelhante à troposfera. Sua temperatura diminui rapidamente com a altitude e seu perfil estende-se até, aproximadamente, 80 km acima da superfície da Terra.

d) Termosfera

A termosfera é uma das camadas mais altas da atmosfera da Terra. Seu perfil tem início a partir de, aproximadamente, 90 km de altura e continua por centenas de quilômetros, até cerca de 640 km. Nos primeiros 50 km desta camada concentra-se uma camada com propriedades peculiares, chamada *ionosfera*. Esta camada contém muitos íons e elétrons livres (plasma). Os íons da ionosfera são criados quando a luz do Sol atinge os átomos e arranca alguns elétrons. A partir de 640 km até 1280 km encontra-se a região ou camada mais externa da atmosfera da Terra, conhecida como *exosfera*. A camada mais inferior da exosfera é chamada de "*nível crítico de escape*", onde os átomos dos gases estão muito espaçados, uma vez que a temperatura e a pressão nessa camada apresentam-se muito baixas (VIANELLO e ALVES, 1991).

Entre cada duas dessas camadas atmosféricas existe uma zona limítrofe que apresenta características e propriedades peculiares, com pouca ou nenhuma mudança na temperatura em função da altitude, também mostrada na Figura 2. Essas zonas são classificadas, de acordo com a posição entre as camadas, em:

- Tropopausa – é a zona limítrofe entre a troposfera e a estratosfera da atmosfera terrestre. Nas latitudes médias, a temperatura dessa zona oscila entre -50°C e -55°C e sua espessura é da ordem de 3 km;
- Estratopausa – é a zona limítrofe entre a estratosfera e a mesosfera. Apresenta temperatura em torno de 0°C e espessura média de 3 a 5 km. Caracteriza-se também por apresentar uma queda acentuada de ozônio em sua composição química;
- Mesopausa – é a zona limítrofe entre a mesosfera e a termosfera. Possui espessura média de 10 km numa altitude entre 80 e 90 km.

2.1 A Camada Limite Planetária - CLP

A troposfera apresenta duas subcamadas bem definidas que são cenários de importantes fenômenos atmosféricos. Essas subcamadas são chamadas de (1) Camada Limite Planetária - CLP e (2) Atmosfera Livre.

A Camada Limite Planetária - CLP, também conhecida como Camada Limite Atmosférica - CLA, é definida por Stull (1988) como “a parte da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície da Terra e que responde aos forçantes superficiais com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos”.

A parte da troposfera que não sofre os efeitos citados na definição acima é a subcamada conhecida como Atmosfera Livre, como mostra a Figura 3.

A CLP tem sua origem ligada aos processos turbulentos associados às trocas de energia, momento e massa na superfície. Os fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente determinam em grande parte a estrutura vertical média da temperatura e da umidade na CLP, enquanto o transporte vertical turbulento de momento horizontal condiciona sua estrutura dinâmica média (KAIMAL e FINNIGAN, 1994). A espessura da CLP varia de algumas dezenas de metros a poucos quilômetros, dependendo da taxa de aquecimento e resfriamento e de alguns forçantes superficiais como evaporação, transferência de calor para a superfície, resfriamento radiativo, variação dos fluxos turbulentos, efeitos da topografia local, atritos com o solo, umidade, movimentos verticais de larga escala, entre outros (STULL, 2006;

HOLTON, 2004). Na Figura 3 estão destacadas as duas camadas componentes da Troposfera: a CLP e a Atmosfera Livre:

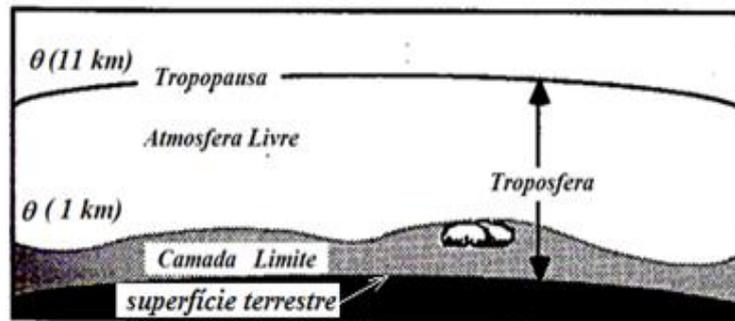


Figura 3 - Esboço da Troposfera mostrando a camada limite e a atmosfera livre. Adaptado de Stull (1988)

2.1.1 Características e propriedades da CLP

Em estudos de dispersão de poluentes por fontes naturais e antropogênicas, é importante o conhecimento das condições meteorológicas ambientais tais como, umidade relativa do ar, estabilidade atmosférica, direção e intensidade da velocidade do vento, inversão térmica e altura da Camada Limite Planetária - CLP. Informações sobre a velocidade e direção do vento são também de grande importância porque, além de relatar a procedência de certos poluentes e seu provável destino, podem prevenir episódios críticos de poluição do ar, e da mesma forma, estimar as prováveis causas de problemas dessa natureza.

De maneira geral, nessa camada, a velocidade do vento é o fator determinante no transporte horizontal dos contaminantes. No transporte vertical, a responsável pelo deslocamento desses poluentes, é ainda, a turbulência atmosférica (ABREU, 1984).

A mais baixa subcamada atmosférica da CLP é conhecida como a *subcamada laminar* ou *camada rugosa* e tem uma espessura de apenas alguns milímetros. É difícil verificar a existência física dessa camada por causa de sua pequena extensão vertical.

No interior dessa subcamada, alguns processos físicos, tais como o transporte de momentum e de calor é regulado pelo movimento molecular. Na maioria dos modelos que representam a camada limite a existência desta camada não é explicitamente tratada.

De acordo com Zdunkowski e Bott (2003), um esboço da estrutura vertical da Camada Limite Atmosférica é como representada na Figura 4.

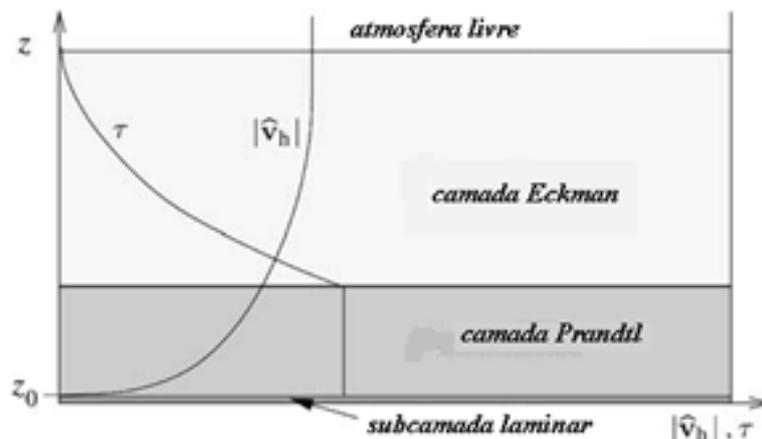


Figura 4 - Subdivisão da CLP mostrando a distribuição vertical média do vento horizontal e a variação da tensão de cisalhamento dentro dessa camada.
Adaptado de Zdunkowski e Bott (2003)

Logo acima da *subcamada laminar*, encontra-se a *Camada de Prandtl* ou, como é mais conhecida, *Camada Superficial*.

Em geral, considera-se que, entre a subcamada laminar e a *Camada de Prandtl*, existe uma camada de transição onde a turbulência é plenamente desenvolvida. No limite inferior da camada superficial, marcado na Figura 4 como Z_0 , altura de rugosidade, a velocidade média do vento é supostamente nula.

A extensão vertical da *Camada de Prandtl* é regulada pela estratificação térmica do ar e pode variar entre cerca de 20 m a 100 m. Nessa camada todos os fluxos turbulentos são aproximadamente constantes com a altura.

Acima da *Camada de Prandtl* encontra-se a *Camada de Ekman*, que se estende até uma altura superior a 1000 m, dependendo das condições de estabilidade. Fluxos turbulentos nessa camada tendem a zero no topo da mesma.

Acima da *Camada de Ekman* o fluxo de ar é mais ou menos não-turbulento. A influência da força de Coriolis produz variações contrárias na direção do vetor velocidade do vento e por esta razão, essa camada é freqüentemente chamada de *camada espiral*, pois o movimento adquirido pelo vento é uma espiral. Resumindo, o conjunto formado desde a região da superfície da Terra até o topo da *Camada de Ekman* é chamado de Camada Limite. Planetária (SALBY, 1996; ZDUNKOWSKI e BOTT, 2003).

Durante o período convectivo da CLP surge uma subcamada chamada *Camada Convectiva* que se estende desde o topo da CLS até o topo da CLP, onde ocorre grande mistura devido a difusão turbulenta. Nessa subcamada, mais conhecida como zona de entranhamento ou subcamada de transição, os gradientes verticais médios das variáveis atmosféricas apresentam-se pequenos. A grande mistura turbulenta na Camada Limite Convectiva - CLC ocorre devido ao efeito da convecção térmica diurna, período no qual a superfície da CLP é fortemente aquecida pela radiação solar (ABREU, 1984).

Na camada limite estável ocorre quase um equilíbrio delicado entre a produção mecânica e a destruição térmica da turbulência, que resulta em uma escala de altura da ordem de 100 m sob condições de vento moderado (~10 m/s). É importante observar que o comportamento, as características e as propriedades da CLP, aqui descritos, diferem um pouco quando são levadas em consideração, superfícies extremamente irregulares com elementos de rugosidade apresentando escalas de altura bem maiores (~ 10 m) que as escalas consideradas (~10 cm) (SALBY, 1996).

2.2 Estabilidade Atmosférica (Inversão Térmica)

Uma condição é dita de estabilidade atmosférica, (atmosfera estável) quando há próximo á superfície, uma camada de ar frio sobreposta por uma camada de ar quente. Nesse caso, os movimentos verticais são limitados e menos intensos, fato esse que favorece a concentração dos contaminantes atmosféricos próximo à superfície

agravando assim o estado de poluição além do surgimento de névoas, nevoeiros, restrições à visibilidade e a presença de nuvens estratiformes.

2.2.1 Dispersão dos poluentes atmosféricos

Um estudo completo da CLP utilizando modelagem computacional torna-se extremamente difícil, tanto do ponto de vista meteorológico, quanto para estudos sobre dispersão de poluentes, uma vez que a maioria dos processos físicos que nela ocorrem são, ainda, desconhecidos. Um desses processos, talvez o mais importante de todos, e o que causa maiores preocupações é o problema da turbulência atmosférica, pois, o poder de dispersão da atmosfera surge de sua natureza turbulenta. A turbulência, apesar de ser um problema da Mecânica Clássica, ainda sem solução, é a atividade meteorológica mais importante no transporte de espécies (calor, contaminantes, umidade, etc.) através da CLP (OLIVEIRA, VIANELLO e FERREIRA, 2004).

O escoamento do ar nas camadas mais baixas da atmosfera terrestre apresenta caráter tipicamente turbulento. A diluição e a distribuição, pela atmosfera, das partículas e dos resíduos contaminantes (gases de combustão, cinzas), a partir de sua emissão, ainda é uma questão que merece ser discutida, quando o assunto se refere ao processo de difusão na atmosfera. Grande parte dos problemas meteorológicos, supostamente causados por ações antropogênicas, é também governada pela difusão turbulenta da atmosfera.

Os modelos de dispersão atmosférica utilizados no cálculo da dispersão de poluentes ajudam a conhecer melhor os problemas mais complexos dos processos relacionados à difusão turbulenta e dos transportes turbulentos que ocorrem na atmosfera, determinando o tipo de movimento e o tempo de permanência desses poluentes na atmosfera. Esses modelos são baseados em equações matemáticas e permitem conhecer como os termos dessas equações agem na dispersão dos contaminantes na atmosfera.

A parametrização dessas equações pode fornecer uma visão geral da contribuição de cada termo na resolução de determinado problema. Assim, para se

conhecer bem o modelo, faz-se necessário o conhecimento matemático, além da física da atmosfera onde ocorre tal dispersão.

2.2.2 Apresentação do modelo matemático da dispersão

O processo descrito aqui é análogo ao processo que descreve a difusão molecular em consequência da agitação térmica. No entanto, como a intensidade das flutuações turbulentas é muito maior do que aquela que caracteriza a agitação molecular, o transporte turbulento também é muito mais efetivo do que o molecular (MOREIRA E CARVALHO, 2005).

Inicialmente, consideremos uma quantidade genérica C que se conserve na atmosfera, tal que:

$$\frac{dC}{dt} = 0 \quad (2)$$

Expandindo a diferencial total da expressão (2), tem-se que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Na equação (3), u , v e w , representam os componentes do campo de velocidade do vento. O primeiro termo representa a variação local ou euliana e os demais termos representam a advecção ou transporte de C em cada uma das direções pelos componentes do vento.

Os campos de C e dos componentes do vento podem ser decompostos em uma parte média e uma parte turbulenta (equações (4), (5) e (6)), segundo o método de Reynolds (STULL, 1988):

$$C = \bar{C} + C' \quad (4)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (5)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (6)$$

Substituindo as equações (4), (5) e (6) na equação (3) e aplicando o método de Reynolds, chega-se à seguinte expressão para a evolução média local de C (STULL, 1988):

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} - \overline{u' \frac{\partial C'}{\partial x}} - \overline{v' \frac{\partial C'}{\partial y}} - \overline{w' \frac{\partial C'}{\partial z}} \quad (7)$$

Os três primeiros termos no lado direito de (7) representam o transporte da parte média de C pelo vento médio e são não nulos em uma determinada direção se houver, simultaneamente, vento e gradiente de C nessa direção. Os três últimos termos no lado direito da mesma equação também são transportes advectivos, mas do componente turbulento de C pelo campo turbulento do vento.

Com boa aproximação, pode-se considerar que o escoamento na Camada Limite Planetária - CLP, é não divergente, isto é:

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Multiplicando (8) por C' , aplicando-se a média de Reynolds e somando em (7), obtêm-se:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u' C'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' C'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w' C'}}{\partial z} \quad (9)$$

De acordo com Moreira e Carvalho (2005), as grandezas $\overline{u' C'}$, $\overline{v' C'}$ e $\overline{w' C'}$ na equação (9), representam os fluxos turbulentos de C nas direções x, y e z, respectivamente, ou ainda, do ponto de vista físico, são advecções do componente turbulento de C pela velocidade turbulenta que caracterizam o processo

físico de transporte de quantidades devido a mistura entre camadas adjacentes de ar imposta pela variabilidade do escoamento turbulento. Cada um desses termos pode ser escrito como:

$$\overline{u'C'} = -K_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \quad \overline{v'C'} = -K_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \quad \overline{w'C'} = -K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (10)$$

onde, K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} são os coeficientes de difusão nas direções x, y e z, respectivamente.

Com a substituição desses coeficientes na equação (9), chega-se à expressão:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} \langle k_{xx} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle k_{yy} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle k_{zz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \rangle \quad (11)$$

que é a equação de Difusão-Advecção dos fluxos turbulentos.

Esta expressão possibilita considerar diferentes difusividades em diferentes direções, significando que o processo de difusão não é necessariamente isotrópico. As soluções da equação (10) podem ser específicas com relação ao problema que se quer estudar.

Embora o problema deste estudo não trate especificamente da dispersão dos poluentes, a quantidade genérica C poderia ser a concentração desses poluentes e para estudar a dispersão dessas concentrações, seria necessário o conhecimento de certas condições de contorno como tipo de fonte poluente (fixa ou móvel), tipo de poluente, posição e/ou altura da fonte, condições meteorológicas, etc.

Portanto, é importante então, o conhecimento da definição de fluxo para uma grandeza física qualquer ou uma propriedade: *Define-se fluxo de uma propriedade como a quantidade dessa propriedade que atravessa uma determinada superfície por unidade de área dessa superfície e por unidade de tempo.*

Infelizmente, essa definição não é apropriada para definir fluxo turbulento, pois em meteorologia, o fluxo turbulento pode ser entendido como o produto de uma

propriedade pela intensidade ou magnitude da velocidade do vento que transporta essa propriedade.

2.3 Composição Química do Ar Atmosférico

A atmosfera padrão é composta quimicamente por uma mistura de gases e vapores em proporções tais que a concentração fracional por volume é a mesma que aquela baseada em números de moléculas ou pressões parciais exercidas pelos gases.

Alguns constituintes estão medidos em concentração percentual (%) em relação ao ar seco e outros em partes-por-milhão (ppm). Nitrogênio (78,08%), Oxigênio (20,95%) e Argônio (0,93%) são os gases predominantes na atmosfera terrestre com mais de 90% do total (WALLACE e HOBBS, 2006).

Alguns constituintes da atmosfera apresentados na Tabela 1, com exceção do vapor d'água, H_2O_{vapor} , ozônio, O_3 e dióxido de carbono, CO_2 , mantêm suas concentrações constantes.

Tabela 1 - Constituição química da atmosfera terrestre - Concentração Fracional por volume

CONSTITUINTE ATMOSFÉRICO	PESO MOLECULAR (g)	CONCENTRAÇÃO FRACIONAL POR VOLUME (ppm)
Nitrogênio, N_2	28,013	78,08%
Oxigênio, O_2	32,000	20,95%
Argônio, Ar	39,950	0,93%
Vapor D'água, $H_2 O$	18,020	0 ~ 5%
Dióxido de Carbono, CO_2	44,010	380 ppm
Neônio, Ne	20,180	18 ppm
Hélio, He	4,000	5 ppm
Metano, CH_4	16,040	1,75 ppm
Criptônio, Kr	83,800	1 ppm
Hidrogênio, H_2	2,020	0,5 ppm
Óxido Nitroso, $N_2 O$	56,030	0,3 ppm
Ozônio, O_3	48,000	0 ~ 0,5 ppm

Adaptado de: Atmospheric Science - An introductory Survey (Wallace e Hobbs, 2006)

2.4 Estatística e Probabilidade

Segundo Devore (2006), estatística é qualquer quantidade cujo valor possa ser calculado com base nos dados da amostra. Antes de se obter os dados, existe a incerteza quanto ao valor que resultará de qualquer estatística específica. Portanto, estatística é uma variável aleatória e será representada por uma letra maiúscula e o seu valor, calculado ou observado, por uma letra minúscula.

O problema da investigação de valores das concentrações de poluentes tratado neste trabalho requer uma análise detalhada utilizando cálculos estatísticos e probabilísticos. Essa metodologia ou forma de investigação científica utilizando amostras de populações e gráficos é conhecida como *Inferência Estatística*.

Segundo Correa (2003) e a maioria dos estatísticos, *inferência estatística* é o processo pelo qual os estatísticos tiram conclusões acerca de uma população usando informações de uma amostra. Entenda-se aqui que o termo “população”, não se refere necessariamente a pessoas, plantas ou animais, mas a todos os casos ou situações aos quais se deseja fazer inferências ou estimativas.

Em um sentido mais amplo, é possível se fazer inferências sobre fósseis, rochas ou sedimentos de um determinado sítio geológico ou sobre a concentração de alguns tipos de poluentes em determinado lençol freático. Uma amostra seria um subconjunto da população usada para se obter informações acerca do todo. Em algumas situações específicas, o estudo pode ser feito conhecendo-se toda a população, mas em determinados casos, esse conhecimento demanda tempo e dinheiro, tornando-se praticamente impossível de ser realizado. Como exemplo, o estudo da poluição atmosférica ou estudos feitos por ensaios destrutivos são processos realizados em amostras da população (DEVORE, 2006).

Para estimar os níveis de poluição atmosférica da cidade de Fortaleza (CE), no período após 2001, serão utilizados os processos estatísticos de Regressão com ajustamento de curvas com extrapolação de valores. Esse processo também será usado para relacionar a poluição atmosférica com outras variáveis como saúde da população, quantidade de veículos automotores em circulação e pluviosidade.

Alguns conceitos estatísticos necessários para o bom entendimento dos processos envolvidos neste estudo estão disponíveis no Anexo A.

2.5 A poluição atmosférica no mundo

O ar atmosférico, essencial à vida, parece ter fonte inesgotável e qualidade inabalada sobre a superfície da Terra. No entanto, a ação desgovernada e muitas vezes irresponsável do homem, tem provocado grandes mudanças ambientais capazes de causar desconforto, destruição e miséria nas populações de todo o mundo.

A partir da segunda metade do século XVIII, com o advento da Revolução Industrial, a queima de produtos fossilizados como o carvão mineral e derivados do petróleo foi intensificada a fim de atender a demanda das atividades industriais. A partir daí, a queima desses combustíveis tornou-se a principal fonte responsável pelo aumento de toneladas de poluentes despejadas na atmosfera da Terra. Desde então, todos os grandes centros urbanos do mundo têm intensificado suas atividades industriais contribuindo diretamente para a degradação da qualidade do ar e do meio ambiente. Cidades como São Paulo, Tóquio, Nova Iorque, Pequim e Cidade do México lideram, hoje, uma lista das mais poluídas do mundo (CETESB, 2001).

Um dos mais clássicos e graves episódios registrados sobre os efeitos deletérios dos poluentes do ar aconteceu em Londres durante o inverno de 1952. Nessa época, um estado de inversão térmica impediu a dispersão de poluentes gerados, então, pelas indústrias e pelos aquecedores domiciliares que utilizavam carvão como combustível e, uma nuvem composta principalmente por material particulado e enxofre (em concentrações até nove vezes maiores do que a média permitida de cada um desses poluentes), permaneceu estacionada sobre a cidade por aproximadamente três dias, levando a um aumento de 4.000 mortes em relação à média de óbitos em períodos semelhantes sem a inversão (AMBIENTEBRASIL, 2009).

O Departamento de Qualidade Ambiental da Universidade de São Paulo - USP realizou um estudo sobre o comportamento sazonal da poluição atmosférica, no período de 1981 a 1994, na cidade de São Paulo e região metropolitana. Nesse estudo

foi revelado que: (1) as concentrações de poluentes atmosféricos encontradas acarretam afecções agudas e crônicas no sistema respiratório humano, mesmo em concentrações abaixo do padrão de qualidade do ar; (2) a maior incidência de patologias, tais como asma e bronquite, está associada com as variações das concentrações de vários poluentes atmosféricos; (3) a mortalidade por patologias do sistema respiratório apresenta uma forte associação com a poluição atmosférica; (4) as populações mais vulneráveis são as de crianças, idosos e aquelas que apresentam doenças respiratórias (AMARAL e PIUBELLE, 2003).

Mascarenhas et al (2005), realizaram estudo ecológico na cidade de Rio Branco, no estado do Acre, a fim de relacionar casos de internações por doenças respiratórias com concentrações de Material Particulado, $MP_{2,5}$, em Setembro de 2005. Nessa época foi detectada, sobre a cidade, uma alta concentração de fumaça oriunda de queimadas naquela região. Os resultados desse estudo estão apresentados no diagrama da Figura 5:

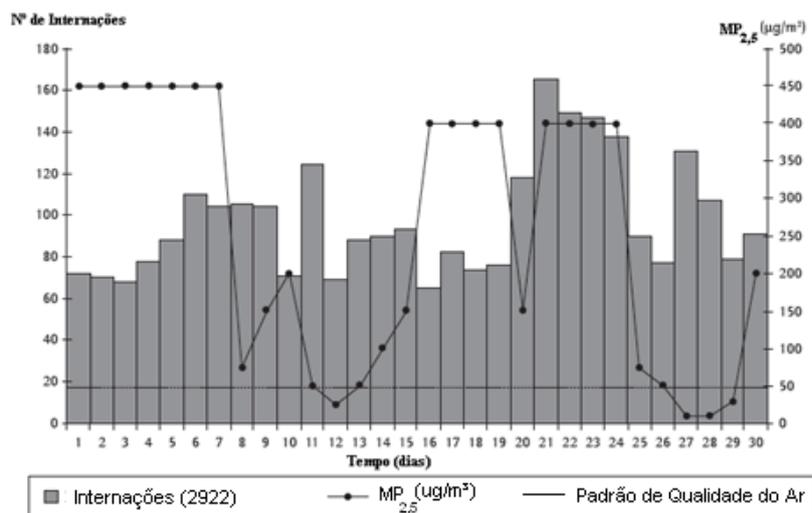


Figura 5 - Relação entre o nº de internações por doenças respiratórias e concentrações de $MP_{2,5}$ – Rio Branco, Acre. Setembro de 2005.

Fonte: Mascarenhas et al (2005)

Em Curitiba (PR), uma investigação sobre os efeitos de morbidade por doenças respiratórias causados pela poluição atmosférica em crianças, entre 1999 e 2000, revelou que a poluição atmosférica promove conseqüências adversas para a

saúde das crianças, mesmo quando os níveis dos poluentes estão aquém do que determina a legislação (BACONYI, 2004).

No Brasil, as cidades de São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ) encabeçam a lista de cidades mais populosas, mas também as que apresentam maiores problemas de poluição atmosférica. As principais questões ambientais relacionadas com as condições de saúde incluíram o aumento da poluição atmosférica nas grandes cidades e sua relação com a morbidade e mortalidade, notadamente de crianças e idosos (LATORRE *et al*, 2001).

A Região Metropolitana de São Paulo apresenta a maior frota circulante do país com 6,5 milhões de veículos automotores, concentrando-se 5,5 milhões na cidade de São Paulo (aproximadamente 1 veículo para cada 2 habitantes), um dos mais altos índices do mundo, com uma tendência crescente do uso de veículos particulares em detrimento do transporte público. Além disso, é considerada a 5ª cidade com o ar mais poluído entre as 20 maiores metrópoles do mundo e a terceira da América Latina (BRASIL, IBGE (SP); 2007; BRASIL, DETRAN (SP), 2008).

A cidade do Rio de Janeiro (RJ), com cerca de 6 milhões de habitantes e mais de 1 milhão de veículos automotores, apresenta pouco mais de 3 habitantes por veículo o que significa uma relação bem próxima à de São Paulo, embora não tenha havido a necessidade do rodízio de veículos como nesta última (BRASIL, IBGE(RJ), 2007; BRASIL, DETRAN(RJ), 2008).

2.6 Poluentes atmosféricos e principais fontes emissoras

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), “é considerado Poluente Atmosférico, toda e qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos em legislação, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”

A poluição atmosférica é atribuída ao excesso de gases e os chamados *aerossóis* - particulados gerados por atividades humanas e naturais. Entre as atividades mais poluidoras geradas pela ação do homem estão, por exemplo, o trânsito veicular terrestre e aéreo, atividades industriais, usinas de geração de energia e canteiros de obras. Algumas atividades naturais consideradas poluidoras do meio ambiente são a queima de florestas, as erupções vulcânicas, as fontes termais (gêiseres) e as transformações orgânicas, em pântanos, e químicas, no ar.

Os poluentes presentes na atmosfera podem ser classificados em primários, aqueles emitidos diretamente pelas fontes naturais e artificiais, e secundários, aqueles emitidos diretamente da atmosfera através de reações químicas entre poluentes primários.

A Tabela 2 mostra as principais fontes de poluição atmosférica produzidas naturalmente e os seus respectivos produtos.

Dentre estes, encontra-se o dióxido de carbono, produzido naturalmente por queimadas florestais, mas, que, segundo alguns pesquisadores, não é considerado, propriamente, um poluente atmosférico que apresente perigo à saúde humana.

Tabela 2 – Principais fontes de poluentes naturais (aerossóis naturais)

AEROSSOL NATURAL	PRODUÇÃO
SAIS MARINHOS	Partículas de NaCl ou $2(\text{NH}_4)$ que se desprendem da superfície dos mares
ERUPÇÕES VULCÂNICAS	Gases e particulados
TEMPESTADES DE POEIRA	Partículas arrancadas do Solo pelo vento
ORGÂNICOS	Desintegração de pólenes, algas em campos de cultivo
QUEIMADAS FLORESTAIS	Particulados
GÊISERES	Gases e vapores

Fonte: Dantas (1998 e 2003)

Na Tabela 3 são apresentados alguns poluentes de origens antropogênicas que desempenham um papel importante nos fenômenos meteorológicos e na composição química da atmosfera terrestre.

Embora não estejam relacionados em nenhuma das tabelas acima, uma classe de poluentes de origem biológica, desempenha um papel no campo da saúde pública, produzindo doenças que afetam de forma significativa a qualidade de vida das populações. São os fungos, as bactérias, as algas, os ácaros, as amebas, etc.

Esses contaminantes usam como substrato material particulado como polens, fragmentos de inseto, escamas de pele humana e pêlos. Além disso, duplicam-se a cada 20 segundos por um processo conhecido como parasitismo celular.

Tabela 3 - Fontes antropogênicas de poluentes (aerossóis antropogênicos)

AEROSSOL ANTROPOGÊNICO	PRODUÇÃO
QUEIMA DE CARVÃO	Cinzas, óxido de enxofre e nitrogênio
QUEIMA DE ÓLEO COMBUSTÍVEL	Monóxido de Carbono, CO, óxidos de enxofre e nitrogênio
REFINARIAS.	Hidrocarbonetos, óxido de enxofre e CO
INDÚSTRIA DO AÇO	Poeiras, fumaça, fuligem, óxido de metais, gases orgânicos e inorgânicos
INDUSTRIA DE FERTILIZANTES.	Material Particulado, gás fluorídrico
INDUSTRIA DE CELULOSE	Material particulado, óxido de enxofre
INDUSTRIA DE PLÁSTICOS	Resinas gasosas.
TRANSPORTES	Dióxido de Carbono, CO ₂ , óxido de Nitrogênio, compostos orgânicos voláteis, Material Particulado
RESIDÊNCIAS	Monóxido de Carbono, Material Particulado
CONSTRUÇÃO CIVIL	Poeiras

Fonte: Dantas (2003)

O conjunto total de todas as partículas suspensas no ar atmosférico é conhecido como Aerossóis Atmosféricos. Os aerossóis de origem biológica são denominados Bioaerossóis ou Aerossóis Bacterianos.

De acordo com o tamanho dessas partículas, elas podem formar dois grupos distintos: a moda das partículas finas com diâmetros aerodinâmicos menores que 2,5 μm ($d < 2,5\mu\text{m}$) e a moda das partículas grossas com diâmetro aerodinâmico entre 2,5 μm e 10 μm ($2,5\mu\text{m} < d < 10\mu\text{m}$). A diferença básica entre essas partículas está nos processos distintos que sofrem na atmosfera e na forma de remoção das mesmas (SEINFELD e PANDIS, 1997).

As partículas com diâmetros menores ou iguais a 10 μm , também chamadas de “inaláveis”, são consideradas as mais danosas para a saúde humana, pois têm o poder de transportar gases adsorvidos em sua superfície para as porções aéreas das vias respiratórias dos seres humanos (AMARAL e PIUBELI, 2003).

2.6.1 Características dos poluentes regulamentados pela Legislação.

No Brasil, algumas substâncias consideradas poluentes já possuem regulamentação em relação às suas emissões segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, através da resolução N° 03 de 28/06/1990 que estabelece os limites de emissões para Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrogênio, Ozônio, Dióxido de Enxofre e Material Particulado, tendo este último, três indicadores: Partículas Totais em Suspensão - PTS, Partículas Inaláveis - PI e Fumaça. As características dessas substâncias e de outras são dadas a seguir:

a) Material particulado MP, PI e Fumaça Preta (FP)

Material Particulado é o termo usado para partículas sólidas ou líquidas encontradas no ar. Algumas partículas são largas ou negras, o suficiente para serem vistas aglomeradas em forma de fumaça ou fuligem. São classificadas, de acordo com o seu diâmetro aerodinâmico em: **PTS** (Partículas Totais em Suspensão, apresentando diâmetro aerodinâmico menor que $50\mu m$), **PI** ou **PM₁₀** (Partículas Inaláveis, apresentando diâmetro aerodinâmico menor que $10\mu m$)

A Figura 5, a seguir, mostra a composição do Material Particulado de acordo com a fonte que o produz.

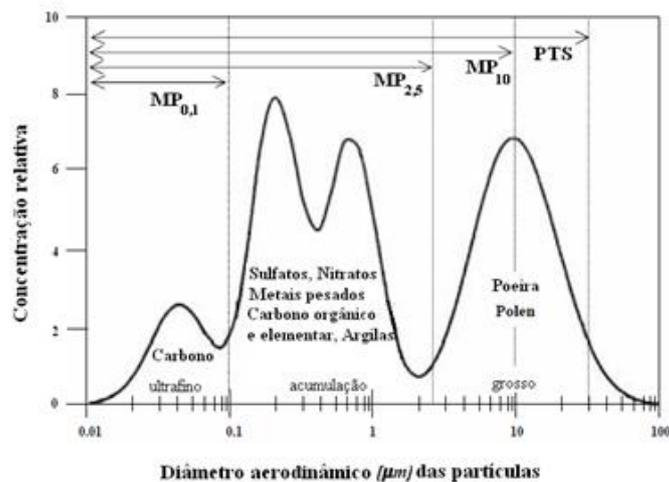


Figura 6 - Fontes e composição do Material Particulado MP
Adaptado do Manual de Laboratório: Programa Ar Puro – Suisscontact (2001)

As partículas com diâmetros aerodinâmicos entre 5 e 10 micra, são, na sua maioria, produzidas por fontes naturais e, aquelas com diâmetros aerodinâmicos entre 0,1 e 5 micra, são provenientes de processos que ocorrem a altas temperaturas como combustão industrial e tráfego veicular.

Essas partículas não são, necessariamente, venenosas como a poeira, o pólen, a fuligem e a fumaça. Algumas são muito nocivas como o arsênio e as fibras de amianto. Partículas líquidas ou gotículas como o ácido sulfúrico, óleos e vários pesticidas também são aqui incluídos. O material particulado apresenta a característica de reduzir eficientemente a visibilidade nas áreas urbanas. Uma vez presente na atmosfera, seu efeito visual torna-se alarmante pela impressão.

b) Monóxido de carbono, CO

É um gás sem cor nem odor e um dos maiores poluentes do ar das cidades, resultando da combustão incompleta do carbono constituinte dos combustíveis.

O monóxido de carbono, CO, é emitido por motores a combustão dos veículos automotores, principais responsáveis pelas emissões desse poluente nas grandes cidades. O monóxido de carbono é extremamente venenoso. Quando inalado, passa a ser transportado pelo sangue no lugar do oxigênio, O₂. A falta de oxigênio no cérebro pode induzir sintomas de dor de cabeça, fadiga, sonolência e, por fim, morte. Entretanto, o CO é eficientemente removido da atmosfera e fixado no solo por microorganismos.

c) Dióxido de carbono, CO₂

Ao contrário do monóxido de carbono, o gás dióxido de carbono, CO₂, não é venenoso, mas essencial à vida, participando de vários processos fisiológicos nos seres vivos, como por exemplo, para manutenção de um pH ótimo no sangue e a fotossíntese das plantas. No entanto, na estratosfera, esse gás é responsável pela retenção de calor emitido pela Terra, contribuindo para o aquecimento global ou efeito estufa.

As Tabelas 4 e 5 apresentam, as emissões anuais, total e percapta, em toneladas de CO₂ no mundo, respectivamente.

Tabela 4 – Emissões anuais de CO₂ dos países considerados maiores poluidores

EMISSÕES TOTAIS DE CO₂	
10⁶ Toneladas de CO₂ por ano	País
2.795	Estados Unidos
2.680	China
661	Rússia
583	Índia
415	Japão
356	Alemanha
300	Austrália

Fonte: Carbon Monitoring for Action (CARMA) database criada por *Center for Global Development*. CARMA, Geographic Regions – página visitada em 15/12/20.

Tabela 5 - Emissões percapta de CO₂ dos países considerados maiores poluidores

EMISSÕES DE CO₂ PERCAPTA	
Toneladas de CO₂ anuais per capita:	País
10	Austrália
8.2	Estados Unidos
3.2	Reino Unido
1.8	República Popular da China
0.5	Índia

Fonte: Carbon Monitoring for Action (CARMA) database criada por *Center for Global Development*. CARMA, Geographic Regions – página visitada em 15/12/2009.

O grande problema, contudo, no uso de combustível fóssil para quaisquer finalidades como a produção de energia em termoelétricas, a alimentação de motores de veículos, o aquecimento de ambientes e caldeiras, é que sempre resultará em produção de CO₂ e H₂O.

d) Compostos orgânicos voláteis (COV)

São compostos formados por hidrogênio e carbono, chamados hidrocarbonetos. O mais abundante na natureza é o metano, CH₄; outros COVs são benzenos, formaldeídos e alguns clorofluorcarbonos. O benzeno e o benzopireno, produtos da queima do carvão, madeira e tabaco, são cancerígenos.

e) Dióxido de Enxofre, SO₂

É um gás incolor que aparece a partir da combustão de um combustível fóssil que contenha enxofre, como o carvão e o óleo combustível. O dióxido de enxofre é um forte poluente de odor desagradável e irritante. Quando inalado, pode

causar problemas respiratórios como asma, bronquite, enfisemas e o agravamento de doenças cardiovasculares pré-existentes. Algumas plantas mais sensíveis têm suas folhas amareladas ou chegam a morrer quando expostas às concentrações, mesmo abaixo dos padrões. O SO_2 é precursor dos sulfatos, os quais são associados aos processos de acidificação de lagos e córregos, corrosão acelerada de edificações, monumentos e carrocerias de automóveis, redução da visibilidade, fatores esses de efeitos adversos à saúde humana, ao meio ambiente e aos materiais.

f) Óxidos de nitrogênio, NO_x

Genericamente conhecidos por NO_x , são o óxido nítrico, NO e o dióxido de nitrogênio, NO_2 . São gases que se formam quando o nitrogênio do ar reage com o oxigênio no processo de queima de combustível em altas temperaturas. O óxido de nitrogênio em alta concentração é prejudicial às pessoas, podendo causar problemas cardíacos e respiratórios. A longa exposição a esses gases também causa a perda de resistência a infecções, principalmente no aparelho respiratório.

g) Ozônio, O_3

O ozônio é uma variedade alotrópica do oxigênio que apresenta três átomos. É um oxidante fortíssimo. Para as pessoas, o ozônio é um gás de odor desagradável que irrita as mucosas e agrava doenças crônicas como asma e bronquite. É importante ressaltar que, na troposfera, o ozônio é um poluente que apresenta uma série de características que o torna prejudicial às pessoas, plantas e animais, no entanto, na estratosfera, com concentração máxima em torno dos 23 km de altitude, o ozônio é um gás que participa de uma série de reações químicas onde ocorre absorção de radiação ultravioleta, principalmente dos tipos UV-C e UV-B. Nesse caso, a presença do ozônio, as reações químicas das quais ele participa e os efeitos produzidos são benéficos para a vida aqui na superfície da Terra.

h) Clorofluorcarbonos, CFC's.

São compostos constituídos por três elementos: cloro, flúor e carbono. Os mais importantes na indústria são conhecidos pelos nomes comerciais de Freon-11 e Freon-12. Essas substâncias formam compostos muito estáveis, não são tóxicos e nem inflamáveis.

São utilizados como solventes para limpeza de circuitos eletrônicos; como gases para sistemas de refrigeração e condicionamento de ar e como propelente para tubos pressurizados.

O problema com os CFC's é duplo: além de participarem do ciclo de produção-destruição de ozônio na estratosfera, impedindo a absorção da radiação ultravioleta, também participam da absorção seletiva da radiação de ondas longas que é emitida pela Terra, aumentando o efeito estufa na atmosfera (AHRENS, 1993).

2.7 Conseqüências da poluição atmosférica

Os principais efeitos da poluição atmosférica se revelam por problemas na saúde da população e da degradação do meio ambiente.

Façanha e Pinheiro (2004), da Universidade Federal do Ceará, realizaram estudos sobre o número de internações de pacientes acometidos de Doenças Respiratórias Agudas – DRA, na cidade de Fortaleza (CE). Eles informam que ocorreram 2.050.845 casos de doença respiratória aguda no período entre 1996 e 2001. Os meses com maior número de casos registrados foram maio e junho. A faixa etária mais acometida foi a de um a quatro anos, com cerca do dobro do número de casos das outras faixas etárias. Pneumonias representaram, aproximadamente, 7,7% dos casos.

Um estudo ecológico de séries temporais realizado na cidade de Curitiba (PR), entre 1999 e 2000, sobre os efeitos causados pela poluição atmosférica na morbidade por doenças respiratórias em crianças, revelou que todos os poluentes investigados (MP_{10} , NO_2 , O_3 e fumaça) têm determinada influência nos casos observados. Um aumento de $40,4 \mu g/m^3$ na média móvel de três dias para fumaça esteve associado a um aumento de 4,5% (Intervalo de Confiança – IC de 95%) nas consultas por doenças respiratórias de crianças. Os resultados desse estudo sugerem que, mesmo estando aquém dos níveis de padrões aceitáveis, a poluição atmosférica promove efeitos adversos na saúde das crianças (BAKONYI et al, 2004).

Pesquisadores da New York University School of Medicine – NYU School of Medicine forneceram evidências que exposição à poluição atmosférica, mesmo

dentro dos níveis dos padrões aceitos pela legislação federal, causa doenças no coração. Estudos prévios ligaram poluição do ar à doença cardiovascular (JAMA, 2004).

Em um estudo com camundongos que respiraram ar tão poluído quanto o da cidade de Nova York, os pesquisadores analisaram mecanismos específicos e mostraram que o ar poluído pode ser particularmente danoso quando associado à dieta rica em gordura. Segundo Lung Chi Chen, Ph.D., professor associado de medicina ambiental na NYU School of Medicine e autor principal do estudo, foi possível estabelecer uma relação causal entre a poluição do ar e a aterosclerose, doença que se caracteriza pelo endurecimento, estreitamento e obstrução das artérias, sendo, portanto, um importante componente da doença.

O estudo realizado em colaboração entre o *Mount Sinai School of Medicine* e a *University of Michigan* examinou os efeitos de partículas suspensas medindo menos que $2,5 \mu\text{m}$, $\text{MP}_{2,5}$, considerando emissões de usinas energéticas e exaustão de veículos automotores. Desde 1997, o *US Environmental Protection Agency - EPA* regulamentou as emissões de $\text{MP}_{2,5}$, limitando a exposição anual a não mais do que $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ (quinze microgramas por metro cúbico). Essas pequenas partículas e fumaça causam cerca de 60.000 mortes prematuras a cada ano nos EUA (EPA, 2005). A poluição atmosférica da cidade de São Paulo, Brasil, induziu alterações inflamatórias e estruturais nos pulmões e corações dos animais normais expostos a ela desde o nascimento até a idade adulta. A resposta pulmonar caracterizou-se por inflamação e diminuição das fibras da matriz extracelular dos vasos, enquanto as coronárias apresentaram fibrose e elastogênese em toda parede vascular. Esses achados reforçam a hipótese de que a poluição atmosférica de grandes centros urbanos induz alterações silenciosas e significativas em órgãos específicos, modulando a resposta vascular, podendo contribuir para alteração da potência e reatividade dos vasos e eventos isquêmicos na idade adulta (PATRICIO, 2008)

Em relação ao Monóxido de Carbono, CO, a questão ambiental e de saúde pública é também preocupante. O monóxido de carbono é resultante de atividades antropogênicas, sendo produzido em fornos, motor à explosão (gasolina, diesel, etc.), refinarias de petróleo, "flares" (queima de gases naturais), etc.

A natureza consegue absorver o CO por meio de reações com radicais hidróxidos do próprio meio ambiente, formando o CO₂. O monóxido de carbono também é absorvido na atmosfera superior e no solo. Nos veículos automotores a queima incompleta de combustíveis pode produzir concentrações de CO de mais de 100 ppm, sendo, portanto, um poluente encontrado facilmente em áreas urbanas com tráfego intenso. O uso de catalisadores nos veículos pode reduzir a poluição a níveis aceitáveis. Segundo o American Petroleum Institute, a exposição aguda ao CO indica insalubridade em alto grau e, de acordo com a NR 15, o Limite de Tolerância (TLW) é de 39 ppm ou 43 mg/m³, e a Média Ponderada no Tempo (TLVtwa) é de 25 ppm ou 29 mg/m³.

O efeito tóxico do CO está associado à capacidade de transporte de oxigênio pela hemoglobina. A afinidade da hemoglobina pelo CO é aproximadamente 200 vezes maior que sua afinidade pelo Oxigênio, O₂. Com a formação da carboxihemoglobina, composto resultante da reação da hemoglobina com o CO, a possibilidade de a hemoglobina transportar o O₂ a todas as células do organismo é reduzida. A Tabela 6 mostra alguns efeitos que o CO pode causar à saúde de acordo com sua concentração no sangue humano:

Tabela 6 - Concentrações e efeitos de Monóxido de Carbono no sangue humano

Concentração de CO (ppm)	% de hemoglobina desativada	Efeito
50	7	Redução da capacidade visual e de reflexos
100	14	Dores de cabeça
200	27	Tonturas
400	45	Vômitos
600	56	Inconsciência
800	65	Morte

Fonte: Fisiologia e mecanismos das doenças - HALL e GUYTON (1998)

2.8 A Poluição Atmosférica e a Legislação.

No Brasil, os padrões nacionais que regulam os níveis de poluição atmosférica e a qualidade do ar foram estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA e aprovados pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, por meio da Resolução CONAMA 03/90 de 28/06/90. Na Tabela 7 são apresentados os padrões primários e secundários estabelecidos por essa resolução, como também, o tempo de amostragem permitida e a técnica utilizada para a medição.

Tabela 7 - Padrões primários e secundários dos principais poluentes e método de medição -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	140	Pararosanilina
	MAA ³	60	40	
Dióxido de Enxofre	24 horas ¹	365	100	Reflectância
	MAA ³	80	40	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora ¹	320	190	Quimiluminescência
	MAA ³	100	100	
Monóxido de Carbono	1 hora ¹ 8 horas	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo
		35 ppm	35 ppm	
		10.000 9 ppm	10.000 9 ppm	
Ozônio	1 hora ¹ MAA ³	160	160	Quimiluminescência

1. Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano

2. Média Geométrica Anual

3. Média Aritmética Anual

Fonte: CETESB

De acordo com os órgãos oficiais, os Índices de Qualidade do Ar, no Brasil, foram determinados com base no *Pollutant Standard Index* - PSI, desenvolvido nos EUA pela *Environmental Protection Agency* - EPA e adaptado às condições brasileiras pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). A Tabela 8 apresenta os Índices de Qualidade do Ar para alguns poluentes

atmosféricos: MP₁₀, Ozônio, O₃, Monóxido de Carbono, CO, Dióxido de Nitrogênio, NO₂ e Dióxido de Enxofre, SO₂.

Tabela 8 - Padrões nacionais de qualidade do ar atmosférico

QUALIDADE	ÍNDICE	MP ₁₀	O ₃	CO	NO ₂	SO ₂
BOA	0-50	0-50	0-80	0- 4,5	0-100	0-80
REGULAR	51-100	50-150	80-160	4,5 - 9	100-320	80-365
INADEQUADA	101-199	150-250	160-200	9 - 15	320-1130	365-800
MÁ	200-299	250-420	200-800	15 -30	1130-2260	800-1600
PÉSSIMA	300-399	>420	>800	>30	>2260	>1600
CRÍTICA	> 400					

Fonte: CETESB

A resolução 03/90 do CONAMA, também define os critérios para episódios agudos de poluição atmosférica para os poluentes mostrados na Tabela 9, considerando o tempo de exposição:

Tabela 9 – Valores máximos das emissões para episódios agudos – CONAMA – 03/90

PARÂMETRO	ATENÇÃO	ALERTA	EMERGÊNCIA
Partículas Totais em Suspensão (µg/m ³) 24 h	375	625	875
Partículas Inaláveis (µg/m ³) 24h	250	420	500
Fumaça (µg/m ³) 24h	250	420	500
Dióxido de Enxofre (µg/m ³) 24h	800	1.600	2.100
SO ₂ xPTS (µg/m ³) (µg/m ³) 24h	65.000	261.000	393.000
Dióxido de Nitrogênio (µg/m ³) 1 hora	1.130	2.260	3.000
Monóxido de Carbono (µg/m ³) 24h	15	30	40
Ozônio (µg/m ³) 24h	400	800	1.000

Fonte:CETESB

O padrão de qualidade do ar atmosférico é definido por lei como um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção e o bem-estar das pessoas. Em geral, esses valores devem atingir níveis adequados que

apresentem uma boa margem de segurança à saúde. Os parâmetros considerados e regulamentados como padrões nacionais de qualidade do ar foram estabelecidos pelo IBAMA por meio da Portaria GM N° 231, de 27/04/76, transformada na Resolução N° 03 do CONAMA já citada.

Consideram-se Primários os poluentes cujas concentrações, se ultrapassadas, afetam a saúde da população e, Secundários, os poluentes cujas concentrações permanecem em níveis, abaixo dos quais não apresentam riscos ao bem-estar das pessoas, à flora, à fauna, aos materiais e, em geral, ao meio ambiente.

Os valores de concentrações dos poluentes apresentados nas tabelas 8 e 9, acima, são combinados e relacionados aos índices de qualidade do ar num diagrama que apresenta as situações de padrão primário e episódios agudos.

Na Tabela 10 são apresentados, separadamente, os referidos Padrões Nacionais de Índices de Qualidade do Ar estabelecidos também pela Resolução 03 do CONAMA

Tabela 10 - Padrões Nacionais dos Índices de Qualidade do Ar - CONAMA 03/90

ÍNDICE	QUALIDADE DO AR
0 - 50	Boa
51 - 100	Regular
101 - 199	Inadequada
200 - 299	Má
300 - 399	Péssima
> 400	Critica

Fonte: CETESB

A forma e a disposição dos padrões de qualidade do ar nos diagramas seguintes são feitos de maneira que facilita, aos meios de comunicação, a interpretação dos valores índices para cada um dos poluentes regulamentados. Todos os padrões apresentados estão de acordo com a resolução n° 03/90 do CONAMA.

As Figuras 7, 8, 9 e 10, a seguir, mostram a relação entre os índices de qualidade do ar e os valores padrões de MP, SO₂, FP e CO, respectivamente:

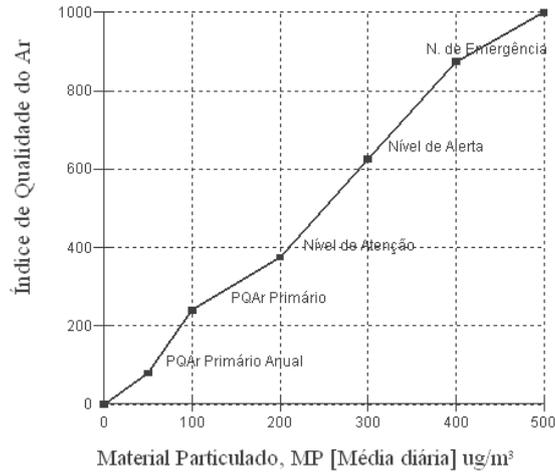


Figura 7 - Padrões de Qualidade do Ar (PQAr) Material Particulado, MP
Fonte: CETESB

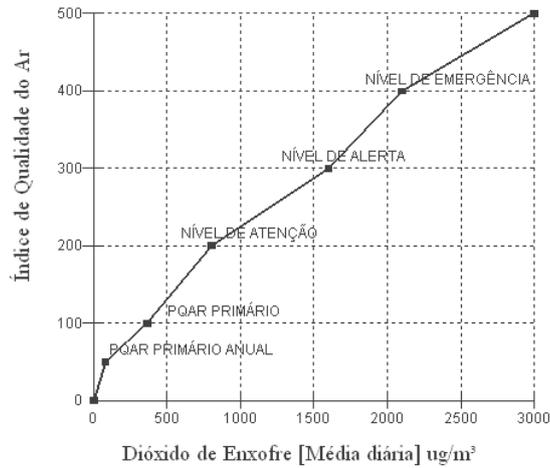


Figura 8 - Padrões de Qualidade do Ar (PQAr) Dióxido de Enxofre, SO₂
Fonte: CETESB

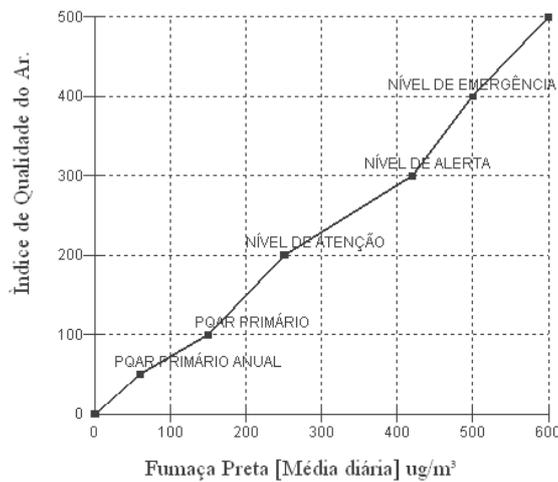


Figura 9 - Padrões de Qualidade do Ar (PQAr) Fumaça Preta, FP
)Fonte: CETESB

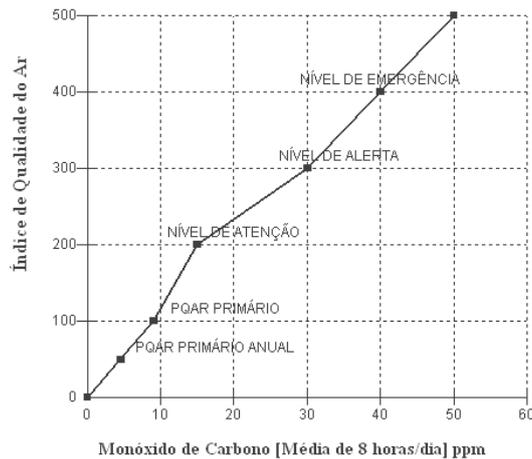


Figura 10 - Padrões de Qualidade do Ar (PQAR) Monóxido de Carbono, CO
Fonte: CETESB

2.9 O Programa de Combate à Poluição em Fortaleza.

Na década de 90, a SEMACE realizou, na região metropolitana de Fortaleza (CE), um programa para o combate à poluição da Fumaça Preta, obtendo resultados bastante satisfatórios (BRASIL, SEMACE, 1992). Entre os anos de 1993 e 2001, esse programa de monitoramento teve continuidade estabelecendo prioridade para as medidas de concentrações de TPS, SO₂ e Fumaça Preta.

De acordo com os dados obtidos no programa, foi observada uma redução na qualidade do ar, considerando-se que no ano de 1997 as três estações de monitoramento da capital apresentaram valores para material particulado acima do padrão estabelecido pelo CONAMA. Além disso, o Índice de Qualidade do Ar nas áreas em torno das estações manteve-se *regular* tendendo a *inadequado* durante os dias da semana, incluindo sábados e domingos. Com exceção da estação I, no centro da capital, os valores desses índices para as outras estações passaram a **bom** nos finais de semana.

Por questões político-governamentais, esse programa foi totalmente interrompido a partir do ano de 2002, não existindo informações acerca dos índices de qualidade do ar da cidade de Fortaleza e região metropolitana desde então.

3 METODOLOGIA

No presente capítulo, são apresentadas as características da região do estudo, as técnicas e as metodologias utilizadas para obtenção e avaliação dos valores resultantes do estudo proposto e os equipamentos utilizados.

Inicialmente, são descritos os métodos, os equipamentos e as técnicas utilizadas para obtenção de concentrações de Partículas Totais em Suspensão - PTS, Dióxido de Enxofre, SO_2 e Fumaça Preta, FP pela SEMACE no período de 1993 a 2001. Em seguida, são apresentadas as técnicas, os equipamentos e os procedimentos principais para determinação de concentrações de $\text{MP}_{2,5}$, Dióxido de Carbono, CO_2 e Monóxido de Carbono, CO, no ano de 2009 e, finalmente, são feitas análises estatísticas de algumas variáveis aleatórias como população, número de veículos, pluviosidade, saúde da população, etc. em função das concentrações de alguns poluentes analisados nesse estudo.

3.1 A região do estudo

O local do estudo é a região central da cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, fundada a 13 de Abril de 1726, com população de cerca de 2.500.000 (dois e meio milhões) de habitantes.

Considerada a quinta maior cidade do Brasil em população, Fortaleza é um dos mais importantes centros industriais, comerciais e turísticos do Nordeste. A cidade, que se localiza no litoral do estado a uma altitude média de 21 metros, possui clima tropical favorecido pelos ventos alísios que sopram do quadrante Leste, apresentando temperatura média anual de 26°C . Fortaleza é também, centro de um município de 313,14 km^2 de área com uma densidade demográfica de cerca de 7 hab/ km^2 .

A Região Metropolitana de Fortaleza - RMF tem cerca de 3.415.455 (três milhões quatrocentos e quinze mil, quatrocentos e cinquenta e cinco) habitantes, sendo uma das dez maiores áreas urbanas do Brasil e a terceira maior do Nordeste (BRASIL, IBGE (CE), 2007)

A Figura 10 mostra a RMF, apresentando em destaque o centro da cidade e parte do litoral.



Figura 11 - Mapa da Região Metropolitana de Fortaleza e Centro da cidade
Fonte: Google Earth

A escolha do local para implantação dos equipamentos e realização do estudo foi feita levando em consideração um conjunto de fatores que apresentam uma relação direta com as intensidades de concentrações dos poluentes envolvidos na pesquisa. Em geral, foram considerados fatores como a direção e velocidade dos ventos, maior concentração de fontes, densidade populacional e segurança dos equipamentos.

As medidas preliminares de PTS, SO₂ e FP, consideradas a partir de 1993, foram realizadas nas estações da Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMACE, espalhadas na RMF.

A Estação I, situada na Avenida do Imperador, centro de Fortaleza, e implantada em Agosto de 1993, mede as emissões do intenso tráfego veicular da

região central da cidade. A Estação II, implantada em Agosto de 1993, localiza-se no Conjunto Acaracuzinho no município de Maracanaú e sofre influência das emissões atmosféricas industriais. A Estação III, localizada na Avenida Presidente Castelo Branco, mais conhecida como Avenida Leste-Oeste, foi implantada em Agosto de 1993 e mede as emissões veiculares e industriais daquela região. A Estação IV foi instalada em Janeiro de 1997 e localiza-se na Avenida Padaria Espiritual, no bairro Castelão, e mede a poluição atmosférica gerada nessa região pela queima do lixo do aterro sanitário de Jangurussú.

Todos os equipamentos foram estruturados, implantados e mantidos afastados de quaisquer objetos materiais que pudessem interferir na medição dos poluentes atmosféricos. A fim de evitar a influência de partículas resultantes da mistura turbulenta próxima à superfície, os equipamentos ficaram dispostos em uma altura aproximada de 3 metros do solo.

As medidas de CO, CO₂ e parte das medidas de MP_{2,5}, apresentadas neste estudo, foram realizadas, na Miniestação Meteorológica do LERCA - IFCE, na Av. 13 de Maio, mostrada na Figura 12.



Figura 12 – Local das medidas: Vista aérea do IFCE destacando a miniestação meteorológica LERCA e Minivol

Outra parte das medidas de MP_{2,5} foi realizada na torre do radar, nas dependências do curso de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas - MCFA,

localizado no campus da Universidade Estadual do Ceará - UECE e, outra, na Floresta Nacional do Araripe – Flona do Araripe, localizada no município de Crato, interior do estado do Ceará.

A Figura 13, a seguir, mostra uma foto aérea da torre do MCFA (UECE), onde foram feitas parte das medidas de $MP_{2,5}$.



Figura 13 – Local das medidas: Torre do radar no MCFA (UECE)
Fonte: Google Earth (2010)

3.2 Métodos de amostragem I (TPS, SO_2 e Fumaça Preta - 1993 a 2001)

Para medir as concentrações de Partículas Totais em Suspensão, PTS, foi empregado um Amostrador de Grandes Volumes (*Hi-Vol - Energética*) equipado com filtros modelo *E558x10IN* da Energética, Figura 14, de uso exclusivo da SEMACE.

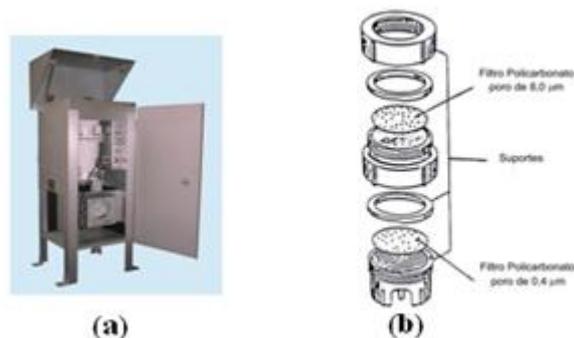


Figura 14 – (a) Amostrador de grandes volumes (*Hi-Vol*) para medidas de PTS e (b) sistema de filtração
Fonte: Energética

Para a determinação simultânea de SO_2 , e Fumaça Preta (*black carbon*) foi utilizado um Amostrador de Pequeno Volume (APV) (*OPSOMS-AOP - Energética*) ilustrado na Figura 15.



Figura 15 - Amostrador de Pequeno Volume (APV) para medida simultânea de SO_2 e Fumaça Preta.
Fonte: Energética

Em conjunto com o APV, para analisar a refletância da luz nos filtros amostrados com Fumaça Preta, foi utilizado um refletômetro de luz da marca Energética, mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Analisador da refletância da luz em filtros para a determinação da concentração de Fumaça Preta
Fonte: Energética

O refletômetro tem a finalidade de medir a refletância da luz incidente na mancha circular formada pela fumaça retida nos filtros. Utiliza, para isso, uma célula fotosensora.

3.2.1 Determinação das concentrações de PTS

O princípio do método utilizado para medir PTS com esses equipamentos consiste na sucção de ar ambiente para o interior de uma câmara, passando através de um filtro de fibra de vidro (modelo *E558x101N*), mantendo uma vazão média de 1,4 m³/min (impactação). As partículas em suspensão que apresentam diâmetros menores que 100 µm ficam retidas no filtro. Para calcular a concentração dessas partículas em unidades de µg/m³ é necessário medir a massa do material coletado e o volume de ar amostrado que é registrado através de uma carta gráfica.

O cálculo do volume de ar amostrado é feito integrando-se a carta gráfica que registra a deflexão da pena em intervalos de tempo pré-escolhidos.

A amostragem total é feita em um período de 24 horas, dividido em intervalos menores de tempo, de acordo com a deflexão da pena.

A Figura 17 mostra a carta gráfica utilizada para o cálculo do volume de ar amostrado, Var.

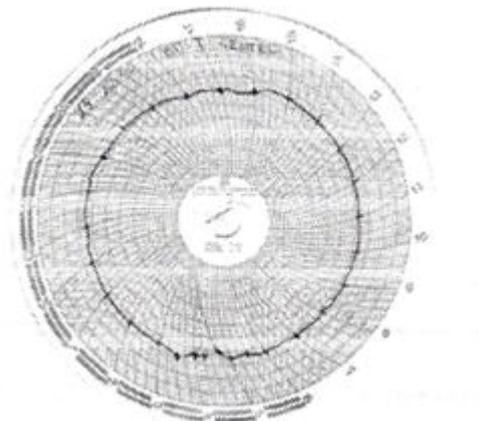


Figura 17 - Carta gráfica para avaliação do volume de ar amostrado
Fonte: SEMACE

Com os valores de deflexões encontrados, calculam-se os valores relativos de volume de ar amostrado Q , de acordo com a equação $y = 0,78 + 0,11x$ que é determinada no ato da calibração do equipamento.

O volume amostrado é determinado pelo produto entre o tempo de amostragem t e o valor Q . A Tabela 11 a seguir apresenta os resultados desse procedimento.

Tabela 11 - Valores de volume de ar amostrado em função da deflexão da pena

Deflexão da Pena	Tempo (min)	Q (m ³ /min)	Var (m ³)
6,25	15	1,4675	22,01
6,37	30	1,4812	44,44
6,37	30	1,4812	44,44
6,37	540	1,4812	799,87
6,25	60	1,4675	88,05
6,00	60	1,4400	86,40
5,90	60	1,4262	85,57
6,00	180	1,4400	259,20
6,37	360	1,4812	533,25
6,62	30	1,5087	45,26
6,62	30	1,5087	45,26
6,50	15	1,4950	22,42
Soma	1410		2076,17

Fonte de dados: SEMACE

Para a determinação da concentração C de PTS, adota-se a seguinte fórmula:

$$C = \frac{(m_f - m_i) \cdot 10^{-6}}{V} \quad (12)$$

onde:

m_f = massa do filtro após a amostragem em g

m_i = massa do filtro antes da amostragem em g

V = Volume amostrado em m³

10^{-6} = fator de conversão de unidades de g para µg

C = Concentração de PTS em µg/m³

3.2.2 Determinação das concentrações de SO₂.

Para a determinação SO₂ foram utilizados Amostradores de Pequenos Volumes equipados com filtros do tipo *Whatman* (catálogo nº 1001055) com diâmetro de 55 mm. Para a avaliação completa das concentrações de SO₂ e Fumaça (*blackcarbon*) foram realizados alguns procedimentos químicos não relatados aqui, mas que estão contemplados no ANEXO B deste estudo.

A avaliação do teor de dióxido de enxofre presente no ar amostrado foi realizada para a amostra de referência seguindo o procedimento:

1. Cálculo do volume de ar amostrado:

$$V = Q \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

onde,

Q = vazão de amostragem, em litros/minuto

V = volume de ar amostrado, em m³

T = tempo de amostragem, em minutos

O tempo total de amostragem foi de 1410 min e o volume de ar amostrado foi de 2,8 m³.

2. Selecionam-se as duas soluções, uma ácida e outra alcalina, preparadas de acordo com os procedimentos químicos do ANEXO B.
3. Calcula-se a concentração de SO₂ utilizando-se as seguintes fórmulas,

AMOSTRA ÁCIDA:

$$C_A = \frac{128 \cdot S}{0,9V} \quad (14)$$

onde:

$C_A =$ Concentração de SO_2 em $\mu g/m^3$

$S =$ Volume do titulante gasto, em mL

$V =$ Volume de ar amostrado

$$C_B = C_{NH_3} \cdot 1,88 \quad (15)$$

onde,

$C_B =$ Concentração de SO_2 corrigida, em $\mu g/m^3$

$C_{NH_3} =$ Concentração de amônia, NH_3 , em $\mu g/m^3$

A concentração C total de SO_2 é a soma $C = C_B + C_A$

AMOSTRA ALCALINA

$$C = 1,88 \frac{[C_{NH_3} - 68.S]}{0,9V} \quad (16)$$

Onde,

$C =$ Concentração de SO_2 , em $\mu g/m^3$

$S =$ Volume do titulante gasto, em mL

$V =$ Volume de ar amostrado, em m^3

$C_{NH_3} =$ Concentração de amônia, NH_3 , em $\mu g/m^3$

Na amostra de referência, a concentração de SO_2 mostrou-se ácida, assumindo a cor rosa após a adição do indicador misto. Usou-se o tetraborato para nova titulação até a amostra alcançar a cor cinza. Nesse caso, o volume do titulante foi de 0,7 mL. A concentração de SO_2 encontrada foi de 35,55 $\mu g/m^3$. Não foi necessário utilizar amônia nos cálculos, devido o teor deste se apresentar abaixo do limite de detecção.

3.2.3 Determinação das concentrações de Fumaça Preta (*black carbon*)

As concentrações de *black carbon* são determinadas usando-se outras formulas mas seguindo o mesmo procedimento descrito para SO₂.

$$C = \frac{s \cdot A}{V} \quad (17)$$

Onde,

C = Concentração de Fumaça, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$

S = Concentração superficial de Fumaça normalizada, em $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

V = Volume do ar amostrado, em m^3

A = Área da mancha sobre o filtro, em cm^2

Para o cálculo do índice de obscurecimento I, tem-se:

$$I = 100 - R \quad (18)$$

Onde,

I = Índice de obscurecimento

R = Refletância, em %

Considerando a amostra de referência para este caso, foi encontrado, para a Refletância, um valor de 80 % e para o índice de escurecimento $I = 20$.

A concentração superficial de Fumaça normalizada é um valor padrão internacional que vale $13,4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ e a área da mancha é de 10 cm^2 , válida para todos os filtros utilizados no estudo.

Substituindo-se esses valores na fórmula da Concentração encontrou-se:

$C = 47,86 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ de Fumaça no ar.

3.3 Métodos de amostragem II – [MP_{2,5}, CO, CO₂ e Fumaça Preta (*black carbon*)]

Como já explicado no início deste capítulo, as medidas de concentrações de Monóxido de Carbono, CO, Dióxido de Carbono, CO₂ e parte das medidas de concentrações de Material Particulado, MP_{2,5}, foram realizadas posteriormente (no ano de 2009), na miniestação meteorológica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), no bairro Benfica.

3.3.1 Medidas de MP_{2,5}

Para a determinação das concentrações de MP_{2,5}, foi utilizado um medidor de partículas *Minivol (Tactical Air Sampler)* da marca *AirMetrics – Eugene/Oregon/US*, pertencente à Universidade de São Paulo (USP). Esse equipamento, utilizado para monitorar PM₁₀ e PM_{2,5}, consiste basicamente de uma bomba de sucção controlada por um *timer* programável, um totalizador de tempo e um rotâmetro.

O *timer* ou horímetro registra o número de horas que a bomba fica em funcionamento e o rotâmetro mede o fluxo de ar durante o período de amostragem. O fluxo médio de sucção de ar, durante as medidas no *Minivol*, foi de 5 litros/min.

O período dessas medidas foi de 24 horas ininterruptas para cada filtro durante uma semana (02/12/2009 e 09/12/2009) e os filtros utilizados foram de fibra de vidro para partículas MP_{2,5}.

A figura 18 mostra uma foto do equipamento (*minivol*) utilizado nas medidas de MP_{2,5}, destacando o sistema de filtração do mesmo.



Figura 18 – Foto: Amostrador de material particulado (Minivol) e Sistema de filtração

A figura 19 mostra a estrutura interna do *minivol*, apresentando as partes mais importantes do seu funcionamento nas medidas de concentrações de MP.

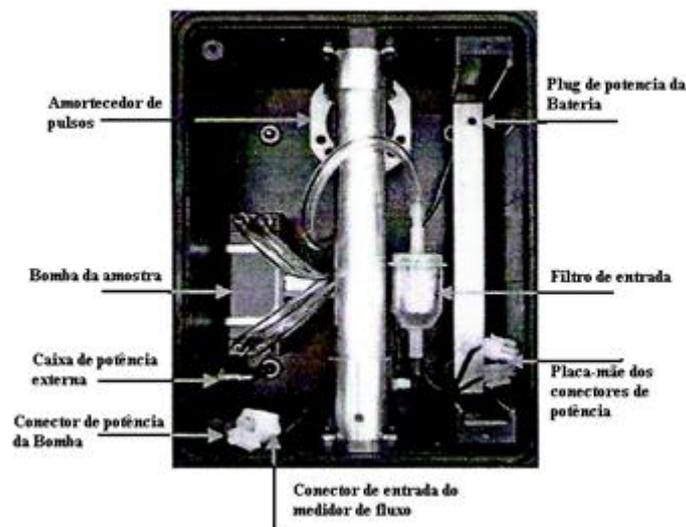


Figura 19 - Partes da estrutura interna do Minivol

O processo utilizado para determinação da densidade das emissões de $MP_{2,5}$ foi o de análise gravimétrica: os filtros amostrados no *Minivol* foram pesados, antes e depois da amostragem, em uma balança eletrônica de precisão nominal $1\mu g$,

pertencente ao Laboratório de Astrofísica e Pesquisas Atmosféricas – LAPAt, do IAG (USP).

Neste procedimento, antes da pesagem, os filtros ficam sob a ação de fontes de Po^{210} a fim de serem descarregados eletrostaticamente, pois as pequenas forças elétricas que eventualmente possam existir influenciam a medida acurada da massa.

Em seguida, são feitas duas pesagens com um intervalo médio de 24 horas, calculando-se uma média entre as duas medidas. Estes procedimentos são realizados em ambiente climatizado com temperatura de 25° C e umidade relativa do ar de ~ 60%.

As concentrações em massa depositadas nos filtros são calculadas pela diferença entre as massas dos filtros amostrados e as massas dos filtros de controle (não amostrados). De posse do volume total amostrado, calculado por um totalizador de volume, são feitos os cálculos de densidade das concentrações dos poluentes. Os filtros de controle, também chamados “filtros brancos”, são usados para detectar uma possível contaminação dos filtros amostrados durante o processo de transporte, manuseio e realização dos experimentos. Esse processo, comentado anteriormente, é idêntico ao processo de determinação de PTS realizado pela SEMACE no período de 1993 a 2001.

3.3.2 Determinação de Fumaça Preta (*black carbon*)

O carbono elementar (CE), também conhecido como *black carbon* ou Fumaça Preta, é um aerossol atmosférico característico da queima incompleta de vários combustíveis, principalmente de subprodutos do petróleo (como gasolina e óleo diesel) e da queima da biomassa (vegetação, florestas). (CETESB, 2006). É também um dos constituintes do material particulado em suspensão e um dos poluentes atmosféricos que ultrapassam freqüentemente os padrões estabelecidos na legislação, principalmente em ambientes urbanos.

O carbono elementar possui alta capacidade de absorção de luz, interferindo no balanço radioativo da terra; mudanças na temperatura e precipitação.

Os efeitos da elevada concentração desses poluentes no ar estão relacionados ao aumento de doenças respiratórias, acidificação de ambientes lacustres e florestais e alterações climáticas locais, regionais e globais.

Para a determinação das concentrações desse poluente foi utilizado o Aetalômetro (*Aethalometer*), Figura 20, cujo princípio básico é medir a atenuação de um feixe de luz que atravessa diretamente um filtro amostrado com aerossol, em tempo real.



Figura 20 – Aetalômetro – medidor de Fumaça preta (*black carbon*) pertencente ao LAPAt (IAG – USP)
Fonte: LAPAt (2009)

Esta medida é feita em intervalos regulares sucessivos de um período pré-determinado. Usando o valor apropriado da atenuação específica do feixe de luz para essa combinação particular do filtro e de componentes óticos, pode-se determinar a massa de carbono elementar que é deposita juntamente com o aerossol em cada momento da medida. O aumento na atenuação ótica de um período para outro, é devido ao incremento de carbono elementar do aerossol coletado durante o referido período. Dividindo este incremento pelo volume de ar durante esse tempo, pode-se calcular a concentração do *black carbon* no ar amostrado durante o período.

3.3.3 Medidas de CO e CO₂.

Além das medidas de material particulado, foram realizadas também medidas dos gases Monóxido de Carbono – CO, e Dióxido de Carbono CO₂, na miniestação do Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Térmico - LERCA, do IFCE, através de sensores da marca *HOBO* da empresa *Onset*, modelos *H-11* (medida de CO) e *Telaire 7001* (medida de CO₂). Os equipamentos utilizados para medir Monóxido e Dióxido de Carbono foram dispostos em Espécies de “gaiolas”, a uma altura aproximada de 3 metros do solo como mostra a figura 21 a seguir:



Figura 21 - Visão externa e interna da miniestação de CO e CO₂ LERCA - IFCE
Fonte: Silva (2009)

As medidas de Monóxido de Carbono, CO, foram realizadas no período compreendido entre 01/06/2009 e 23/06/2009 e foram monitoradas com medidas de temperatura e umidade relativa do ar.

O *HOBO H-11*, mostrado na Figura 22, é composto por três filtros capazes de medir os níveis de monóxido de carbono presentes na atmosfera num raio de 1500 m.

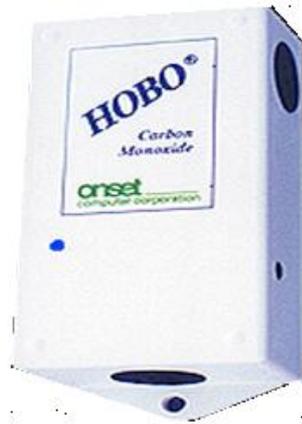


Figura 22 – HOBO H-11 - Sensor automático para medir CO
Fonte: Banco de dados do LERCA

É importante observar que esse dispositivo funciona apenas como um registrador/gravador de dados com capacidade de realizar pouco mais de 30.000 medições. Sua capacidade de medida varia de 0,5 segundo até 9 horas com um tempo de gravação acima de 1 ano. O registrador de dados desse aparelho não dispõe de um dispositivo de advertência para exposições de monóxido de carbono em níveis fora dos padrões.

Para medir Dióxido de Carbono (CO₂), foi utilizado um sensor automático da marca HOBO, modelo *Telaire 7001*, composto de sensor de CO₂, sensor de temperatura e sensor de umidade relativa do ar (UR).

O *Telaire 7001*, mostrado na Figura 23 é capaz de medir numa escala de 0 a 4000 ppm com precisão de ± 1 ppm.



Figura 23 - *Telaire 7001* - Sensor automático para medir CO₂ com HOBO Logger U12 013
Fonte: Banco de dados do LERCA (2009)

Para medir temperatura e umidade relativa do ar, foi utilizado o sensor *HOBO H 08* que possui capacidade de armazenagem de mais de 7000 registros.

O *HOBO H 08* (Figura 24) trabalha numa faixa de temperatura de -20°C a 70°C para temperaturas com uma exatidão de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ e numa faixa de 25% a 95% para umidade relativa, com uma exatidão de 5%, podendo gravar intervalos de amostragem de 0,5 s a 9h.



Figura 24 - *HOBO H 08* Sensor de temperatura e umidade
Fonte: Banco de dados do LERCA

Por ser bastante sensível às radiações térmicas, mesmo em ambientes fechados, o aparelho deve ser devidamente protegido da incidência de luz solar. Para isso, utiliza-se um recipiente de PVC (Figura 25), também da marca *HOBO* com pequenas aberturas que permitem a livre circulação de ar para o interior do sensor. Este procedimento evita que a radiação térmica interfira nas medidas de temperatura.



Figura 25- Protetor externo do sensor *HOBO H 08*
Fonte: Banco de dados do LERCA

3.4 Análise estatística dos poluentes

A segunda parte da metodologia usada nesse estudo trata das correlações entre algumas variáveis que dependem ou que influenciam a poluição atmosférica.

Nesse estudo foram consideradas variáveis dependentes da poluição atmosférica: a saúde da população, o estado físico-químico do meio ambiente. Igualmente, fatores como crescimento populacional, produção de energia, número de veículos automotores circulantes, atividades industriais e modificações da topografia, esta última, associada às atividades de mineralogia, desmatamento e ocupação do solo, foram consideradas variáveis altamente influenciadoras da poluição atmosférica, embora alguns destes estejam correlacionados entre si.

A metodologia utilizada nessa parte do estudo envolve cálculos estatísticos e probabilísticos, parcialmente comentados no capítulo 2 e descritos no Anexo A.

Os estudos relacionados à Regressão com ajustamento de curvas, abordados naquele capítulo, têm como objetivos obter resultados teóricos sobre o problema estudado. Os resultados dessa análise estatística estão explicitados no capítulo 4.

4 RESULTADOS e DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, os resultados das concentrações de PTS, SO₂ e Fumaça Preta - FP realizadas no período entre 1993 e 2001, nas estações da SEMACE, em Fortaleza, e, em seguida, os resultados das concentrações de MP_{2,5}, CO₂, CO e Fumaça Preta - FP realizados pelo LERCA – IFCE e MCFA – UECE, durante o ano de 2009.

4.1 Resultados para PTS, SO₂ e FP (1993 a 2001)

A Tabela 12, a seguir, mostra os valores da Média Geométrica Anual – MGA das concentrações de Partículas Totais em Suspensão – PTS, Dióxido de Enxofre – SO₂ e Fumaça Preta – FP, obtidos no período de 1993 a 2001 na Estação-I, localizada no centro de Fortaleza. Pode-se observar que, nesse conjunto de medidas, todos os valores para PTS, exceto nos anos de 1994 e 1996, estão acima da média padrão que é de 80 µg/m³.

Tabela 12 - Qualidade do ar no período de 1993 a 2001 para PTS, SO₂ e Fumaça Preta na Estação I

I Ano	PTS		SO ₂		Fumaça Preta	
	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar
1993	83,88	Regular	*	*	*	*
1994	77,47	Boa	16,47	Boa	*	*
1995	80,45	Regular	*	*	*	*
1996	78,53	Boa	*	*	*	*
1997	90,10	Regular	*	*	*	*
1998	81,67	Regular	67,2	Boa	36,70	Boa
1999	83,65	Regular	52,90	Boa	64,60	Boa
2000	94,17	Regular	43,10	Boa	69,40	Regular
2001	117,61	Regular	*	*	*	*

Fonte SEMACE
*Sem informação

Observa-se que o valor médio máximo das concentrações medidas em 2001, que foi de $117,61\mu\text{g}/\text{m}^3$, representa cerca de 31% do valor do nível de ATENÇÃO e 19% do nível de ALERTA.

Com relação a SO_2 e FP, a qualidade do ar se manteve BOA sem apresentar qualquer valor de concentração fora dos padrões.

Na Estação II, em Maracanaú, para todos os poluentes analisados, observou-se que apenas um valor da Média Geométrica Anual com qualidade REGULAR, no caso, para o Dióxido de Enxofre - SO_2 , correspondente ao ano de 1996.

A BOA qualidade do ar atmosférico nessa região acredita-se, tenha sido devido à fiscalização dos órgãos governamentais nas indústrias causadoras das emissões, aliada à ação dos ventos que são muito importantes na dispersão dos poluentes atmosféricos. A Tabela 13 mostra esses valores.

Tabela 13 - Qualidade do ar no período de 1993 a 2000 para PTS, SO_2 e Fumaça Preta na Estação II

II	PTS		SO_2		Fumaça Preta		
	Ano	MGA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Qualidade do Ar	MGA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Qualidade do Ar	MGA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Qualidade do Ar
	1993	46,13	Boa	38,50	Boa	17,26	Boa
	1994	55,39	Boa	46,17	Boa	17,47	Boa
	1995	48,71	Boa	77,83	Boa	20,43	Boa
	1996	60,22	Boa	98,90	Regular	25,82	Boa
	1997	71,46	Boa	*	*	*	*
	1998	74,93	Boa	23,00	Boa	23,70	Boa
	1999	62,12	Boa	16,30	Boa	24,50	Boa
	2000	63,14	Boa	18,80	Boa	23,40	Boa

Fonte: SEMACE

*Sem informação

Na região da Estação III, foram observados valores para PTS acima da Média Geométrica Anual de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$, notadamente no ano de 1998, em que o valor observado é próximo do padrão secundário de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nessa estação são medidas tanto emissões produzidas por atividades industriais como por tráfego veicular. Pode-se observar que na região dessa estação a qualidade do ar tem se mantida de REGULAR a BOA com relação a PTS e SO_2 , e BOA com relação à Fumaça Preta.

Na Tabela 14 estão registrados os valores das concentrações desses poluentes no referido período. De acordo com essa tabela, as concentrações de PTS tiveram um aumento nos anos de 1997, 1998 e diminuíram em 1999 e 2000. Acredita-se que esses aumentos correspondem às obras de manutenção da via expressa, ocorridas entre Julho de 1997 a Março de 1999. Em 1994, a estação estava localizada próxima a uma fonte de material particulado (marcenaria) fazendo com que a concentração de PTS ultrapassasse o valor padrão. Em 1995 a estação foi transferida de modo a evitar outras interferências.

Tabela 14 – Qualidade do ar no período de 1993 a 2000 para PTS, SO₂ e Fumaça Preta- Estação III

III Ano	PTS		SO ₂		Fumaça Preta	
	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar
1993	*	*	*	*	*	*
1994	113,67	Regular	89,35	Regular	22,68	Boa
1995	80,90	Regular	91,13	Regular	25,28	Boa
1996	77,03	Boa	89,52	Regular	23,16	Boa
1997	97,54	Regular	55,20	Boa	29,26	Boa
1998	143,10	Regular	33,86	Boa	24,32	Boa
1999	79,61	Regular	15,44	Boa	24,97	Boa
2000	65,41	Boa	14,92	Boa	26,54	Boa

Fonte:SEMACE

*Sem informação

A Estação IV, localizada no bairro Castelão e posta a funcionar a partir de 1997, mede as emissões produzidas pelo lixo do Aterro Sanitário de Jangurussú. Nessa estação não foram verificadas grandes variações nas concentrações dos poluentes, embora a qualidade do ar em relação a PTS tenha se mantido de REGULAR a BOA. A Tabela 15 mostra os valores observados:

Tabela 15 - Qualidade do ar no período de 1997 a 2000 para PTS, SO₂ e Fumaça Preta- Estação IV

IV Ano	PTS		SO ₂		Fumaça Preta	
	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar	MGA (µg/m ³)	Qualidade do Ar
1997	122,7	Regular	43,06	Boa	26,52	Boa
1998	95,96	Regular	24,20	Boa	28,30	Boa
1999	76,6	Boa	25,10	Boa	27,40	Boa
2000	84,86	Regular	24,40	Boa	22,20	Boa
2000	84,86	Regular	24,40	Boa	22,20	Boa

Fonte:SEMACE

A fim de complementar a avaliação desses resultados, foi feita uma análise temporal no período de 1993 a 2001, dos valores médios geométricos anuais das concentrações de PTS, referentes à estação I, no centro. Essa estação foi considerada aquela que apresentou os maiores valores de concentrações observados. Além disso, é o local de medidas exposto às maiores emissões do tráfego veicular.

Na Tabela 16 estão registrados os valores das referidas concentrações anuais e a respectiva qualidade do ar.

Tabela 16 - Qualidade do ar no período de 1993 a 2001 - Estação I

ANO	PTS (MGA) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	QUALIDADE DO AR
1993	83,88	regular
1994	77,47	Boa
1995	80,45	regular
1996	78,53	Boa
1997	89,96	regular
1998	81,67	regular
1999	83,65	regular
2000	94,17	regular
2001	117,61	regular

Fonte: SEMACE

A análise mostrou que, nessa estação e no referido período, a qualidade do ar se apresentou BOA nos anos de 1994 e 1996, mas mostrou-se REGULAR com uma tendência a se tornar INADEQUADA nos anos após 2001.

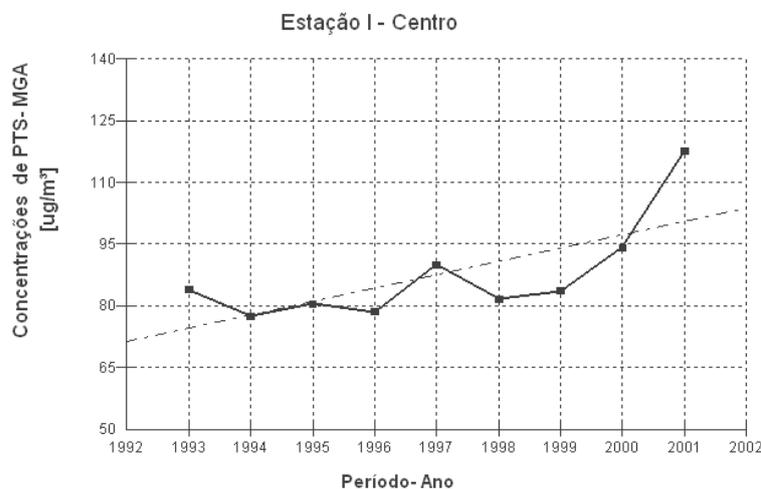


Figura 26 - Diagrama das concentrações (MGA) de PTS para estação I
Fonte: SEMACE

Na Tabela 17 estão registrados os valores máximos mensais das concentrações de PTS da estação I, no período compreendido entre 1997 e 2001. Nessa tabela, é possível observar que no mês de Agosto do ano 2000 os valores das concentrações de PTS atingiram um máximo de 145,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor esse que representa 96,8% da média diária do padrão secundário que é de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabela 17 - Concentrações PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Valores máximos mensais - Estação I Centro

Concentrações de PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
Mês/Ano	1997	1998	1999	2000	2001
JAN	105.9	126.6	85.2	105.9	105.9
FEV	66.84	99.1	81	88.1	83.76
MAR	104.25	70.7	82.1	85.68	85.68
ABR	63.82	126.5	100.5	75.7	91.63
MAI	62.45	100.8	115.2	105.4	110.6
JUN	86.38	98.1	99.7	106.8	130.6
JUL	112.35	82.1	108.1	94.2	105.8
AGO	110.4	95.1	114.6	145.2	125.2
SET	116.44	101.5	106.8	120.1	111.21
OUT	105.45	105.45	90.1	120.8	105.45
NOV	102.88	93	99.4	120.3	103.89
DEZ	82.42	101.9	132.5	105.6	105.6
Média anual	93,3	100,1	101,3	106,2	105,4

Fonte:SEMACE (2001)

No diagrama da Figura 27 estão representados os valores da Tabela 17 mostrando a reta de regressão tendenciosa.

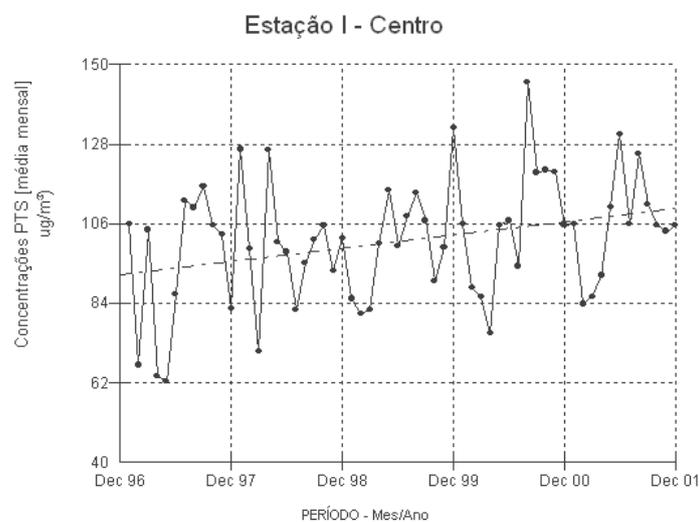


Figura 27 – Diagrama da variação dos valores médios mensais de PTS - Estação I
Fonte:SEMACE(2001)

Esses resultados, aparentemente, variações sazonais, embora não apresentem um padrão bem definido, mostram também que, durante o período de 1993 a 2001, a qualidade do ar no centro da cidade de Fortaleza, com relação a PTS, esteve entre REGULAR e BOA, mas com tendências de passar a INADEQUADA.

4.2 Resultados para CO, CO₂, MP_{2,5} e Fumaça Preta (*black carbon*) (2009)

As medidas das concentrações apresentadas a seguir foram realizadas em locais diferentes. As concentrações dos gases Monóxido e Dióxido de Carbono e parte das concentrações de MP_{2,5} e Fumaça Preta, foram medidas na miniestação do LERCA-IFCE, nas proximidades do cruzamento das Avenidas 13 de Maio com Expedicionários. O restante das medidas de MP_{2,5} e Fumaça Preta foi realizado, parte na Floresta Nacional do Araripe e parte na torre do radar, na UECE. Os resultados encontrados se apresentaram abaixo dos padrões estabelecidos e aceitáveis.

4.2.1 Resultados para Monóxido de Carbono, CO.

Os resultados das medidas de concentrações de monóxido de carbono se apresentaram abaixo dos níveis aceitáveis dos padrões estabelecidos pela legislação que é de 9 ppm ou 10.000 µg/m³, numa amostragem de 8 horas diárias.

Durante o período dessas medidas, realizadas de 01/06/2009 a 23/06/2009, também foram coletados valores de temperatura e umidade relativa do ar.

Esses resultados demonstraram que, embora, o local dessas medidas apresentasse um intenso tráfego veicular, a qualidade do ar, no período analisado, permaneceu BOA, exceto no dia 02/06 quando o valor das concentrações atingiu 5,5 ppm, considerado REGULAR.

Esse valor máximo do período corresponde a 61,1% do padrão primário. A Figura 28 mostra as variações desses valores. A linha horizontal vermelha, no gráfico, representa o valor do padrão primário.

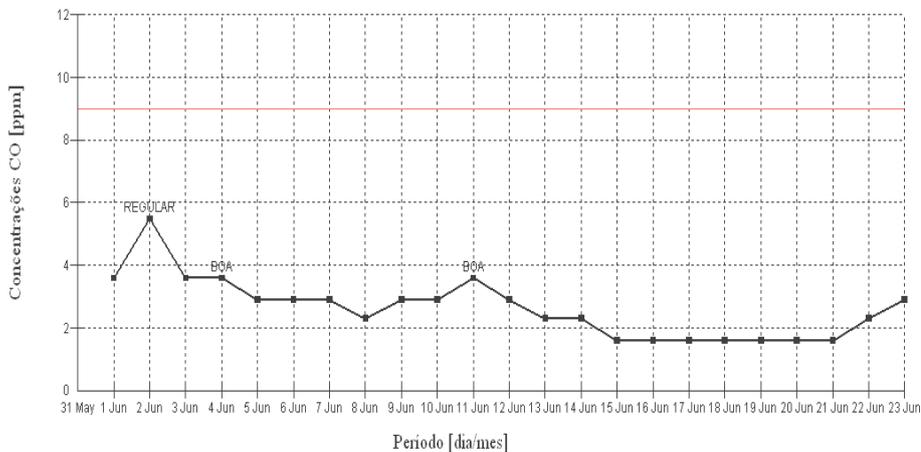


Figura 28 – Concentrações de Monóxido de Carbono, temperatura e umidade relativa do ar
Fonte de dados: Miiniestação do LERCA - IFCE

Levando em consideração o curto período estudado para esse poluente, não foi possível observar qualquer variação que definisse um estado estacionário ou uma periodicidade nas suas concentrações. Por isso, a continuidade desse procedimento é importante para a construção de bancos de dados e séries históricas, dado que o monóxido de carbono é um dos poluentes regulamentados pela legislação por ser um componente atmosférico altamente venenoso.

4.2.2 Resultados para Dióxido de Carbono (CO₂)

Quanto ao Dióxido de Carbono, CO₂, o período escolhido para realização das medidas foi entre 27/07/2009 e 03/08/2009. Esse período marca o início das chamadas “chuvas do caju”, e se caracteriza pela presença de ventos intensos.

Nesse caso, também não foram observados valores fora dos padrões para a região analisada. Na Tabela 19 e Figura 29 estão registrados os valores das concentrações de CO₂ e os respectivos valores de temperatura e umidade relativa do ar correspondente ao referido período:

Tabela 18 - Média diária-concentrações de CO₂ (ppm), UR (%) e Temperatura (°C)

Dia/mês	Média de CO₂ (ppm)	Umidade Relativa (%)	Temperatura do Ar (°C)
27/07	382,83	76,55	26,74
28/07	373,21	68,55	28,47
29/07	371,98	71,24	28,30
30/07	364,83	70,21	28,63
31/07	365,58	69,54	28,41
01/08	363,63	69,73	28,17
02/08	361,96	70,04	27,97
03/08	368,67	64,97	28,91
04/08	379,08	68,26	27,90
05/08	362,08	71,34	28,22
06/08	364,96	68,53	28,59
07/08	357,63	71,67	28,60
08/08	359,15	65,69	28,26
09/08	364,98	67,10	28,26
10/08	349,56	70,48	28,07
11/08	349,00	73,11	28,01

Fonte: Banco de dados do LERCA (IFCE)

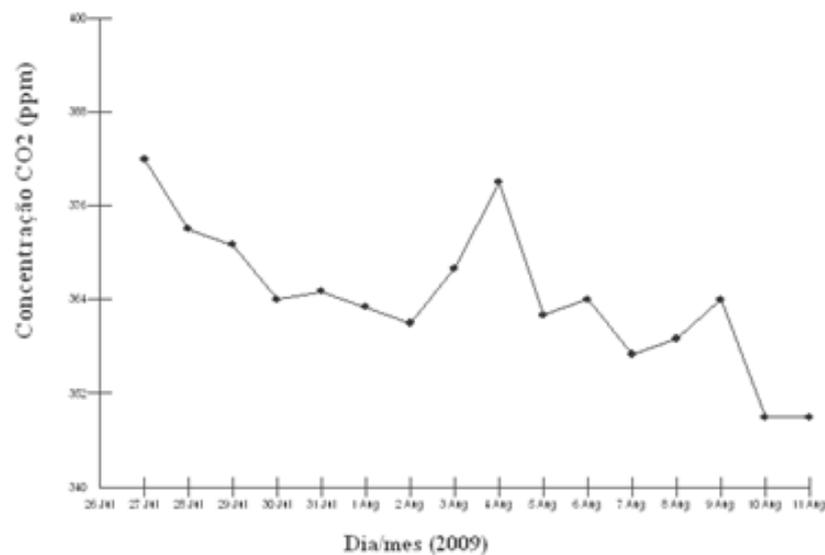


Figura 29 – Concentrações de CO₂ - Médias diárias -
Fonte: Banco de dados do LERCA (IFCE)

No período dessas medidas, o máximo valor de concentração de CO₂ registrado foi de 382,2 ppm, e o mínimo, foi de 362 ppm, resultados que se apresentam dentro do intervalo tolerado determinado pela legislação que é o máximo de 400 ppm e o mínimo de 340 ppm. Na Figura 29 está registrada a variação dessas concentrações

Nessas condições, considerou-se que a qualidade do ar, em relação a Dióxido de Carbono, foi BOA no período e na região das medidas.

O CO₂ não é considerado um gás poluente dentro da camada troposférica. No entanto, segundo alguns pesquisadores, esse gás, juntamente com alguns compostos formados por carbono, os clorofluorcarbonos - CFC's, por exemplo, são responsáveis pelo aquecimento global por reter o calor emitido pela Terra.

4.2.3 Resultados para MP_{2,5}

As medidas das concentrações de MP_{2,5}, como já citado anteriormente, foram realizadas em locais diferentes, inclusive fora da região do estudo, como parte do projeto “Convecção sobre o Nordeste Brasileiro: variabilidade em múltiplas escalas” (CONBINE).

. Este procedimento facilitou a comparação entre as concentrações obtidas em cada ponto de medida e ajudou a referenciar valores de regiões com características diferenciadas.

As medidas de MP_{2,5} foram iniciadas em 16/11/2009, na Floresta Nacional do Araripe (Flona do Araripe), localizada no município de Crato, no interior do estado do Ceará, Continuadas na torre do radar, na UECE e finalizadas em 09/12/2009, na miniestação do Laboratório de Energias Alternativas e Conforto Térmico, LERCA, pertencente ao IFCE.

As medidas realizadas na Flona do Araripe correspondem aos filtros numerados de 1 a 5, expostos durante 24 horas ininterruptas. Em seguida foram realizadas medidas na torre do radar, localizada no campus do Itaperí, UECE, correspondendo aos filtros 6 a 10, e, finalmente, na miniestação do LERCA – IFCE,

correspondendo aos filtros 11 a 17. O resultado geral está apresentado no diagrama da Figura 30, a seguir:

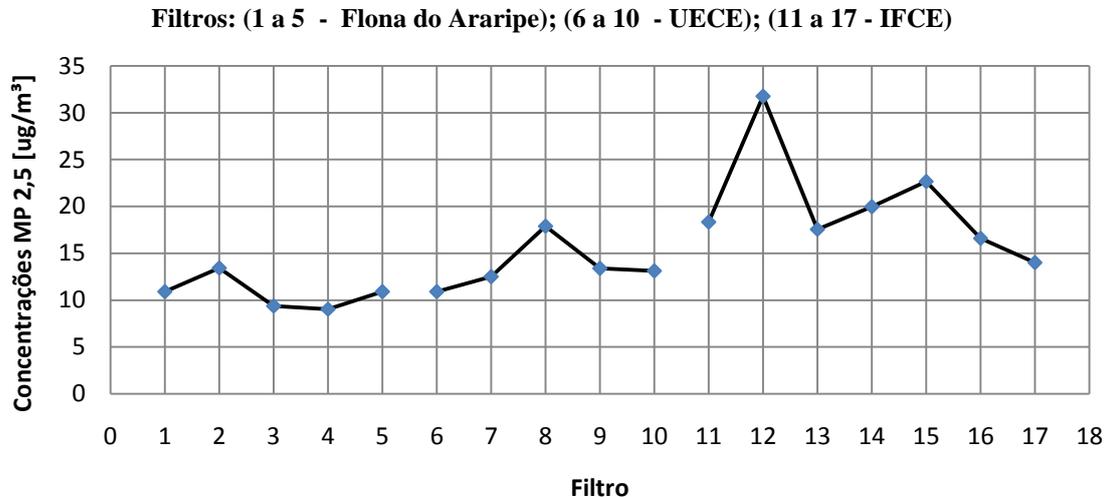


Figura 30 – Valores das concentrações de MP_{2,5} em regiões de características diferentes.
Fonte: CONBINE/UECE/IFCE

As diferenças observadas nos valores das concentrações medidas para MP_{2,5}, podem ser justificadas considerando-se os seguintes aspectos: características diferentes entre as regiões das medidas, distâncias diferentes entre o sistema de medidas *(minivol)* e as fontes emissoras em cada local de medida.

A Tabela 20 mostra os valores das concentrações de MP_{2,5} (filtros 11 a 16), temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, medidos na miniestação do LERCA – IFCE:

Tabela 19 - Concentrações de MP_{2,5} e Variáveis meteorológicas medidas no IFCE

Data	MP _{2,5} (ug/m ³)	T (°C)	UR(%)	Vento	
				Velocidade (m/s)	Direção (°)
3/dez	18.34	28.4	65.6	1.5	267
4/dez	31,77	28.5	68.3	1.5	269
5/dez	17.57	28.3	71.9	1.5	263
6/dez	19.99	28.4	71.4	1.5	266
7/dez	22.66	28.8	68.3	1.5	261
8/dez	16.60	28.6	66.3	1.6	253
9/dez	14.02	28.3	65.5	1.6	252

Fonte: CONBINE/UECE/IFCE

As medidas realizadas entre os dias 04 e 05 de Dezembro, no IFCE, correspondentes ao filtro 12, apresentaram valores de concentrações atípicos, em relação aos demais, em razão de problemas técnicos durante o procedimento.

Nesse local (LERCA – IFCE), o sistema de medidas foi posicionado a uma distância média de 50 metros do cruzamento das vias onde ocorria a maior atividade emissora. A presença de edificações próximas também pode ter influenciado os resultados através de turbulências indesejáveis e variações na intensidade e direção da velocidade do vento. A Figura 31 mostra um gráfico dos valores máximo e mínimo das concentrações de $MP_{2,5}$, identificando a amplitude em cada local de medida. Pode-se observar que no IFCE a intensidade e a amplitude dessas concentrações foram maiores.

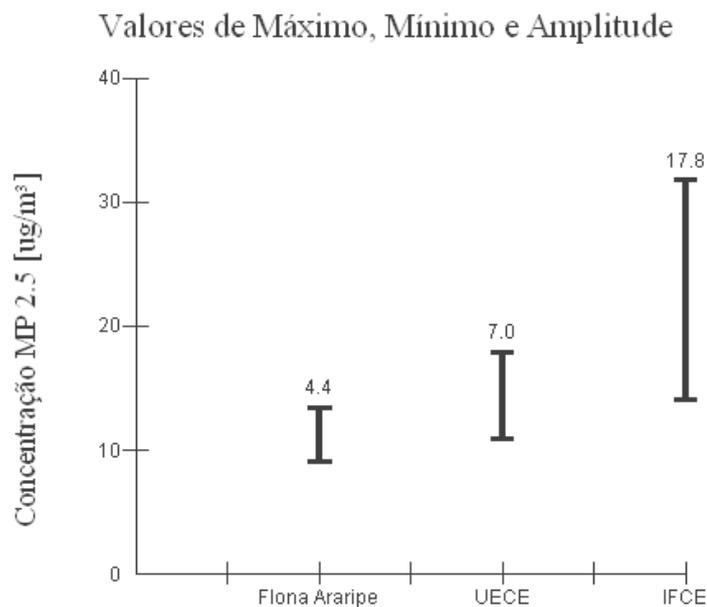


Figura 31 - Valores máximo, mínimo e amplitude das concentrações de $MP_{2,5}$
Fonte: CONBINE/UECE/IFCE

Durante o período dessas medidas, foi observado que a velocidade do vento variou em intensidade atingindo valores: máximo de 2,2 m/s e mínimo de 0,7 m/s.

Na UECE, o sistema de medidas foi posicionado a uma distância média de 1 km da maior atividade emissora considerada, mas nesse caso, as grandes edificações foram evitadas.

4.2.4 Resultados para Fumaça Preta (*black carbon*)

As medidas das concentrações de Fumaça Preta (*black carbon*), como eram de ser esperadas, também se apresentaram abaixo dos padrões primários da média diária que é de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$

Em Fortaleza, após uma intensa campanha de combate à poluição atmosférica de Fumaça Preta realizada pela SEMACE, os índices de concentrações desse poluente tiveram seus valores reduzidos e a qualidade do ar, em relação ao mesmo, tem permanecido BOA. A Figura 32 mostra como variou o percentual de veículos que tiveram suas emissões reduzidas durante a campanha de combate à Fumaça Preta entre 1990 e 1997, com o uso de catalisadores:

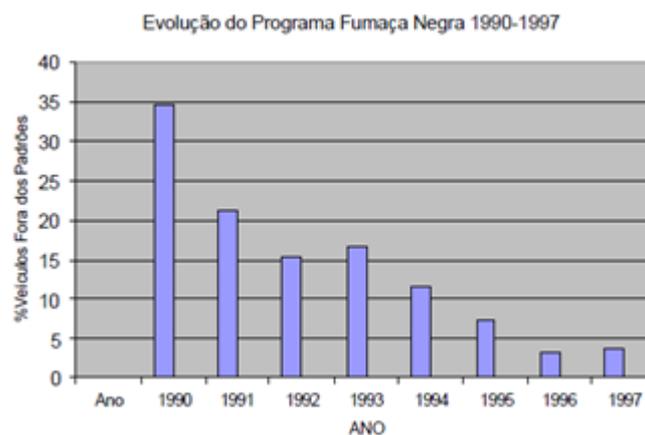


Figura 32 – Resultados do programa de combate à poluição atmosférica: Fumaça Preta (90 a 97):
Fonte: SEMACE (2000)

Os valores medidos para as concentrações de *black carbon*, no período de 2009, embora muito abaixo dos padrões aceitáveis pela legislação, mostraram que há uma variação nas intensidades dessas concentrações com relação ao local das medidas. Igualmente, como para $\text{MP}_{2,5}$, essas diferenças podem ser explicadas pelos mesmos motivos já citados. A Tabela 21 apresenta os valores dessas concentrações, como também, as variáveis meteorológicas medidas simultaneamente.

Tabela 20 - Valores das concentrações de *blackcarbon* e variáveis meteorológicas medidas no IFCE

Data	<i>Black carbon</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	UR(%)	Vento	
				Velocidade (m/s)	Direção ($^{\circ}$)
3/dez	2.114593	28.4	65.6	1.5	267
4/dez	2.669248	28.5	68.3	1.5	269
5/dez	2.084356	28.3	71.9	1.5	263
6/dez	1.355470	28.4	71.4	1.5	266
7/dez	2.197047	28.8	68.3	1.5	261
8/dez	2.278930	28.6	66.3	1.6	253
9/dez	2.202286	28.3	65.5	1.6	252

Fonte: CONBINE/UECE/IFCE

A Figura 33 mostra as um gráfico das variações dessas concentrações medidas pelo *Minivol* no período correspondente ao das medidas do $\text{MP}_{2,5}$.

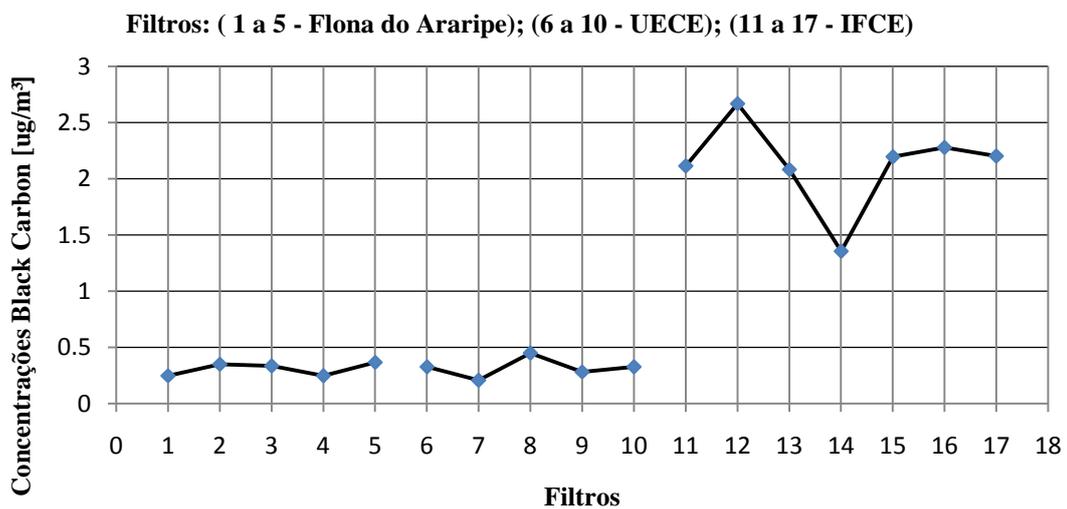


Figura 33 - Valores de concentrações para Fumaça Negra (*black carbon*)
Fonte: CONBINE/UECE/IFCE(2009)

A Figura 34 mostra os valores máximo, mínimo e a amplitude das concentrações de *black carbon* medidas nos mesmos locais e nas mesmas condições das medidas das concentrações de $\text{MP}_{2,5}$.

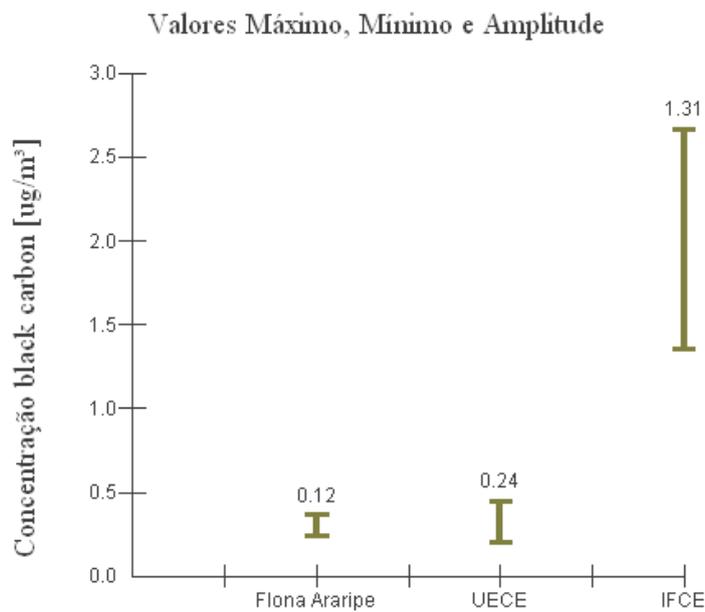


Figura 34 - Valores máximo, mínimo e amplitude das concentrações de *black carbon* medidas no IFCE.
Fonte: CONBINE/UECE/IFCE

4.3 Análise Estatística das Variáveis

Nesse ponto, são mostrados os resultados das análises estatísticas realizadas entre as concentrações das Partículas Totais em Suspensão – PTS, e as variáveis consideradas dependentes e independentes da poluição atmosférica, de acordo como explicitado nos objetivos específicos do Capítulo 1. A razão pela qual o poluente PTS foi escolhido para as análises estatísticas reside no fato deste ter sido medido num maior período e ter apresentado as maiores concentrações.

Todos os resultados estatísticos e gráficos apresentados a seguir foram obtidos através do programa computacional *BioEstat 5*.

A análise estatística consistiu de regressão com ajustamento de curvas onde foi destacado o melhor resultado explicado pelo modelo.

4.3.1 Regressão: PTS (Estação I-centro) e Tempo.

Para as emissões médias mensais de PTS da Estação I, no período de 1993 a 2001, foi realizado o teste de regressão com ajustamento de curvas que apresentou os resultados mostrados na Tabela 22. De acordo com essa tabela, o melhor resultado para esse teste está representado pelo Coeficiente de Determinação da última coluna pela *regressão geométrica* ($r^2 = 11,31\%$).

Do ponto de vista estatístico, os resultados obtidos não foram conclusivos, uma vez que os valores dos parâmetros que explicam essa relação estão abaixo dos padrões considerados válidos pela estatística.

Tabela 21 - Parâmetros da Regressão para valores médios mensais de PTS e TEMPO de 1997 a 2001

REGRESSÃO	Linear	Exponencial	Logarítmica	Geométrica
Tamanho da amostra	60	60	60	60
Intercepto (a)	91.8505	90.0817	82.8058	81.1552
Coef. regressão (b)	0.308	0.0033	5.8654	0.0657
Coef. Determ. (r^2)	10.01%	11.06%	9.66%	11.31%
Média (X)	30.5	30.5	23.1919	23.1919
Média (Y)	101.2455	99.7707	101.2455	99.7707
Var. independente	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO
Var. dependente	PTS	PTS	PTS	PTS
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * e^{(bX)}$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	58	58	58	58
Valor (p) =	0.0137	0.0094	0.0156	0.0086

Fonte de dados; SEMACE

De acordo com a maioria dos estatísticos, os resultados das análises de regressão só podem ser relevados quando o modelo é capaz de “explicar” cerca de 70% da variação proporcional de uma variável dependente, em relação a outra, independente. Essa “explicação” é determinada pelo coeficiente de determinação (r^2), definido no Anexo A deste estudo.

A Tabela 22 registra o valor de r^2 para algumas formas de regressão mostrando que a geométrica apresenta o maior valor para esse parâmetro ($r^2 = 11,31\%$), nessa relação. A Figura 35 mostra o diagrama de dispersão da referida relação e a curva ajustada.

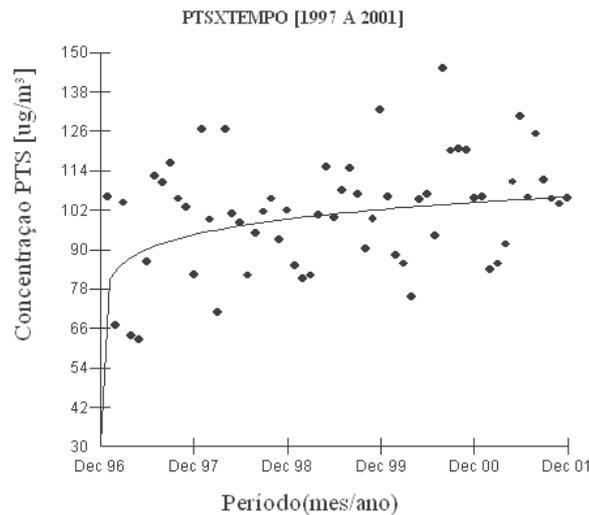


Figura 35 – Diagrama da relação Geométrica: PTS e TEMPO (1993 a 2001)
Fonte: SEMACE

Do ponto de vista matemático, os resultados apresentados pelo modelo de regressão têm um significado importante porque permitem que se façam projeções futuras dos valores da variável PTS.

Para exemplificar, substitui-se os valores dos parâmetros *a* (Intercepto) e *b* (Coeficiente de determinação) na equação de regressão geométrica, fazendo-se uma estimativa de Y' (PTS) para $X(\text{ano}) = 2010$.

O valor estimado para Y' , nesse caso, é de $133,7631 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esse valor representa um aumento de cerca de 67% no valor da Média Geométrica Anual do padrão primário ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), e de cerca de 90 % do padrão primário ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Como o valor estimado recai sobre a curva ajustada, caso seja levado em consideração a variação em torno da mesma, provavelmente, poderiam ser encontrados valores maiores para as concentrações de PTS.

No entanto, pela própria evolução da curva de regressão, os aumentos nos valores estimados de Y' , aparentemente, tenderão a ser cada vez menores. Uma extrapolação para o ano $X = 2020$, por exemplo, fornece um valor estimado para Y' de $133,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que não representa um aumento considerável em relação ao valor do ano 2010.

A análise estatística feita com as concentrações anuais de PTS, em relação ao tempo, apresentou valores mais representativos que os do teste anterior. Na Tabela 23, na coluna de regressão exponencial, estão registrados os parâmetros dessa análise onde se destacam o coeficiente de determinação r^2 (52,06%) e o *valor p* (0,0282):

Tabela 21 – Parâmetros de regressão para concentração de PTS e Tempo – 1993 a 2001 (valores anuais)

REGRESSÃO	Linear	Exponencial	Logarítmica	Geométrica
Tamanho da amostra	9	9	9	9
Intercepto (a)	-6388.1176	0	-49101.8996	0
Coef. regressão (b)	3.2427	0.0342	6472.7984	68.362
Coef. Determin. (r^2)	50.48%	52.06%	50.43%	52.02%
Média (X)	1997	1997	1996.9983	1996.9983
Média (Y)	87.4878	86.7914	87.4878	86.7914
Var. independente	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO
Var. dependente	PTS	PTS	PTS	PTS
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * e^{(bX)}$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	7	7	7	7
Valor (p)	0.0319	0.0282	0.032	0.0283

Fonte de dados: SEMACE

O diagrama da Figura 36 (anteriormente apresentado na Figura 26) mostra a variação das concentrações anuais de PTS, em função do tempo, e a curva ajustada exponencial:

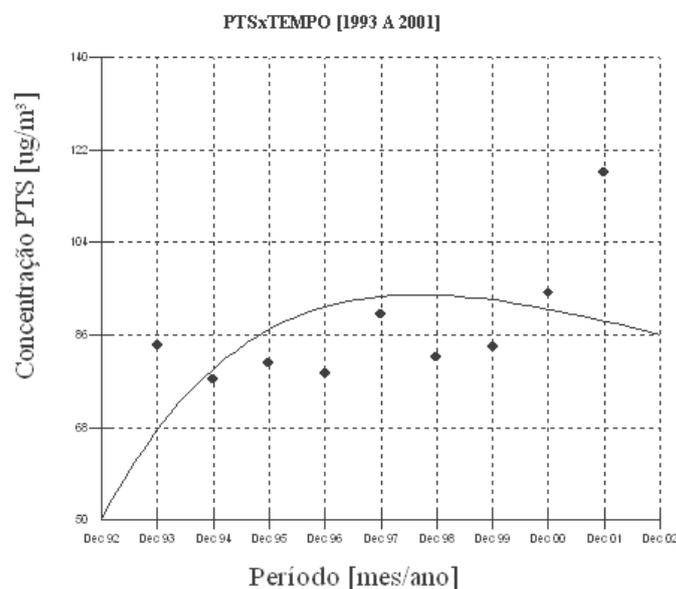


Figura 36 - Diagrama de dispersão de PTS em função do tempo (1993 a 2001)
Fonte de dados: SEMACE

Com relação a esse teste, foram feitas estimativas das concentrações de PTS para os anos 2010 e 2020. Os valores encontrados correspondem a 133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2010 e 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2020. Esses valores representam, respectivamente, 66% e 137% do padrão média geométrica anual.

4.3.2 Regressão: $\text{PTS}_{\text{max anual}} \times \text{FROTA}$ de veículos.

Considerando que a frota de veículos automotores em circulação é responsável por grande parte do material particulado jogado na atmosfera, foi realizado um teste de regressão utilizando-se PTS como a variável dependente. Os parâmetros dessa relação estão registrados no quadro da Tabela 24, destacando-se os principais parâmetros da análise:

Tabela 22 – Parâmetros da Regressão - $\text{PTS} \times \text{FROTA}$ de veículos – Valores anuais de 1993 a 2001.

REGRESSÃO	Linear	Exponencial	Logarítmica	Geométrica
Tamanho da amostra	9	9	9	9
Intercepto (a)	95.6038	98.6544	-51.4075	30.5861
Coef. regressão (b)	0.0994	0.0008	31.0399	0.2472
Coef. Determ. (r^2)	16.81%	17.39%	17.01%	17.63%
Média (X)	316.6889	316.6889	314.1914	314.1914
Média (Y)	127.0722	126.718	127.0722	126.718
Var. independente	FROTA	FROTA	FROTA	FROTA
Var. dependente	PTS	PTS	PTS	PTS
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * e^{(bX)}$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	7	7	7	7
Valor (p)	0.273	0.2641	0.2699	0.2605

Fonte de dados: SEMACE/DETRAN

No modelo dessa relação (última coluna da Tabela 24), o coeficiente de determinação, r^2 , explica somente cerca de 17% da proporção entre as variáveis. Além disso, do ponto de vista estatístico, a hipótese nula (não-relação) não poderia ser rejeitada, visto que o **valor p** (última linha da tabela) é maior que o intervalo de significância de 95%.

Apesar dos resultados não-satisfatórios para essa relação, é importante considerar que cada veículo em circulação é uma fonte de poluição e que o crescimento do número de veículos está associado ao aumento das emissões das concentrações de poluentes.

Segundo o Departamento Estadual de Trânsito, a frota de veículos automotores da capital sofreu um aumento de quase 60% a partir do ano 2000 até Junho do ano de 2008. Isso significa uma média de 64 veículos postos em circulação todo dia.

A figura 37 mostra o diagrama da regressão geométrica entre as variáveis analisadas:

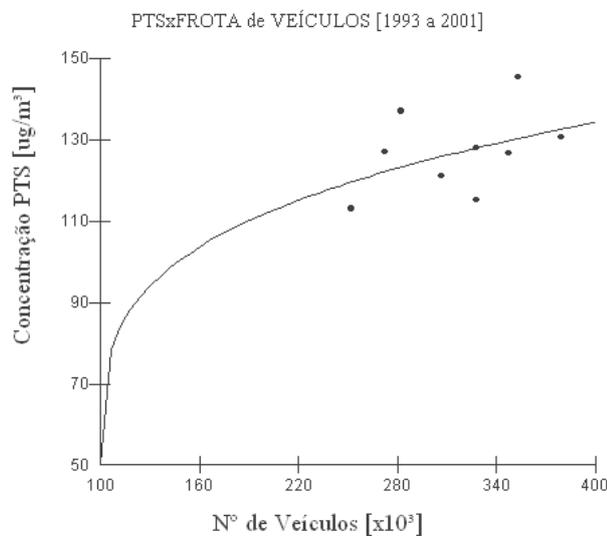


Figura 37 – Diagrama de Regressão Geométrica para PTS e Frota de veículos de 1993 a 2001.
Fonte: SEMACE/SMS

4.3.3 Regressão PTS x Número de Internações/DRA

Com o objetivo de relacionar a saúde da população com a poluição, foram investigados valores do número de internações por Doenças Respiratórias Agudas – DRA na cidade de Fortaleza, no período de 1996 a 2001.

Os dados de DRA foram fornecidos pela Célula de Vigilância Epidemiológica, CEVIP, da Secretaria Municipal de Saúde de Fortaleza. Foram feitas duas avaliações estatísticas usando valores mensais e anuais das duas variáveis.

Os resultados para a relação dos valores mensais das duas variáveis ficaram muito abaixo do padrão estatístico considerado. A melhor explicação para essa relação foi dada pela regressão exponencial cujos parâmetros estão registrados na Tabela 25 e no diagrama da Figura 38, a seguir.

Tabela 23 – Parâmetros da Regressão para PTS e DRA (média mensal de 1997 a 2001).

REGRESSÃO	Linear	Exponencial	Logarítmica	Geométrica
Tamanho da amostra	60	60	60	60
Intercepto (a)	19.6567	20.0357	-11.6316	6.3831
Coef. regressão (b)	0.0931	0.0034	8.8455	0.3233
Coef. Determ. (r ²)	5.31%	5.66%	5.13%	5.48%
Média (X)	101.2455	101.2455	99.7707	99.7707
Média (Y)	29.0831	28.2715	29.0831	28.2715
Var. independente	PTS	PTS	PTS	PTS
Var. dependente	DRA	DRA	DRA	DRA
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * \exp(bX)$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	58	58	58	58
Valor (p)	0.0765	0.067	0.0818	0.0717

Fonte de dados: SEMACE/SMS

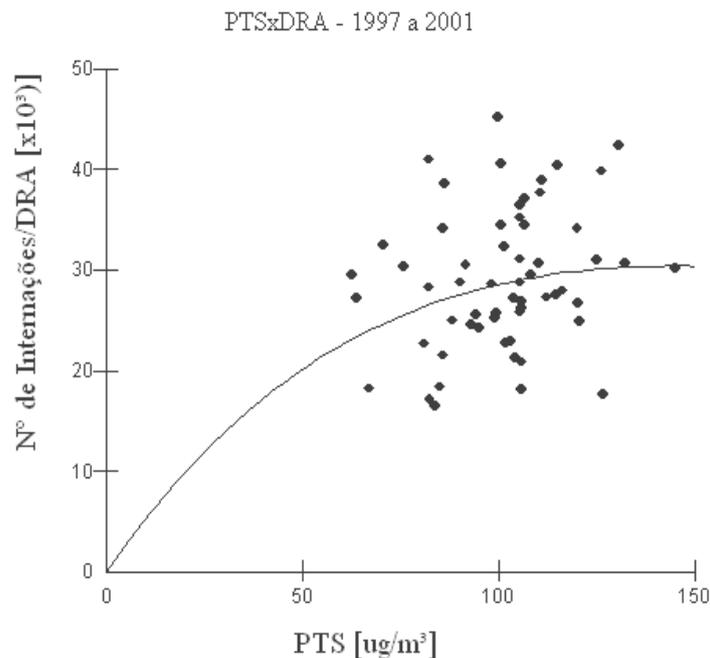


Figura 38 - Diagrama de dispersão - PTS e DRA (média mensal de 1997 a 2001)
Fonte de dados: SEMACE/SMS

Apesar desses resultados, deve-se considerar que, estudos recentes realizados sobre a saúde da população confirmam que a poluição atmosférica, mesmo em níveis abaixo dos padrões aceitáveis, tem forte relação com a morbidade nos processos relacionados com doenças do trato respiratório.

A avaliação realizada com as médias anuais produziu um resultado mais representativo do ponto de vista estatístico. Na Tabela 26 estão registrados os parâmetros do teste de regressão destacado na coluna exponencial:

Tabela 24 - Regressão PTSxDRA (valores anuais 1996 a 2001)

REGRESSÃO	Linear	Exponencial	Logarítmica	Geométrica
Tamanho da amostra	6	6	6	6
Intercepto (a)	52.5916	58.4703	120.1074	422.8521
Coef. regressão (b)	-0.1633	-0.0048	-18.2018	-0.5334
Coef. determinação (r ²)	43.86%	44.33%	43.05%	43.48%
Média (X)	112.735	112.735	112.2528	112.2528
Média (Y)	34.181	34.085	34.181	34.085
Var. independente	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3
Var. dependente	Coluna 2	Coluna 2	Coluna 2	Coluna 2
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * e^{(bX)}$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	4	4	4	4
Valor (p)	0.1517	0.1488	0.157	0.1542

Fonte: SEMACE/SMS

A Figura 39 mostra o diagrama de dispersão das duas variáveis

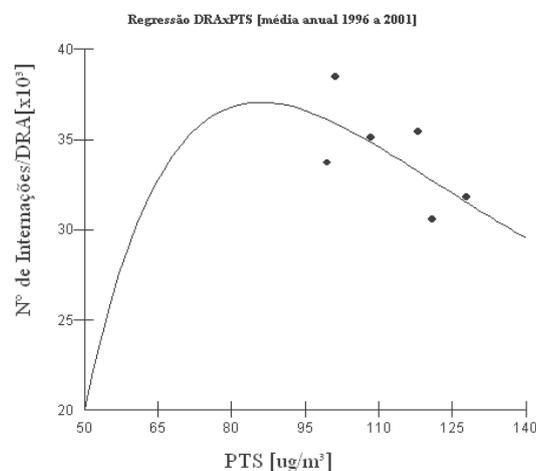


Figura 39 - Diagrama de dispersão para PTSxDRA - 1996 a 2001
Fonte de dados: SEMACE/SMS

4.3.4 Regressão: PTS x Pluviosidade

Nesse teste, a relação foi melhor explicada pela regressão geométrica, mas também não tem valor estatístico aceitável. A relação é confirmada estatisticamente apenas pelo parâmetro **valor-p** ($p = 0.0334$) que garante a rejeição da hipótese nula num nível de significância de 95% como mostrado na Tabela 26:

Tabela 25 - Parâmetros de regressão PTS e Pluviosidade (Valores mensais de 1997 a 2001).

REGRESSÃO	Linear	Geométrica
Tamanho da amostra	60	60
Intercepto (a)	104.3067	109.9047
Coef. regressão (b)	-0.0287	-0.0271
Coef. Determ. (r²)	6.39%	7.56%
Média (X)	106.48	1
Média (Y)	101.2455	1
Var. independente	PLUVIOSIDADE	PLUVIOSIDADE
Var. dependente	PTS	PTS
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * X^b$
Graus de liberdade	58	58
Valor (p)	0.0513	0.0334

Fonte de dados: SEMACE/FUNCEME

Considerando que após as chuvas uma parte da poluição atmosférica se concentra próximo à superfície da Terra, medidas realizadas antes das chuvas e imediatamente após, poderiam detectar diferenças nas concentrações.

Nesse teste, os valores das concentrações utilizadas são médias mensais, o que torna mais difícil afirmar que existe uma relação entre as variáveis quando se utiliza um diagrama de dispersão. Dessa forma, um diagrama de área poderia fornecer uma visualização melhor da relação.

A Figura 39 mostra um diagrama de área para as variáveis PTS e Pluviosidade onde foram usados valores médios mensais:

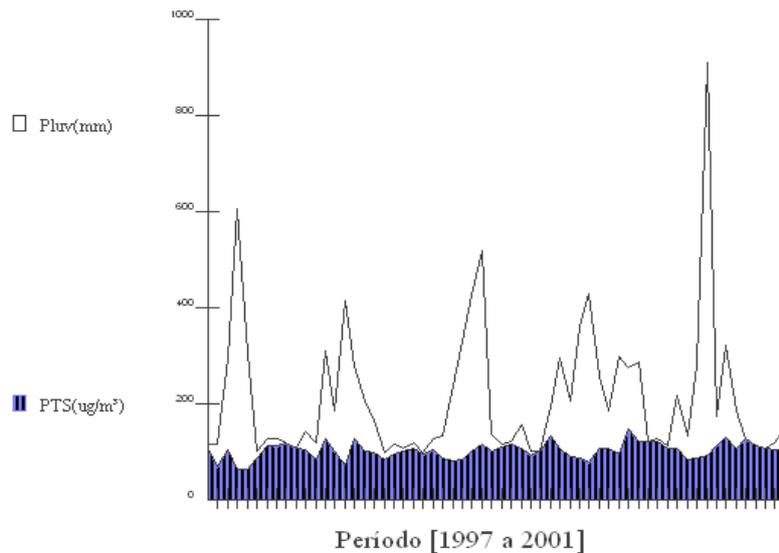


Figura 40 - Diagrama de Área para PLUVIOSIDADE e PTS (1997 a 2001).
Fonte:SEMACE/FUNCEM

Analisando os máximos desse diagrama, pode-se observar alguma coincidência ou contraste entre as duas variáveis, mas como já foi comentado, nenhum outro dado que confirme uma relação, pode ser observado.

4.3.5 Regressão: Pluviosidade x DRA

Alguns especialistas da saúde admitem que, durante as estações chuvosas, o número de internações por afecções pulmonares aumenta. Nesse teste, foram utilizados valores mensais do número de internações por doenças pulmonares registrados nos hospitais públicos, coletados pela Célula de Vigilância Epidemiológica da Secretaria de Saúde de Fortaleza e valores mensais de pluviosidade fornecidos pela FUNCEME.

Os registros feitos nos anos 1997 a 2001 foram organizados e submetidos a um teste de regressão com ajustamento de curvas. Os resultados estatísticos indicaram quase nenhuma relação entre essas variáveis, embora o diagrama de área forneça um contraste visual entre os máximos, indicando alguma relação.

O diagrama da Figura 40 mostra as variações de DRA acompanhando as variações de Pluviosidade quando se observam os máximos dessas variáveis.

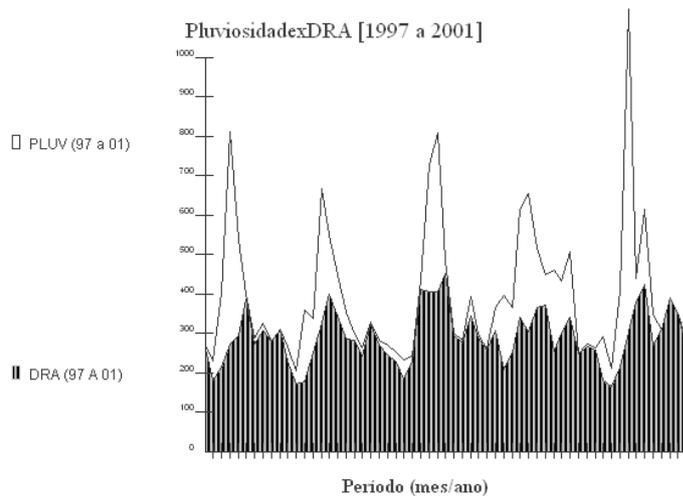


Figura 41 – Diagrama de área para Pluviosidade e DRA
 Fonte: FUNCEME/SMS

A realização desse teste foi, em parte, uma tentativa de justificar o teste anterior que também careceu de conclusão. O argumento de que, durante os períodos de chuvas, a atmosfera sofre um processo de “lavagem” onde, grande parte da poluição atmosférica, em particular, o material particulado, ficaria concentrada próxima à superfície da Terra, poderia explicar um aumento nas DRA’s. No entanto, isto também não foi observado.

Para finalizar essas avaliações, que, estatisticamente, não apresentaram resultados esperados, achamos importante citar, aqui, a opinião de especialistas da saúde, em particular, o trabalho de Saldiva et al, (2002), referenciado no capítulo 2 deste estudo, e que trata da relação entre poluição atmosférica e saúde da população.

Numa forma audaciosa de divulgar os resultados do seu trabalho, o autor revela que, além do seu, outros trabalhos sobre o mesmo tema têm mostrado que, mesmo dentro dos padrões permitidos de índices de qualidade do ar, a poluição atmosférica continua afetando a morbidade e mortalidade das pessoas por DRA e sugere que os limites desses índices sejam reavaliados.

Além disso, Façanha e Pinheiro (2004), observaram aumento no número de casos de DRA, tanto antes como depois das chuvas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS e CONCLUSÕES

Neste capítulo, são feitas as considerações finais e as conclusões sobre os resultados do estudo, além de sugestões para futuros trabalhos em continuidade a este e que possam contribuir para melhoria da qualidade do ar em Fortaleza, com conseqüente preservação do meio ambiente.

5.1 O ar e a medida de sua qualidade

A Tabela 23 mostra os resultados finais do estudo sobre a Qualidade do Ar em Fortaleza, em relação aos poluentes cujas concentrações foram medidas e avaliadas nesse estudo.

Tabela 26 - Qualidade do Ar referente aos poluentes avaliados no período (1993 a 2001) e 2009

POLUENTE ANALISADO	QUALIDADE DO AR									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2009
PTS	Regular	Boa	Regular	Boa	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	*
SO ₂	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa	*	*
CO	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Boa
CO ₂	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Boa
MP _{2,5}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Boa
FUMAÇA (Black carbon)	*	*	*	*	*	Boa	Boa	Regular	*	Boa

*Sem informação

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir que a qualidade do ar da cidade de Fortaleza se apresenta relativamente BOA, considerando-se os diversos poluentes medidos e analisados. Esses resultados, em parte, podem ser justificados pelo fato de que, Fortaleza é uma cidade bastante ventilada e, por isso, grande parte dos poluentes atmosféricos presentes é rapidamente dispersada.

No entanto, embora as condições meteorológicas de vento, temperatura, umidade e pressão, em Fortaleza, sejam favoráveis à rápida dispersão dos poluentes, as medidas de concentrações de Partículas Totais em Suspensão – PTS feitas em

Fortaleza, pela SEMACE, até o ano de 2001, mostraram que a qualidade do ar foi sistematicamente REGULAR, com tendência de aumento na sua concentração, o que poderá vir a se tornar uma qualidade de ar INADEQUADA.

Dada a impossibilidade de se analisar as concentrações de PTS a partir de 2002, é recomendável e importante que se dê continuidade às medidas de concentrações desse poluente, no sentido de se verificar o estado real da qualidade do ar em Fortaleza, relativamente ao mesmo. Além disso, é importante considerar que, mesmo abaixo dos níveis tolerados, as concentrações dos poluentes atmosféricos têm um grande poder de contribuir para o agravamento de doenças cardiorrespiratórias e de muitos outros problemas relacionados às questões ambientais. O mais importante é que a qualidade do ar permaneça BOA.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração é o fato de que todos os resultados apresentados nesse estudo foram discutidos com base nos padrões nacionais considerados pelo CONAMA, no entanto, os valores medidos no IFCE e na UECE estão bem próximos dos padrões recomendados pela Organização Mundial de Saúde (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a Média Anual e 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a Média Diária). A EPA, desde 1997, adota o valor de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Média Anual das concentrações de $\text{MP}_{2,5}$. Isso reforça a necessidade da continuidade da monitoração desses poluentes.

5.2 Sugestões e perspectivas de novos trabalhos

O problema do controle e redução da poluição do ar nas grandes cidades deve ser focado na perspectiva do desenvolvimento sustentável, que considera a proteção à saúde e ao meio ambiente uma preocupação prioritária, do exercício de uma gestão ambiental compartilhada e de âmbito metropolitano.

A iniciativa para o combate à poluição deve partir, principalmente, dos órgãos governamentais que devem atuar junto aos meios de comunicação no sentido de aumentar o nível de consciência pública a respeito da importância de estratégias de prevenção e controle da poluição do ar nas grandes metrópoles, no nosso caso em Fortaleza e sua Região Metropolitana.

A sugestão para novos trabalhos requer a participação do poder público, bem como da iniciativa privada, na implementação de inovações tecnológicas que apresentem baixa emissão local e global. É importante então promover discussões sobre propostas de criação de planos de ação que contribuam com a melhoria da qualidade do ar. O intercâmbio de conhecimentos entre governo, ONGs, iniciativa privada e universidades que discutem esse tema pode conduzir a mais experiência para o desenvolvimento de planos de ação.

O monitoramento das concentrações dos poluentes presentes na atmosfera e das variáveis meteorológicas é de grande importância na construção de banco de dados e formação de séries históricas para um melhor conhecimento e controle da poluição atmosférica.

Neste estudo foi dada maior ênfase às questões da poluição atmosférica associadas à saúde pública e ao meio ambiente, considerando os níveis de concentrações de poluentes gerenciados pela legislação. No entanto, a legislação vigente, com relação aos índices de qualidade do ar, trata apenas do problema da saúde pública, deixando inteiramente solta a questão ambiental e os aspectos de poluição atmosférica que influenciam e promovem a degradação dos materiais.

Uma investigação acadêmica da influência da poluição atmosférica sobre a matéria forneceu os seguintes estudos que poderão servir como temas de futuros trabalhos direcionados ao controle ambiental e à degradação da matéria:

1. estudos sobre a influência dos sistemas de controle e redução de poluentes nos custos da cogeração de energia (AVELLAR , 1997);
2. avaliação do Conceito Bolha como critério de compensação ambiental em atividades poluidoras de ar atmosférico (SANTOS, 2004);
3. comparação entre os poluentes atmosféricos e ruídos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível do tipo BPF 2A; (MOREIRA, 2007)
4. caracterização química e biológica de material particulado atmosférico (MP₁₀) coletado em um sítio urbano (MARTINIS, 1997);
5. avaliação das emissões atmosféricas causadas por motocicletas e os benefícios ambientais do uso de tração elétrica destes veículos (DUARTE, 2006);

6. avaliação do potencial de risco mutagênico dos poluentes presentes na exaustão de motor diesel por meio de bioensaio Trad-SH (OLIVEIRA, 2005);
7. estudos sobre a política brasileira de combustíveis automotivos e a poluição atmosférica urbana, para o caso dos veículos leves com ciclo Otto (FERNANDES, 1992);
8. estudos sobre o efeito da poluição atmosférica urbana sobre o epitélio respiratório de ratos eutróficos e desnutridos (SANT'ANNA, 1997);
9. estudos sobre a poluição atmosférica urbana e mutagênese: avaliação de riscos utilizando-se bioindicadores vegetais do gênero *Tradescantia* (SANT'ANNA, 2003)

Nesse contexto, espera-se que novos temas regionais sejam estudados, novos limites de concentrações de poluentes sejam determinados a fim de serem utilizados na atualização dos índices de qualidade do ar, ao mesmo tempo em que poderão ser utilizados na formulação de legislações mais rigorosas no controle e preservação da saúde, materiais e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABREU, Magda Luzimar de. **Previsores sinótico-meteorológicos para a dispersão de poluentes na região da grande São Paulo**. 1984. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Inpe, São Jose Dos Campos, 1984.

AHRENS, C. Donald. **Essentials of Meteorology**. 3ª New York: Thomsom, 1993. 454 p.

AMARAL, Djanira Maria; PIUBELI, Francine Amaral. **A Poluição atmosférica interferindo na qualidade de vida da sociedade**. Apresentado no X SIMPEP de 10 a 12 de Novembro de 2003. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_08/anais_08.php>. Acesso em: 10 jul. 2008.

AMBIENTEBRASIL (Brasil). Fundação Universitária Iberoamericana. **Smog**. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2009.

AVELLAR, Luis Henrique Nobre. **A Influência dos Sistemas de Controle e Redução de Poluentes nos Custos da Cogeração**. 01/12/1997. 1v. 104p. Mestrado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA

JÚLIO DE MESQUITA FILHO/GUARATINGUETÁ - ENGENHARIA MECANICA

BAKONYI, Sonia Maria Cipriano et al. Poluição Atmosférica e Doenças Respiratórias em Curitiba(PR). **Revista Saúde Publica**, Curitiba, v. 38, n. 05, p.695-700, out. 2004. Mensal.

BRASIL. CETESBE (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), **Poluição atmosférica**. São Paulo, 2003.

BRASIL. DETRAN. Governo do Rio de Janeiro. **Frota 2008**. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. DETRAN. Secretaria da Infra-estrutura. **Frota 2008**. Fortaleza, 2008.

BRASIL. DETRAN. Secretaria de Estado da Segurança Pública. **Frota 2008**. São Paulo, 2008.

BRASIL. IBGE. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. **População 2007**. Fortaleza, 2008.

BRASIL. IBGE. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. **População 2007**. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. IBGE. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. **População 2007**. São Paulo, 2008.

BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro Alberto. **Estatística Básica**. 5ª São Paulo: Saraiva, 2006. 526 p.

CATLING, David C.; ZAHNLE, Kevin J.. Perda de Atmosferas. **Scientific American**, São Paulo, n. 85, p.46-53, jun. 2009. Mensal.

CORREA, Sonia Maria Barros Barbosa. **Probabilidade e Estatística**. 2ª Belo Horizonte: PUC Minas, 2003. 116 p.

DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Considerações sobre a poluição do ar em Curitiba-Pr, face a seus aspectos de urbanização**. Curitiba: Editora UFPR, 2000. p. 101 - 110.

DEVORE, Jay L.. **Probabilidade e Estatística para Engenharia E Ciências**. 1ª São Paulo: Thomsom Learning, 2006. 706 p.

ENERGÉTICA (Brasil). **Equipamentos de medidas de Mp**. Disponível em: <<http://www.energetica.ind.br/empresa.htm>>. Acesso em: 16 out. 2008.

EPA - *Environmental Protection Agency* – EPA, 2005

FAÇANHA, Mônica Cardoso; PINHEIRO, Alicemaria Ciarlini. Doenças respiratórias agudas em serviços de saúde entre 1996 e 2001, Fortaleza, CE. **Rev Saúde Pública**, São Paulo, v. 3, n. 38, p.346-350, 21 jan. 2004. Mensal

FERNANDES, Eliana Dos Santos Lima. **A Política Brasileira de Combustíveis Automotivos e a Poluição Atmosférica Urbana: O caso dos veículos leves com ciclo Otto**. 01/05/1992

1v. 114p. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - ENGENHARIA NUCLEAR

HALL, John. E.; GUYTON, Arthur C. **Fisiologia humana e mecanismos das doenças** – Editora Guanabara-Koogan – 6ª edição – 639 p. – 1998 - São Paulo.

HOLTON, James R.. **An Introduction to Dynamic Meteorology.** 4ª Seattle: Academic Press, 2004. 540 p.

JAMA - Journal of the American Medical Association – Dezembro, 22/29, 2004; 292: 2984 – 2990

LATORRE, Maria do Rosário Dias de Oliveira et al. **Relação entre Poluição Atmosférica e atendimento por infecção.** Rev. Bras. Epidemiologia, São Paulo, v. 03, n. 04, p.220-229, 2001. Mensal.

LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation.** 2ª Los Angeles: Academic Press, 2002. (International Geophysic).

MARTINIS, Bruno Spinosa de. **Caracterização Química e Biológica das Partículas Respiráveis (PM₁₀) do Material Particulado Atmosférico Coletado em um Sítio Urbano da Cidade de São Paulo.** 01/11/1997. 1v. 100p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - Química (Química Analítica)

MASCARENHAS, Márcio Dênis Medeiros et al. **Poluição atmosférica antropogênica e doenças respiratórias- relação com as internações hospitalares em Rio Branco, Acre, Brasil – Setembro de 2005.** Jornal Brasileiro de Pneumologia. 2008;34(1):42-46.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.; HUBELE, Norma Faris. **Estatística Aplicada à Engenharia.** 2ª São Paulo: Ltc, 2004. 352 p.

MOREIRA, Davidson Martins; CARVALHO Jonas da Costa e VILHENA Marco Túlio; **Tópicos em turbulência e modelagem da dispersão de poluentes na camada limite planetária** – 1ª UFRG Editora, 2005

MOREIRA, Lenice Carrilho de Oliveira. **Comparação entre os poluentes atmosféricos e ruídos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A.** 01/12/2007 1v. 165p. Mestrado. Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Tecnologias Ambientais

NEVES, Alessandra Fortuna. **Vanádio no Material Particulado Atmosférico na Região de Ressurgência de Cabo Frio - RJ.** 01/07/2005. 1v. 78p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense - Química

OLIVEIRA, Deuzuita dos Santos. **Avaliação do potencial de risco mutagênico dos poluentes presentes na exaustão de motor diesel por meio do bioensaio Trad-SH.** 01/04/2005
1v. 53p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo/São Carlos - Engenharia Mecânica.

OLIVEIRA, Lucimar Luciano de; VIANELLO, Rubens Leite; FERREIRA, Nelson Jesus. **Meteorologia Fundamental.** Erechin: Edifapes, 2001. 432 p.

PATRICIO, Licia Mioko Yoshizaki Akinaga - **Efeitos da poluição atmosférica de origem veicular no sistema cardiopulmonar de camundongos** – Dissertação de mestrado – Faculdade de Medicina de São Paulo, 2008.

SALBY, Murry L. **Fundamentals of atmospheric.** Flórida: Academic Press, 1996. 61 v. (International Geophysic).

SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento et al. **Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil.** Rev. Saúde Pública vol.36 no.1 São Paulo Feb. 2002

SANT´ANNA, Eliane Tigre G. **Efeito da Poluição Atmosférica Urbana Sobre o Eptelio Respiratorio de Ratos Eutrofos e Desnutridos..** 01/02/1997 1v. 138p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De São Paulo - Ciencias Biologicas (Biologia Molecular)

SANT´ANNA, Eliane Tigre G. **Poluição atmosférica urbana na cidade de São Paulo e mutagênese:avaliação de riscos utilizando-se bioindicadores vegetais do gênero Tradescantia..** 01/09/2003. 1v. 120p. Dissertação de Mestrado. Universidade De Caxias do Sul - Administração

SANTOS, Elio Lopes dos. **Avaliação do Conceito Bolha como Critério de compensação Ambiental em Atividades Poluidoras de Ar Atmosférico:**Estudo de caso no Estado de São Paulo. 01/01/2004. 1v. 166p. Mestrado. Universidade Federal de São Carlos - Engenharia Urbana

SEINFELD, John H.; PANDS, Spyros N.. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** 1ª New York: John Willey, 1997. 1326 p.

STULL, Roland B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.**

STULL, Roland B. The Atmospheric Boundary Layer. In: WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey.** 2ª Washington: Elsevier, 2006. Cap. 9, p. 375-412.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e Aplicações.** 1ª Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 449 p. Universidade Federal de Viçosa - MG.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V.. **Atmospheric science an introductory survey.** 2ª Washington: Elsevier, 2006. 92 v.

ZDUNKOWSKI, Wilford; BOTT, Andreas. **Dynamics of the Atmospheric:** A course in Theoretical Meteorology. 1ª Nova York: Cambridge University Press, 2003. 719 p.

ANEXO - A

Análise de Regressão e Correlação

✓ Modelo de Regressão linear Simples

A relação matemática determinística mais simples entre duas variáveis x e y é uma relação linear do tipo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (19)$$

A relação (14) representa o conjunto de pares (x, y) para o qual (14) determina uma reta com coeficiente angular β_1 e termo constante β_0 .

Se as duas variáveis não estiverem relacionadas deterministicamente, então, para um valor fixo de x , o valor da segunda variável será aleatório. Por exemplo: se estivermos investigando a relação entre a idade de uma criança e o tamanho do seu vocabulário e decidirmos selecionar uma criança de idade $x = 5,0$ anos, então, antes que a seleção seja feita, o tamanho do vocabulário será uma variável aleatória Y .

Depois que uma determinada criança de 5 anos tiver sido selecionada e testada, o resultado será, por exemplo, um vocabulário de 2000 palavras. Portanto, podemos dizer que o valor observado de Y , associado com a fixação de $x = 5,0$, foi $y = 2000$.

Na maioria das vezes, a variável cujo valor é fixado pelo pesquisador será representada por x e será chamada de **variável independente, previsão** ou **explicativa**. Para x fixo, a segunda variável será aleatória; representamos essa variável aleatória e seu valor observado por Y e y , respectivamente, e as chamamos de **variável dependente** ou **resposta**.

Em geral, as observações serão feitas para inúmeros conjuntos da variável independente. Sejam x_1, x_2, \dots, x_n , os valores da variável independente para as quais são feitas as observações e sejam Y e y , respectivamente, a variável aleatória e o valor observado associados a x_i . Portanto, os dados bivariados fornecidos consistem nos n

pares $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. O primeiro passo na análise de regressão com duas variáveis é elaborar um gráfico de dispersão dos dados observados.

Em um gráfico desse tipo, cada (x_i, y_i) é representado como um ponto, representado graficamente em um sistema de coordenadas bidimensional.

✓ Modelo Probabilístico Linear

Para o modelo determinístico $y = \beta_0 + \beta_1 x$, o valor real observado de y é uma função linear de x . A generalização apropriada dessa característica para um modelo probabilístico pressupõe que o *valor esperado de Y é uma função linear de x* , mas que, para um x fixo, a variável Y difere de seu valor esperado de uma quantidade aleatória.

✓ O Modelo de Regressão Linear Simples

Existem parâmetros β_0, β_1 e σ^2 tais que, para qualquer valor fixo da variável independente x , a variável dependente está relacionada a x por meio da **equação do modelo**:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (20)$$

A quantidade ϵ na equação (15), do modelo, é uma variável aleatória, considerada normalmente distribuída com $E(\epsilon) = 0$ e $V(\epsilon) = \sigma^2$

A variável ϵ normalmente é chamada de **desvio aleatório** ou **erro aleatório** do modelo. Sem ϵ , qualquer par observado (x, y) corresponderia a um ponto disposto exatamente sobre a reta $y = \beta_0 + \beta_1 x$ denominada **reta de regressão real** (ou da **população**).

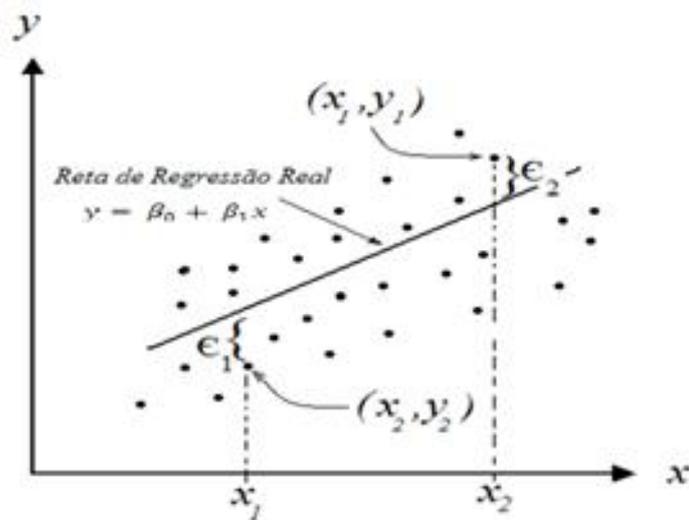


Figura 42 - Diagrama de regressão linear mostrando as variações sobre a reta ajustada.
Fonte: Devore (2006)

Ocasionalmente, a aplicabilidade do modelo de regressão linear simples pode ser sugerida por considerações teóricas (por exemplo: existe uma relação linear exata entre as duas variáveis, em que ϵ representa o erro de medição). Contudo, bem mais freqüentemente, a plausibilidade do modelo é indicada por um gráfico de dispersão exibindo um padrão linear significativo (como na Figura 39).

A equação do modelo probabilístico requer que, para um x fixo, Y é a soma de um $\beta_0 + \beta_1 x$ constante e a va normalmente distribuída \square , implicando que Y tem uma distribuição normal. Essas propriedades são ilustradas nas Figuras 40 e 41.

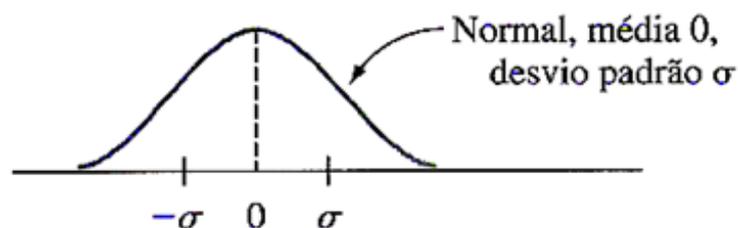


Figura 43 - Distribuição normal para as variações da variável aleatória Y .
Fonte: Devore (2006)

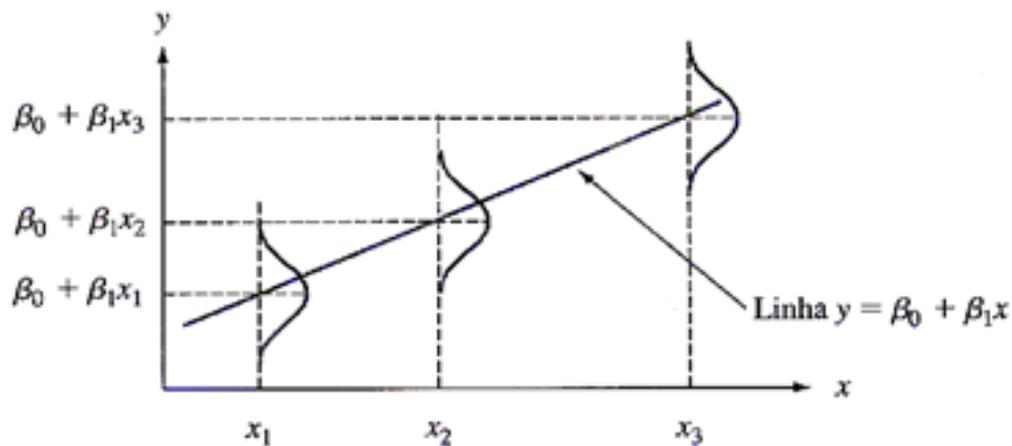


Figura 44 - Distribuição normal da variância em torno da reta de regressão linear.
Fonte: Devore (2006)

O parâmetro de variância σ^2 determina até que ponto cada curva normal se dispersa ao redor de seu valor médio (a altura da reta). Quando σ^2 é pequeno, um ponto observado (x, y) , quase sempre ficará bem próximo da reta de regressão real, ao passo que as observações podem desviar consideravelmente de seus valores esperados (correspondendo a pontos distantes da reta) quando σ^2 for grande.

Para exemplificar essas propriedades é possível fazer a previsão de uma determinada variável Y para um valor fixado de x .

Vamos supor, por exemplo, que um certo modelo de regressão admita a seguinte equação reta de regressão): $y = 10 + 5x$ e $\sigma = 2$.

Deseja-se saber qual a probabilidade da variável y ultrapassar um valor 40 quando $x = 5$. Então, se $x = 5$, $y = 35$

$$P(Z > 37 \text{ qdo. } X = 5) = P(Z > (37 - 35)/2) = 1 - \Phi(1,0) = 1 - 0,8413 = 0,1587$$

O resultado confirma que a chance de y ser 37 quando $x = 5$, é de 15%.

Essas propriedades podem ser utilizadas para se fazer previsões futuras de concentrações de poluentes através do método de regressão linear. O gráfico a seguir mostra essa propriedade para um modelo de regressão em que $y = 65 - 1,2x$ e $\sigma = 8$. Deseja-se saber a probabilidade de $Y > 50$ quando $x = 20$ e $x = 25$ (Figura 42)

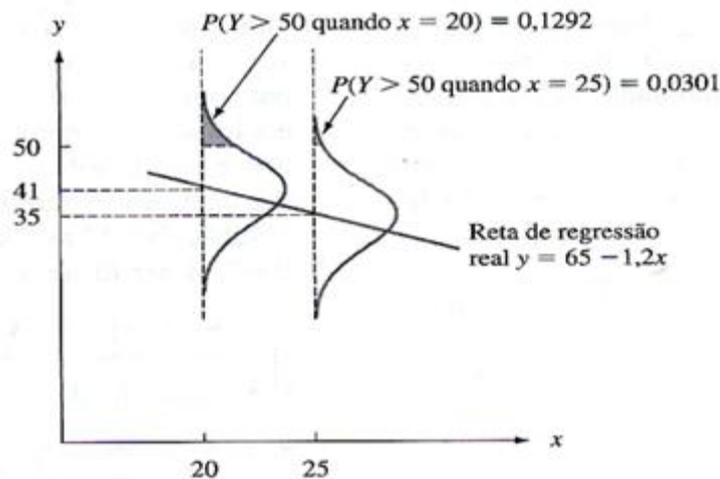


Figura 45 - Probabilidade da variável Y.
Fonte: Devore (2006)

Os valores de $\Phi(Z)$ são facilmente encontrados nas tabelas de distribuição normal encontradas em livros de estatística (Devore, 2006)

1. Objetivos e hipóteses da Análise de Regressão

O objetivo principal da análise de regressão é prever o valor da variável dependente Y dado que seja conhecido o valor da variável independente X.

A equação de regressão é a fórmula algébrica pela qual se determina Y.

A Análise de Regressão Simples diz respeito à predição de Y por uma única variável X.

A Análise de Regressão Múltipla diz respeito à predição de Y por mais de uma variável X (x_1, x_2, \dots).

As hipóteses gerais são:

- Y é uma variável aleatória obtida de uma amostra;
- Y e X estão associadas linearmente;
- homocedasticidade – as variâncias das distribuições condicionais de Y dado X são todas iguais.

Se em conjunto com a análise de regressão, utiliza-se a estimação por intervalo, é necessária a hipótese de que as distribuições condicionais de Y dado X são todas distribuídas normalmente para os valores da população.

2. Diagrama de dispersão

É um gráfico no qual cada ponto representa um par de valores (x,y). Os valores de X são colocados no eixo horizontal e Y no vertical.

Transformação Linear – se a relação entre X e Y for curvilínea, usam-se logaritmos para transformá-la em linear e aplicar a Análise de Regressão Linear. Para voltar à escala original usa-se o antilogaritmo.

Se o diagrama indica uma relação linear, então ajusta-se aos dados uma linha que seja a melhor função ajustante.

A localização precisa desta linha é determinada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Exemplos de diagramas de dispersão:

3. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

A fórmula geral na população é:

$$\hat{Y} = a + bX + \mu \quad (21)$$

onde :

a = coeficiente linear ou intercepto-Y;

b = coeficiente angular;

u = variações aleatórias.

A fórmula geral na amostra é:

$$\hat{Y} = a + bX \quad (22)$$

onde:

a = estimador do coeficiente linear;

b = estimador do coeficiente angular;

Pelo MMQ, a reta resultante tem duas características importantes:

- A soma dos desvios verticais dos pontos em relação a reta é zero.
- A soma dos quadrados desses desvios é mínima.

As fórmulas de cálculo para a e b são:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (23)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (24)$$

onde,

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad (25)$$

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{\sum x^2}{n} \quad (26)$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{\sum y^2}{n} \quad (27)$$

A estimação de Y deve ser feita apenas dentro do intervalo de variação de X originalmente amostrado. A equação fornece a base de uma estimativa por ponto.

4. Erro padrão de Estimação (predição) e Intervalos de Predição

O erro padrão de estimação é um desvio-padrão condicional, na medida em que indica o desvio padrão da variável Y dado um valor específico de X .

O erro padrão de estimação é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{Y})}{n - 2}} \quad (28)$$

Divide-se por $n-2$, pois, perdem-se dois graus de liberdade com as estimativas de a e b .

Correlação Linear de Pearson

- Objetivos e Hipóteses

A análise de correlação mede o grau de relacionamento entre as variáveis. Inicialmente, trataremos da Análise de Correlação Simples, a qual diz respeito à medida entre X e Y .

Hipóteses:

- a. a relação entre X e Y é linear;
- b. ambas são variáveis aleatórias;
- c. homocedasticidade;
- d. as distribuições condicionais de Y dado X têm distribuição Normal;
- e. as duas distribuições, de X e de Y , têm distribuição Normal na população.

- O coeficiente de Determinação:

Quando, na reta de regressão linear, a maioria dos pontos está muito próxima da reta, é razoável concluir que grande parte da variação de y é atribuída à relação linear aproximada entre as variáveis pelo modelo de regressão linear simples. Se os referidos pontos estão afastados da reta de regressão linear, diz-se que o modelo de regressão linear simples não consegue explicar a variação em y relacionando-o a x .

A soma dos quadrados dos erros SQE pode ser interpretada como uma medida da quantidade de variação em y que não consegue ser explicada pelo modelo. Uma medida quantitativa da quantidade total de variação nos valores observados de y é dado pela soma total dos quadrados $SQT = S_{yy}$. Aqui, SQE é a soma dos desvios quadrados em torno da reta dos mínimos quadrados e SQT é a soma dos desvios quadrados em torno da reta horizontal na altura y . A razão SQE/SQT é a proporção da variação total que não pode ser explicada pelo modelo de regressão linear simples e a diferença $1 - SQE/SQT$ (um número entre 0 e 1) é a proporção da variação y observada explicada pelo modelo.

O coeficiente de determinação, representado por r^2 , é dado por:

$$r^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad (29)$$

Esse resultado é interpretado como a proporção da variação de y que pode ser explicada pelo modelo de regressão linear simples (atribuída a uma relação linear aproximada entre as duas variáveis).

O valor do coeficiente de determinação também pode ser determinado para outras formas de regressão como geométrica, logarítmica, exponencial, etc.

Em geral, os programas computacionais usados para realizar esses testes, determinam a melhor forma como as variáveis se relacionam.

ANEXO B

Procedimentos químico-analíticos para determinação de SO₂ e Fumaça Preta (*black carbon*)

Análise de SO₂

Para a análise de Dióxido de Enxofre (SO₂) foram utilizados os seguintes reagentes:

Indicador Misto – consta de uma solução em meio de metanol (25 mL) misturando-se 0,015g de verde de bromocresol e 0,01g de vermelho de metila.

Tetraborato de Sódio a 0,004 N - Pesam-se exatamente 0,7629 g de tetraborato de sódio decaidratado P.A (Na₂B₄O₇, 10 H₂O) e em seguida, transfere-se para um balão volumétrico de 1000 mL usando água como solvente, completando o volume de 1000 mL. O tetraborato de sódio decaidratado foi mantido em um dessecador contendo solução saturada de cloreto de sódio e sacarose.

Ácido Sulfúrico 0,004 N - Preparação: Em um balão de 1000 mL contendo cerca de 500 mL de água destilada, adicionam-se 11,1 mL de ácido sulfúrico P.A marca *Reagen* (d = 1,84g/cm³).

Procedimento: agita-se e resfria-se a solução em água. Adiciona-se ao volume, água destilada, até completar 1000 mL. Esta solução possui concentração aproximada de 0,4 N. Retiram-se 10 mL dessa solução que são diluídos com 1000 mL de água destilada em um balão volumétrico. Esta segunda solução possui concentração aproximada de 0,004 N, sendo padronizada em seguida com uma solução de tetraborato de sódio a 0,004 N.

Padronização: Em um *erlenmeyer* de 125 mL, pipeta-se 20 mL da solução de ácido sulfúrico a ser padronizada. Adicionam-se três gotas de indicador misto. Faz-se titulação com solução de tetraborato de sódio 0,004 N até atingir cor cinza. Faz-se a titulação em duplicata de forma que as duas titulações não difiram mais que 0,1 mL. A normalidade da solução de ácido sulfúrico é calculada pela seguinte fórmula:

$$N = \frac{0,004V}{20} \quad (13)$$

Onde: N = Normalidade do ácido sulfúrico.

V = Volume utilizado do tetraborato de sódio

Normalidade do tetraborato de sódio = 0,004

Volume do ácido sulfúrico = 20 mL

Solução absorvente (água oxigenada a 0,3%): Colocam-se cerca de 500 mL de água destilada em um balão volumétrico de 1000 mL. Adicionam-se 10 mL de peróxido de hidrogênio 30% P.A (*Vetec*) com auxílio de uma proveta. Completa-se o volume com água destilada até 1000 mL. Para correção do pH da solução faz-se a transferência de 50 mL da solução anterior para um frasco *erlenmeyer* de 125 mL e colocam-se três gotas de indicador.

Caso a solução torne-se verde, adiciona-se H_2SO_4 a 0,004 N com o auxílio de uma bureta até que a coloração se torne cinza. Anota-se o volume gasto. Se a solução se tornar rosa, adiciona-se tetraborato de sódio 0,004 N até que a coloração se torne cinza. Anota-se o volume gasto.

Junta-se ao frasco que contém o resto da solução de peróxido de hidrogênio, 19 vezes o volume de ácido sulfúrico ou de tetraborato de sódio 0,004 N que foram acrescentados ao frasco de *erlenmeyer*. Agita-se bem. Transfere-se 50 mL a um segundo frasco de *erlenmeyer* e juntam-se três gotas do indicador.

A coloração normalmente apresenta-se cinza neutro, caso contrário, é necessário novamente corrigir o pH , repetindo a etapa anterior e juntando-se ao frasco, 18 vezes a nova quantidade de solução de ácido sulfúrico ou de tetraborato de sódio 0,004 N utilizada.

Determinação de amônia, NH_3

Para a análise da determinação de amônia foram utilizados os seguintes reagentes:

Solução de NaOH 2,5 N: colocam-se 100 g de NaOH em um béquer diluindo-se com água destilada, fazendo em seguida a transferência para um balão volumétrico de 1000 mL. Em seguida, completando-se o volume para 1000 mL e padronizando-se a solução com HCl.

Reagente de Nessler - Solução contendo KI e Hg_2Cl_2 em meio alcalino (NaOH).

Solução estoque de NH_4Cl - Dissolveu-se em água bidestilada 0,315 g de cloreto de amônio, previamente secado a 105°C por 2 horas, em um balão de 1000 mL.

Solução de NH_4Cl para calibração $\sim 0,5 \mu\text{g/mL}$ - Colocou-se 5 mL da solução estoque de NH_4Cl em um balão volumétrico de 1000 mL. Adicionando-se 2 gotas de H_2SO_4 concentrado, completando-se o volume com água bidestilada.

Em seguida, transfere-se 200 mL desta solução para o frasco apropriado (solução de trabalho no laboratório), guardando-se o restante em lugar apropriado (na geladeira) em frasco de polietileno.

Semanalmente, a solução de trabalho deve ser renovada, desprezando-se o restante e uma nova alíquota de 200 mL deve ser tomada da solução armazenada na geladeira para a preparação de uma solução para calibração.

O procedimento para a determinação da Amônia segue os seguintes passos: retira-se uma amostra de 10 mL da solução de amostragem de SO_2 , transferindo-a para para um tubo de ensaio. Acrescenta-se a esse tubo, 1,0 mL de reagente de *Nessler* e agita-se a mistura. Retiram-se 10 mL da solução de NH_4Cl para calibração, juntando-se a 1 mL de reagente de *Nessler* em outro tubo e agita-se a mistura.

A leitura é feita num refletômetro de comprimento de onda igual a $\lambda = 400$ nm, utilizando-se a prova do branco como referência.

Na determinação de Fumaça Preta, deixa-se o refletômetro estabilizando durante 30 minutos. Logo após, coloca-se o detector sobre um filtro branco e ajusta-se o controle para um nível de sensibilidade de 100% da escala. Substitui-se o filtro branco pelo filtro amostrado e anota-se o valor da refletância R.