



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

---

ESTUDO DAS CONCENTRAÇÕES DE ÓXIDOS DE  
NITROGÊNIO EM ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE  
MANAUS POR ANALISADORES AUTOMÁTICOS

ILSA MARIA HONÓRIO DE VALOIS COELHO

MANAUS  
2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

---

ILSA MARIA HONÓRIO DE VALOIS COELHO

ESTUDO DAS CONCENTRAÇÕES DE ÓXIDOS DE  
NITROGÊNIO EM ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE  
MANAUS POR ANALISADORES AUTOMÁTICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Química da Universidade Federal do Amazonas como  
requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em  
Química, área de concentração Química Analítica.

Orientador: Professor, Dr. Jamal da Silva Char  
Coorientadora: Professora, Dra. Elizabeth Cartaxo

MANAUS  
2012

## OFERECO

Àquele que silenciosamente almejou o meu sucesso e que foi levado antes das grandes vitórias, o meu pai, Lauro Honório, de saudosa memória.

À minha mãe, Ylsa Honório, minha primeira mestra das letras e da vida.

Ao meu marido e companheiro, um exemplo de ética e dignidade para mim e para nossos filhos, pelo apoio nas horas mais difíceis e pelo suporte intelectual.

Aos meus filhos Luis Carlos, Lucíola, Alfredo e Lúcia que souberam entender minhas repetidas ausências.

Aos meus amados netos Bruna, Luis Carlos, Fábio, Lauro, Luciana e aos que vierem, que este trabalho represente a minha contribuição para um futuro melhor.

## **AGRADECO**

Ao meu orientador Jamal da Silva Chaar por participar dessa jornada, pelo incentivo e motivação e, acima de tudo, pela amizade construída durante esse tempo de convivência.

À minha coorientadora Elizabeth Ferreira Cartaxo, pelas muitas oportunidades oferecidas, pela confiança e pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

Ao CNPq pelo financiamento dos projetos que proporcionaram as condições necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da comissão de avaliação do meu exame de qualificação pelas excelentes contribuições.

À Marcianita, nossa secretária do NIEMA, pela presteza com que atendeu a todos os meus pleitos, pelo respeito e acima de tudo pelo profissionalismo que imprime em todas as suas atividades na Universidade.

À professora Amazoneida Pinheiro do Departamento de Estatística da UFAM e ao Thiago Bentes finalista do Curso de Estatística, pelo imprescindível apoio estatístico.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Química em cuja fonte eu colhi muitos conhecimentos valiosos.

À toda a equipe do NIEMA, que contribuiu com a montagem da Estação de Monitoramento, manutenção e calibração dos analisadores.

Ao INMET por fornecer os dados meteorológicos importantes para a compreensão dos mecanismos de dispersão dos poluentes.

À Marcia Passos que dividiu comigo muito do trabalho de campo do NIEMA permitindo um tempo maior para as minhas reflexões teóricas.

À Tayana Freitas pela colaboração na confecção dos gráficos e no tempero de juventude que proporcionou aos nossos sábados dedicados ao estudo.

Àos meus colegas de doutorado, em especial a Lílian, Socorro e Christian pelos dias que juntos dedicamos ao estudo da Química Analítica.

À Prefeitura de Manaus, na pessoa do meu amigo Amazonino Armando Mendes, que disponibilizou local para a instalação da Estação de Monitoramento.

*"Todo o futuro da nossa espécie, todo o governo das sociedades, toda a prosperidade moral e material das nações dependem da ciência, como a vida do homem depende do ar"*

(Rui Barbosa)

## RESUMO

Este trabalho realiza um estudo das concentrações de NOx na atmosfera urbana do município de Manaus, com foco nas influências meteorológicas específicas da região equatorial. Faz-se inicialmente, uma contextualização histórica da poluição atmosférica e do uso de combustíveis fósseis, relacionando a poluição decorrente com o desenvolvimento da cidade e da população urbana. A importância que os conhecimentos químicos tiveram nesse processo é ressaltada destacando-se a Ciência Química como a base para todo o desenvolvimento da humanidade. As dificuldades de fornecimento de energia, cujas origens remontam aos primórdios do desenvolvimento do Amazonas, o aumento da frota veicular e o crescimento atípico da cidade de Manaus também são discutidos em função da relação que guardam com os problemas de qualidade do ar. Partindo do conhecimento prévio da composição atmosférica e dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem naturalmente, busca-se entender os efeitos do aumento da concentração de NOx, bem como de possíveis poluentes secundários produzidos por reações fotoquímicas. Foram coletados dados das emissões de NOx, durante o período de fevereiro a julho de 2011, além das condições meteorológicas como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pluviosidade e insolação. A coleta foi feita nas proximidades do Distrito Industrial e do maior complexo termelétrico do Brasil, no bairro do Mauazinho. Foram utilizados analisadores automáticos que armazenam os resultados através de um sistema computadorizado e os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados mostraram um crescente agravamento da qualidade do ar na região, com 32 ultrapassagens aos limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde, sendo o mês de junho, o mais poluído entre os meses pesquisados. Conclui-se que o elevado número de UTE's e as condições climáticas predominantes na região em estudo tenham sido determinantes para os níveis de concentração dos NOx implicando na necessidade de formulação do diagnóstico da qualidade do ar ambiental na cidade de Manaus para, dessa forma, subsidiar o poder público no estabelecimento das exigências de níveis adequados de emissão das fontes de poluição fixas e móveis.

**PARAVRAS CHAVE:** poluição, qualidade do ar, energia, química da atmosfera e óxidos de nitrogênio.

## ABSTRACT

This work makes a NO<sub>x</sub> concentrations study in the urban atmosphere of Manaus city, focusing on the specific meteorological influences of the equatorial region. Initially, we make a historical contextualization about atmospheric pollution and fuel oil consumption, making the relation between pollution, city and urban population development. The importance that chemical knowledge has been in this process is pointed out, emphasizing the Chemical Science as the basis for all the human development. The difficulties of energy supply whose origins come from the beginnings of Amazon development, the vehicle fleet increasing and Manaus city atypical growth, are also discussed according to relations that they have with the problems of quality air. Starting from the prior knowledge of the atmospheric composition and physico-chemical phenomena which happen naturally, we seek to understand the effects from the NO<sub>x</sub> concentration increase, as well as the possible secondary pollutants, produced by photochemical reactions. The NO<sub>x</sub> emissions data were collected during the period from February to July in 2011, besides the meteorological conditions like temperature, relative humidity, wind speed, pluviosity and solar radiation. The collection was done, near to Industrial District, and Brazil's largest thermoelectric complex, in the district of Mauazinho. The automated analysers were used, which store the results through a computerized system, and the meteorological data were supplied by Meteorological National Institut (INMET). The results showed an increasing deterioration of air quality in the region, with 32 overtaking the limits recommended by the World Health Organization, and June was the most polluted month in the months surveyed. It concludes that the high number of TPP's and the climatic conditions in the Amazon Region are decisive for NO<sub>x</sub> concentration levels. This implies the need to formulate an environmental air quality diagnostic in the city of Manaus and thus, to support the government in establishing the requirements for issuance of appropriate levels, by stationary and mobile pollution sources.

**KEY WORDS:** pollution, air quality, energy, atmospheric chemistry and nitrogen oxides.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema de Geração Elétrica no Brasil.....	44
Figura 2: Evolução Populacional da Cidade de Manaus.....	52
Figura 3: Camadas da Atmosfera.....	82
Figura 4: Crescimento do Nível de CO <sub>2</sub> nos Últimos Anos.....	95
Figura 5: Tendência de Umidade Durante os Meses do Ano em Manaus .....	110
Figura 6: O Espectro Eletromagnético .....	117
Figura 7: Mapa de Manaus com Destaque para o Bairro do Mauazinho.....	140
Figura 8: Distância entre a EMMQA e as Fontes de Emissão.....	142
Figura 9: Visão Interna e Externa da EMMQA.....	144
Figura 10: Analisador de NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> Modelo 42i.....	145
Figura 11: Diagrama de Fluxo do Analisador.....	145
Figura 12: Equipe Técnica Realizando Calibração.....	147
Figura 13: Variação Simultânea dos Parâmetros Meteorológicos.....	151
Figura 14: Gráficos Histograma e Densidade.....	154
Figura 15: Médias Diárias de NO e NO <sub>2</sub> no Mês de Fevereiro.....	157
Figura 16: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> em 12 de Fevereiro.....	160
Figura 17: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> nos dias 16 e 17 .....	161
Figura 18: Médias Diárias de NO e NO <sub>2</sub> no mês de Março.....	162
Figura 19: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> nos dias 02 e 03 de Março.....	163
Figura 20: Médias Diárias de NO/NO <sub>2</sub> no Mês de Abril.....	164
Figura 21: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 27 de Abril .....	166
Figura 22: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 30 de Abril.....	167
Figura 23: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 25 de Abril.....	168
Figura 24: Médias Diárias de NO/NO <sub>2</sub> no mês de Maio.....	169
Figura 25: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 01 de Maio.....	171
Figura 26: Médias Diárias de NO/NO <sub>2</sub> no Mês de Junho.....	173
Figura 27: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 02 de Junho .....	173
Figura 28: Médias Diárias de NO/NO <sub>2</sub> no mês de Julho.....	174
Figura 29: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> nos dias 24 e 25 de Julho.....	176
Figura 30: Médias Horárias de NO/NO <sub>2</sub> no dia 30 de Julho.....	177
Figura 31: Tendência Crescente dos Níveis de Concentração do NO <sub>2</sub> nos Meses da Pesquisa.....	178



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Direção dos Ventos.....	56
Tabela 2: Dados da Frota de Veículos em Manaus.....	62
Tabela 3: Oferta Interna de Energia.....	67
Tabela 4: Tempo de Residência e Composição de Alguns Gases na Atmsfera.....	90
Tabela 5: Padrões Conforme CONAMA nº 03/90.....	113
Tabela 6: Episódios Agudos de Poluição do Ar para o NO <sub>2</sub> .....	113
Tabela 7: Comparando os Padrões da Qualidade do Ar.....	114
Tabela 8: Umidade Relativa Média do Ar nos Meses da Pesquisa.....	149
Tabela 9: Velocidade Média dos Ventos nos Meses da Pesquisa.....	149
Tabela 10: Temperatura Média nos Meses da Pesquisa.....	150
Tabela 11: Pluviosidade Média nos Meses da Pesquisa.....	150
Tabela 12: Estatística Descritiva para NO, NO <sub>x</sub> e NO <sub>2</sub> .....	152
Tabela 13: Estatística Descritiva Mensal para os Óxidos de Nitrogênio.....	153
Tabela 14: Coeficientes de Correlação Linear.....	154
Tabela 15: Limites (quartis) e Valores Medianos dos NO <sub>x</sub> .....	156
Tabela 16: Condições Meteorológicas no Mês de Fevereiro.....	158
Tabela 17: Condições Meterorológicas no Mês de Março.....	162
Tabela 18: Condições Meteorológicas no Mês de Abril.....	165
Tabela 19: Condições Apresentadas no Dia 30 de Abril.....	167
Tabela 20: Condições Meteorológicas no Mês de Maio.....	170
Tabela 21: Condições Meteorológicas no Mês de Junho.....	172
Tabela 22: Condições Meteorológicas no Mês de Julho.....	175
Tabela 23: Ultrapassagem do Padrão OMS nos Meses da Pesquisa.....	178
Tabela 24: Dias e Horas Analisados e Validados.....	179
Tabela 25: Médias das Concentrações do NO <sub>2</sub> nos Meses da Pesquisa.....	179

## LISTA DE ABREVIATURAS

BEN – Balanço Energético Nacional	MW – Megawatts
CEASA – Centrais de Abastecimento	N – Norte
CDs – Compact Disc	NE – Nordeste
CEM – Companhia de Eletricidade de Manaus	NIEMA – Núcleo Interdisciplinar de Energia, Meio Ambiente e Água
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental	Nm – Nanômetro
CLP – Camada Limite Planetária	NO <sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente	PAN – Peroxiacetil Nitratos
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente	PBN – Nitrato de Peroxibenzoila
COPAM – Companhia de Petróleo da Amazônia	ppb – Partes por Bilhão
COVs – Compostos Orgânicos Voláteis	OMS – Organização Mundial de Saúde
DETRAM – Departamento Nacional de Trânsito	ONGs – Organizações Não Governamentais
DVDs – Digital Versatile Disc	PTS – Partículas Totais em Suspensão
EAPA – Episódios Agudos de Poluição do Ar	PM10 – Partículas Inaláveis
EMMQA – Estação Móvel de Monitoramento da Qualidade do Ar	PSI – Unidade de Medida de Pressão utilizada pela indústria americana
EPA – Environmental Protection Agency	REMAN – Refinaria de Manaus
FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente	RMSp – Região Metropolitana de São Paulo
GEE – Gases de Efeito Estufa	RO <sub>2</sub> – Radical Peróxido
GWP – Global Warming Potential	S – SUL
<i>h</i> – Constante de Planck	SE – Sudeste
HC - Hidrocarbonetos	Smog – “ <i>smoke</i> ” + “ <i>fog</i> ”
IBGE – Instituto Brasileiro da Geografia e Estatística	SPVEA – Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária	SUDAM – Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia	TVs – Televisões
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas	UFAM – Universidade Federal do Amazonas
IV – Infravermelho	UHE – Usina Hidrelétrica
Kj – Quilojoule	UTES – Usinas Termelétricas
Km – Quilômetro	UV – Ultravioleta
L – Leste	W – Oeste
LCD – Display de Cristal Líquido	ΔH – Variação de Entalpia
MAA – Média Aritimética Anual	<i>v</i> – Frequência da Radiação Eletromagnética
MGA – Média Geométrica Anual	λ - Comprimento de Onda
MP – Material Particulado	μg – Micrograma
	°C – Graus Celsius

## LISTA DE SÍMBOLOS e FÓRMULAS

Ar – Argônio  
C – Carbono  
CFCs – Clorofluorcarbonetos  
CH<sub>2</sub>O – Fórmula simplificada dos carboidratos  
CH<sub>4</sub> – Metano  
CO – Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico  
C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> – Fórmula Geral dos Hidrocarbonetos  
H<sub>2</sub>O – Água  
H<sub>2</sub>S – Gás Sulfídrico  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido Sulfúrico  
HF – Gás Fluorídrico  
HNO<sub>2</sub> – Ácido Nitroso  
HNO<sub>3</sub> – Ácido Nítrico  
HO• – Radical Hidroxila  
HOO• – Hidroperóxido  
N<sup>+</sup> - Íon Nitrogênio  
N<sub>2</sub> – Nitrogênio Molecular  
N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso  
N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de Nitrogênio  
Na – Sódio  
NO – Óxido Nítrico  
NO<sub>2</sub> – Dióxido de Nitrogênio  
NO<sub>3</sub>• – Radical Nitrato  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio (NO + NO<sub>2</sub>)  
O• – Oxigênio, radical livre  
O<sub>2</sub> – Oxigênio Molecular  
O<sub>3</sub> – Ozônio  
SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxôfre

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO TEÓRICA SOBRE A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	20
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO DESENVOLVIMENTO.....	20
2.1.1 <u>Energia e Cultura da Combustão</u> .....	22
2.1.2 <u>Contribuição da Ciência Química</u> .....	28
2.1.3 <u>Energia e o Desenvolvimento do Amazonas</u> .....	34
2.1.4 <u>O Consumo e a Escassez de Recursos</u> .....	48
2.1.5 <u>Questões Urbanas e Climáticas</u> .....	51
2.1.6 <u>A Contribuição Veicular</u> .....	60
2.1.7 <u>Comprometimento Atmosférico e a Importância das Medidas de Controle</u> .....	65
2.2 A QUÍMICA DA ATMOSFERA.....	76
2.2.1 <u>Composição da Atmosfera</u> .....	80
2.2.2 <u>Reatividade Química e Tempo de Residência de alguns gases na atmosfera</u> .....	86
2.2.3 <u>Efeito Estufa</u> .....	91
2.2.4 <u>Combustão, Combustível e Contaminantes</u> .....	97
2.2.5 <u>Condições Meteorológicas</u> .....	102
2.2.6 <u>Padrões de Qualidade do Ar</u> .....	112
2.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A ATMOSFERA.....	115
2.3.1 <u>O Espectro Eletromagnético</u> .....	116
2.3.2 <u>Reações Fotoquímicas</u> .....	119
2.3.3 <u>O Ozônio Troposférico e seus Precursores</u> .....	127
2.3.4 <u>Vibrações Moleculares</u> .....	136
3. METODOLOGIA.....	139
3.1 O MONITORAMENTO.....	139
3.1.1 <u>A Escolha do Local da Coleta</u> .....	139
3.1.2 <u>A Escolha do Método</u> .....	142
3.1.3 <u>A EMQA</u> .....	143
3.1.4 <u>Descrição do Instrumento da Pesquisa</u> .....	144
3.1.5 <u>Metodologia de Calibração do Monitor</u> .....	146
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	148
3.2.1 <u>Variabilidade Mensal das Condições Meteorológicas</u> .....	148
3.2.2 <u>Estatística Descritiva dos Dados Amostrais</u> .....	151
3.2.3 <u>Análise Gráfica dos Dados Amostrais</u> .....	156
3.2.4 <u>Análise do Conjunto de Dados</u> .....	177
3.2.5 <u>Análise da Variabilidade das Concentrações em Função das Condições de Dispersão</u> .....	180
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	183
5. REFERÊNCIAS.....	190

# 1

## INTRODUÇÃO

*Preparar-se para o nosso mundo incerto é o contrário de se resignar a um ceticismo generalizado.*

(Edgar Morin)

Este estudo busca, na interdisciplinaridade, compreender a interdependência dos processos químicos e físicos diante da complexidade dos fenômenos atmosféricos. Em cada etapa do trabalho, os fenômenos químicos e ambientais são analisados buscando não perder de vista a perspectiva histórica, econômica e social de mundo, pois o mundo, como se refere Leis (2004), é uma realidade cada vez menos internacional e cada vez mais uma realidade global.

No entanto, ainda que conscientes dos limites da natureza, as forças do mercado resistem a qualquer possibilidade de redução dos lucros, burlando leis, mascarando a realidade e tornando muito difícil encontrar soluções globais a problemas globais. Para vencer essas forças a sociedade terá que se munir da capacidade de relacionar os conhecimentos que a Ciência adquiriu através dos tempos, às demandas do progresso, de unir a tecnologia e a informação às exigências de qualidade de vida, no presente e no futuro (LEIS, 2004).

A Ciência Química tem um papel importante nessa história porque, nas últimas décadas, algumas descobertas deixaram o mundo em estado de alerta para fenômenos como, “aquecimento global”, “buraco na camada de ozônio”, “poluição fotoquímica” e “chuva ácida”. E não só a Química, porque nenhuma Ciência, por si só, terá condições de explicar e encontrar soluções para esses e outros problemas atuais. A temática ambiental transita entre

todas as áreas do conhecimento estimulando discussões e envolvendo questões climáticas e meteorológicas, além de problemas relacionados com as inúmeras mazelas sociais e os sistemas de governo através dos tempos. Esses assuntos da atualidade estão unindo a Ciência em todos os seus matizes e abrindo espaço para refletir sobre o ambiente natural e as suas múltiplas correlações entre homem e natureza.

Crescer, para vários sistemas de governo, tem significado diferentes formas de exploração, as quais produzem externalidades sociais e ecológicas não contabilizadas economicamente, socialmente, nem culturalmente. Do ponto de vista econômico e social esses custos não são pagos e os benefícios não são recebidos igualmente por todos. Culturalmente também não são compreendidos nem assimilados e, nesse contexto, o mundo caminha como se nada pudesse mudar o rumo da história ou que igualmente eterna fosse a disponibilidade dos bens proporcionados pela natureza.

As crises ecológicas e o colapso social parecem estar profundamente relacionados e a Terra tem dificuldades para absorver os impactos da produção. Todas essas forças, embora aparentemente diferentes, são resultado da mesma dinâmica central de expansão dos sistemas econômicos de poder. Mesmo a nascente consciência ética ambiental, que começa a colocar o modelo capitalista em xeque, não é eficiente para vencer o poder mistificador do sistema, o qual tem, como imperativo, o aumento constante da lucratividade.

Em consequência, também não é capaz de disseminar o conhecimento dos problemas que afetam as populações atuais e vindouras. A alienação cultural, daí decorrente, gera efeitos nocivos sobre a natureza e ao próprio homem, significando um distanciamento entre o mundo restrito das ciências e a sociedade. Para combater o que pode ser chamado, nos dias de hoje, a maior crise socioambiental do mundo moderno, as pesquisas científicas precisam aglutinar

forças estabelecendo relações entre si e entre os diversos setores da sociedade.

Leis naturais e universais comandam essas inter-relações e não podem ser ignoradas quando se põe em questão o uso de recursos naturais, renováveis ou não, para a produção de energia necessária ao desenvolvimento das Nações. Nesse caso, o uso da energia não pode estar dissociado do que é dado aos bens naturais ou industrializados e deve ser entendido como fator definitivo para a compreensão dos limites do globo e como determinante dos processos de desenvolvimento social e econômico de forma sustentável.

Compreender estas relações complexas não é algo muito fácil de realizar. É difícil relacionar a alimentação das populações com a perda da biodiversidade; o uso do transporte com a poluição atmosférica; o avanço da urbanização e a industrialização com o esgotamento do solo, a poluição das águas e o aquecimento global; o simples ato de acender uma lâmpada elétrica ou ligar um aparelho de ar condicionado ao esgotamento dos recursos naturais ou à diminuição da qualidade de vida (VALOIS, 2007).

Apesar dessa dificuldade, cresce significativamente a preocupação com o aumento de emissões de gases do efeito estufa (GEEs), por exemplo, e o polêmico tema sobre o aquecimento do globo terrestre, que podem trazer problemas para a sobrevivência do homem, dos demais animais e vegetais. Disso resulta uma valoração social maior do ar atmosférico e uma demanda por processos mais eficientes e menos poluentes.

As atividades industriais, a geração de energia elétrica e o aumento do número de veículos automotores têm contribuído com concentrações cada vez maiores de poluentes, entre os quais Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Óxido Nítrico (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), partículas em suspensão e outros produzidos indiretamente através de reações fotoquímicas no ar (PRETTO, 2005).

Essa reflexão leva a relacionar os impactos dos poluentes na qualidade do ar atmosférico com os resíduos gerados pelo desenvolvimento acelerado, resíduos que têm origem em muitas fontes. Entre elas, considerando a cidade de Manaus e os objetivos deste estudo, destaca-se a emissão de gases provenientes da queima de combustíveis fósseis nas termelétricas e nos veículos automotores que circulam pela cidade. Acrescente-se que, em Manaus, dado o isolamento elétrico e geográfico, a energia é gerada, principalmente por termelétricas e a concentração da população na capital intensifica a emissão dos gases poluentes emitidos por essas fontes. Esse fato impõe, de imediato, uma análise diferenciada em relação às outras cidades do Brasil, onde a principal fonte de geração é hidrelétrica.

A poluição decorrente dessas atividades é uma ameaça à qualidade de vida, mas não é a única. Os derramamentos de petróleo frequentes no mundo industrializado e a consequente destruição da flora e fauna marinhas, os choques do petróleo, a mineração, a poluição das águas e do ar, além da perda desnecessária de vidas, são fenômenos que estão longe ainda de serem solucionados na sua totalidade.

O Estudo de Impacto Ambiental realizado quando da instalação das UTE's (Usinas Termelétricas) refere-se apenas à emissão na fonte não sendo avaliadas as condições ambientais do ar, através da concentração de substâncias tóxicas, a qual varia conforme a distância da fonte emissora e as possibilidades de diluição da substância tóxica na atmosfera. A inexistência de uma rede de monitoramento da qualidade do ar capaz de promover a fiscalização, tanto do ponto de vista da eficiência de combustão, quanto do enfoque na proteção do patrimônio público/privado, saúde humana, e meio ambiente, deixam a sociedade e o poder público sem ferramentas para fundamentar suas contestações e reivindicações.

Com o aumento crescente de termelétricas e o fato de estas se localizarem, geralmente,



próximas aos centros de carga, os impactos provocados no ambiente são cumulativos. Nesse caso, o estudo de impacto ambiental exigido quando da instalação de cada empreendimento isoladamente, parece ser insuficiente. É mais eficaz a análise dos impactos do conjunto das usinas instaladas, o que significa, para a cidade de Manaus, a necessidade de monitoração e formulação de uma política de gestão da qualidade do ar atmosférico.

Além das considerações acima, é preciso ponderar, ainda como justificativa para esta pesquisa, o fato de os poluentes referidos serem originados de recursos não renováveis e que, além de trazerem impactos negativos ao ambiente, acarretam custos financeiros e energéticos crescentes, devidos à necessidade constante de renovação do processo tecnológico para ter acesso aos mesmos.

Diante disso é premente a formulação do diagnóstico da qualidade do ar ambiental para verificar seu enquadramento na Resolução CONAMA<sup>1</sup> n. 03/1990 e dar subsídios ao poder público no estabelecimento das exigências de níveis adequados de emissão das fontes de poluição fixas e móveis. Também é importante avaliar até que ponto as normas estabelecidas pela referida Resolução, são adequadas à realidade da região amazônica.

Como objetivo principal este estudo buscou conhecer e avaliar os níveis de concentração do NO<sub>2</sub> em determinada área urbana da cidade de Manaus, possivelmente impactada pela queima de combustíveis fósseis e entender os mecanismos de interferência dos parâmetros meteorológicos na poluição atmosférica. Espera-se, com isso, trazer um importante subsídio para a atuação do poder público e da própria sociedade, na formulação, planejamento, implantação e acompanhamento de políticas ambientais dirigidas ao monitoramento da qualidade do ar.

---

<sup>1</sup> Conselho Nacional do Meio Ambiente

O desenvolvimento das atividades humanas parece estar contribuindo para aumentar a concentração dos poluentes na atmosfera urbana das cidades mais populosas do mundo. Esse fato justifica que se faça um resgate histórico do processo de desenvolvimento das sociedades, pois o homem se comporta com relação aos outros homens e com o meio ambiente segundo valores assumidos e trabalhados no contexto do seu tempo e espaço, portanto, da sua história.

Com este escopo, elaborou-se, inicialmente, uma contextualização histórica dos caminhos que a humanidade tem percorrido em busca do desenvolvimento econômico, principal vetor dos processos de poluição, e da contribuição da ciência Química, sem olvidar a importância dos conhecimentos químicos no caminho de retorno a uma natureza equilibrada e sustentável.

O desenvolvimento do estado do Amazonas, desde o tempo das “drogas do sertão” até o advento do gás natural, precisou ser abordado para um melhor entendimento dos problemas ligados ao abastecimento de energia na região, um dos mais importantes focos de poluição atmosférica. Tornou-se indispensável, como abertura para o exercício de um pensar humano responsável, abordar a contribuição da energia para o crescimento da indústria e, conseqüentemente, das sociedades.

Num segundo momento, importante para atender ao objetivo principal deste estudo, faz-se uma abordagem teórica dos principais fenômenos atmosféricos e da interação entre matéria e energia, destacando as reações fotoquímicas como forças decisivas no agravamento da poluição do ar.

Em Metodologia, são apresentados os principais métodos e instrumentos utilizados, bem como os dados obtidos entre fevereiro e julho de 2011 de uma Estação Móvel de Monitoramento da Qualidade do Ar (EMMQA), de propriedade do Núcleo Interdisciplinar de Energia, Meio Ambiente e Água (NIEMA) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A estação foi

instalada na zona leste da cidade, próximo ao Distrito Industrial, e ao maior complexo termelétrico do país.

Além da influência dessas emissões, também foram consideradas importantes para a qualidade do ar nessa zona da cidade, a poluição veicular e a contribuição das embarcações no Porto da CEASA<sup>2</sup>, próximas ao local da coleta. Os resultados obtidos foram avaliados com base nas condições meteorológicas, tratados estatisticamente e relacionados com a legislação ambiental brasileira e com as recomendações da OMS, muito mais exigentes quanto aos padrões de emissões.

A cidade de Manaus, por sua posição geográfica e condições climáticas não deve estar entre as cidades mais poluídas do país, no entanto, particularmente na zona leste da cidade, alguns valores encontrados para a concentração dos óxidos de nitrogênio na atmosfera são suficientemente altos para justificar a preocupação com a qualidade do ar.

As chuvas frequentes e quase diárias na maior parte do ano permitem que a diluição das impurezas evite a permanência dos poluentes no ar atmosférico, mas as elevadas temperaturas e a reduzida velocidade dos ventos concorrem inversamente, para elevar os níveis dessas substâncias na atmosfera.

O controle das emissões é fundamental, não só para que, no futuro, os amazonenses não se defrontem com situações irreversíveis, mas para que, ao ampliar o abastecimento energético, qualquer que seja a fonte, e a frota veicular, os potenciais impactos ao ambiente possam ser controlados.

Enfim, o planejamento urbano com condições de acompanhar o desenvolvimento da cidade de Manaus, deve contemplar o monitoramento e o controle das emissões, inclusive evitando que

---

<sup>2</sup> Centrais de Abastecimento

se concentre numa mesma zona, bairro ou região, um grande número de fontes poluidoras, como acontece com o bairro do Mauzinho na zona leste da cidade. Isso é importante porque, no que diz respeito aos danos ambientais provocados pelas atividades ligadas à produção de energia elétrica, a expansão da cidade se tem apoiado na disponibilidade de fontes de energia abundantes e baratas, sem a devida preocupação com a eficiência no aproveitamento da matéria prima dos processos de produção.

## REVISÃO TEÓRICA SOBRE A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

*Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.*

*Leonardo da Vinci*

### 2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO DESENVOLVIMENTO

Historicamente marca-se o início do desequilíbrio na composição atmosférica a partir da descoberta do fogo, primeira e importante vitória do homem sobre a natureza. Essa conquista da Humanidade, necessariamente, consistiu na utilização da energia como uma força natural transformadora o que a coloca na origem de todas as transformações materiais ocorridas através dos tempos, com ou sem a participação humana. Por esta razão, esse fato histórico também marcou o início do domínio da química, aqui entendida como ciência capaz de facilitar a leitura e a interação com o mundo.

A história da relação do homem com a natureza se confunde com a história da energia, tendo início, ambas, com o homem das cavernas, a descoberta do fogo e suas utilidades para proteção, alimentação e aquecimento. A energia permite as condições necessárias para uma sociedade moderna e, ao mesmo tempo, proporciona amenidades comumente confundidas com os bens que, de fato, são indispensáveis à qualidade de vida. O homem, no entanto, é parte de um quadro maior, onde a saúde, o bem-estar humano e a natureza dos sistemas sociais representam papéis importantes e fundamentais, conseqüentemente a qualidade de vida não

pode estar dissociada do bem-estar do planeta (HINRICHS *et. al.*, 2010).

Essa análise inicial tem alguns desdobramentos, pois relaciona o poder sobre a natureza com poluição, desenvolvimento, uso crescente das matérias-primas e, em última instância, exploração do próprio homem pelo seu semelhante. O fenômeno, que é resultante do desenvolvimento das forças produtivas, trouxe consequências importantes, tanto na qualidade de vida humana quanto do ambiente.

Uma visão realista sobre o mundo atual deixa claro que o ambiente é uma dimensão finita abrigando uma economia e uma população em franco crescimento. Este fato mostra a impossibilidade física de crescimento constante, resultando na necessidade de impor limitações e na imposição inadiável de se buscar um equilíbrio possível, principalmente se for considerado que esse crescimento é agravado com o aumento da pobreza resultante do desequilíbrio socioeconômico.

No início da história do homem sobre a Terra, a manipulação dos recursos disponíveis na natureza não constituiu degradação, porque ao se respeitarem os ciclos naturais de produção, a natureza conseguia renovar-se e reconstituir as suas perdas. No entanto, e esse é um fato de grande relevância, com a tecnologia do motor elétrico, o uso do petróleo como fonte de energia se intensificou, aumentou a produção, o consumo irracional dos recursos naturais e a corrida para o desenvolvimento industrial acelerado, criou riquezas e, ao mesmo tempo, produziu um empobrecimento coletivo e desigual (VALOIS, 2007).

Foi no final do séc. XVIII que o fator tecnologia desempenhou um importante papel no processo de produção de bens e depredação da natureza. A época que a história denominou de revolução industrial marcou-se pela significativa contribuição da energia como alavanca para o crescimento econômico baseado no uso e na exploração das riquezas naturais, permitindo a

aceleração da produção e acumulação do capital. Lixo, poluição dos ecossistemas, destruição das florestas, das águas, da biodiversidade e o esgotamento dos recursos energéticos estão tornando cada vez mais difíceis as condições de vida no planeta e exigindo mudanças comportamentais e políticas urgentes.

Não por coincidência foi também a partir do séc. XVIII, com o início da industrialização, que a temática ambiental começou a ser debatida. Questões como, o esgotamento de riquezas naturais, poluição e perda de qualidade de vida, há muito tempo, fazem parte dos discursos ambientalistas, mas apenas na segunda metade do século XX a preocupação com esses problemas se tornou mais explícita, embora camuflada com a mensagem de “sustentabilidade”. A mudança do discurso teve como motor a continuidade da dominação: o ambiente se tornou “meio ambiente”; limites do desenvolvimento passaram a ser entendidos como “desenvolvimento sustentável”, matérias-primas e energia transformaram-se em “recursos naturais”, força de trabalho, hoje se chama “recursos humanos” e, por fim, não existem mais conflitos de classe e sim “conflitos de gerações” (RODRIGUES, 2005).

Vê-se que a ideologia dominante mudou o tipo do discurso, mas não pode mudar a história que impõe sua presença em cada pedacinho do ambiente, em cada processo de transformação das matérias-primas e da energia e em todos os homens e mulheres que doam a sua força de trabalho para continuar vivendo num mundo em desenvolvimento.

### 2.1.1 Energia e Cultura da Combustão

O estudo da energia esteve, inicialmente, vinculado às diferentes concepções a respeito da origem do calor por físicos e químicos. Fluido material para os físicos ou resultado do movimento das moléculas para os químicos. A primeira saída racional ocorreu em 1824 com Carnot que procurou estudar o mecanismo de funcionamento das máquinas térmicas

concluindo sobre os limites do rendimento das máquinas e fornecendo a base para a formulação dos princípios da termodinâmica (HEMÉRY, 1993).

A primeira Lei da Termodinâmica expressa o princípio da conservação de energia ao dizer que a energia do universo é constante, não podendo ser criada nem destruída, apenas transformada. Conservação de energia é, portanto, um termo que tem relação direta com a primeira Lei da Termodinâmica, pois para qualquer sistema fechado, a energia total é constante. Mas, como a energia está constantemente se transformando em outras formas de energia, o esgotamento dos estoques de energia está intimamente ligado ao rendimento dos conversores (GOLDEMBERG & LUCON, 2008).

Os conversores transformam a energia natural (recursos) em energia útil; portanto, quanto melhor for o rendimento do processo de transformação, menor será a exigência energética. Esse fato traduz a segunda Lei da Termodinâmica, a entropia, segundo a qual, nenhuma transformação é 100% eficiente. Alguma energia se torna indisponível sob forma de energia térmica, dispersa no ambiente (GOLDEMBERG & LUCON, 2008).

Também não existe uma rota de colisão entre as duas leis da Termodinâmica, isto é, elas não se contradizem, porque embora a energia sempre se conserve, a geração de entropia é inevitável e isso “implica a progressiva e inexorável destruição das reservas energéticas conversíveis” (NOGUEIRA, 2007).

Relações de produção que caracterizam as sociedades, condicionam, a seu tempo, o desenvolvimento energético. Assim, diversos sistemas energéticos se sucederam através dos tempos: a sociedade feudal e a sociedade capitalista tiveram seus sistemas energéticos próprios. O uso da energia humana, da tração animal, dos ventos ou da máquina a vapor foi determinado por condicionantes sociais e políticos.



“[...] a difusão da máquina a vapor não teve por objetivo aliviar o trabalho dos tecelões, mas simplesmente permitir aos patrões das manufaturas produzir mais, mais rápido e mais barato e este primeiro conversor de energia térmica em energia mecânica, teve por efeito, senão por objetivo, estabelecer a dominação do capital sobre o trabalho” (HEMÉRY, 1993, p. 23).

Portanto, o desenvolvimento da humanidade sempre esteve ligado ao tipo de energia que o homem usou para dominar a natureza, em cada período da sua história. Como marco inicial para a sobrevivência da espécie, o domínio e o controle do fogo foram fundamentais, pois se utilizou a energia proveniente da combustão para produzir alimentos, utensílios cerâmicos e metais. O fogo não foi apenas fonte de energia adicional. Foi fator de socialização, na medida em que produziu mudanças na forma de ocupação do espaço pelo homem (em volta das fogueiras), na alimentação, no aperfeiçoamento dos instrumentos de produção e, em consequência, na percepção de mundo e, inclusive, no desenvolvimento psíquico e social. Surgiram, na sequência, os ofícios como o de ferreiro que foi o primeiro artífice das transformações químicas controladas pelo homem, a transformação dos metais, a metalurgia, amplamente praticada nas grandes civilizações da antiguidade, coincidindo com os registros da prática da alquimia, como precursora do que veio a ser a ciência Química (VALOIS, 2007). É necessário voltar muito longe na história, para encontrar as sociedades que utilizavam apenas a força humana e verificar que a demanda por energia cresceu a partir de então, com o uso do fogo para cozinhar, a domesticação dos animais e a disponibilização da energia mecânica adicional. Nessas épocas remotas, a população mundial ainda não atingira índices elevados sendo menores os níveis do consumo, o comércio e as demandas por serviços de infraestrutura e energéticos. Então, a produção e os serviços eram executados à custa da força de trabalho dos homens, da tração animal, da utilização direta da força das águas e do vento, da lenha e do carvão vegetal. No entanto, devido à avidez do processo produtivo, a madeira utilizada para produzir energia térmica foi se tornando escassa em algumas regiões

aumentando a demanda pelo combustível. “O uso intensivo de madeira para construções, embarcações e geração de calor levou à destruição das florestas em diversas regiões mais sensíveis do planeta, especialmente ilhas e montanhas” (GOLDEMBERG & LUCON, 2008, pag. 67).

Forçosamente o processo produtivo exigia a descoberta de novas fontes de energia para continuar a sua escalada. De fato, dois fatores aceleraram a degradação das riquezas naturais: o desenvolvimento econômico e o aumento populacional. Em busca do desenvolvimento econômico, a começar com a indústria dos produtos manufaturados, a humanidade iniciou a aceleração dos impactos ambientais, e a partir de então o processo se desenrolou de forma cada vez mais célere.

Uma vez que a produção está associada à disponibilidade de energia, o desenvolvimento de qualquer país ou região depende de fontes energéticas confiáveis e, em consequência, da utilização crescente dos recursos da natureza. Portanto, qualquer aumento na produção tem significado aumentar também o consumo energético e a geração de resíduos, resultando na conclusão de que os problemas ambientais da atualidade estão intimamente relacionados com a utilização de energia. Por esse motivo, a Revolução Industrial e o desenvolvimento da Indústria Química são definidos, por muitos, como decisivos no processo acelerado da poluição. No entanto, apesar dessa aparente relação de dependência entre consumo de energia e desenvolvimento, “esses parâmetros não estão ligados de maneira indissolúvel”, o que quer dizer que existem caminhos alternativos para o desenvolvimento “sem o aumento correspondente do consumo de energia” (GOLDEMBERG & LUCON, 2008, pag. 83).

Ao potencializar o uso dos recursos naturais e energéticos, o homem lançou as bases da revolução tecnológica burguesa. Esse fato, no apagar das luzes do séc. XVIII consistiu no que

se poderia chamar aqui, uma verdadeira cultura da combustão. O uso do carvão mineral de forma intensiva possibilitou a introdução da máquina a vapor no processo produtivo e permitiu transformações substanciais na relação do homem com a natureza e com os outros homens, determinando mudanças em toda a estrutura socioeconômica e ambiental e marcando o início de uma nova era para a economia (VALOIS, 2007).

Graças à tecnologia da máquina a vapor, os países detentores das maiores reservas de carvão mineral foram os que mais se desenvolveram entre os séculos XVIII e XIX, permitindo que uma indústria iniciante substituísse a agricultura como principal atividade econômica. No entanto, o aumento do consumo de energia a partir dessa nova tecnologia não foi tão significativo quanto aquele proporcionado pela tecnologia do motor elétrico (VALOIS, 2007).

Com a abertura do primeiro poço petrolífero uma nova fonte energética substituiu o carvão e a introdução do petróleo e do motor de combustão interna ao processo produtivo, marcou a assim chamada II Revolução Industrial. Posteriormente, os avanços da eletricidade permitiram o surgimento de uma civilização, ainda hoje, fortemente dependente dos combustíveis fósseis. Mudou as relações sociais fazendo nascer o trabalho altamente especializado, além de transformações nos transportes, nas comunicações, no vestuário, nas famílias, enfim, toda a modernidade tecnológica dos dias atuais, o que só foi possível graças ao advento da eletricidade.

Infelizmente, o modelo que se baseou na lógica de acumulação de bens, no consumismo exacerbado e no desperdício de energia e de recursos naturais, não levou em consideração a capacidade limitada do ambiente de fornecer matéria-prima e absorver os resíduos do processo produtivo. Como consequência, efeitos perversos se fazem sentir, paradoxalmente, na qualidade de vida das populações, criando mecanismos que injetam uma dinâmica cada vez

maior ao movimento de transformação das sociedades.

O acúmulo do capital levou a uma desigual distribuição de renda, significando, em decorrência, que os benefícios da energia elétrica também se distribuíram desigualmente seguindo a mesma filosofia do “quem mais tem é quem pode mais”. No Brasil, o modelo capitalista de desenvolvimento, além de aumentar o consumo de bens, de recursos e de serviços, fez crescer, também, o nível de pobreza (VALOIS COELHO e CARTAXO, 2004; VALOIS, 2007).

Decididamente, a máquina a vapor, o motor elétrico, o desenvolvimento do aço e todos os avanços obtidos no campo dos transportes e na produção, dinamizaram o comércio, o consumo e todas as demais atividades ligadas inexoravelmente ao desgaste maior dos recursos naturais. Pode-se dizer, como Rifkin (2003, p. 4), que “todos os avanços dos últimos dois séculos, sejam eles de natureza comercial, política ou social, estão ligados, de alguma forma, às transformações e ao poder derivado dos combustíveis fósseis”.

É importante ressaltar que a passagem das fontes renováveis de energia para os combustíveis fósseis propiciou o desenvolvimento de uma sociedade baseada na exploração crescente das matérias-primas naturais, na acumulação do capital e na aceleração da produção, inclusive de supérfluos para cuja distribuição contou-se, cada vez mais, com o apelo ao consumo, pois o mecanismo de mercado precisa organizar a produção e distribuição dos bens e serviços. De fato, este processo se tornou uma relação de causa e efeito. Quanto mais se produz, mais se precisa consumir e quanto maior o consumo mais se necessita produzir. O novo modelo de sociedade estabelecia o seu domínio, investindo no crescimento econômico baseado no uso intensivo de energia, deixando um rastro de agressões ao meio ambiente e à sociedade (VALOIS, 2007).

E sendo parte integrante da sociedade industrial, porque é resíduo da produção, a poluição imprime seus efeitos, tanto no campo ambiental, como econômico, político e social, com desdobramentos imprevisíveis. Portanto, a primeira forma de energia produzida pelo homem (o homem das cavernas), que consistiu na combustão pelo atrito, se modernizou através dos tempos, mas, ainda hoje, a combustão é a principal fonte de energia utilizada nas atividades de produção. E continuará, ainda por algum tempo, como fonte de energia, pois os países desenvolvidos e em desenvolvimento, terão que obter energia térmica necessária ao funcionamento de suas indústrias e dos setores de transporte, principalmente pelo processo de combustão (CARVALHO Jr. e LACAVA, 2003).

Percebe-se, ao investigar a ligação da energia com a história do desenvolvimento, que as expectativas de crescimento econômico sempre demandaram investimentos na área de geração de energia sem haver uma concreta preocupação com a eficiência energética ou com externalidades ambientais. Em regiões onde a prodigalidade da natureza induz à ideia de perpetuação dos recursos naturais, políticas de conservação têm sido postergadas, prevalecendo, ainda que de forma camuflada, os interesses pouco ecológicos da exploração (VALOIS, 2007).

Ações de controle e tratamento das emissões, embora necessárias, não são suficientes, pois transferem os poluentes de um meio receptor para outro. É preciso compreender as causas da poluição que, segundo o pensamento ambientalista, “é uma questão de baixa eficiência no aproveitamento das matérias-primas dos processos produtivos” (MARTINS, 2004).

Do mesmo modo, as legislações ambientais, por si só, não bastam para que a humanidade atinja o desenvolvimento sustentável, porque, mesmo existindo um arcabouço legal de qualidade e por mais severas que sejam essas leis, a realidade não muda como num passe de

mágica. Concluindo esta análise, o sistema produtivo como impulsionador do desenvolvimento enfrenta limites inquestionáveis. Nacionalmente é pressionado pelos índices econômicos e pelas políticas que os perseguem e, internacionalmente, pela dependência energética dos limites do globo e por uma nova, embora fragmentada, consciência ambiental. Parece cada vez mais evidente que a cultura da combustão “[...] não pode ter uma vida histórica muito longa” (KURTZ, 2004).

### 2.1.2 Contribuição da Ciência Química

Pode-se dizer que, ao utilizar o fogo pela primeira vez, o homem também começou a realizar experimentos químicos. Todas as atividades humanas estão impregnadas de conhecimentos químicos, “em cada copo de vinho bebido, pão consumido, unguento passado nas feridas do soldado ou flecha envenenada lançada contra um inimigo durante uma guerra, havia a química [...]”. Foi o domínio de certos conhecimentos, impulsionando as sociedades antigas no campo dos artefatos bélicos, nas conquistas de territórios, no surgimento da indústria têxtil, na fabricação do vidro, além de muitas outras descobertas, que colocaram a Química, definitivamente presente no cotidiano do homem moderno (OLIVEIRA, MARTINS e APPELT, 2010, pag. 140).

Desde a Idade da Pedra até os dias hodiernos, passando pela Idade do Bronze e do Ferro, quando o homem aprendeu a extrair metais dos minerais encontrados na Natureza, os conhecimentos químicos foram sendo reunidos em hipóteses, leis e teorias com o objetivo primeiro de proporcionar melhorias na qualidade de vida. As belezas da civilização surgiram à medida que o homem aperfeiçoou “sua capacidade de transformar os materiais, o vidro, as joias, as moedas, as cerâmicas [...]” (ATKINS e JONES, 2006, p.27).

Evidentemente, também não é possível negar a contribuição da Química nos impactos

negativos produzidos ao ambiente com as novas tecnologias, pois apesar dos avanços tecnológicos e científicos, o ambiente tem se degradado em consequência dos resíduos que não consegue absorver.

Na sequência histórica das atividades humanas, a industrialização, a produção de alimentos, o aumento da população e a geração e o consumo de energia para manter aquelas atividades, foram aceleradores do maior comprometimento do ar atmosférico. Surgiram novos tipos de resíduos de origem industrial, domiciliar, comercial, hospitalar, agrícola e outros, para o que a Ciência Química teve enorme contribuição, pois a industrialização precisou produzir fertilizantes, pesticidas e herbicidas entre outros produtos, necessários para atender a uma demanda maior de alimentos e melhorar a saúde e o padrão de vida da espécie humana.

A história da Química como ciência tem um marco que foi o revolucionário *Traité Élémentaire de Chimie*, publicado em 1789 por Antoine Lavoisier. Antes de Lavoisier (1743 – 1794) tudo que se sabia sobre combustão estava relacionado à “Teoria do Flogístico”, segundo a qual toda substância combustível possuía, em seu interior, um constituinte invisível denominado “flogístico” capaz de produzir luz e calor, deixando como resíduo, a cinza. A combustão era, então, o resultado da perda de “flogístico” pelos metais (ARAGÃO, 2008).

Em 1786 Lavoisier criou a expressão “matière du feu” em substituição ao “flogístico” e mais tarde o termo “calórico”, o qual, dependendo da quantidade, formava os três estados físicos da matéria. Na sequência desses fatos e em função deles, a combustão passou a ser entendida como uma reação química entre o combustível e o comburente (oxigênio) e a Química se tornou uma Ciência com linguagem e metodologia próprias das ciências quantitativas (LAVOISIER, 2007).

Em sua obra, ao afirmar que, “Sendo as substâncias combustíveis, em geral, aquelas que têm

grande afinidade pelo oxigênio [...]”, Lavoisier introduz uma nova teoria segundo a qual a combustão é causada pela absorção do oxigênio e não pela perda do flogístico (LAVOISIER, 2007, p.79). Seus méritos consistiram na análise racional e no uso sistemático da balança como instrumento de pesquisa, método esse que o levou a explicar qualitativa e quantitativamente, alguns fenômenos químicos (ARAGÃO, 2008).

A experimentação passou a ser um requisito fundamental para o estabelecimento da verdade científica e, sem dúvida, Lavoisier foi um precursor desse método influenciando, determinantemente, na transição para a química quantitativa ao enunciar o seu princípio da conservação da matéria. Portanto, o embrião da Química Analítica Quantitativa, parte importante da Química Moderna, foi desenvolvido a partir das experiências de Lavoisier, usando a balança como primeiro instrumento de análise química (métodos gravimétricos) (AFONSO e SILVA, 2004).

O estabelecimento da importância da balança e o seu aperfeiçoamento a partir do final do século XIX foram determinados pelo desejo de produzir um instrumento que não dependesse tanto da prática do operador, não fosse muito sensível ao ambiente e mais do que nunca, tornasse o processo de pesagem mais rápido. A balança facilitou o trabalho nos laboratórios, e dessa forma também foi um instrumento importante para a aceleração da produção (AFONSO e SILVA, 2004).

Com relação aos métodos volumétricos, estes eram, no princípio, muito grosseiros, tornando-se mais precisos a partir de Gay-Lussac. Apenas no século XIX o seu uso se popularizou, em consequência, também, das necessidades econômicas decorrentes da Revolução Industrial. O surgimento dos laboratórios de pesquisa foi muito importante para o crescimento da indústria europeia, como também as tecnológicas mais sofisticadas as quais têm proporcionado



mudanças radicais, traduzindo em produtos para o consumo, os anseios da humanidade, suas necessidades e suas ambições. A aplicação dos conhecimentos científicos à produção tornou tênue a linha demarcadora entre Ciência e Tecnologia, criando-se um movimento de mão dupla e dando origem, em consequência, à expansão da industrialização (AFONSO e SILVA, 2004).

No entanto, a mesma tecnologia que traz conforto material, está colocando em risco não só a qualidade e a subsistência dos recursos naturais, mas também o bem-estar humano. As indústrias, em permanente crescimento, são alimentadas pela técnica química de transformação dos elementos. A Química fornece a fonte para a extraordinária variedade de produtos de consumo que a indústria oferece, e a sociedade, tão propriamente chamada de sociedade de consumo, esmagada por uma propaganda agressiva, inteligente e cada vez mais profissional, provoca degradações que a própria tecnologia tem dificuldade de eliminar (ATKINS & JONES, 2006).

Alguns setores sofreram maior interferência da química como foi o caso da agricultura impulsionada pelos fertilizantes artificiais, os quais, apesar das controvérsias, tiveram inegável importância diante da missão de prover os meios para a alimentação da população sempre crescente. Outro produto que permitiu uma substancial imersão na modernidade tecnológica foram os plásticos os quais passaram a ocupar um lugar privilegiado na sociedade, “substituindo materiais tradicionais como o vidro, o papel e a madeira” e “permitindo maior durabilidade e segurança” dos produtos manufaturados (OLIVEIRA *et. al.*, 2009, pag. 144). Nos dias atuais somam-se “materiais avançados, como polímeros para tecidos, silício de elevada pureza para computadores e vidro para fibras óticas” (ATKINS e JONES, 2006, p. 28). Esse progresso não teria sido possível sem a contribuição da Ciência Química.

Ela permitiu o desenvolvimento de combustíveis mais eficientes e renováveis, deu-nos as ligas mais leves e resistentes necessárias para a aviação moderna e as viagens espaciais. A química transformou a medicina aumentando substancialmente nossa expectativa de vida, e assentou os fundamentos da engenharia genética (ATKINS e JONES, 2006, p.28).

Contrapondo-se aos benefícios, mesmo considerando as vantagens do agronegócio e das tecnologias modernas que permitiram alimentar as populações crescentes, a qualidade dos produtos alimentares resultantes se degradou consideravelmente. E mais do que isso, a humanidade passou a conviver com elementos tóxicos presentes nos produtos fabricados pela indústria e disseminados no ar, na água, nos alimentos e nos ambientes internos.

Em todas as cadeias produtivas e complexos industriais, houve a participação da indústria química cujo papel de destaque no desenvolvimento das diversas atividades econômicas do mundo são inquestionáveis. “São mais de 70.000 compostos comerciais, utilizados para os mais diversos fins, sendo que a movimentação financeira em torno da produção mundial de produtos químicos, somente em 2008, ficou em cerca de 4 trilhões de dólares” (FARIAS e FÁVARO, 2011).

Durante todo o processo de desenvolvimento que envolveu as revoluções, agrícola e industrial, ocorreram mudanças nos processos físicos, químicos e biológicos devido ao crescimento da população, à queima de combustíveis fósseis com a inevitável liberação de poluentes para a atmosfera, e à intensificação das técnicas de plantio com o uso de fertilizantes e agrotóxicos (MARTINS *et.al.*, 2003).

Os impactos provocados por essas mudanças no planeta ainda não estão perfeitamente entendidos, pois sua compreensão requer o estudo dos processos em um contexto amplo, integrando os ecossistemas, atmosfera, hidrosfera e litosfera em seus diversos ciclos globais (MARTINS, *et. al.*, 2003).

Esses fatos colocaram a Química no rol dos vilões responsáveis pela poluição do solo, da água e do ar, mas, em contrapartida, os químicos foram requisitados para contribuírem na melhoria dos processos industriais tornando-os ecologicamente mais eficientes. Isso tem sido possível, por exemplo, através do tratamento dos efluentes, processo que reduz o poder poluidor dos mesmos sobre a natureza. Também, através do estudo do comportamento dos poluentes na natureza é possível encontrar os caminhos para mitigar impactos e aperfeiçoar técnicas de controle e monitoramento (O'CONNOR, 1977).

O' Connor, da Universidade do Texas (1977, p. 245), afirma que a Ciência possui tecnologia necessária para controlar, em grande parte, a poluição. Citando o professor texano, "[...] a extensão com que esta tecnologia será aplicada depende grandemente da extensão de nosso esforço para um ambiente melhorado e de nossa boa vontade em fazer os sacrifícios necessários para alcançá-lo".

O caminho do homem de volta à Natureza para amenizar e reduzir os danos que são causados necessariamente pelo progresso, precisa da química e de químicos conscientes do seu papel na sociedade e da importância dos processos cada vez menos poluentes para um ambiente saudável necessário à manutenção da vida no planeta. E quando se fala em processo poluente é importante ressaltar o papel essencial do consumo de energia não só referente ao uso dos combustíveis fósseis, mas como energia “per se” inerente às transformações químicas e à estrutura da matéria.

O advento da Mecânica Quântica e os estudos da interação entre matéria e energia eletromagnética produziram outro grande impulso à área tecnológica com repercussões importantes em medicina, biologia, química e física. Ocorreu uma verdadeira revolução no âmbito das certezas com relação às medidas temporais de posição e de momento e variáveis

dinâmicas substituíram as “garantias” da mecânica newtoniana (SILVA, 2008).

É natural que as análises químicas tenham sido beneficiadas com os avanços tecnológicos. O que antes, nos séculos XVIII e XIX, era realizado por processos gravimétricos e volumétricos quase exclusivamente, no século XX, mais precisamente a partir de 1970, avanços no campo da eletrônica e da computação introduziram novas técnicas enriquecendo os métodos analíticos com instrumentos mais complexos (SILVA, 2008).

Os métodos analíticos instrumentais utilizam equipamentos elétricos e marcam uma nova era para as análises químicas trazendo vantagens como rapidez, simplicidade, seletividade e sensibilidade. Ao permitirem a determinação de baixas concentrações das espécies de interesse facilitam, por exemplo, o estudo dos fenômenos atmosféricos (SILVA, 2008).

Nas últimas décadas, a Química Ambiental tem ocupado grandes espaços, interagindo com todos os outros ramos da Ciência e conseguindo uma enorme projeção internacional. O químico ambiental transita entre os conhecimentos básicos e teóricos da Química e os problemas ambientais, atuando, principalmente, em prevenção, controle e monitoramento da poluição.

### 2.1.3. Energia e o Desenvolvimento do Amazonas

Desde a descoberta, pelos gregos, das propriedades elétricas do âmbar, até os feitos de Thomas Edison, passando por Faraday que deu o ponto de partida para as aplicações práticas da eletricidade, nenhum achado científico foi tão decisivo para a aceleração do desenvolvimento das sociedades quanto o da energia elétrica. Permitiu, entre outras coisas, a utilização do motor elétrico em substituição ao vapor e o uso dos derivados do petróleo como fonte principal de energia, decorrendo daí, uma maior velocidade na produção (VALOIS e CARTAXO, 2009).

Entre todas as formas de energia, a energia elétrica, considerada a mais nobre das energias em virtude do processo de conversão envolvido, é a que acarreta custos mais elevados para produção e distribuição, mas, por outro lado, exerce um grande poder de sedução sobre as pessoas, tornando-se uma mercadoria ansiada como símbolo de poder, ascensão social e libertação.

Do lado institucional e político, o conceito superficialmente empírico de que a energia elétrica pode transformar atraso em desenvolvimento, torna-a instrumento de políticas que capitalizam os desejos e aspirações populares, e na perseguição a esse desenvolvimento, muita riqueza é desperdiçada e acumulada de forma bastante desigual, aprofundando-se, com isso, abismos sociais e de renda. Pode-se dizer que a energia elétrica é um indicador econômico e, como tal, acompanha os humores da economia nacional. Em tempos de crise conserva-se, em tempos de fartura, esbanja-se.

Reconhecidamente, a Região Amazônica, por suas riquezas inigualáveis abriga uma enorme contradição: por um lado, uma grande diversidade de fontes energéticas renováveis e, por outro, o estado de miséria vivido pelas populações das comunidades isoladas, onde o abastecimento de energia é precário. As vantagens socioambientais da geração e utilização de fontes primárias de energia em larga escala na região encontram algumas barreiras, entre as quais as mais importantes, referem-se aos altos custos de investimento inicial (CORREIA, 2005).

É um princípio econômico que esses custos só diminuirão quando a escala de produção das fontes aumentar, constituindo-se numa questão de decisão política, pois as fontes não diminuirão seu custo, por causa da baixa demanda e a demanda não aumentará, em virtude dos altos custos das fontes (CORREIA, 2005).

A energia elétrica, no Amazonas, tem sido um fator limitante em consequência das dificuldades de comunicação com o resto do país e entre as comunidades do próprio Estado. Apesar de suas inigualáveis riquezas, a região tem estado dependente de políticas oficiais elaboradas e dirigidas para outros Estados da Federação, sem a devida atenção às diversidades regionais do país.

No tempo das “Drogas do Sertão”, o desenvolvimento desse pedaço do norte do país esteve atrelado à navegação fluvial, subsidiada pelo Governo Federal e estimulada pela extração das riquezas da floresta. Descrevendo a história da evolução energética no Amazonas, Alkimin (2000) relata que, à época das primeiras navegações, o combustível usado era o carvão vegetal e a lenha. Através da navegação, comunidades e vilas foram criadas. Eram os chamados “portos de lenha” que serviam como pontos de abastecimento do combustível. Portanto, à essa época, no século XVIII, foi o interesse pelas “drogas do sertão” que favoreceu o estabelecimento de algumas fazendas às margens dos rios, porém esta não foi uma atividade extrativista muito importante.

O extrativismo se expandiu a partir do comércio da borracha, no final do século XIX (1880-1920). Com ele, numa cadeia de dependência recíproca, veio a navegação a vapor e, como consequência, o processo de ocupação da Amazônia. Coincidindo com o período que se seguiu à Proclamação da República (1889), Manaus viveu grandes transformações, pois a borracha, cada vez mais, era requisitada como matéria prima das indústrias mundiais. A cidade cresceu, a população aumentou inflada pela contribuição dos migrantes do nordeste, ganhou transporte coletivo de bondes elétricos, telefonia e eletricidade (ALKIMIM, 2000).

Aqui, como nas outras regiões do País, os serviços de eletricidade e todos os serviços que envolviam novas tecnologias, eram explorados por empresas estrangeiras; no caso do

Amazonas, especificamente as inglesas. As novidades tecnológicas que surgiam na Europa, aliadas à falta de capital e de tecnologia nacional, levavam o Brasil a conceder, a essas empresas, a exploração de serviços públicos essenciais. A energia gerada destinava-se a atividades como o sistema de transporte de bondes elétricos e o bombeamento de água, e como combustível eram utilizados o carvão vegetal e a lenha. No entanto, o desenvolvimento se fazia à custa da desmedida exploração dos recursos ambientais e humanos (HALL, 1991).

Somas imensas de dinheiro foram ganhas pelos barões da borracha, que exploravam a mão-de-obra barata dos seringueiros, atraídos para a Amazônia pelo surto de progresso e subseqüentemente mantidos nos seus lugares por um selvagem e implacável sistema de escravidão por endividamento [...] (HALL, 1991, p. 22).

Com o aumento da produção da borracha, atendendo à demanda mundial, elevados investimentos europeus transformaram a cidade, dando-lhe status de metrópole. Neste período o Amazonas viveu o seu apogeu econômico e cultural, mas a “Era da Borracha” durou apenas enquanto sua extração contribuiu para o enriquecimento de alguns, para o aumento dos lucros e da receita do Estado (VALOIS, 2007).

Socialmente, apesar de ter gerado muita riqueza e prosperidade, os benefícios não foram universalizados e a exclusão foi potencializada pela exploração dos segmentos mais pobres da sociedade. Além disso, os lucros também não foram investidos num desenvolvimento econômico duradouro para a região, isto é, não foi implantada, no Amazonas, uma política industrial nem se tomaram medidas para preservar tanta riqueza. Em assim sendo, quando a borracha asiática se expandiu provocando a queda nos preços da *Hevea Brasiliensis*, veio a estagnação econômica deixando um rastro de abandono tão bem retratado nas palavras de Melby (*apud* Hall, 1991, p.23): “Prédios foram abandonados, refinadas mansões ficaram vazias, parques e avenidas perderam suas frequências e o mato cresceu novamente em muitas ruas”.

Fracassada a indústria da borracha, foram tímidos os investimentos na área energética. Nesta fase são priorizados, a instalação e beneficiamento de matérias-primas regionais e algumas pequenas melhorias no sistema elétrico já existente, como a troca das caldeiras e turbinas a vapor pelo diesel. Em 1946 o governo encampou os serviços de eletricidade e viação urbana fornecidos até então pela empresa *Manaos Tramways & Light C.O. Ltd* em função da perda de qualidade dos serviços prestados (ALKMIN, 2000).

Devido às distâncias quase intransponíveis e ao isolamento do Estado, o desenvolvimento chegou ao Amazonas sempre como uma concessão do governo federal. Os custos do combustível eram extremamente altos e a falta de soluções locais levou o Amazonas á escuridão total. Na década de 1950, poucas residências possuíam iluminação elétrica, conquistada, com recursos próprios, através de geradores. Em 1956 entrou em operação a refinaria de propriedade do empresário local Isaac Benayon Sabbá (Companhia de Petróleo da Amazônia – COPAM) com equipamentos adquiridos nos Estados Unidos e com capacidade para 5.000 barris por dia. Também na década de 1950 (1954) criou-se a Companhia de Eletricidade de Manaus – CEM para responder pelos serviços de iluminação e transporte dos bondes. No entanto, o setor elétrico estava totalmente paralisado e sua reconstrução se arrastou até 1962, quando a primeira Unidade da nova usina entrou em operação comercial (ALKMIN, 2000).

A volta da energia elétrica veio, não tão coincidentemente, respaldar novas e questionáveis tentativas para implantar políticas de desenvolvimento regional. Como exemplo, a criação da Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia-SPVEA (1953-64) cujas metas deveriam ser atendidas através de planos quinquenais com prioridade para a agricultura, melhoramentos de transporte fluvial, comunicação, energia e saúde. Sua maior realização, a



construção da estrada Belém-Brasília não correspondeu aos objetivos propostos. Ao contrário, inspirada por interesses da indústria automobilística, foi a principal responsável pela aceleração do processo de ocupação que ocorreu a partir de então. Martine (*apud* HALL, 1991, p.25) estima que: “Supostamente inspirada por pressão do *lobby* da nascente indústria automobilística do país, e não pelo desejo de colonizar o interior *per se* estima-se que a estrada atraiu 174.000 migrantes no período 1960-70, de uma forma muito desorganizada e não planejada”.

As dificuldades com o escoamento da produção e o investimento ainda muito dirigido para a borracha, excluindo algumas outras atividades, levaram à falência da SPVEA. Em substituição à SPVEA, já desacreditada, nasce a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia-SUDAM, cuja estratégia econômica era copiar o modelo de desenvolvimento aplicado no nordeste, com algum sucesso na época, fomentando a industrialização por meio de incentivos fiscais com financiamento do capital privado interno e externo. A Lei n. 5.174 “[...] concedeu isenção de 50% do imposto de renda devido até 1982 àqueles que investissem na agricultura, pecuária, indústria e serviços básicos, tais como educação, transporte, colonização, turismo e saúde pública” e esses incentivos eram elevados para o patamar de 100%, tratando-se de projetos na Amazônia (HALL, 1991, p.26).

A “Operação Amazônia” também foi criada com objetivos geopolíticos que visavam à ocupação através da imigração inter-regional. A ocupação aconteceu, principalmente, na parte oriental da região o que se pode explicar devido à facilidade de acesso aos grandes mercados através da Belém-Brasília. Em vários momentos da história do Amazonas observou-se esse tipo de desenvolvimento desigual, voltado para a acumulação do capital e de costas para as reais demandas da sociedade (HALL, 1991).

A parte ocidental da Amazônia teria que merecer mais do que os mecanismos historicamente utilizados para atrair investimentos considerando os maiores obstáculos representados pelas distâncias continentais. Esse raciocínio é confirmado por Garcia (2004, p.45):

Era necessário que outros mecanismos de atração de investimentos, específicos para a banda oeste da Região, se somassem aos incentivos da SUDAM, de modo a compensar, principalmente, as dificuldades representadas pelo grande distanciamento geográfico.

O Decreto-Lei 288 de 28 de fevereiro de 1967, que ampliou e regulamentou a legislação da Zona Franca de Manaus, surgiu como uma política específica para o Amazonas, mas consistiu numa alternativa para o desenvolvimento regional com grande impacto para o crescimento da cidade. Houve aumento de renda e emprego, crescimento populacional, e em contrapartida também representou o início de uma enorme concentração urbana e de riquezas. Contribuiu, de forma específica, para o processo de migração interior/capital, mudando o padrão de povoamento regional, intensificando o ritmo de urbanização e expandindo o consumo de energia elétrica. Além disso, o modelo de oferta de energia no Amazonas, bem como em todo o Brasil, acompanhou o modelo de distribuição de renda com a consequente distribuição de privilégios.

Outra estratégia que careceu de resultados positivos foi o projeto de assentamento de famílias ao longo da Transamazônica pelo INCRA<sup>3</sup>. “Dados de atrasados estudos de viabilidade<sup>4</sup> foram fornecidos tarde demais para afetar a política de colonização, em consequência do que muito tempo e dinheiro foram desperdiçados reassentando os lavradores em terras medíocres, improdutivas” (HALL, 1991, p. 37).

O investimento na pecuária também foi uma estratégia para a ocupação da Amazônia fortemente influenciada pelos interesses privados. No entanto, o otimismo inicial devido à

---

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

abundância de terra barata, mão de obra com requisitos mínimos de conhecimento e retorno rápido de capital foi substituído, no final da década de 1970, pelas frustrações resultantes dos impactos da degradação ambiental. Além disso, muitos empresários da pecuária “[...] estavam usando o esquema como fachada para obter dinheiro barato, que era desviado para outras atividades, um aspecto não raro na concessão do crédito agrícola no Brasil em geral” (HALL, 1991, p. 44).

Percebe-se, na realidade, que não seria o crescimento da população, o principal fator de desequilíbrio ambiental, uma vez que, como afirma Procópio (2000, p. 230), “[...] la dégradation de l’environnement amazonien n’est pas une exception” O que intensifica esse desequilíbrio é segundo o mesmo autor, “[...] le pouvoir de destruction de la modernité capitaliste”. De forma incisiva, ele reforça:

Les pratiques nocives pour l’environnement ne peuvent être dissociées de l’impunité dont jouissent les classes dirigeantes, de la corruption et des privilèges que accompagnent les actions des sociétés que font un usage abusif des ressources naturelles [...] (PROCÓPIO, 2000, p. 230).

No Amazonas, a ausência de políticas voltadas para a fixação do homem no interior, geraram o êxodo rural, a superpopulação dos centros urbanos e os consequentes efeitos negativos sobre a qualidade de vida dos amazonenses. O resultado tem sido duplamente danoso para o desenvolvimento do Estado: de um lado, uma zona rural subdesenvolvida e carente de serviços clama por ações que capitalizem as potencialidades da natureza em prol de uma vida melhor para seus habitantes; do outro, as populações dos centros urbanos dos municípios, principalmente os da capital do Estado, são obrigadas a conviver com invasões, moradias impróprias, desemprego, violência e desnutrição, entre outros males, infelizmente muito comuns no mundo em desenvolvimento. Essas mazelas conduzem a alguns desequilíbrios e à dificuldade de compreender os enormes desafios que se impõem para a conquista de um

ambiente saudável e não poluído.

A partir dessa análise histórica, verifica-se que o setor energético não se desenvolve de forma isolada dos demais setores importantes para o progresso do país, também não está isolado das questões que preocupam as pessoas de bom senso na atualidade. No entanto, os problemas em geral são estudados de forma totalmente divorciada do contexto em que atuam. Os choques do petróleo, as crises de abastecimento, a poluição, o buraco na camada de ozônio, o desmatamento e a perda da biodiversidade são discutidos muitas vezes como se não tivessem qualquer conexão entre si e com os recursos energéticos.

Uma dessas inter-relações diz respeito à interferência da energia na situação social e econômica das regiões. Conquanto a energia seja essencial para o desenvolvimento, entende-se que, mais do que iluminar, conservar alimentos, climatizar ambientes e tantos outros itens destinados a proporcionar conforto ao homem moderno, a contribuição maior do fornecimento de energia está ligada à inserção social e econômica das populações, ao respeito e ao equilíbrio das relações entre os homens e entre estes e a Natureza. Por esse motivo a energia deve estar atrelada à geração e distribuição de renda e ao uso equilibrado dos recursos naturais, razão pela qual devem ser reavaliados os sistemas energéticos também do ponto de vista do menor custo social e ambiental (VALOIS, 2007).

Em todo o Brasil, a produção de energia, a partir de Hidrelétricas, muito embora a água seja um recurso abundante, tem desencadeado grandes impactos sociais e ambientais. A regra também cabe para o Amazonas, pois não obstante ser uma região recortada por rios e florestas, rica de recursos materiais e energéticos, há forte restrição à expansão da capacidade de oferta de energia por vários motivos (CORREIA, 2005):

a) Problemas ambientais que adviriam da construção de grandes hidrelétricas;

- a) Dificuldades de interligação com outros sistemas;
- b) Carência tecnológica e desinteresse do capital para uso de alternativas energéticas locais;
- c) Desigualdade na distribuição da população; e
- d) Grandes desigualdades de renda, entre outros.

O país com dimensões continentais e grandes diversidades regionais convive com dificuldades também diversas, mais ou menos superáveis. Como exemplo, o homem que habita o interior amazônico, é um homem solitário. As populações se encontram dispersas pelas calhas dos rios, muitas vezes, sem nenhum contato com a capital do Estado. A maioria dos municípios não está interligada por meio de rodovias, os rios numerosos que banham a quase totalidade desses municípios e pequenas comunidades não possuem um serviço de transporte fluvial eficiente, e, evidentemente, em função disso, o acesso a essas localidades se constitui num problema de enormes dimensões (VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2009).

Distante centenas de quilômetros do centro urbano mais próximo, o homem amazônico tem, mais do que qualquer outro brasileiro, grandes dificuldades de se informar, e assim como a região onde vive, também ele tem necessidades diversas dos demais brasileiros. Para que seja “sustentável”, o desenvolvimento da região Amazônica teria que considerar, além das conveniências econômicas, as diversidades de cada localidade ou comunidade, as potencialidades locais e as reais necessidades da população que será beneficiada (VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2009).

É compreensível que os países em desenvolvimento tenham aspirações de crescimento e pretendam acelerar o processo de aproveitamento de suas riquezas para produção da energia necessária, mesmo correndo o risco de intensificar as emissões de poluentes. Para manter acesas as esperanças de crescimento constante, o pensamento da classe econômica dominante,

afirma que “não é o crescimento *mais lento* que permitirá aos países em desenvolvimento alcançar essa queda nas emissões; é o crescimento de baixo carbono, usando tecnologias demonstradas e compartilhadas pelos países ricos, bem como seus próprios avanços tecnológicos e esforços em prol da eficiência energética” (STERN, 2010, p. 163).

No entanto, definir metas sólidas de desenvolvimento, exige que se olhe para além do presente e em todas as direções, porque definitivamente, não existe uma receita infalível e a questão ambiental não é apenas um problema de tecnologia, nem se resume exclusivamente à limpeza dos ecossistemas poluídos. As contradições que povoam os discursos da sustentabilidade mostram a incapacidade de se produzir e consumir indefinidamente em ritmo crescente sem que sejam destruídas as próprias condições de reprodução dos meios de sobrevivência do planeta.

No Brasil o sistema de geração de energia elétrica divide-se entre: (i) Sistema Interligado; e (ii) Sistema Isolado que compreende grande parte da Região Norte do país.

A **Figura 01** mostra a localização das usinas hidrelétricas e termelétricas em todo o território brasileiro.

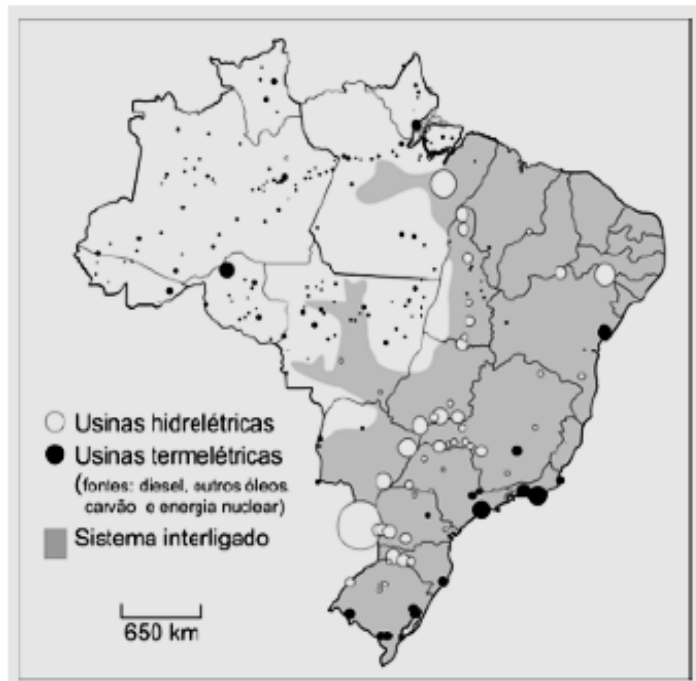


Figura 01: Sistemas de Geração Elétrica no Brasil  
 Fonte: Théry e Mello, 2005

Longe do Sistema Interligado, no estado do Amazonas, as usinas termelétricas constituem a principal fonte geradora de eletricidade, pois essa é uma opção para as regiões isoladas. A capital do Estado, Manaus, representa o maior sistema de energia elétrica isolado da América Latina sob a total responsabilidade da empresa Eletrobrás Amazonas Energia. É composto pelas seguintes usinas (geração própria):

- UTE-Aparecida (198,0 MW);
- UTE-Mauá (452,8 MW);
- UTE-Cidade Nova (17,6 MW);
- UTE-São José (41,6 MW);
- UTE-Flores (90,6 MW) e
- Usina Hidrelétrica de Balbina (250,0 MW) constitui a participação de fonte hídrica;

Isto significa uma potência própria de 1.050,6 MW. Entretanto a geração própria não é

suficiente para atender o mercado, sendo necessária a complementação de energia dos Produtores Independentes, totalizando o montante de potência nominal de 1.467,3 MW (CARTAXO, ROCHA e FROTA, 2010):

- UTE Breitener Tambaqui (83,5 MW)
- UTE Breitener Jaraqui (83,3 MW)
- UTE Manauara (83,3 MW)
- UTE Rio Eletrobrás Amazonas Energia (83,3 MW)
- UTE GERA (83,3 MW)

A Usina Mauá, um enorme complexo termelétrico com 452,8 MW de potência está localizada na zona leste da cidade de Manaus, envolvendo uma área de 723,73 hectares. As usinas utilizam Diesel, óleo combustível e gás natural para a produção de energia, ressaltando que, somente recentemente, a partir de 2011, parte das máquinas passaram a operar com gás natural, fonte menos poluente em relação aos outros combustíveis fósseis, sólidos e líquidos (NIEMA, 2011).

Uma alternativa que permita desenvolver o interior do Estado, descentralizando as atividades econômicas no município de Manaus, é o aproveitamento do gás natural proveniente de Urucu (AM) para a produção de energia em larga escala. A utilização do gás natural, como combustível, descortina um novo caminho mais “sustentável” para o estado do Amazonas, pois, segundo Spiro e Stigliani (2009), considerando a mesma produção de energia, a queima do carvão e do petróleo libera significativamente mais gás carbônico (CO<sub>2</sub>) do que o gás natural, cerca de 60% e 33% respectivamente.

Esses dados justificam a utilização do gás natural, preferencialmente em relação aos demais combustíveis fósseis, dado que a quantidade de CO<sub>2</sub> produzida diminui, mas não eliminam,



absolutamente, os problemas da poluição ambiental decorrentes do uso da energia, pois todos os processos de combustão geram poluentes.

A redução dos custos de produção, a combustão mais limpa, considerando a emissão do principal gás do efeito estufa e a densidade menor que a do ar são as principais vantagens do uso do gás natural. No entanto, apesar de oferecer uma combustão mais eficiente quanto à emissão de poluentes e ao rendimento térmico, o uso do gás natural para gerar eletricidade em larga escala, aumenta a dependência de recursos não renováveis e conseqüentemente, aumenta, também, a emissão de alguns poluentes como os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$ ) que se formam independentemente do combustível utilizado. Dessa forma, contribui para a formação do ozônio troposférico, um poluente secundário e oxidante fotoquímico relacionado às doenças respiratórias (VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2011).

Sem o conhecimento dos impactos que o gás natural provoca no ambiente, a preocupação com a poluição parece se diluir no conceito da população, permitindo que as usinas termelétricas movidas a gás natural sejam vistas como solução definitiva para um desenvolvimento limpo e sustentável. Embora considerando que os níveis de emissão sejam inferiores aos emitidos pela queima do óleo combustível ou do Diesel, o aumento da intensidade energética há de potencializar os impactos ao ambiente, além de intensificar a participação das emissões fugitivas de metano ( $\text{CH}_4$ ) um gás de efeito estufa muito mais poderoso do que o  $\text{CO}_2$  (RIBEIRO, 2003).

O metano é um dos hidrocarbonetos atmosféricos menos reativos, mas a despeito dessa baixa reatividade é um componente importante para os processos químicos que ocorrem na atmosfera. Conforme afirmam Spiro e Stigliani (2009, p. 27) o fato de o  $\text{CH}_4$  ser menos reativo resulta em vantagens e desvantagens.

Embora o gás natural produza menos CO<sub>2</sub> do que outros combustíveis fósseis, o próprio metano constitui um potente gás de efeito estufa. Suas bandas de absorção de raios infravermelhos recaem na janela dos espectros de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e, por ser menos reativo do que outros hidrocarbonetos, possui longa vida atmosférica. Uma molécula adicional de metano contribui aproximadamente 20 vezes mais para o efeito estufa do que uma molécula adicional de CO<sub>2</sub>. Conseqüentemente, os vazamentos de metano representam uma grave preocupação ambiental. Eles podem ocorrer nos poços de gás, durante as transferências e no uso final. O escape de metano em veículos movidos a gás em marcha lenta, por exemplo, pode anular sua vantagem em relação à mesma produção de CO<sub>2</sub> durante a combustão.

Comprovando o aumento da concentração do metano em decorrência das mudanças provocadas pelas atividades antrópicas, Manahan (2005, pag. 243) relata que “informações obtidas de blocos de gelo mostraram que durante os últimos 250 anos os níveis de metano atmosférico mais do que dobraram como resultado da utilização de combustíveis fósseis, práticas agrícolas e resíduos de fermentação”.

Manter e incrementar a dependência de fontes não renováveis de energia são questões que precisam ser ponderadas, não só por causa do inevitável esgotamento dessas fontes, mas principalmente, pelo incremento das emissões em termos globais, preocupação essa que não é descabida, considerando as recentes descobertas na área do pré-sal.

A mudança da matriz energética para o gás natural é um avanço no sentido da descarbonização da energia que, no Amazonas, devido às distâncias e ao isolamento geográfico e energético, ainda é gerada através da queima de óleo combustível em algumas usinas instaladas na cidade. No entanto não deve ser considerada como uma solução definitiva para os problemas ambientais.

Buscar uma solução para atender à demanda dos amazonenses por energia não termina com a mudança da matriz energética. Fundamentalmente nessa questão, mas nem de longe somente nela, o Brasil abriga vários brasis. São diferentes no clima, na geografia, na cultura, nos costumes e até na forma de adaptação e interação com a natureza (VALOIS, CARTAXO e

CHAAR, 2011).

#### 2.1.4. O Consumo e a Escassez de Recursos

Tendo em mente, como ponto de partida para qualquer análise ambiental, que no início da ocupação da terra, o desequilíbrio quantitativo entre a natureza e o homem era suficientemente grande para justificar a ideia de infinitude das riquezas naturais, deduz-se que em países onde há abundância de recursos e dimensões exageradas como é o caso do Brasil e mais especificamente da Amazônia, não exista uma preocupação consciente com a poupança da natureza. Diante da oferta excessiva, os recursos naturais passam a ser utilizados em grande escala nos processos produtivos, ultrapassando os limites do necessário e gerando o desperdício.

Desde os primórdios, o homem procurou transformar a natureza e dela fazer uso, sendo essa relação, o grande motor da degradação ambiental. Segundo Brüseke (1997), “A teoria econômica que acompanhou o surgimento da sociedade industrial era incapaz de identificar a natureza como fonte de valor e como algo esgotável” e, sendo considerada uma fonte inesgotável de recursos, era independente das relações humanas. Essa ideia de desenvolvimento ilimitado levou a um consumismo sem freios que, afinal, entrou em choque com a limitação dos recursos naturais. Além disso, as grandes dimensões favorecem as diferenças sociais, geográficas, econômicas, ambientais e culturais, mostrando um Brasil de contradições.

Nesse contexto e diante do avanço tecnológico, o consumo de energia elétrica guarda, também, essa complexidade contraditória, na medida em que ainda se encontram populações simples que desconhecem o conforto proporcionado pela energia elétrica, em flagrante oposição às camadas da sociedade dita industrial, nas quais a sofisticação do uso da energia

elétrica reflete o aprofundamento das desigualdades (VALOIS COELHO e CARTAXO, 2004).

As mudanças no campo da consciência são inquestionáveis, porém ainda insuficientes. Um novo paradigma precisa surgir e afirmar a necessidade de interação entre o homem e a natureza, a necessidade do equilíbrio entre dar e retirar, entre preservar e usufruir, pois a relação entre o homem e o mundo natural, origem de todos os males ambientais é uma relação recíproca e dinâmica, onde o homem transforma o meio e é por ele transformado. Se no princípio, o homem pequeno diante da supremacia quase divina da natureza não podia imaginá-la finita, hoje não é mais possível ignorar o fato de que o capital natural não é inesgotável e que o progresso precisa frear seu avanço para garantir a possibilidade de um futuro para o mundo e para a Humanidade.

Na prática, porém, o processo de desgaste dos recursos naturais não é bem compreendido e o quadro da realidade atual ainda é preocupante. Muito bem retratados por Araújo (2003), os efeitos das atividades humanas sobre a natureza se fazem sentir em todos os aspectos da vida no globo:

O século XX vem comprovar, os efeitos nocivos ao meio ambiente, causados pela ação antrópica e a constante busca por um crescimento e desenvolvimento divorciado das questões ambientais. Exploração de populações, sucateamento de patrimônios históricos, concentração de riquezas, produção excessiva de todo o tipo de lixo, destruição de ecossistemas, chuvas ácidas, escassez dos recursos hídricos, utilização desregada de agrotóxicos, destruição de florestas, extinção da fauna e flora e efeito estufa - com o desequilíbrio energético global; derretimento das calotas polares, com o posterior aumento dos níveis das superfícies líquidas que inundarão cidades litorâneas; buraco na camada de ozônio; poluição atmosférica, erosão dos solos agricultáveis, contaminação do lençol freático, desertificação, queda na qualidade de vida humana, dentre outros, passaram a gerar problemas de ordem, social, econômica, cultural e ambiental. São heranças de uma socialização nociva que nos levou à queda na qualidade de vida individual (humana) e coletiva (planetária).

Pelas leis da Conservação de Matéria e Energia, estas não podem ser criadas nem destruídas, mas transformadas, constantemente, em processos que podem ser renováveis ou não. Em

qualquer dos casos, parte da energia transformada se dissipa na atmosfera como consequência da entropia. Acontece que a partir da revolução industrial, o uso da energia comercial foi intensificado trazendo alguns questionamentos sobre os limites do globo, porque, à proporção que se desenvolve a sociedade, mais energia é necessária para sustentá-la e mais entropia é produzida.

Segundo Leis (2001) os problemas ambientais são efeitos do modelo de desenvolvimento econômico do sistema capitalista dominante o qual se legitima atendendo as demandas da população cujo consumo aumenta insustentavelmente dentro de um planeta com capacidade de sustentação limitada.

De fato, quando ultrapassada a época da pré-história, a humanidade concluiu que os recursos naturais retirados da natureza e destinados, no princípio, apenas à sobrevivência humana, poderiam, depois de transformados, gerar e acumular capital, despontando a partir daí, o capitalismo como sistema econômico-social (BATISTA, 2010).

Nessa sociedade, que se caracteriza pelo individualismo e imediatismo, energia e desenvolvimento são indissociáveis. No entanto, a dinâmica desse relacionamento, resulta em forte pressão sobre o meio ambiente, uma vez que o crescimento econômico é atrelado à expansão da oferta de energia.

Os recursos escassos passaram a ser amplamente utilizados tanto pela população crescente como pelas empresas resultando no esgotamento das bases de recursos naturais como lagos, rios, solo, biodiversidade, petróleo, minérios, etc. A consequência disso é a degradação ambiental que destrói o ambiente natural e compromete o ciclo de recuperação dos próprios recursos. Nasceu, a partir desse modelo de consumo, um conflito com a capacidade de suporte do planeta, pois não se avalia que a natureza é incapaz de sustentar uma população que quer

sempre mais e mais, sem que sejam respeitados os ciclos biológicos de regeneração (BATISTA, 2010).

Os combustíveis fósseis estão disponíveis na natureza, praticamente “de graça”, não fossem os custos para extraí-los, custos estes que se tornam cada vez mais elevados à proporção que o recurso escasseia. Isso quer dizer que o uso dos combustíveis fósseis para gerar energia tem aumentado significativamente num caminho que levará, fatalmente, ao seu esgotamento, deixando um rastro difícil de desfazer (LOUREIRO, CARLO e LAMBERTS, 2002).

Por outro lado, o interesse pela energia “doada” pela natureza, somado ao consumo individual acelerado, ao crescimento populacional e ao desperdício crescente, torna o problema energético, principalmente no que diz respeito à proliferação das usinas termelétricas, um grande desafio. Parece evidente que a utilização dos combustíveis fósseis tem crescido bem mais do que as populações, conduzindo a preocupações sobre esse espaço cada vez menor, desigualmente utilizado por um número cada vez maior de pessoas.

Paralelamente ao esgotamento dos combustíveis fósseis, a humanidade terá que superar outros problemas atuais ligados ao consumo de energia: o aumento do efeito estufa e a poluição dos ecossistemas com repercussões severas na qualidade de vida e no cotidiano das cidades. Em ambos os casos, a solução vai depender da forma como a energia será consumida.

#### 2.1.5 Questões Urbanas e Climáticas

As cidades estão cada vez mais congestionadas concentrando populações numerosas, infraestruturas precárias e acentuada pobreza urbana. Esse cenário da maioria das zonas urbanas mundiais, não é diferente no estado do Amazonas, especialmente na cidade de Manaus.

Geograficamente localizada próxima à linha do Equador (03° 08' 01" de latitude sul, 60° 18'

34” de longitude oeste de Greenwich e altitude de 21 m acima do nível do mar) e com uma área de 11.401 km<sup>2</sup>, Manaus abriga uma população de 1.802.014 habitantes enquanto a população de todo o estado do Amazonas é de 3.350.773 habitantes. Isso dá à cidade de Manaus, uma densidade demográfica de 158,06 habitantes por km<sup>2</sup> revelando uma enorme concentração populacional na capital em detrimento do interior que carece de recursos para um desenvolvimento autêntico (IBGE<sup>5</sup>, 2010).

Entre os anos de 1991 e 2010, os números que representam a população da cidade de Manaus, demonstram um crescimento acelerado conforme Figura 2.

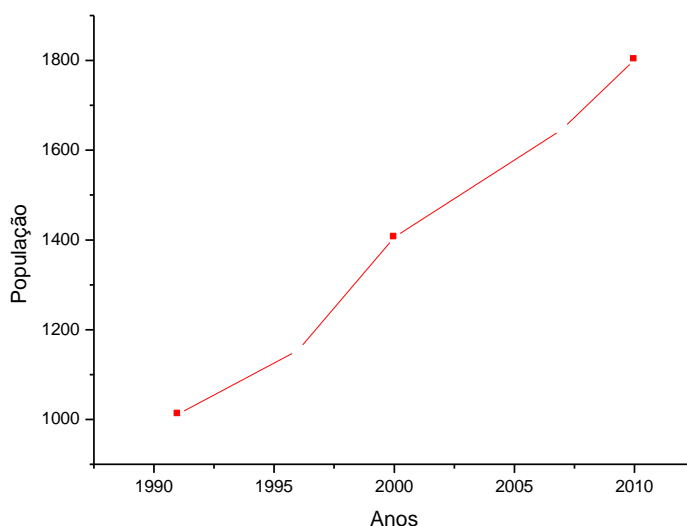


Figura 2: Evolução Populacional da Cidade de Manaus  
Fonte: Adaptado de IBGE, 2010

A distribuição populacional na capital também mostra uma grande concentração urbana com 1.792,881 habitantes contra 9.133 na zona rural (IBGE, 2010). Com isso pode-se dizer que o Amazonas sofre de grave rarefação populacional, pois a imensa área de florestas e de rios abriga pequenas comunidades dispersas e distantes. A região é quase totalmente dependente

---

<sup>5</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

dos combustíveis fósseis e o aumento da demanda gerado pelas necessidades intensivas do Polo Industrial de Manaus, impulsiona o estrangulamento do setor e dificulta o suprimento de eletricidade (CARTAXO, COELHO e PAIXÃO, 2006).

Um aspecto importante a ser observado é que as migrações assumiram, a partir da década de 1980, um novo vetor. Até então se tratava de migração de regiões menos desenvolvidas para regiões mais desenvolvidas, principalmente do nordeste para outras unidades. Após 1980, os fluxos populacionais mais expressivos passaram a ser intrarregionais, isto é, de pequenas para grandes cidades. Não se trata do crescimento das cidades em função do crescimento da população nacional e sim do fluxo dos migrantes que, por falta de acesso a oportunidades na região de origem, migram para centros mais desenvolvidos (KAMPEL, CÂMARA e MONTEIRO, 2001).

Esse processo de migração atingiu mais intensamente as zonas urbanas por causa da complexidade dos problemas gerados pelo aumento populacional desordenado e pelo desenvolvimento desigualmente distribuído na região. Contribuíram para este processo, a Zona Franca de Manaus e a implementação de um conjunto de políticas nacionais que mudou o padrão de povoamento regional intensificando o ritmo de urbanização. Como a energia elétrica tem uma relação direta de proporcionalidade com os impactos ambientais que provoca em todas as etapas da sua cadeia, ao estimular a demanda de energia, a política do setor também acelerou o consumo de matéria e energia (VALOIS e CARTAXO, 2009).

Além desses fatos, as cidades oferecem a possibilidade de uma vida melhor, mas os benefícios não são universais. Muitos daqueles que migram da zona rural para a zona urbana encontram condições de vida desfavoráveis somando-se aos contingentes de favelados e de moradores de rua que, vivendo em situações sub-humanas, não têm alternativas senão o esgotamento dos



recursos do meio.

Sobre isso, Goldemberg & Lucon (2008, pag. 121) avaliam que “populações sem meios econômicos para prover suas necessidades básicas e imediatas não estão particularmente preocupadas com fenômenos que ocorrerão com maior frequência daqui a algumas décadas”.

E apesar de as populações urbanas ocuparem apenas 2% da área de terra do mundo, o consumo de 3/4 dos recursos acarreta um grande descarte de resíduos. Por esse motivo, “a maioria das cidades não têm sistemas auto-sustentáveis” (MILLER, 2007, pag. 158).

Ao lado dos problemas migratórios ligados à falta de oportunidades nas zonas rurais do estado do Amazonas às questões populacionais e urbanas se somam o isolamento geográfico e as dificuldades de ligação com outras regiões do país. Cria-se, assim, um grande desequilíbrio de espaço e de oportunidades e o fluxo dos benefícios tem movimento direcionado privilegiando os já muito privilegiados (CARTAXO, COELHO e PAIXÃO, 2006).

São muitos os estudos sobre os impactos da urbanização, pois intencionalmente ou não, o homem exerce influência sobre o clima das cidades, da mesma forma que os elementos que caracterizam o clima também o afetam, tanto diretamente como indiretamente, em relação às atividades que desempenha. Manahan (2005, p. 257) assim explica as diferenças climáticas induzidas pela urbanização:

A particularly marked effect on microclimate is that induced by urbanization. In a rural setting, vegetation and bodies of water have a moderating effect, absorbing modest amounts of solar energy and releasing it slowly. The stone, concrete, and asphalt pavement of cities have an opposite effect, strongly absorbing solar energy and reradiating heat back to the urban microclimate.

O processo de desenvolvimento da cidade de Manaus agravou esses contrastes entre o urbano e o rural, pois apesar de se encontrar encravada no seio da floresta Amazônica, os desmatamentos, a pavimentação asfáltica e as edificações modernas estão, cada vez mais,

contribuindo para mudanças na movimentação das massas de ar, nas variações de temperatura e pluviosidade e na própria fisionomia da cidade.

Loureiro, Carlo e Lamberts (2002) igualmente destacam as diversidades climáticas do território brasileiro, as diferenças geográficas, o relevo e a dinâmica das massas de ar, esta última como um fator de fundamental importância, uma vez que atua diretamente na temperatura e na pluviosidade caracterizando diferentes climas para diferentes regiões.

Confirmando a questão da diversidade regional e a interferência nos regimes de chuvas, Cândido *et. al.* (2007) usa os resultados dos modelos IPCC<sup>6</sup> para analisar as projeções futuras de mudanças climáticas na Amazônia. Segundo esse autor, o quadro de mudanças do regime de chuvas não se aplica a todas as regiões da Terra, nem, é claro, do Brasil. De acordo com alguns modelos projetados pelo IPCC, eventos extremos mais frequentes e intensos como enchentes e secas prolongadas são previstos para a Amazônia, embora devido às limitações dos atuais modelos, parece ser impossível afirmar, com segurança, sobre a intensidade com que esses eventos afetarão a região.

Sobre as alterações climáticas provocadas pelas atividades humanas nas cidades, Gonçalves (2003, p. 76) relata:

[...] a materialidade física da cidade e as atividades dela decorrentes promovem alterações nos balanços energéticos, térmico e hídrico resultantes, trazendo como consequência modificações importantes nas propriedades físicas e químicas da atmosfera, propiciando, assim, a criação de condições climáticas distintas das áreas não urbanizadas.

Torres e Machado (2011, pag. 88) explicam que “um dos maiores impactos antrópicos sobre o clima são as cidades”. Por esse motivo “o clima urbano é totalmente distinto em suas características”, do clima das zonas rurais, assim como são também distintas a realidade das diferentes regiões brasileiras.

---

<sup>6</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

As alterações no campo da qualidade do ar também têm sido estudadas e avaliadas. Conforme Miller (2007, p. 397) “em razão da alta concentração de carros e indústrias, as cidades costumam apresentar níveis de poluição do ar mais elevados do que as áreas rurais. Entretanto, ventos predominantes podem levar poluentes [...] de áreas urbanas e industriais para o campo e para outras áreas urbanas”, fato que demonstra a interação entre os problemas ambientais, locais, regionais e globais.

A direção do vento é determinada pela sua origem, ou seja, os ventos são denominados conforme o ponto cardeal de onde o vento vem. No Brasil são adotadas as seguintes direções fundamentais (Tabela 01):

Tabela 1: Direção dos Ventos

<b>Abreviatura</b>	<b>Direção do Vento</b>	<b>Graus</b>
<b>N</b>	Norte	0°
<b>NNE</b>	Nor-Nordeste	22,5°
<b>NE</b>	Nordeste	45°
<b>ENE</b>	Este-Nordeste	67,5°
<b>E</b>	Este	90°
<b>ESE</b>	Este-Sudeste	112,5°
<b>SE</b>	Sudeste	135°
<b>SSE</b>	Sul-Sudeste	157,5°
<b>S</b>	Sul	180°
<b>SSW</b>	Sul-Sudoeste	202,5°
<b>WSW</b>	Oeste-Sudoeste	247,5°
<b>W</b>	Oeste	270°
<b>WNW</b>	Oeste-Noroeste	292,5°
<b>NW</b>	Noroeste	315°

Fonte: Adaptado de INMET, 2011

Na cidade de Manaus, conforme dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a predominância da direção dos ventos é de Norte/Nordeste (NNE), e, devido se tratar de uma zona de baixa pressão, é, praticamente, uma região de calmaria.

A velocidade dos ventos raramente ultrapassa 3,00 m.s<sup>-1</sup> e as temperaturas chegam a atingir

mais de 40°C em alguns dias dos meses mais secos (INMET, 2011). Como consequência dessa quase inexistência de ventos, acredita-se que os poluentes atmosféricos, principalmente na época da seca, devam ter suas concentrações mais elevadas nas proximidades das fontes de emissão, pois a pequena movimentação relativa das massas de ar dificulta a dispersão das impurezas. Por outro lado, durante os períodos chuvosos, esses poluentes podem ser dissolvidos na água da chuva, diminuindo a concentração dos mesmos no ar atmosférico e transferindo-os para outros ecossistemas.

Regiões equatoriais são regiões de baixa pressão por causa das temperaturas elevadas que provocam a ascensão das massas de ar. Devido ao aquecimento solar, as massas de ar, no equador, diminuem de densidade, ascendem e se elevam na atmosfera, criando uma zona de baixa pressão. As massas quentes dirigem-se para as regiões temperadas pelas partes superiores da atmosfera, enquanto as massas de ar frio fazem o caminho inverso, convergindo em direção ao equador pelas partes baixas da atmosfera. O movimento de rotação da Terra provoca um desvio dessas massas para a direita ou para a esquerda da sua trajetória no hemisfério norte ou sul, respectivamente. No entanto, como viajam pelas camadas inferiores, sofrem atritos com a superfície e, por esse motivo a velocidade do deslocamento é menor, sendo menor ainda nas zonas urbanas, pois as construções altas aumentam o coeficiente de atrito entre o vento e a terra (TORRES e MACHADO, 2011).

Essas são algumas características do clima equatorial úmido, segundo a classificação dos climas proposta por Strahler em 1969 (apud TORRES e MACHADO, 2011). Ocorre em áreas de densa e variada cobertura vegetal. É quente com temperaturas médias anuais que variam entre 25 °C e 27 °C, com pouca amplitude térmica. As chuvas são abundantes durante vários meses do ano com valores anuais superiores a 2.000 mm, podendo ultrapassar 3.000 mm

anuais na parte ocidental da Amazônia.

Confirmando a íntima relação entre os diferentes fatores de mudanças climáticas, verifica-se, através da literatura, que o processo de urbanização, além de outros impactos, também altera sensivelmente o ciclo da água intimamente relacionado aos problemas atmosféricos. As atividades humanas no meio urbano produzem maior número de núcleos de condensação e, com isso, aumentam as precipitações pluviais, a erosão, a necessidade de maior escoamento dessas águas, a evaporação, reiniciando, constantemente, um novo ciclo (TORRES e MACHADO, 2011).

Como a pressão atmosférica depende da quantidade de partículas que se chocam com a superfície terrestre, ela é diretamente proporcional à concentração dos gases e, portanto, devida ao peso do ar sobre determinado lugar. No entanto, apesar de as baixas altitudes determinarem um peso de ar maior sobre a superfície, a temperatura faz variar essa pressão, porque o calor dilata o ar tornando-o mais leve e reduzindo a pressão. Esse fenômeno está também relacionado com a capacidade de retenção de vapor d'água pela atmosfera, sendo a umidade, um fenômeno atmosférico muito importante nas determinações meteorológicas e climáticas (TORRES e MACHADO, 2011).

Correntes de ar ascendentes originam nuvens convectivas e frequentes precipitações. Como a atmosfera está sempre em movimento, as massas de ar deslocam-se influenciando diretamente as áreas nas quais predominam e sendo igualmente influenciadas à medida que se afastam de sua região de origem. Se a massa de ar se desloca sobre uma superfície hídrica, sua umidade aumenta, podendo perder essa umidade, caso se desloque sobre o continente. Em suma, as propriedades térmicas também podem ser alteradas se as massas de ar se deslocam sobre superfícies mais frias ou mais quentes (TORRES e MACHADO, 2011).

Um fator importante na determinação da temperatura do ar é a topografia. Com exceção do extremo norte do Amazonas e do extremo sul de Rondônia cujo relevo apresenta áreas elevadas e temperaturas amenas, a Amazônia Ocidental brasileira possui um relevo de planície e altas temperaturas (LIBERATO e BRITO, 2010).

Esses condicionantes, posição geográfica, relevo de planície, pouco movimento das massas de ar, calor irradiado e temperatura do ar, interagem determinando maior capacidade de reter vapor de água. Na região Amazônica, com maior quantidade de energia solar recebida, a atmosfera apresenta elevada concentração de vapor d'água e, com isso, produz maior nebulosidade favorecendo ganho de calor. A grande quantidade de vapor d'água também é responsável pelas altas temperaturas (TORRES e MACHADO, 2011).

A radiação solar se relaciona com determinados fatores como latitude, valores de temperatura e de pressão atmosférica e formação dos ventos. Assim, como na região Amazônica, a obliquidade dos raios solares é menor, o clima tem seus valores térmicos na razão inversa da latitude. Quanto menor a latitude, maiores os valores térmicos (TORRES e MACHADO, 2011).

Partículas em suspensão na atmosfera também podem elevar a temperatura média, além de reduzir a visibilidade nas cidades. Apesar do pouco tempo que essas partículas permanecem na atmosfera em relação ao tempo de residência dos principais gases estufa, os efeitos que elas provocam podem ser bastante significativos (DE NEVERS, 2000).

Entre as fontes de partículas, além das queimadas, muito frequentes principalmente nos meses mais quentes do ano, encontram-se as usinas termelétricas e os veículos automotores nos centros urbanos. São sentidas próximo às fontes de emissão porque, geralmente, se sedimentam muito rápido. Quando atingem elevadas altitudes, conduzidas por correntes

aéreas, provocam turvação na atmosfera, o que, segundo Fellenberg (1980), tem reflexos sobre o clima.

Mesmo que sejam mantidos os níveis de emissões, a qualidade do ar varia conforme a maior ou menor diluição dos poluentes, o que é determinado pelas condições meteorológicas, topográficas e urbanas. Quando essas condições são desfavoráveis à dispersão dos poluentes (calmaria e pouca umidade, por exemplo), a qualidade do ar piora em relação aos parâmetros, monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). O mesmo ocorre com relação ao ozônio e seus precursores em locais onde a intensidade da luz solar é maior (GOLDEMBERG & LUCON, 2008).

Calmaria e luz solar intensa, são condições características do “farto verão<sup>7</sup>” amazônico<sup>8</sup> que ocorre, principalmente, nos meses de agosto e setembro, mas que podem ocorrer igualmente em qualquer dia de qualquer mês do ano na região Amazônica. É que, embora existam duas estações (seca e chuvosa), é comum a ocorrência de chuva e de sol num mesmo dia.

Mas, é importante destacar que nos meses mais quentes e mais secos, podem ocorrer dias em que os índices de umidade são relativamente baixos, merecendo cuidadoso monitoramento nesse período. Acrescente-se a isso, o acelerado processo de urbanização, a pouca cobertura vegetal e as áreas densamente construídas que contribuem para a mudança no balanço energético na cidade. Se for considerada a vasta floresta circundante, tem-se a configuração das chamadas “ilhas de calor”<sup>9</sup>.

Avaliando essas condições, compreende-se por que o processo acelerado de urbanização da

---

<sup>7</sup> Expressão de autoria de Chico da Silva na música “Amazonas”

<sup>8</sup> O verão amazônico difere do sul do país, principalmente pelas chuvas frequentes, baixa umidade e pouca velocidade dos ventos

<sup>9</sup> Manifestação do aumento das temperaturas causado por características físicas (alta densidade de construções, concentração de materiais construtivos de grande potencial energético de emissividade e reflectância) e as atividades urbanas (COSTA et. al., 2009).

capital amazonense provavelmente consistiu em uma das mais danosas transformações operadas na cidade, provocando resultados potencialmente desastrosos, no balanço energético, no clima, na distribuição sócio-espacial e na economia da região, com efeitos, inclusive, na demanda de energia elétrica. Não há como negar a ocorrência de mudanças ambientais impelidas pelos processos de urbanização cujos efeitos intensos ultrapassam, inclusive, os limites das cidades, pois segregam populações em guetos de pobreza, implicando em injustiça social e, portanto, em insustentabilidade.

#### 2.1.6. A Contribuição Veicular

A evolução dos meios de transporte é um exemplo de como os avanços em tecnologia tornaram possíveis ganhos cada vez maiores em velocidade. No período, desde a domesticação do cavalo há cerca de 2.000 a.C. até 1825 d.C., o mais rápido que os homens puderam viajar foi a uma velocidade de 30 milhas/h<sup>10</sup> durante um único percurso. Entre 1825 e 1900 essa velocidade aumentou para 100 milhas<sup>11</sup> por hora ao dia, em trens rápidos. Esses ganhos cresceram ainda mais, conforme registros de alguns historiadores: “In the period from 1900 to 1990 that increased to 18.000 miles an hour for astronauts and 600 miles an hour in commercial airlines. The change in personal mobility caused by the auto has been even more spectacular” (DE NEVERS, 2000, p. 521).

A performance no âmbito da mobilização continuou através dos tempos e em todos os recantos do planeta, gerando um agravamento da crise urbana. Além disso, o desenvolvimento industrial criou “facilidades” para o uso de automóveis incentivando ainda mais a expansão das cidades. Países desenvolvidos ou em desenvolvimento, grandes e pequenas cidades registram problemas de trânsito entre os seus maiores desafios para a sustentabilidade e para a

---

<sup>10</sup> 49,27 km

<sup>11</sup> 160,93 km



própria viabilidade de suas gestões.

O setor de transporte consome alta taxa de energia e é responsável por mais de 50% do consumo mundial de petróleo. Já há algum tempo, uma das maiores preocupações relacionadas com a poluição atmosférica nas grandes cidades brasileiras, tem sido os veículos de combustão interna, em consequência, de acordo com o Balanço Energético Nacional, de os transportes representarem, no Brasil, o segundo maior consumidor de energia (28%) perdendo apenas para o setor industrial (41%) (BEN, 2008).

Manaus tem, nas vias urbanas saturadas e no trânsito lento, a reprodução do modelo de desenvolvimento urbano comum nas principais cidades brasileiras. Nessas condições, os motores dos veículos em marcha lenta realizam a combustão incompleta do combustível resultando em substâncias que não foram totalmente oxidadas como o monóxido de carbono (CO) e material combustível não queimado (HC) (LIMA, 2005).

Lima (2005) ressalta que fatores como, ultrapassagens, paradas e conversões, velocidade do veículo e outros eventos característicos do tráfego, impactam, significativamente, no consumo e na emissão de poluentes, pois provocam alterações na forma de operação do motor do veículo. No trânsito congestionado o consumo do combustível é maior porque ao ser acelerado depois de uma parada, o carro exige uma força líquida que significa maior quantidade de combustível queimado.

Além disso, deve-se levar em conta que, apesar de os poluentes de origem veicular também se formarem em todos os processos de combustão, a produção de poluente por unidade de combustível queimado é maior nos motores dos veículos. São vários os fatores que induzem a esse resultado: combustão não permanente, atomização insuficiente do combustível e sistema de refrigeração do motor que impede a queima por igual da mistura comburente (DE

NEVERS, 1995; BAUMBACH, 1996, *apud* LIMA, 2009).

A Tabela 02 divulga os dados da frota veicular nos anos de 2009 e 2010 na cidade de Manaus.

Tabela 02: Dados da Frota de Veículos em Manaus

<i>Tipo</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>
Automóvel	239.277,00	260.783,00
Caminhonete	30.012,00	37.007,00
Camioneta	36.232,00	36.567,00
Motocicleta	75.322,00	85.021,00
Ciclomotor	366,00	370,00
Motoneta	7.461,00	8.094,00
Triciclo	80,00	90,00
Microônibus	2.153,00	2.309,00
Ônibus	6.845,00	7.034,00
Reboque	1.315,00	1.359,00
Semi-Reboque	11.540,00	11.734,00
Caminhão	16.334,00	17.193,00
Caminhão-Trator	2.134,00	2.225,00
Trator de Rodas	20,00	28,00
Trator Misto	1,00	1,00
Cavalo Mecânico	5,00	4,00
Utilitário	1.602,00	2.062,00
Motor Casa		2,00
<b>Total</b>	<b>430.699,00</b>	<b>471.883,00</b>

Fonte: DETRAN/ AM, 2010

São inegáveis os avanços da indústria automobilística com relação à eficiência das máquinas e dos combustíveis. Significativas reduções nas emissões veiculares de alguns poluentes resultaram de investimentos em eficiência, em tecnologia dos motores, nos combustíveis e na diminuição da massa dos carros, tornando-os mais leves. Mas, mesmo com as tecnologias de redução de emissões, fatores como o crescimento da frota veicular, o trânsito lento e as distâncias percorridas contribuem para o aumento significativo das emissões.

Com o crescimento populacional, aliado ao aumento do número de veículos circulantes, às condições do trânsito e às características poluentes dos combustíveis veiculares, surgiu um cenário preocupante em relação à qualidade do ar. Em Manaus, em consequência da grande

dependência dos meios de transporte motorizados, somam-se fatores, como fraco investimento em transportes coletivos, em infraestrutura viária, no calçamento das vias públicas e na qualidade das calçadas para os pedestres, contribuindo e assumindo cada fator, isoladamente e em conjunto, um papel preponderante na poluição da atmosfera.

É evidente que, quanto maior for o nível de desenvolvimento de uma Nação ou região, maior será a sua contribuição, crescendo, também, na mesma proporção, a responsabilidade para com o controle da qualidade do ar e, conseqüentemente, com a saúde da população.

A participação dos transportes no aumento dos índices de emissões tem sido uma preocupação presente em vários estudos e pesquisas pelo mundo afora:

Nos países da Comunidade Europeia, o transporte contribui com 75% de todo o Monóxido de Carbono (CO), 40% dos hidrocarbonetos (HC) e 48% dos óxidos de Nitrogênio (NOx). Em uma escala global, o transporte contribui com altas percentagens das emissões totais, mas com grande diferença entre as várias regiões do mundo (VASCONCELOS, 2000, p. 38).

Nos Estados Unidos, a principal fonte de CO é o transporte, apesar de as reduções nas emissões, que têm ocorrido desde 1970, terem introduzido padrões de controle mais rigorosos e melhorias nos processos de eficiência energética (SPIRO e STIGLIANI, 2009).

No Brasil, o trânsito congestionado é responsável por 90% das emissões de CO, 80% a 90% das emissões de NOx e hidrocarbonetos além de uma considerável parcela de particulados que constituem ameaça à saúde humana. Vê-se que o CO é um poluente veicular com maior índice de emissões e conseqüentemente maior influência na perda de qualidade do ar atmosférico. Sua emissão está relacionada à combustão incompleta tanto em fontes móveis como em fontes fixas e os efeitos que a exposição a esse poluente provoca estão associados à sua afinidade com a hemoglobina do sangue, bem maior do que da hemoglobina com o oxigênio, podendo levar à morte por asfixia (TEIXEIRA, FELTES e SANTANA, 2008).

Emissões de ozônio também têm preocupado os gestores ambientais, principalmente em

grandes metrópoles onde os níveis desse gás ultrapassam, muitas vezes, os padrões tolerados. Nos grandes congestionamentos de veículos pode haver emissão de quantidades significativas de NOx e compostos orgânicos voláteis (COVs) os quais poderão ser levados para lugares distantes, onde reagirão e formarão o ozônio. Por esse motivo o ozônio não é apenas um poluente local, é também regional e transfronteiriço. O controle do ozônio deve ser feito através de seus precursores, principalmente os NOx e COVs. Na troposfera “o ozônio em concentrações maiores de 100g/cm<sup>3</sup> é um grande poluidor do ar que causa danos à vegetação, pode prejudicar os pulmões e é o principal agente responsável pela formação da neblina e fumaça” (GOLDEMBERG & LUCON, 2008, pag. 138).

Em Manaus, uma pesquisa preliminar que antecedeu este estudo foi realizada pelo NIEMA. Mediram-se as emissões diretamente nas descargas de uma amostra de veículos automotores em diversos pontos dentro do perímetro urbano da cidade. Para que diferentes situações fossem contempladas, a escolha dos locais tomou como base: (i) o maior fluxo veicular, (ii) a proximidade de áreas arborizadas e (iii) a periferia urbana. Os resultados obtidos apontaram os ônibus e os caminhões como os maiores emissores de óxidos de nitrogênio e os veículos leves, movidos a gasolina, os principais emissores de CO e hidrocarbonetos (NIEMA, 2011).

Também foi observado que o segmento emergente das motocicletas tem crescido de forma substancial em consequência dos problemas de mobilização, necessitando de maior controle de suas emissões. Aliás, a mitigação da poluição precisa lançar mão do controle tanto dos padrões de qualidade do ar como dos padrões de emissão a fim de reduzir os efeitos da poluição no ambiente e na saúde da população (VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2011).

Na avaliação dos resultados sobre os níveis do NOx a maior contribuição dos ônibus e caminhões, era esperada, pois embora os transportes em geral constituam-se em fontes

importantes de poluição urbana, “os ônibus e caminhões movidos a diesel respondem pela quase totalidade das emissões de óxidos de nitrogênio” (BRANCO *et. al.*, 2009). A emissão substancial de NOx pelos motores a Diesel é sustentada também por Garcia (2002, pag. 280). Segundo o autor, “ficam na faixa de 1.000 ppm, para o motor funcionando em vazio e até cerca de 4.000 ppm, quando o motor está com plena carga”.

Percebe-se a importância de se aliar políticas de desenvolvimento, como de transportes públicos e de urbanização, às pesquisas científicas de forma a tornar os esforços de ambos os lados, mais eficientes. Dessa forma, a área ambiental não pode ser olhada como um entrave ao progresso tão almejado por todos, mas como coadjuvante nesse processo, contribuindo para que os avanços de hoje não venham a comprometer os ganhos de amanhã.

#### 2.1.7. Comprometimento Atmosférico e a Importância das Medidas de Controle

Por muitos anos a Humanidade não se deu conta dos impactos provocados pelo desenvolvimento acelerado e acreditou que nada poderia ser feito para não prejudicar o progresso tão almejado por todos os povos. Hoje, é inadmissível pensar assim. Sem dúvida, não existe uma solução absolutamente simples, mas o homem precisa planejar e controlar suas atividades para que a vida na Terra seja preservada.

Analisando a pressão que o desenvolvimento provocou sobre o ambiente verifica-se que foram duas as vias principais: (i) o consumo individual, cujo aumento é caracterizado pelas aspirações do próprio indivíduo ou família estimulados pelo modelo de produção inerente ao desenvolvimento capitalista e (ii) o aumento do número de consumidores (população).

No século XIX, a população mundial totalizava um bilhão de pessoas. Em 1927 atingiu a marca de dois bilhões. Na segunda metade do século XX teve um crescimento considerável passando de 2,6 bilhões em 1950, para três bilhões em 1959 e quatro bilhões em 1974. A

população do planeta chegou aos cinco bilhões de habitantes em 1987, seis bilhões em 1999 e sete bilhões em 2011. A projeção para 2050 é de uma população de 9,3 bilhões de pessoas e mais de 10 bilhões em 2100 (UNFPA, 2011).

Goldemberg & Lucon (2008), ressaltam que o aumento na intensidade das atividades antrópicas nas grandes cidades provoca pressões sobre o ambiente, entre as quais, o consumo de água, a geração de esgoto e lixo, ruído e poluição do ar. Dessas, segundo os autores, a poluição atmosférica é o problema local mais intrinsecamente ligado ao consumo de energia. Contribuindo com essa análise, a disponibilidade de energia para o desenvolvimento, no Brasil, ocorreu sob a dependência da gasolina e do óleo Diesel destinados à indústria e aos setores de iluminação e transporte. Fatores convergentes, como a implantação das fábricas de automóveis e a construção de estradas de rodagem, determinaram um aumento da demanda de petróleo e como resultado desse processo, o consumo de combustíveis cresceu, aumentando as emissões e contabilizando impactos ao ambiente e à sociedade, difíceis de mensurar (VALOIS, 2007). Como consequência desses dois fatores (população e consumo), o desperdício acabou por transformar a questão energética em um dos mais sérios desafios da atualidade, pois estende seus efeitos a todos os campos das atividades humanas. Assim, não há como separar o problema energético dos problemas sociais, políticos, culturais, econômicos e naturais.

Os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) confirmam que o consumo de energia das famílias cresceu 1,7% e, nos setores de comércio e público, o crescimento foi de 2,3% até o ano de 2009. O consumo de combustíveis fósseis, em decorrência, também aumentou, sendo os mais consumidos, o óleo Diesel e a gasolina. Dentre estes, o consumo da gasolina automotiva cresceu 0,9%, apesar do avanço importante do etanol, cujo consumo aumentou

7,1% em relação a 2008, justificável devido à participação dos biocombustíveis líquidos no setor de transporte o qual aumentou de 19,2% em 2008 para 21,0% em 2009 (BEN, 2008, 2010).

Em 2011 a Matriz Energética Brasileira sofreu uma redução de um ponto percentual na participação das energias renováveis. Essa redução foi consequência das restrições na oferta da biomassa da cana, cuja safra caiu 9,8%. Mesmo assim, conforme a Agência Internacional de Energia, “a participação de renováveis manteve-se no elevado patamar de 44,1%, muito acima da média mundial de 13,3% (BEN, 2012).

A Tabela 03 mostra a Oferta Interna de Energia no Brasil.

Tabela 03: Oferta Interna de Energia

Fonte	2011 (%)	2010 (%)
<b>RENOVÁVEIS</b>	<b>120,1</b>	<b>121,2</b>
<b>Energia hidráulica e eletricidade</b>	39,9	37,7
<b>Biomassa da cana</b>	42,8	47,1
<b>Biomassa tradicional</b>	26,3	26
<b>Outras renováveis</b>	11,1	10,4
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	<b>152,2</b>	<b>147,6</b>
<b>Petróleo</b>	105,2	101,7
<b>Gás natural</b>	27,6	27,5
<b>Carvão mineral</b>	15,2	14,5
<b>Urânio (U3O8)</b>	4,1	3,9

Fonte: BEN, 2012

No campo da geração de energia elétrica, ainda que inicialmente, no Brasil, o uso dos combustíveis fósseis tenha tido apenas um papel marginal, hoje representa uma questão estratégica, adicionando problemas de caráter local, urbano, regional, continental e global, relacionados à qualidade do ar, devido à emissão de poluentes (XAVIER, 2004). E embora não sejam as únicas, as usinas termelétricas, baseadas na queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) têm sido consideradas grandes responsáveis pelo aumento antrópico

da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera. No Amazonas essa é uma realidade agravante, pois considerando as condicionantes geográficas e climáticas, a expansão do setor significa maior consumo daqueles combustíveis e maior produção de gases poluentes.

Impossível, portanto, tentar minimizar ou mesmo buscar entender os problemas ambientais do estado do Amazonas, tratando-os como são tratados, no sul do país, problemas similares. O Ministério de Integração Nacional já denunciava, em 2007, através da Política Nacional de Desenvolvimento Regional os contrastes sociais e econômicos entre as diferentes regiões brasileiras, pois enquanto em certas áreas o uso dos recursos disponíveis é intenso, em outras os potenciais de desenvolvimento são subutilizados (BRASIL, 2007).

No Amazonas, apesar de existir um potencial hidrelétrico economicamente viável, ao contrário das outras regiões do Brasil, cerca de 80% da energia produzida no Estado são de geração termelétrica e apenas 20% da energia são fornecidos pela Usina Hidrelétrica (UHE) de Balbina, localizada no município de Presidente Figueiredo, a 107 km da capital.

Justifica-se a opção pelas usinas termelétricas porque apresentam vantagens ligadas à flexibilidade de localização, sem contar os custos financeiros, ambientais e sociais das hidrelétricas, tornando mais atraente a construção de termelétricas. Portanto, o que é complementar para o Brasil, para todo o estado do Amazonas é uma questão de sobrevivência. As desvantagens, principalmente ligadas ao uso do combustível não renovável e aos resíduos produzidos na combustão, suscitam preocupações com o sistema de abastecimento de energia elétrica na capital amazonense, porque a cidade cresce impulsionada pelo êxodo rural e as demandas da sociedade exigem que mais usinas sejam construídas próximas aos centros de carga. Além disso, esse sistema é considerado um dos maiores emissores de gases poluentes devido ser, predominantemente, originado de energia fóssil, com alto potencial de emissões



(VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2011; LAZARA, 2009).

Nas regiões urbanas, as fontes de emissão mais importantes, fixas (usinas, indústrias, queimadas etc.) ou móveis (veículos automotores, aviões etc.) contribuem com a redução da qualidade do ar. Devido ao elevado número de veículos nas principais cidades brasileiras, as fontes móveis passaram a representar a maior parte das emissões (UEDA e TOMAZ, 2011).

De acordo com Goldemberg & Lucon (2008) os principais poluentes emitidos pelos sistemas energéticos são:

- SO<sub>2</sub>: Dióxido de Enxofre, proveniente da queima do carvão e de combustíveis de má qualidade. Sua emissão está relacionada, principalmente, à presença de enxofre no combustível;
- NO<sub>x</sub>: Mistura dos óxidos NO e NO<sub>2</sub>, gerados pelas altas temperaturas da combustão, acima de 1.300°C e pelo uso de óleos pesados que contém nitrogênio. São produtos da combustão em motores de combustão interna;
- HC: Hidrocarbonetos emitidos a partir da combustão incompleta e da evaporação de combustíveis em tanques e Carter dos veículos, e também pela evaporação dos combustíveis e dos óleos lubrificantes;
- CO: formado pela queima incompleta dos combustíveis.
- Material particulado: abrange tanto a poeira como os resíduos da combustão (alcatrão, fuligem, sulfatos). A emissão de sulfatos, por exemplo, adsorve, em torno de si, substâncias tóxicas (como o benzeno) e metais pesados formando partículas finas. Por esse motivo, a queima de óleo Diesel com alto teor de enxofre produz concentrações elevadas de particulados finos (PM<sub>2,5</sub>) nas grandes metrópoles.

Ainda muito dependente dos combustíveis fósseis, no estado do Amazonas, a energia elétrica

está diretamente ligada a problemas ambientais potencialmente graves enfrentados pelas sociedades contemporâneas. O efeito estufa e a chuva ácida, por exemplo, resultantes da emissão de gases poluentes, dos resíduos industriais, da geração de energia elétrica e da combustão nos automóveis, mantêm uma estreita relação com a energia elétrica proveniente das fontes não renováveis e significam mudanças importantes, quiçá irreversíveis, na composição química do ar atmosférico (VALOIS, 2007).

Diante das questões aqui suscitadas, verifica-se que o problema da poluição atmosférica tem desdobramentos impossíveis de serem relacionados, ao mesmo tempo, num único trabalho acadêmico. No entanto é imprescindível que se estabeleça esse fato, pois, definitivamente, só será possível alcançar a “sustentabilidade”, “se o crescimento econômico for capaz de redesenhar soluções que integrem os aspectos sociais e ambientais relacionando esses, às necessidades: ordenamento do espaço urbano, transporte/mobilidade e, principalmente, eficiência energética” (CANDIANI, *et. al.* 2009, p.50).

Refletindo sobre a diversidade da realidade amazônica e sobre as condições climáticas que influenciam no processo de dispersão e na concentração dos poluentes vê-se quão imperativo é o tratamento diferenciado com relação à gestão da qualidade do ar e ao controle da poluição na cidade de Manaus. Nesse aspecto, é fundamental o monitoramento constante das emissões de poluentes atmosféricos para que sejam adotadas medidas mitigadoras no setor energético. Também se faz importante o inventário de emissões, uma ferramenta que algumas agências ambientais no Brasil já vêm realizando com o objetivo de quantificar as emissões atmosféricas e identificar as fontes de poluição (UEDA e TOMAZ, 2011).

O inventário realizado em 2004 pela Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA), na região metropolitana do Rio de Janeiro apontou que as emissões veiculares são responsáveis por 77% das emissões nesta região, também identificou as vias de maior tráfego e conseqüentemente, de maiores emissões

(FEEMA, *apud* UEDA e TOMAZ, 2011).

O desenvolvimento da tecnologia principalmente nos setores de energia e de transporte tem sido amplamente influenciado pela necessidade de controlar os efeitos das emissões. “Entre as tecnologias que passaram a ser utilizadas pode-se citar o uso de catalisadores automotivos, que atenderam de maneira eficiente às exigências legais para redução das emissões, principalmente de CO, NO<sub>x</sub> e COV [...]” (UEDA e TOMAZ, 2011).

No entanto, não obstante as características referidas, e o fato de o estado do Amazonas representar o maior sistema isolado de energia da América Latina, sua capital não possui uma política de gestão ambiental dirigida ao monitoramento e fiscalização da qualidade do ar. Cresce o número de veículos na capital e, em todo o seu território, o número de termelétricas, em consequência, a cidade convive com o uso crescente de combustível e energia e com o desconhecimento dos impactos que esse desenvolvimento provoca no ambiente e na população.

A atmosfera de Manaus, objeto principal deste estudo, tem sido negligenciada talvez em virtude de sua posição privilegiada em meio à imensa e farta floresta amazônica, considerada em quantidade de espécies animais e vegetais. Essa concepção contribui para a ideia equivocada de que os recursos naturais seriam inesgotáveis, o que é perfeitamente compreensível, pois o ser humano pensa e age conforme uma escala de valores que, por sua vez, depende de condições espaciais e temporais.

Em Manaus, além de não se fazer o monitoramento das emissões provenientes do processo de desenvolvimento da cidade, poucos estudos relacionados à qualidade do ar denotam o nível de preocupação ainda insipiente. No entanto, se consideradas, a frota veicular crescente e outros emissores como, as usinas de asfalto, fábricas de cimento, movelarias, borracharias,

marmorarias, termelétricas etc., justifica-se a preocupação com os níveis de concentração dos principais poluentes atmosféricos.

Estudos realizados tanto a nível internacional como nacional, refletem a crescente consciência ambiental e apontam para a necessidade de interpretar os fenômenos ambientais sob o aspecto das transformações químicas, de modo específico, aquelas que se processam silenciosamente na atmosfera das grandes cidades.

Alves (2006) e colaboradores, por exemplo, desenvolveram, em Portugal, uma técnica que mediu as concentrações atmosféricas de hidrocarbonetos voláteis leves desde o etano ao xileno (C<sub>2</sub> a C<sub>6</sub>) com um grau de precisão de 20%. Os pesquisadores utilizaram e compararam “vários processos de amostragem buscando avaliar os problemas de estabilidade das amostras e a sensibilidade e especificidade das técnicas analíticas”. Concluem ao comparar as técnicas utilizadas que o sistema automático é potencialmente mais fácil de operar além de produzir resultados superiores. No entanto, o trabalho em questão foi aplicado em zonas rurais e florestais enquanto nas cidades a emissão de COV's é tanto mais intensa, devido, principalmente, aos transportes.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) os valores de ozônio encontrados têm, frequentemente, ultrapassado os padrões. Segundo Alvim *et. al.* (2009) os gases provenientes dos veículos são responsáveis por 97% da presença de ozônio na atmosfera. Por essa razão o órgão responsável pelo monitoramento da qualidade do ar da cidade (CETESB<sup>12</sup>) tem dado ênfase no controle dos compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio.

Alvin *et. al.* (2009), realizaram um levantamento das emissões dos compostos orgânicos voláteis (COV's) por veículos automotores em um túnel da cidade, tendo sido quantificadas 96

---

<sup>12</sup> Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

espécies de COV's. A técnica possui a vantagem de permitir a amostragem de uma grande variedade de veículos em condições normais de uso, sendo assim mais representativo da população total de veículos de um determinado local.

Devido à relação que existe entre os óxidos de nitrogênio, os hidrocarbonetos lançados para a atmosfera e a formação do ozônio troposférico, a preocupação com a presença de hidrocarbonetos de petróleo presentes no ambiente tem crescido. Conforme Pereira Jr, Gomes e Soriano (2009, p.16), a presença dos hidrocarbonetos de petróleo no ar atmosférico pode ser significativa, dependendo da existência de fontes fixas de emissão.

No ar os hidrocarbonetos de petróleo podem ser encontrados como pequenas partículas dispersas, ou como componentes de material particulado complexo. Sua concentração é variável, porém, em áreas próximas a fontes fixas de contaminação tende a ser maior.

Correia (2004) propôs um sistema de gestão para a redução das emissões de  $NO_x$  na região de Cubatão-SP, quando a mesma se encontrava saturada quanto ao ozônio. Para isso foi necessário conhecer as emissões do ponto de vista qualitativo e quantitativo e as várias tecnologias para a redução. Foi verificado que a queima dos combustíveis em fornos e caldeiras causa os maiores impactos. O estudo recomendou o uso de queimadores *Low NOx* de alto rendimento que reduzem a emissão de gases de combustão, apesar de esse ser apenas um dos fatores que afetam as emissões.

Uma mistura adequada dos reagentes, suprimento contínuo desses reagentes e regulagem do tamanho e forma da chama de modo a promover a dispersão do calor, também constituem funções do queimador. Conseqüentemente, como a emissão de  $NO_x$  é afetada pela temperatura da chama (quanto mais alta, maior a emissão), pela mistura dos reagentes e pelo tempo de permanência dos reagentes na temperatura de pico da chama, é conclusivo que o projeto do queimador afete significativamente a emissão de  $NO_x$  (CORREIA, 2004; CORREIA,

BARROS e FERAUCHE, 2008).

Também na cidade de São Paulo, uma análise dos níveis de concentração de gases-traço (CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e COV's (1999 a 2004) buscou compreender os fatores que afetam as concentrações dos referidos gases e as interferências nas concentrações devidas às diferentes estações do ano. Consideraram dias tipicamente chuvosos, períodos muito poluídos e a influência de movimentos descendentes na concentração noturna do ozônio (O<sub>3</sub>) troposférico. O estudo, que teve a duração de 4 anos, mostrou que, em média, a concentração do NO<sub>2</sub> é 35% maior nos períodos desfavoráveis à dispersão, porém nos períodos mais poluídos a concentração pode chegar ao dobro. O pior período foi o inverno de 2000 (PRETTO, 2005).

Em nível local deve ser referenciada a pesquisa, “Mapeamento da Distribuição de Dióxido de Nitrogênio na Cidade de Manaus”. O estudo revelou que os maiores índices de NO<sub>x</sub> foram obtidos em locais de grande fluxo de veículos e os menores em regiões de pouca influência urbana. Foram usados amostradores passivos que possibilitaram trabalhar com grande quantidade de pontos de amostragem e assim observar a influência de fontes diretas de emissão. Esse foi o primeiro mapeamento de dióxido de nitrogênio em área urbana da cidade de Manaus e os resultados obtidos demonstraram que os níveis de NO<sub>2</sub> são influenciados, principalmente, pela combustão proveniente de fontes móveis e pelos fatores meteorológicos (MARINHO, 2007).

A responsabilidade pelo comprometimento do ar atmosférico é tanto maior porque a consciência dos danos advindos de uma atmosfera poluída não surgiu recentemente. São vários os registros de ações motivadas pelos problemas da poluição que, inclusive, ainda motivam a elaboração de leis e normas controladoras, comprovando a preocupação com o que fazer para controlar a emissão de substâncias tóxicas no ambiente. Alguns dados fornecidos

por Fellenberg (1980) confirmam que essa preocupação é antiga:

- Na Grécia antiga era exigida uma autorização especial para a construção dos curtumes devido ao cheiro que exalavam;
- Também na Grécia eram construídas altas chaminés para disseminar melhor, na atmosfera, o SO<sub>2</sub> emitido pelas fundições de prata;
- Na Roma antiga, legalmente, as atividades ligadas a matadouro, curtumes, fabricação de azeite e lavanderias, só eram permitidas em locais desabitados;
- Ainda na antiga Roma, a contaminação por gás fluorídrico (HF) proveniente dos fornos de fabricação de vidro, era transferida para áreas restritas da cidade;
- Em 1348, em Zwickau (Saxônia), foi proibido em áreas urbanas, o emprego do carvão de pedra nas forjas.

Outros episódios foram registrados por Braga *et. al.* (2005, p. 169)

No século XIII (1273), o Rei Eduardo da Inglaterra assinou as primeiras leis de qualidade do ar, proibindo o uso de carvão com alto teor de enxofre. Além disso, ele proibiu a queima de carvão em Londres durante as sessões do Parlamento, por causa da fumaça e do odor produzidos. Em 1300, o Rei Ricardo III fixou taxas para permitir o uso do carvão. Em razão da intensa queima de madeira, as florestas inglesas reduziram-se rapidamente. A despeito dos esforços do reinado, o consumo de carvão aumentou.

Os autores (BRAGA *et. al.*, 2005, p. 169), também destacam os primeiros acidentes ambientais:

[...] em 1911, ocorreu o primeiro grande desastre decorrente de poluição atmosférica em Londres: 1.150 mortes em decorrência da fumaça produzida pelo carvão. Nesse ano, o Dr Harold Des Voeux propôs o uso da palavra 'smog' para designar a composição de 'smoke' e 'fog'(fumaça e neblina). Smog é hoje uma palavra que designa episódios críticos de poluição do ar.

No entanto, o crescimento da preocupação com os resíduos tóxicos do processo industrial não foi proporcional ao aumento da população e aos interesses econômicos (FELENBERG, 1980).

No Brasil, até a Constituição de 1988, a preocupação ambiental perpassava as normas

infraconstitucionais. O Estudo de Impacto Ambiental, por exemplo, foi introduzido na legislação brasileira através da Lei n. 6.803/1980 a qual obrigava as empresas ligadas aos polos petroquímicos, cloroquímicos, carboquímicos e instalações nucleares à apresentação de “estudos especiais de alternativas e de avaliações de impacto” (ARAÚJO, 2003).

Vale destacar que a política ambiental brasileira se desenvolveu muito lentamente, em resposta às exigências do movimento ambientalista internacional. Isso porque, na visão dos governos à época da Conferência de Estocolmo (1972), a proteção ambiental sacrificaria o desenvolvimento econômico do país. Apesar disso, a crescente preocupação com o meio ambiente teve reflexos no Brasil que se materializaram na moderna Constituição Federal de 1988, a qual revelou uma grande preocupação com a proteção ambiental. É preciso ressaltar que a Lei Maior por si só não assegura o direito de respirar um ar sadio, mas dá, à sociedade, instrumentos para exigir que os poderes públicos assumam uma postura positiva em relação a um ambiente ecologicamente equilibrado.

No plano da consciência parece crescer a ideia de que o desenvolvimento, a qualquer custo, provocou transformações profundas no ambiente, surgindo, com a demanda da sociedade, a necessidade de avaliar os impactos gerados a partir da poluição ambiental. Nesse aspecto, a poluição atmosférica se apresenta como um dos maiores problemas das grandes cidades, pois tanto as fontes fixas quanto as fontes móveis, representadas no Amazonas, principalmente, (i) pelas usinas de geração de energia e (ii) pelos veículos automotores, contribuem com a perda de qualidade do ar atmosférico.

## **2.2. A QUÍMICA DA ATMOSFERA**

O dinamismo da natureza permite que transformações ocorram permanentemente em todos os ecossistemas, poluídos ou não poluídos. São sempre os mesmos fenômenos, os que ocorrem



na atmosfera livre de poluentes e os que governam as reações em uma atmosfera contaminada. A diferença reside nas baixas concentrações das espécies responsáveis pela poluição do ar. Baixas o suficiente para sua medição e monitoramento, mas bastante altas para reagirem entre si de forma a produzir alterações no longo prazo, na composição química do ar. Essas considerações justificam a necessidade de prever o comportamento da atmosfera e propor meios para mitigar os principais agentes poluidores (SCHIRMER e LISBOA, 2008).

Medir os poluentes atmosféricos torna-se crucial para o conhecimento dos níveis de poluição e conseqüentemente, para o desenvolvimento de estratégias de controle e de uma legislação condizente com a realidade social e com as condições ambientais. Não é possível sugerir mecanismos de mitigação dos poluentes atmosféricos, sem o conhecimento do próprio comportamento desses poluentes na atmosfera. Por esse motivo, têm crescido bastante os estudos das reações químicas da atmosfera e dos problemas a ela relacionados apesar das grandes dificuldades que representam (SCHIRMER e LISBOA, 2008).

Essas transformações são promovidas tanto por fatores internos, inerentes à própria estrutura da matéria como por fatores externos como a radiação solar, as forças gravitacionais, ou ainda as atividades antrópicas, comprovando o Princípio da Conservação da Matéria: *Na natureza nada se cria nada se perde tudo se transforma* (LENZI e FAVERO, 2011).

Com respeito às transformações provocadas pelas atividades antrópicas, pouco se sabe sobre os efeitos, no longo prazo, das interferências humanas, não sendo unânime a tese do IPCC, a qual responsabiliza o homem pela elevação da temperatura do Globo Terrestre. Apesar de os relatórios produzidos pelo IPCC, frequentemente, trazerem dados que fortalecem a tese do aquecimento, alguns pesquisadores céticos argumentam o contrário, gerando as incertezas que permeiam os estudos pró e contra sobre o aquecimento global. Considerando, porém, que

uma discussão é sempre mais produtiva se baseada em incertezas do que em certezas, em havendo dúvidas é preciso refletir com seriedade para evitar que posições açodadas sejam responsáveis pelo declínio da qualidade de vida no Planeta (VEIGA, 2008).

É verdade que a Natureza possui mecanismos para se purificar das substâncias intrusas, mas esse processo natural depende da escala em que é acionado. Sem a interferência humana crescente, os contaminantes naturais não representariam grandes problemas para o equilíbrio ambiental do ar, no entanto, principalmente depois da Revolução Industrial o processo de aceleração do desenvolvimento foi crucial para a intensificação dos efeitos adversos das emissões (STERN, 2010, p. 6).

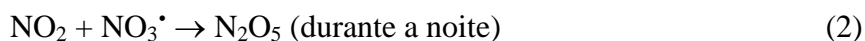
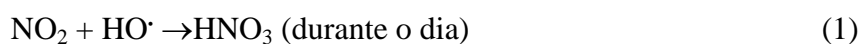
A química da atmosfera apresenta reações de caráter **fotoquímico** e/ou meramente **químico**, através das quais se formou e se mantém num estado de equilíbrio dinâmico que, segundo o princípio de Le Chatelier, tende a se desfazer das ações antrópicas que ferem seus equilíbrios milenarmente estabelecidos (LENZI e FAVERO, 2011, p.42).

Mesmo os mecanismos de autopurificação, isto é, os próprios processos naturais de purificação criados pela natureza para se libertar de substâncias indesejáveis, também sofrem a influência das atividades humanas com consequências danosas como, a poluição fotoquímica, a chuva ácida e o efeito estufa. Dir-se-ia que a atmosfera varre o seu “lixo” transferindo-o para a litosfera e hidrosfera. A chuva ácida, por exemplo, é resultado de um desses processos de depuração. Em áreas densamente povoadas e industrializadas, elevadas concentrações de SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre), NO (óxido nítrico) e NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) são responsáveis pelo baixo pH das águas das chuvas (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2005).

Tomando como exemplo o óxido nítrico, este se forma a partir da reação entre o oxigênio e o nitrogênio atmosféricos e essa reação, embora endotérmica, é espontânea a altas temperaturas. Nos motores de combustão interna dos automóveis e nas termelétricas essas condições facilitam a formação dos óxidos de nitrogênio os quais participam de reações fotocatalíticas

(ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2005).

Como permanecem na atmosfera cerca de 24 horas, alguns mecanismos atuam como sorvedouro desses gases. O NO sofre oxidação transformando-se em NO<sub>2</sub> e em ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), durante o dia pela ação dos radicais hidroxila (HO<sup>•</sup>) e, durante a noite pelo radical nitrato (NO<sub>3</sub><sup>•</sup>). O HNO<sub>3</sub> formado em ambos os casos, é um dos responsáveis pela acidez da água da chuva (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2005, p. 85).



A chuva ácida bem como o efeito estufa, a destruição da camada de ozônio ou a poluição fotoquímica, são problemas decorrentes do estilo de vida nas modernas sociedades. O homem passou a viver em grandes aglomerados urbanos e a poluição se faz sentir de forma acentuada, produzindo impactos ao ambiente, à saúde e ao padrão de vida da população. A exploração dos recursos energéticos do planeta, o uso dos combustíveis fósseis, os processos industriais e os meios de transporte em número crescente contribuíram, ainda mais, para acentuar os danos da poluição.

Ainda que esse seja o preço do progresso, a relação entre as atividades antrópicas que emitem os chamados gases de efeito estufa e as mudanças climáticas que apontam para o aumento da temperatura da atmosfera, não há de ser uma simples questão de causa e efeito. Em nome do progresso e da produção industrial, preocupações ambientais foram ignoradas por décadas, com efeitos de longo prazo sobre a terra e seu povo. Obviamente, a humanidade não pode se dar ao luxo de esperar até conhecer, com absoluta certeza, tudo sobre a ciência das mudanças climáticas (STERN, 2010; HINRICHS, KLEINBACH e REIS, 2010). “De fato, a incerteza

generalizada exige ação imediata para reduzirmos os riscos de um desastre de proporções planetárias” (STERN, 2010, p. 6).

A natureza não é simples. Os conhecimentos que se tem a respeito dos fenômenos que nela ocorrem, quer no solo, na água ou no ar, ainda são muito precários. Como conclui Silva (2009), “não existe homogeneidade real em termos de fenômenos, de espécies, de populações, de comportamento: a heterogeneidade é a regra”.

A complexidade dos problemas de poluição atmosférica assinala para o fato de que esses fenômenos são resultados de vários fatores como: movimento das massas de ar, balanço térmico, componentes atmosféricos e reações químicas que têm lugar entre esses componentes e as emissões originadas de fontes naturais e antrópicas. Conclui-se, com isso, que os estudos sobre a Química da Atmosfera estão associados à poluição devido ao aumento das concentrações de alguns compostos químicos existentes na troposfera e à introdução de poluentes pela ação do homem (DE NEVERS, 2000).

Para entender as interações que ocorrem entre essas espécies e entre elas e a maior fonte de energia do planeta, é fundamental o conhecimento prévio da composição atmosférica.

#### 2.2.1. Composição da Atmosfera

A espessura da atmosfera pode atingir 800 km a 1.000 km, sendo menor nos polos devido à característica genóide do planeta (TORRES e MACHADO, 2011). Considerando o diâmetro da Terra (12.756,2 km), pode-se falar que a atmosfera é uma “fina camada” protetora, onde se encontram os componentes naturais e onde se depositam e se acumulam gases e particulados resultantes de emissões provenientes de atividades humanas. Essa massa de gases e partículas interage com a radiação solar e com elementos dos outros ecossistemas determinando o clima e influenciando a vida no planeta (MORETTO, 2007).

Conforme Rocha, Rosa e Cardoso, (2004) para cada milhão de moléculas do ar, existem aproximadamente:

- 780.000 moléculas de Nitrogênio ( $N_2$ );
- 210.000 moléculas de Oxigênio ( $O_2$ );
- 9.300 moléculas de gases nobres;
- 300 moléculas de  $CO_2$ ;
- 400 moléculas de outros compostos como:  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ , metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), etc.

Os gases  $N_2$  e  $O_2$  apresentam altas concentrações devido à regeneração contínua de suas moléculas através das atividades, microbiana e da fotossíntese respectivamente. Excetuando-se esses gases majoritários, que somam 990.000 moléculas em cada milhão de moléculas do ar, as restantes 10.000 moléculas correspondem aos chamados gases minoritários.

Alguns desses gases têm tido suas concentrações aumentadas desde a Revolução Industrial até os dias atuais. O  $CO_2$ , o  $CH_4$ , e o  $N_2O$ , são grandes responsáveis pelo efeito estufa, fenômeno natural, pelo qual os gases interagem com o calor emanado da superfície terrestre e, posteriormente, o refletem em todas as direções. Esse fenômeno mantém a temperatura do planeta em condições de abrigar a vida.

Os óxidos de nitrogênio,  $NO$  e  $NO_2$  ( $NO_x$ ) são sérios poluentes do ar. Entram na atmosfera como  $NO$  e, por processos fotoquímicos se transformam em dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ). Reações posteriores podem levar à formação de nitratos ou ácido nítrico. O vapor d'água (0,1 a 5%) também é um gás de efeito estufa encontrado na atmosfera embora sua concentração varie de acordo com o local, estação do ano, altitude e temperatura. O vapor d'água é responsável por muitos processos químicos atmosféricos através dos radicais, hidroxila ( $OH\cdot$ )

e hidróperóxido ( $\text{HO}_2^{\cdot}$ ) (MILLER, 2007).

Nos primeiros 30 km de altitude estão concentradas 99% da toda a massa de ar que compõe a atmosfera. Esse fato permite inferir, considerando o pequeno espaço da biosfera do planeta que, apesar da aparente baixa reatividade da mistura, as atividades humanas podem produzir alterações gradativas na composição da atmosfera e afetar a qualidade de vida do próprio homem e de muitas outras espécies (MOZETO, 2001).

A Figura 03 destaca as camadas da atmosfera e as variações de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em relação a altitude (Km) e pressão.

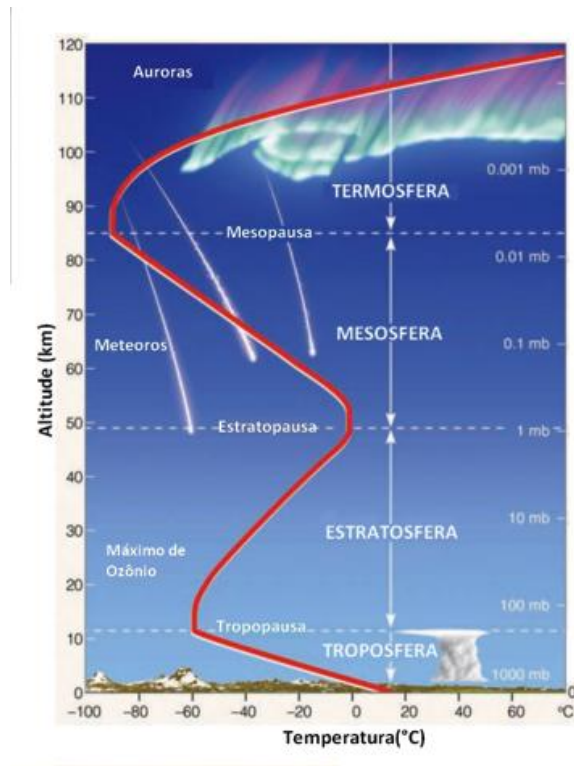


Figura 03: Camadas da Atmosfera  
Fonte: Martins, 2011

Enquanto a pressão atmosférica diminui com a altitude, a temperatura se modifica ao longo da atmosfera como resultado de interações que ocorrem de diferentes formas entre as moléculas e

a energia solar e terrestre. Portanto, como resultado dessas diferenças na absorção da energia solar, os estratos atmosféricos se caracterizam por alterações abruptas na temperatura (MILLER, 2007).

Troposfera: a primeira camada ao nível do mar é a Troposfera onde ocorre o contato direto com os seres vivos que habitam os mares, os rios e o solo terrestre. Apesar de ser a camada mais fina da atmosfera, é aí que se concentram 75 % a 80 % de toda a massa de ar da Terra e, nesse nível, quanto maior a altitude, mais baixa a temperatura a qual chega a atingir  $-56^{\circ}\text{C}$  no seu limite máximo. Isso porque os raios solares aquecem a superfície da Terra e o calor daí emanado se dissipa na atmosfera. Devido a essa característica, a troposfera é uma zona de instabilidade estática favorecendo os movimentos verticais ascendentes e interferindo nas condições meteorológicas e na dispersão dos poluentes (BAIRD, 2002; MILLER, 2007).

Nessa camada, de no máximo 15 km a 16 km de espessura é que ocorrem as principais reações químicas entre os componentes do ar, as emissões gasosas, e o material particulado, originados, tanto na litosfera como na hidrosfera por fontes naturais ou por interferência humana (BAIRD, 2002; MILLER, 2007).

Nos polos, a troposfera tem uma espessura menor (de 8 km a 10 km) em decorrência das baixas temperaturas que promovem a contração dos componentes atmosféricos (BAIRD, 2002; MILLER, 2007). Devido à turbulência das correntes de ar que sobem e descem, ocorre a ciclagem química dos nutrientes vitais do planeta, além disso, a troposfera é a principal responsável pelas condições de tempo no curto prazo, e pelo clima, no longo prazo (MILLER, 2007).

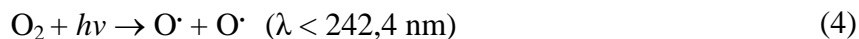
Tropopausa: o limite superior da Troposfera denomina-se Tropopausa (16km), onde a temperatura muito fria causa a condensação do vapor d'água impedindo que ele atinja

altitudes nas quais se fotodissociaria devido à radiação ultravioleta de altíssima energia. Se isso acontecesse, o hidrogênio produzido escaparia da atmosfera da Terra e se perderia. Segundo Manahan, grande parte dos gases hidrogênio e hélio, originalmente presentes na atmosfera terrestre, se perderam por esse processo (MANAHAN, 2005).

Estratosfera: acima da Tropopausa inicia a Estratosfera que se estende a uma altitude de 50 km. Embora a estratosfera contenha menos matéria que a troposfera, a sua composição é diferente apenas em dois pontos: o vapor d'água cujo volume muito menor é aproximadamente de 1/1.000 e a concentração maior de ozônio (MILLER, 2007).

Pelo fato de a tropopausa agir como barreira na migração da água da Troposfera para a Estratosfera, apenas uma pequena parcela de vapor consegue atingir níveis mais elevados. Nesse sentido, a principal fonte de água na estratosfera é resultado da oxidação fotoquímica do CH<sub>4</sub> ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). A água é então decomposta fotoquimicamente ( $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{HO}\cdot + \text{H}$ ) (MANAHAN, 2005).

Na Estratosfera, a temperatura aumenta com a altitude, alcançando -2 °C aos 50 km devido à absorção de radiação ultravioleta pelo ozônio, cuja concentração atinge o limite máximo de 10 ppm entre 25 e 30 km de altitude. Na parte superior da Troposfera e na Estratosfera a radiação ultravioleta (UV) é absorvida principalmente pelo O<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> e, embora não seja capaz de ionizar esses gases, é suficiente para dissociar suas moléculas produzindo radicais livres. É através da interação entre as moléculas de O<sub>2</sub> e a radiação UV emitida pelo sol que o ozônio estratosférico é formado. O mecanismo de formação desse gás é desencadeado, primeiramente, pela fotodissociação das moléculas de O<sub>2</sub> (MANAHAN, 2005).

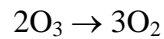


Os radicais livres resultantes reagem, em seguida, com outras moléculas de O<sub>2</sub> formando O<sub>3</sub>:





O ozônio formado, por sua vez, absorve radiação ultravioleta na região entre 220 nm e 330 nm e se decompõe estabelecendo o equilíbrio dinâmico conforme as reações abaixo:



Esse conjunto de reações é responsável por manter constante a concentração de ozônio na estratosfera, daí o nome dado a essa região de “camada de ozônio”. A diminuição da concentração de ozônio na estratosfera reduz a capacidade de filtração da radiação UV. O fenômeno é considerado um “filtro solar” o qual impede que 95% da radiação UV nociva chegue à superfície da Terra (MILLER, 2007).

Enquanto a troposfera é aquecida a partir da superfície terrestre, a estratosfera se aquece em função da camada de ozônio. O ozônio converte a energia da radiação em calor sendo responsável pela máxima temperatura encontrada na fronteira entre a estratosfera e a mesosfera (MANAHAN, 2005).

A Estratosfera é uma região estável onde não se produzem os fenômenos climáticos próprios da troposfera como chuvas e temporais e isso é uma consequência dos perfis de temperatura influenciando no modo como o ar flui entre essas duas camadas.

Estratopausa: é a região de transição entre a Estratosfera e a Mesosfera;

Mesosfera: a Mesosfera inicia a partir dos 50 km (acima da stratopausa) e se estende a uma altura de 80 km apresentando características semelhantes à Troposfera com redução de temperatura de 3,5 °C por quilômetro. Alcança temperaturas entre -90 °C e -92 °C devidas, em parte, à ausência de espécies que absorvam níveis elevados de radiação e, por outro lado,

porque essa radiação característica já foi absorvida na camada superior, a Termosfera (LENZI e FAVERO, 2011).

Acima dos 60 km, incluindo parte da Mesosfera até o limite da Termosfera, ocorre o fenômeno da fotoionização dos gases atmosféricos recebendo essa região da atmosfera o nome de Ionosfera. A radiação solar que penetra na atmosfera pelas camadas superiores, tem energia suficiente para retirar elétrons dos átomos e moléculas com os quais se chocam transformando-os em íons e conferindo propriedades elétricas a essa região. (MANAHAN, 2005).

Mesopausa: acima dos 80 km até 85 km, tem-se a mesopausa onde a temperatura se mantém constante em, aproximadamente,  $-92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Termosfera: a camada mais alta, a Termosfera, tem início na Mesopausa aos 85 km e  $-92\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prolonga-se até a exosfera (parte exterior à atmosfera) aos 500 km de altitude. As raras espécies gasosas existentes nessa região absorvem radiação muito energética de comprimento de onda aproximadamente menor que 200 nm e em consequência, os gases intensamente rarefeitos alcançam temperaturas muito altas, por volta de  $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (MANAHAN, 2005; LENZI e FAVERO, 2011).

Exosfera: estende-se até o limite superior da atmosfera (800 km a 1.000 km). Predominam átomos leves, poeira cósmica e elevadíssimas temperaturas.

Refletindo sobre a composição da atmosfera, deduz-se que as atividades poluidoras, como a queima de combustíveis fósseis, não só aumentam as concentrações de compostos químicos já existentes na atmosfera, mas também introduzem outras substâncias. Essas espécies interagem tal como um organismo vivo, absorvendo, transformando e eliminando o que é indesejável. De alguma forma a natureza procura se recompor dos impactos sofridos tentando manter a

composição e o equilíbrio natural entre seus componentes, razão porque a mistura gasosa que forma o ar atmosférico tem composição relativamente estável.

### 2.2.2. Reatividade Química e Tempo de Residência de alguns gases na atmosfera

Independentemente das atividades antrópicas as partículas que compõem a atmosfera estão constantemente passando por processos de trocas. Um desses processos é o biológico que sustenta a vida no planeta. Através da fotossíntese (síntese pela luz), obtém-se o oxigênio o qual, por sua vez, é consumido na respiração. O conhecimento desse processo é vital para o entendimento dos impactos na composição atmosférica, no ciclo do CO<sub>2</sub> e, em última instância, no clima do planeta (SPIRO E STIGLIANI, 2009).

Os vegetais, que guardam o segredo da coleta de energia, utilizam apenas 0,3% da luz solar incidente para produzir carboidratos. O fenômeno reversível (fotossíntese) é representado pela equação (SPIRO E STIGLIANI, 2009):



O processo absorve/libera 450 kJ de energia por mol de carbono. Em consequência disso, o ciclo do carbono é quase um ciclo fechado. No entanto, um aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> perturba o equilíbrio sem alterar significativamente a quantidade de oxigênio atmosférico, isso porque uma pequena fração de matéria orgânica produzida (menos de uma parte em 10.000) encontra-se soterrada sem contato com o oxigênio atmosférico (SPIRO E STIGLIANI, 2009).

O total de carbono soterrado excede, em muito o O<sub>2</sub> atmosférico, mas a maior parte dele está amplamente dispersa na crosta terrestre e somente uma pequena fração está em depósitos recuperáveis. Portanto, mesmo que todo o combustível fóssil fosse consumido, a perda de O<sub>2</sub> mal seria notada (SPIRO e STIGLIANI, 2009, p.16).

A relação entre a vida e a atmosfera é ressaltada também por Rocha, Rosa e Cardoso (2004, p.65) ao afirmar que “não é possível dizer se a vida sustenta a atmosfera ou se a atmosfera a

sustenta”. Aliás, foi exatamente essa inter-relação entre o processo biológico e as condições de vida na terra, que levou o cientista James Lovelock a propor sua famosa “Hipótese de Gaia” segundo a qual “a vida desempenha papel fundamental em criar e manter as condições ambientais do planeta” (apud ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004, p. 65). “A não ser que vejamos a Terra como um planeta que se comporta como se estivesse vivo, pelo menos a ponto de regular seu clima e química, faltará a vontade de mudar nosso meio de vida e de entender que fizemos dele nosso pior inimigo”. A “Hipótese de Gaia” vê a teoria da evolução de Darwin, e “a evolução do mundo material das rochas, ar e oceano [...] como parte de uma só história da Terra, em que a vida e seu ambiente físico evoluem como uma entidade única” (LOVELOCK, 2006 p. 29, 44).

Entendendo dessa forma, a função de cada um dos componentes atmosféricos na composição da mistura gasosa é mais do que relevante. Suas concentrações se mantêm relativamente equilibradas graças aos processos físicos e químicos que transformam as substâncias intrusas em espécies solúveis, capazes de passar pelo processo de depuração, favorecendo o retorno das mesmas à crosta terrestre.

As espécies emitidas para a atmosfera geralmente têm um tempo de vida curto por causa desses processos de purificação, no entanto, apesar disso e devido ao crescente desenvolvimento das forças produtivas, a natureza não consegue superar seus próprios limites e evitar as constantes alterações, capazes de modificar as propriedades físicas e químicas de seus ecossistemas. Com respeito aos gases Nitrogênio ( $N_2$ ) e Oxigênio ( $O_2$ ), suas concentrações têm se mantido estáveis, mas o mesmo não acontece com os componentes minoritários, como o  $CO_2$ , por exemplo, que apesar de ser pequena a sua participação na composição atmosférica, tem função importante na manutenção da vida na terra (MARTINS,

et. al., 2003).

A estabilidade dos gases majoritários ( $N_2$  e  $O_2$ ) é devida a reatividade química dos mesmos, pois está relacionada à estrutura molecular. O  $N_2$  é um gás muito pouco reativo uma vez que a energia da tripla ligação entre seus átomos é muito forte, e isso lhe confere grande estabilidade explicando a maior abundância do  $N_2$  na mistura gasosa que envolve a Terra. Por essa razão ele praticamente não desempenha papel químico importante nos estratos inferiores da atmosfera. Por outro lado o  $N_2$  funciona como moderador da atividade química do  $O_2$ , cuja dupla ligação entre os átomos é mais fraca e permite maior reatividade, dando à atmosfera o seu caráter oxidante (MARTINS, et. al., 2003).

Além do oxigênio, outros oxidantes como o ozônio, o vapor d'água e o radical hidroxila ( $OH\cdot$ ) também exercem papéis importantes na química da atmosfera. Entre eles o ozônio é um oxidante extremamente poderoso, muito mais potente que o  $O_2$  transformando-se, devido à sua alta reatividade, num componente tóxico capaz de destruir micro-organismos e prejudicar o crescimento dos vegetais (MAIOLI e NASCIMENTO, 2005).

Segundo Rocha, Rosa e Cardoso (2004) através do  $O_3$  têm início todas as cadeias de oxidação primárias que ocorrem naturalmente na atmosfera. Um exemplo desse processo é a decomposição do  $O_3$  pela ação da energia solar, produzindo oxigênio molecular e oxigênio atômico (Equação 6). O átomo de oxigênio, em presença do vapor d'água produz o radical  $OH\cdot$ , outro poderoso agente oxidante.



Dois fatores de máxima importância na química da atmosfera são a energia eletromagnética proveniente do sol, predominantemente na região ultravioleta do espectro e o radical  $OH\cdot$ , considerado um “detergente” da atmosfera. Ressalta-se que, devido à aceleração das

atividades de produção, intensificaram-se, de forma expressiva, as emissões de poluentes e a atmosfera, em consequência, foi perdendo o seu potencial de autodepuração. Dessa forma, os poluentes permanecem por mais tempo na atmosfera e, ainda que em pequena quantidade, produzem efeitos notáveis, não só pela capacidade de algumas moléculas interagirem com a energia do sol, mas também por agirem como catalisadores de transformações químicas. Não sendo removidas com eficiência por um longo período de tempo, podem ter suas concentrações aumentadas de forma considerável (SEINFELD, 2004).

A severidade dos efeitos prejudiciais da poluição é determinada por três fatores que são: natureza química do poluente, sua concentração no ambiente e sua persistência, isto é, a medida de quanto tempo o poluente permanece no ambiente (MILLER, 2007).

Ao serem emitidos para a atmosfera, os poluentes podem sofrer transformações envolvendo os mais variados fenômenos, os quais promovem a redução das suas concentrações.

Desses processos depende o tempo em que eles permanecem na atmosfera, denominado *tempo de residência* o qual varia, de acordo com mecanismos de remoção físicos ou químicos (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004).

TABELA 4: Tempo de Residência e Composição de Alguns Gases na Atmosfera

Compostos	Tempo de Residência	Composição (ppb)
Gás Carbônico (CO <sub>2</sub> )	4 anos	360.000
Monóxido de Carbono (CO)	0,1 ano	100
Metano (CH <sub>4</sub> )	8 anos	1.600
Formaldeído (HCOH)	1 dia	1-0,1
Ácido Fórmico (HCO <sub>2</sub> H)	5 dias	2-0,1
Oxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	85 anos	310
Oxido Nítrico (NO)	1 dia	0,1
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	1 dia	0,3
Amônia (NH <sub>3</sub> )	5 dias	1
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	1-4 dias	0,01-0,1
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	24 h	0,05
Sulfeto de Carbono (CS <sub>2</sub> )	40 dias	0,02
Dimetil Sulfeto (H <sub>3</sub> C-S-CH <sub>3</sub> )	0,5 dia	0,005
Peróxido de Hidrogênio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1 dia	0,1-10
Cloreto de Metila (CH <sub>3</sub> Cl)	1,8 ano	0,7
Cloreto de Hidrogênio (HCl)	4 dias	0,001

FONTE: Adaptado de Rocha, Rosa e Cardoso, 2004

As transformações físicas estão relacionadas com a quantidade liberada pela fonte de emissão, as condições topográficas da região, além de umidade, orientação e velocidade dos ventos, fatores climáticos que interferem no *tempo de residência*, pois facilitam a dispersão dos poluentes na atmosfera. Como resultado, algumas emissões podem permanecer na região em que foram produzidas enquanto outras se espalham para outros ecossistemas e por todo o planeta (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004).

As transformações químicas, por sua vez, são influenciadas pela velocidade das reações podendo ser de alguns minutos ou mesmo de anos, dependendo da concentração, temperatura, catalisador e reatividade da molécula. Compreendem, principalmente, as reações de oxidação que sempre resultam em espécies mais solúveis em água, facilitando, dessa forma, a remoção dos poluentes da atmosfera pela chuva. Os oxidantes funcionam, portanto, como detergentes,

solubilizando a sujeira para que seja removida pela água (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004).

O tempo de residência de alguns poluentes atmosféricos é apresentado na Tabela 4:

Em razão disso, os poluentes do ar atmosférico têm um raio de ação que é dependente do *tempo de residência*, pois sua atuação estará limitada pelo espaço de tempo em que as moléculas permanecem na atmosfera antes de serem removidas sendo este um fator relevante para a qualidade do ar atmosférico.

Alguns gases que compõem a atmosfera têm um *tempo de residência* relativamente alto em decorrência de sua estabilidade química. Esse fato aumenta o seu Potencial de Aquecimento Global (GWP)<sup>13</sup>. Por exemplo, o CO<sub>2</sub>, o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O são quimicamente estáveis, razão porque possuem um tempo de residência maior (de 4 a 85 anos) sendo chamados “gases de efeito estufa de longa vida” influenciando no clima por um longo espaço de tempo (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004).

### 2.2.3. Efeito Estufa

O efeito estufa está relacionado com a temperatura da atmosfera, a qual depende da radiação solar que a atravessa e do calor emitido pela Terra. A radiação solar influencia a temperatura da atmosfera por causa das interações com a matéria e da consequente transferência de energia, capaz de acelerar o movimento das partículas e aumentar a sua temperatura. Devido a essas interações, a radiação solar mais energética é freada nas camadas superiores da atmosfera, impedindo que chegue à parte inferior da troposfera, atingindo a biota. Portanto, quando fótons da radiação ultravioleta são capturados por átomos ou moléculas, ocorre transferência de energia, causando excitação aos elétrons mais externos e tornando as

---

<sup>13</sup> *Global Warming Potential* – é o índice que determina a capacidade de refletir a radiação terrestre e consequentemente, aquecer o planeta.



moléculas ou átomos temporariamente instáveis podendo provocar rompimento das ligações químicas e desencadeamento de reações com formação de novos arranjos moleculares (XAVIER e KERR, 2004; LYNAS, 2008).

Por outro lado, as radiações com comprimento de onda maior, menos prejudiciais, alcançam a superfície terrestre, aquecem o solo que devolve o calor absorvido (radiação infravermelha) tornando o ar mais quente próximo à superfície. Essas radiações, por serem menos energéticas, não são capazes de quebrar as ligações químicas entre os átomos de uma molécula, no entanto, certos gases atmosféricos, denominados “gases de efeito estufa” possuem a propriedade de deixar passar a radiação proveniente do sol e reter a radiação infravermelha que é irradiada pela superfície da Terra. É um fato indiscutível que esses gases são “relativamente transparentes à radiação solar enquanto absorvem grande parte da radiação emitida pela superfície aquecida da Terra” (XAVIER e KERR, 2004; LYNAS, 2008).

Parte da energia absorvida pelos gases-estufa é refletida para o espaço e parte é devolvida para a Terra e esse fenômeno natural denominado “efeito estufa” tem sido objeto de muitos estudos, quer por pesquisadores nas Academias, ONGs e instituições privadas, quer pelas agências ambientais responsáveis pelo controle e monitoramento da qualidade do ar nas grandes cidades.

Com exceção do Oxigênio, Nitrogênio e Argônio (Ar), os demais constituintes atmosféricos são considerados “gases de efeito estufa”, isto é, são capazes de absorver a radiação infravermelha (IV). Ao absorverem a radiação sofrem diversos tipos de interação (estiramentos, distorções, vibrações, rotações e translações) provocando o aquecimento natural da atmosfera (efeito estufa), que é responsável por manter “a temperatura global média da Terra em 15 °C ao nível do mar”. Com o aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>,

clorofluorcarbonetos (CFCs), e outros gases provenientes das atividades antrópicas, o efeito estufa é intensificado elevando, perigosamente, a temperatura global terrestre (LENZI e FAVERO, 2011, p. 30).

Além dos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, considerados os principais gases de efeito estufa, o vapor d'água também contribui para o aquecimento da atmosfera, contudo a sua concentração varia de região para região e conforme a estação dependendo da temperatura. É um componente atmosférico que absorve radiação infravermelha, sendo responsável pela formação das nuvens e pelo transporte de calor na atmosfera. Considerando a molécula individualmente, o vapor d'água é um gás de efeito estufa muito poderoso, pois cerca de 90% da absorção da radiação na atmosfera são processadas pelo vapor d'água, as nuvens e o CO<sub>2</sub>, ficando os 10% restantes a cargo dos demais gases do efeito estufa (MARQUES, 1992).

No entanto o vapor d'água não está incluído entre os gases de efeito estufa, propriamente ditos, porque sua concentração na atmosfera é uma consequência do aumento da concentração de outros gases. Essa dependência é mais bem explicada por Spiro e Stigliani (2009, p. 114):

A quantidade total de água representa uma ordem de grandeza maior do que a de dióxido de carbono. Se a temperatura da Terra aumentar em decorrência do aumento de dióxido de carbono e outros gases estufa, a pressão do vapor d'água também vai aumentar, e espera-se que a quantidade de água na atmosfera aumente. Esse é um exemplo de *retorno positivo*: quanto maior a concentração de gases do efeito estufa, maior a temperatura na superfície; uma maior temperatura acarreta maior quantidade de água atmosférica, que, por sua vez, amplia o efeito estufa.

Tolentino e Rocha-Filho (1998, p. 02) assim reforçam a influência do vapor d'água no aquecimento global: “Cabe destacar que grande parte do efeito estufa natural se deve à presença da água na atmosfera”. O aumento do teor de gases do efeito estufa devido às atividades humanas “pode causar uma exacerbação do efeito estufa e, conseqüentemente, um aquecimento global do planeta”. Em regiões mais úmidas, o aumento do vapor d'água na atmosfera não só contribui para a elevação da temperatura como para um maior nível de

precipitações.

Principal gás do efeito estufa, o CO<sub>2</sub> faz parte da composição natural do ar atmosférico e não é um gás tóxico, no entanto, o ciclo antrópico desse gás tem gerado um crescimento do seu nível de concentração na atmosfera, relacionando-o a possíveis impactos negativos ao ambiente natural. Apesar disso, por conta das muitas incertezas de como o planeta vai reagir aos impactos da massiva liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, as ações de controle e prevenção, desse e dos demais gases de efeito estufa, têm sido negligenciadas (TOLENTINO e ROCHA-FILHO, 1998).

Com o aumento da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico, a quantidade de energia retida na atmosfera também aumenta podendo resultar na elevação da temperatura do planeta. O fenômeno se explica porque a molécula de CO<sub>2</sub> tem grande capacidade de absorver radiação infravermelha, logo, um pequeno aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode estar associado à elevação da temperatura e à alteração do clima da Terra (MANAHAN, 2005).

Although only about 0.037% (370ppm) of air consists of carbon dioxide, it is the atmospheric 'nonpollutant' species of most concern. Carbon dioxide, along with water vapor, is primarily responsible for the absorption of infrared energy reemitted by the Earth such that some of this energy is reradiated back to the Earth's surface. Current evidence suggests that changes in the atmospheric carbon dioxide level will substantially alter the Earth's climate through the greenhouse effect (MANAHAN, 2005, p.381-382).

Tanto o vapor d'água como o dióxido de carbono têm grande influência no aquecimento da atmosfera, pois “[...] quanto mais vapor d'água e CO<sub>2</sub>, mais quente estará o ar”. Por esse motivo é grande a preocupação com o perigo do aquecimento global em função das altas concentrações de CO<sub>2</sub>, na atmosfera (PACHECO e HELENE, 1990).

Com relação aos gases do efeito-estufa as incertezas decorrem do “fato de ainda não se entender, integralmente, todas as fontes e sumidouros dos gases” (D'AMÉLIO, 2006). No entanto, tomando como exemplo, a queima de combustíveis fósseis e a manufatura do

cimento, essas atividades têm crescido, exponencialmente, nos países em desenvolvimento, e não coincidentemente, são os maiores vetores de emissão do CO<sub>2</sub>. Relacionam-se entre si porque, para a fabricação do cimento, são necessárias altas temperaturas exigindo a queima de quantidades elevadas de combustíveis fósseis. Somadas, contribuíram com 75% do aumento dos teores de CO<sub>2</sub> na atmosfera a partir de 1750, sendo o restante, resultado de queima da floresta (OLIVEIRA, PERGHER e MORO, 2004).

Conforme Manahan (2005), o crescimento dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico nos últimos anos é de aproximadamente 1ppm volumétrico/ano como demonstrado na Figura 04.

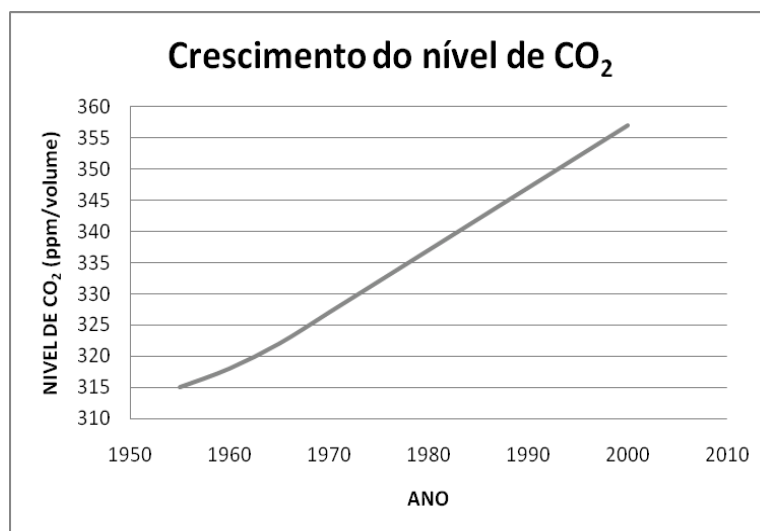


Figura 04: Crescimento do Nível de CO<sub>2</sub> nos Últimos Anos  
Fonte: Adaptado de Manahan, 2005

Logo, no nível atual de desenvolvimento, o CO<sub>2</sub> é considerado o principal gás de efeito estufa. Sendo um gás estável, essa propriedade favorece sua permanência na atmosfera por aproximadamente quatro anos, tempo que ele leva para ser removido, e certamente, as concentrações de CO<sub>2</sub> continuarão a aumentar a menos que se reduza o uso dos combustíveis fósseis e o desflorestamento. Por tudo isso, a queima dos combustíveis fósseis vai interferir, por muito tempo ainda, nos ciclos biogeoquímicos, principalmente o do carbono, por adicionar

quantidades crescentes de CO<sub>2</sub> na atmosfera (PACHECO e HELENE, 1990).

O metano (CH<sub>4</sub>) é outro gás estufa importante. Principal componente do gás natural, sua participação na composição atmosférica tem aumentado desde a época pré-industrial (HOUGHTON, 1996, *apud* DE NEVERS, 2000).

Nos últimos 250 anos, os níveis de metano atmosférico se elevaram significativamente (mais do que o dobro) como resultado da utilização de combustíveis fósseis, práticas agrícolas e resíduos de fermentação. Sendo um gás de efeito estufa 20 vezes mais efetivo que o CO<sub>2</sub>, e a despeito da baixa reatividade, mesmo a baixas concentrações é um fator importante para os processos químicos na atmosfera (MANAHAN, 2005; DE NEVERS, 2000).

Hoje, presente na atmosfera em concentrações inferiores a do CO<sub>2</sub>, dentro de 50 anos poderá ser o principal gás a influenciar o clima global (PEARCE, 1989, *apud* CARDOSO, SAMINEZ e VARGAS, 2001).

Outro gás de efeito estufa que apresenta vida longa na atmosfera (85 anos) é o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Segundo Manahan (2005) não influencia significativamente as reações químicas na troposfera, no entanto, sua molécula é um absorvente eficaz da radiação infravermelha, tornando-o um concorrente para o aquecimento global mais potente que o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub>. É produzido naturalmente por processos microbiológicos nos solos e nos oceanos, é pouco reativo e é um componente natural da atmosfera (0,3 ppm).

A principal fonte antrópica do N<sub>2</sub>O são as atividades agrícolas ligadas à manipulação do solo como o uso de fertilizantes. Sua concentração decresce com a altitude na estratosfera devido, segundo Manahan (2005):

➤ À reação fotoquímica:



- Ou em decorrência de algumas reações com o oxigênio atômico *singlet*<sup>14</sup>:



Existe uma estreita relação entre o aumento na emissão dos principais gases de efeito estufa e os processos de combustão envolvidos na maior parte das atividades ligadas à produção. Por exemplo, para produzir energia, muito material tem sido queimado, com poder energético e intensidade crescente, começando pela madeira no passado, até a participação intensa dos combustíveis fósseis nos dias de hoje.

O controle dos efeitos que o modelo de sociedade consumista imprime ao ambiente passa pelo conhecimento dos processos produtivos e dos caminhos necessários para a obtenção, ao mesmo tempo, de eficiência e redução das emissões. Portanto, um conhecimento, no mínimo rudimentar, sobre a combustão se faz necessário para compreender as fontes de poluição e alguns mecanismos de controle.

#### 2.2.4. Combustão, Combustível e Contaminantes

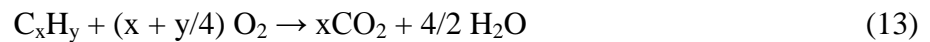
Entende-se que a combustão é um fenômeno químico complexo que depende de alguns fatores como: combustível, grau de mistura do combustível com o oxigênio, temperatura da combustão, tempo, etc.

**Combustível:** é o material que queima sendo que a maioria das coisas que queimam são compostas de carbono e hidrogênio, os principais elementos constituintes dos hidrocarbonetos fósseis. Quando são queimados para produzir energia ocorre normalmente a reação do combustível com o oxigênio do ar atmosférico, ou, em alguns casos, com o oxigênio puro

---

<sup>14</sup> Oxigênio molecular ( $\text{O}_2$ ) no seu estado fundamental é paramagnético e a sua estrutura eletrônica é triplete, ou seja, ele possui dois elétrons não emparelhados e é chamado de oxigênio triplete ( $^3\text{O}_2$ ). Oxigênio molecular que possua todos os elétrons emparelhados é chamado de oxigênio singlete ( $^1\text{O}_2$ ), e corresponde a um estado excitado de oxigênio (ALBERTIN *et. al.*, 1997).

(comburente). A combustão é, portanto, uma reação de oxirredução onde o combustível cede elétrons, agindo como redutor, e o comburente funciona como oxidante, fixando os elétrons cedidos pelo combustível. A equação (13) mostra a reação geral da combustão (HILSDORF, *et. al.*, 2009):



**Grau da mistura do combustível com o oxigênio:** Em primeiro lugar, para uma combustão eficiente com um mínimo de perdas, o ar fornecido deverá ser, teoricamente, suficiente para a queima completa do combustível, o que significa uma mistura adequada do combustível com o ar. Na prática é utilizada uma quantidade maior que a quantidade teórica, denominada “excesso de ar”. Esse “excesso de ar” é fator determinante para a eficiência da combustão permitindo manter o teor de oxigênio necessário à oxidação do combustível, até o fim da chama. Pode-se, segundo Hilsdorf *et. al.* (2009), relacionar essas quantidades com a seguinte expressão:

$$\textit{Quantidade de ar real} = \textit{Quantidade de ar teórico} + \textit{quantidade de ar em excesso}$$

Um grande “excesso de ar”, no entanto, é indesejável “porque diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes”. Nesse caso, provoca o retardamento da reação e redução na eficiência do sistema (PINHEIRO e VALLE, 1995).

O baixo “excesso de ar” propicia, por outro lado, a combustão incompleta, isto é, não há oxigênio suficiente para reagir completamente com o combustível. Assim, [...] “uma parte do carbono se une ao oxigênio para formar o monóxido de carbono e não o dióxido de carbono”.

Além de CO, formam-se também outros poluentes como os NO<sub>x</sub> e hidrocarbonetos não queimados, havendo ainda o aparecimento de fuligem nos gases de combustão (LOPES, OLIVEIRA e DONZELES, 2000).

A diferença entre combustão completa e parcial está nessa relação entre combustível e oxigênio. “[...] os produtos da combustão completa estão saturados com átomos de oxigênio, ao contrário dos produtos da combustão parcial que possuem a capacidade de absorver mais oxigênio se uma nova combustão lhes for promovida” (SANTOS, GULYURTLU e CABRITA, 2008).

**Temperatura:** No mesmo grau de importância, a temperatura precisa ser suficientemente alta para manter a combustão. Logo, sendo a combustão, uma “oxidação em alta temperatura” e uma reação exotérmica (que liberta calor), há necessidade de elevar a temperatura inicial (energia de ativação) para que o processo se torne autoativante, isto é, a energia liberada sustenta a reação permitindo que ela continue até que o combustível ou o comburente acabem. Temperatura suficientemente alta significa a temperatura máxima teoricamente possível, na qual se considera que todo o calor resultante da combustão é transformado em entalpia dos produtos da combustão não havendo, portanto, perdas de calor. Isso, na realidade não acontece, pois em um processo de combustão sempre haverá perdas de calor, por irradiação e por aquecimento do material em que se efetua a combustão (GARCIA, 2002; HILSDORF, 2009).

**Tempo:** Além dos fatores citados, o tempo também é importante, pois mesmo as explosões e detonações nucleares, requerem alguma quantidade de tempo para acontecer (HILSDORF, 2009).

Verifica-se, na prática, a impossibilidade de se atingir as condições para uma combustão absolutamente completa, razão porque, além de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , alguns poluentes atmosféricos também são lançados ao ambiente, como óxidos de enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio entre outros compostos indesejáveis na atmosfera (DE NEVERS, 2000).



Consequentemente, a equação química balanceada para a reação da combustão não é, provavelmente, uma descrição detalhadamente correta de como a reação se processa na realidade. Pode-se demonstrar esse fato com a queima do monóxido de carbono, um resíduo da combustão incompleta dos combustíveis fósseis. A equação da reação química balanceada é:



Poder-se-ia, apenas com essa informação, entender que a mistura de CO e oxigênio queimariam facilmente. Isso, no entanto não ocorre, pois é praticamente impossível queimar CO na ausência de quantidade-traço de água (DE NEVERS, 2000).

A explicação para isso está no radical livre hidroxila (OH<sup>•</sup>), de alta reatividade, que tem um papel crucial nas reações de oxidação. Um dos processos que a atmosfera utiliza para se livrar dos poluentes é através da reação do radical OH<sup>•</sup> com o CO:



O átomo de hidrogênio resultante dessa reação reage subsequentemente com o oxigênio molecular produzindo o radical hidroperoxila, outro radical importante na oxidação de poluentes do ar originados pela combustão incompleta (SCHIRMER e LISBOA, 2008).



O radical OH<sup>•</sup> é um limpador natural da atmosfera, oxida os gases poluentes transformando-os em substâncias mais solúveis e menos nocivas. Os radicais livres mais importantes para a combustão são: OH<sup>•</sup>, H<sup>•</sup>, O<sup>•</sup>, N<sup>•</sup>, CH<sub>3</sub><sup>•</sup> e aqueles produzidos pela quebra de hidrocarbonetos maiores. Nenhum deles tem uma concentração razoável (mais do que partes por bilhão) na temperatura ambiente, mas na temperatura da chama existem em quantidades significativas e são muito ativos (DE NEVERS, 2000).

Hoje, a maioria dos poluentes atmosféricos de origem antrópica na área urbana, “entra na atmosfera em decorrência da queima de combustíveis fósseis em usinas elétricas, em indústrias (origens estacionárias) e em veículos motorizados (origens móveis)” (MILLER, 2007, pag. 397).

Os subprodutos diretos e indiretos da queima desses combustíveis (carvão, petróleo e gás natural) são, em grande parte, contaminantes do ar liberados para a atmosfera. Entre os contaminantes diretos (poluentes primários), contam-se, conforme Nebel (1999):

- Alguns fragmentos de moléculas dos combustíveis que não queimaram totalmente e são denominados compostos orgânicos voláteis (COVs);
- O CO que é resultado da oxidação incompleta do carbono;
- O óxido nítrico (NO) formado pela oxidação do nitrogênio contido no ar atmosférico;
- Impurezas contidas nos combustíveis como o enxofre que se oxida e produz dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); ou ainda,
- Metais pesados e uma série interminável de outras impurezas.

Alguns desses materiais reagem na atmosfera e produzem outros compostos indesejáveis chamados poluentes secundários. Por exemplo, o ozônio e numerosos compostos orgânicos reativos se formam como resultado de reações químicas entre os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis ativados pela energia solar.

Os ácidos sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e nítrico (HNO<sub>3</sub>) também são considerados contaminantes secundários porque são produtos da reação do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)<sup>15</sup> com a umidade do ar e oxidantes como o OH<sup>•</sup> (NEBEL, 1999).

O material particulado é um poluente primário que pode adsorver outros contaminantes em

---

<sup>15</sup> NO<sub>x</sub> é a designação de dois óxidos de nitrogênio: o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

sua superfície onde algumas reações químicas possivelmente ocorrem. Quando constituído de partículas bastante pequenas, são inalados podendo introduzir-se profundamente nos pulmões, em cujas paredes úmidas liberam os contaminantes adsorvidos. Os processos industriais são a principal fonte de partículas e os transportes e a queima dos combustíveis respondem pela maior parte dos outros contaminantes. Para cada caso, as estratégias de controle são diferentes (NEBEL, 1998).

A combustão, bem como todas as atividades de produção, deixa resíduos, e pelas Leis da Conservação de Matéria e Energia não existe a possibilidade de “jogar fora” o lixo produzido e indesejável. Os materiais se transformam, mas não podem ser destruídos, portanto, continuam no ambiente. Os resíduos sólidos das indústrias, por exemplo, podem ser recolhidos, mas terão que ser depositados em algum local. É possível despoluir a água em estações de tratamento e esgoto, mas os poluentes retirados terão que ser queimados ou enterrados ou ainda utilizados como fertilizantes. Em todos esses casos a poluição é transferida da água para o ar ou para o solo. “A Lei da conservação da matéria diz que sempre enfrentaremos o problema do que fazer com resíduos e poluentes” (MILLER, 2007, pag. 27).

#### 2.2.5 Condições Meteorológicas

A camada mais baixa da troposfera, chamada Camada Limite Planetária (CLP), é onde ocorre a maioria dos fenômenos atmosféricos responsáveis pela qualidade do ar e compreende aproximadamente, os primeiros 1.000 a 1.500 m acima do nível do solo. Um desses fenômenos é a dispersão e remoção dos poluentes que estão intimamente ligadas aos fatores climáticos, às condições meteorológicas, à topografia e ao uso e ocupação do solo. Por essa razão o estudo da química da atmosfera envolve o conhecimento dessas condições, pois a

vitalidade ambiental de qualquer região depende da capacidade de trocar energia e matéria sem acelerar os processos de entropia (MELO e MITKIEWICZ, 2002).

Os poluentes classificam-se em antrópicos ou naturais conforme tenham ou não sido gerados por atividades humanas. Em ambos os casos podem ser liberados para o ambiente na forma original (poluentes primários) ou podem passar por processos físicos e químicos resultando na formação de poluentes secundários (MORETO, 2007).

Formam uma mistura complexa de gases e material particulado que participam de diversos fenômenos físicos, químicos e fotoquímicos na atmosfera, facilitados por condições meteorológicas e climáticas específicas. Um desses fenômenos tem relação com o movimento das massas de ar que pode ser favorecido pelas variações de temperatura e pressão em relação à altitude caracterizando a estabilidade ou instabilidade estática da atmosfera. Na troposfera, por exemplo, o decréscimo da temperatura com a altitude constitui uma situação de instabilidade estática induzindo os movimentos verticais ascendentes (PROCLIRA, 2007a).

Estabilidade ou instabilidade atmosférica são, portanto, condições fundamentais para a dispersão dos poluentes, pois a concentração destes na atmosfera não depende apenas da fonte de emissão ou da reatividade da espécie. Os parâmetros meteorológicos e a topografia do terreno também contribuem para um ambiente poluído. Fatores geográficos associados aos fatores meteorológicos favorecem a dispersão e diluição, da mesma forma que certos processos químicos de remoção dos poluentes também dependem do estado da atmosfera e dos poluentes emitidos por área, mesmo tratando-se de áreas afastadas da fonte poluidora (OLIVEIRA, SANTOS e LANDAU, 2002). Por essa razão o monitoramento das emissões, exclusivamente nas fontes, não é suficiente para garantir a qualidade do ar.

Como se sabe, a radiação solar não atinge igualmente a superfície do planeta, gerando

gradientes de temperatura e de umidade. As regiões equatorial e tropical recebem mais energia solar que as latitudes médias e as regiões polares (PROCLIRA, 2007b).

No equador registram-se temperaturas médias mais elevadas e a proporção que aumenta a latitude, a temperatura decresce. No entanto, como a terra aquece mais rapidamente e resfria mais lentamente que a água, no hemisfério norte, onde se concentra a maior parte das terras firmes do planeta, as temperaturas são superiores que as registradas no hemisfério sul. Outro fator, como a inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira (eixo de rotação) de 23,5° em relação ao seu eixo de translação (trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do sol), permite em 2/4 do ano, maior intensidade dos raios solares num ou noutro hemisfério (solstício). Nos outros 2/4 do ano os raios solares atingem igualmente os dois hemisférios (equinócio) (GONZATTI, SARAIVA e RICCI, 2008).

Por todas essas características, no Equador e nos Trópicos a energia recebida é maior que a energia emitida, enquanto na região polar ocorre o inverso provocando um desequilíbrio térmico que induz a circulação da atmosfera (PROCLIRA, 2007). Esse fato, muito importante para o clima, responde pelo sistema global dos movimentos atmosféricos denominado *Circulação Geral da Atmosfera*. Em consequência disso a diversidade climática do território brasileiro é muito grande, destacando-se os aspectos geográficos, de dimensão territorial, de relevo e a dinâmica das massas de ar. Devido a essa desigual distribuição da radiação solar sobre a superfície da terra, formam-se zonas de altas e baixas pressões. Em regiões onde a radiação solar atinge com maior intensidade o solo terrestre, forma-se uma zona de baixa pressão, provocando o deslocamento vertical da mistura (PRETTO, 2005).

É natural, considerando esses aspectos, que fatores como pluviosidade e temperatura, façam do clima da região amazônica, um sistema complexo e uma realidade única em todo o país,

implicando em diferentes formas de interpretação e de soluções para os problemas de poluição atmosférica (LOUREIRO, CARLO e LAMBERTS, 2002).

O solo é aquecido pelo sol e aquece o ar na sua vizinhança. À medida que o ar se aquece, as moléculas absorvem energia a qual se transforma em energia de movimento. Com velocidade maior, aumentam os choques entre as moléculas que, em consequência, se expandem, elevando-se na atmosfera. O ar quente, menos denso, ascende verticalmente e o ar frio, mais denso, desce, sendo, por sua vez, aquecido ao entrar em contato com a superfície quente do solo. Criam-se, assim, movimentos verticais ascendentes e descendentes reiniciando indefinidamente, o ciclo convectivo da atmosfera. Os poluentes compartilham dessas condições com os componentes naturais resultando daí os processos de dispersão e os fenômenos químicos e fotoquímicos relatados.

Eventualmente, podem ocorrer **inversões térmicas** quando a temperatura aumenta com a altitude e nesse caso os poluentes não se dispersam tão facilmente ao serem transportados pelo movimento das massas de ar. Esse é um exemplo da influência dos fenômenos que ocorrem na CLP os quais se caracterizam pela presença de uma camada de ar quente sobreposta a uma camada de ar frio e pela ausência de movimentos convectivos ascendentes. É uma condição de estabilidade onde os movimentos verticais ficam limitados, dificultando a dispersão dos poluentes (PROCLIRA, 2007).

Essas inversões podem ser de curta duração, geralmente em madrugadas de céu limpo e ventos calmos, decorrentes de mudanças abruptas de temperatura a qual arrefece mais rapidamente na superfície da terra ficando uma camada de ar quente sobreposta a uma camada de ar frio. Quando o sol nasce e seus raios voltam a aquecer a superfície, os poluentes encurralados pela inversão se dispersam através das correntes de convecção (PROCLIRA, 2007).

No entanto, em alguns casos a formação de um nevoeiro, por exemplo, pode impedir a radiação solar de atingir a superfície e dissipar a inversão a qual tende a subsistir por várias horas ou dias. E se poluentes forem emitidos abaixo da camada de inversão a dispersão dos mesmos ficará impossibilitada (o ar frio não sobe) trazendo prejuízos à saúde da população. Logo, o grau de insolação e a temperatura, são condições especiais que influem de forma considerável na formação do *smog* reduzindo a visibilidade. Maiores concentrações de espécies poluentes são favorecidas por nevoeiros, ausência de vento e inversões térmicas (MORETO, 2007).

Diante das interações que envolvem fenômenos naturais e atividades antrópicas, verifica-se que um conjunto de fatores incluindo os meteorológicos pode comprometer os resultados das pesquisas, por esse motivo precisa ser igualmente monitorado. Além das chuvas, a velocidade do vento também é um fator que afeta o transporte e a difusão dos poluentes na atmosfera e, por sua vez, se relaciona com o aquecimento e resfriamento do solo.

Manaus está situada em uma região de baixa pressão, no centro da Planície Amazônica. Possui clima Equatorial Quente e Úmido e apenas duas “estações”: i) chuvosa de novembro a junho, denominada “inverno regional”; e ii) menos chuvosa, de julho a outubro, comumente designada por “estação seca” ou “verão regional”. As chuvas são abundantes durante todo o ano com valores anuais entre 2.000 mm e 3.000 mm e temperaturas médias anuais que ficam entre 25 °C, e 27 °C, com pequena amplitude térmica. Apesar de não haver uma uniformidade climática, historicamente não têm sido registradas temperaturas máximas diárias excessivas em decorrência da alta umidade relativa e da nebulosidade que é intensa nessa Região. Excepcionalmente, registram-se temperaturas acima de 40 °C no auge do verão regional. De acordo com Torres e Machado (2011), não obstante a pequena amplitude térmica observam-se

“dois períodos equinociais máximos: março (temperaturas mais amenas) e setembro (temperaturas máximas)”.

As massas de ar deslocam-se das regiões de alta pressão para as de baixa pressão, ou seja, “para substituir as massas de ar da região equatorial que ascenderam em virtude das temperaturas elevadas, para lá convergem massas de ar menos quentes (tépidos), os ventos alísios [...] originados nas regiões temperadas”. Os ventos alísios vêm das regiões subtropicais para a região equatorial viajando pelas camadas mais baixas da atmosfera e, por esse motivo, sua velocidade é fortemente influenciada pela fricção com a superfície, não ultrapassando cinco metros por segundo (TORRES e MACHADO, 2011, p.48).

Regiões de baixa pressão, geralmente, são favorecidas com a renovação do ar na camada da mistura, no entanto, na cidade de Manaus, além da baixa velocidade dos alísios, os efeitos da urbanização representam um fator de desaceleração da velocidade dos ventos, possivelmente contribuindo com maiores concentrações de poluentes.

Verifica-se que os elementos do clima são influenciados por diferentes fatores trazendo, como resultado, diferenças climáticas de uma região para outra. “Cada área tem particularidades climáticas que, muitas vezes, não se encontram em uma área vizinha, embora ambas possam ser incluídas em um mesmo tipo de clima por terem características gerais semelhantes” (TORRES e MACHADO, 2011, p. 133).

Por esse motivo, torna-se difícil e praticamente improdutivo, usar exemplos e aplicar normas iguais para todas as regiões do país. Condições meteorológicas específicas da região amazônica diferem, substancialmente, das outras realidades brasileiras de clima temperado, com invernos frios e secos, sendo diferentes, também, em consequência, a interação entre as variáveis climáticas e meteorológicas com os poluentes atmosféricos. Em decorrência disso,



esses poluentes passam a ter um comportamento diverso daquele apresentado pelas mesmas espécies no sul o país.

Embora, na cidade de Manaus, a preocupação com a poluição atmosférica ainda não seja uma realidade vivenciada efetivamente pela sociedade, as cidades mais desenvolvidas do sul e sudeste do Brasil são férteis em produzir estudos sobre poluição de todos os seus ecossistemas, como pode ser comprovado na literatura.

Em São Paulo, por exemplo, o ozônio tem apresentado vários episódios de ultrapassagem dos padrões estabelecidos pelo CONAMA 03/90. Esse fato, constatado pelos relatórios da CETESB, justificam estudos diversos realizados na área e políticas desenvolvidas na tentativa de reduzir os impactos da poluição. O ozônio na troposfera “frequentemente ultrapassa o padrão horário de qualidade do ar de  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (82 ppbv) na RMSP<sup>16</sup>, sendo considerado o poluente com situação mais desfavorável em termos de ultrapassagens do padrão” (MARTINS, 2006).

Verificando a variabilidade sazonal e diurna de alguns gases poluentes na atmosfera da RMSP, Pretto (2005) demonstrou que alguns gases apresentam maiores concentrações durante o inverno, sendo que o ozônio teve os seus picos na primavera e verão. Esse comportamento diferenciado para o ozônio é explicado pela maior quantidade de radiação solar que favorece as reações fotoquímicas.

Outro achado importante em relação à concentração do ozônio troposférico na RMSP foi investigado exaustivamente por vários pesquisadores, comprovando o chamado “efeito de final de semana”. Verificou-se que, nas proximidades das fontes de emissão veicular de  $\text{NO}_x$ , as altas concentrações de NO produzidas durante a semana, consomem o  $\text{O}_3$  rapidamente. Por

---

<sup>16</sup> Região Metropolitana de São Paulo

outro lado, nos finais de semana, devido à diminuição da circulação de veículos, há um decréscimo da concentração de  $\text{NO}_x$ , aumentando a taxa de fotólise do  $\text{NO}_2$  e, em consequência, o aumento da concentração do  $\text{O}_3$  (MARTINS, 2006).

Também relatado por Martins (2006), as maiores concentrações de ozônio são detectadas entre 13 e 16 h devido ao perfil regular de emissão dos precursores do ozônio e das condições meteorológicas que registraram situações de baixa velocidade do vento.

Não é diferente na cidade do Rio de Janeiro onde elevadas concentrações de ozônio foram verificadas no período de março a abril de 2005. O estudo em questão demonstrou que quanto maior a concentração de ozônio registrada, menor foi a do dióxido de nitrogênio, comprovando a teoria, segundo a qual, a formação de ozônio troposférico tem início na fotólise do  $\text{NO}_2$ . O mesmo estudo mostrou, através das curvas de concentração do  $\text{O}_3$ , que as próprias possuem um comportamento igual ao da curva de radiação (CARVALHO, 2004).

No Amazonas, em decorrência da fartura de rios e de florestas apenas esses ambientes têm merecido a maior atenção, enquanto o ar atmosférico é negligenciado. Somadas às questões culturais, a pesquisa no Amazonas padece, também, de enormes dificuldades logísticas resultantes, entre outras coisas, das distâncias continentais que separam o Estado dos centros mais desenvolvidos. Em consequência, excetuando-se as tentativas de alguns centros de pesquisa das Universidades que “teimam em nadar contra a corrente”, muito pouco se conhece sobre os níveis de concentração dos poluentes atmosféricos na capital amazônica, ainda que sejam evidentes os indícios do “progresso” e de proliferação das fontes de emissão.

Lançados por essas fontes, os poluentes encontram, na atmosfera, condições meteorológicas capazes de interferir, diretamente na dispersão e no transporte dos mesmos. Além disso, no ambiente urbano, as condições de dispersão dos poluentes são afetadas pelas edificações e pela

vegetação que, muitas vezes, é substituída por áreas construídas. O transporte dos poluentes nessas áreas é realizado pelas correntes de ar horizontais que arrastam a poluição lateralmente (causados pela direção e velocidade dos ventos) e as correntes de ar verticais convectivas que carreiam os poluentes para níveis superiores da atmosfera. “Quando esses dois mecanismos falham, ocorre uma estagnação atmosférica com consequentes episódios de poluição do ar” (PIRES, 2005, p. 13-14).

Considerar as condições meteorológicas locais é fundamental para a compreensão dos níveis de concentração de poluentes, inclusive para reunir informações que venham ao encontro da formulação de políticas ambientais eficientes e adequadas. No entanto tem sido comum o entendimento departamentado dos fenômenos naturais, ignorando-se as interdependências que tornam os estudos atmosféricos complexos e interdisciplinares. Variações de umidade, ventos, temperatura, pluviosidade, e radiação solar estão em constante associação, ligados, diretamente, à biosfera do planeta. Não relaciona-los resultará no advento de novas incertezas e dificuldade de soluções, pois mesmo que se mantenham constantes os níveis de emissão os parâmetros meteorológicos atuam efetivamente na maior ou menor dispersão influenciando a qualidade do ar.

**UMIDADE:** É importante avaliar a influência da umidade relativa do ar nas condições de dispersão dos poluentes, pois ela é inversamente influenciada pela temperatura. Refletindo sobre o conteúdo teórico desta pesquisa, a baixa umidade relativa combinada com radiação solar intensa, altas temperaturas, ventos fracos e, principalmente a presença de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, são condições propícias para o aumento da produção do ozônio troposférico. Hoje, este poluente secundário constitui uma das maiores preocupações de ambientalistas em cidades muito desenvolvidas.

A Figura 05 apresenta o gráfico das Normas Climatológicas em Manaus (1961 a 1990) o qual demonstra a tendência da umidade durante os meses do ano.

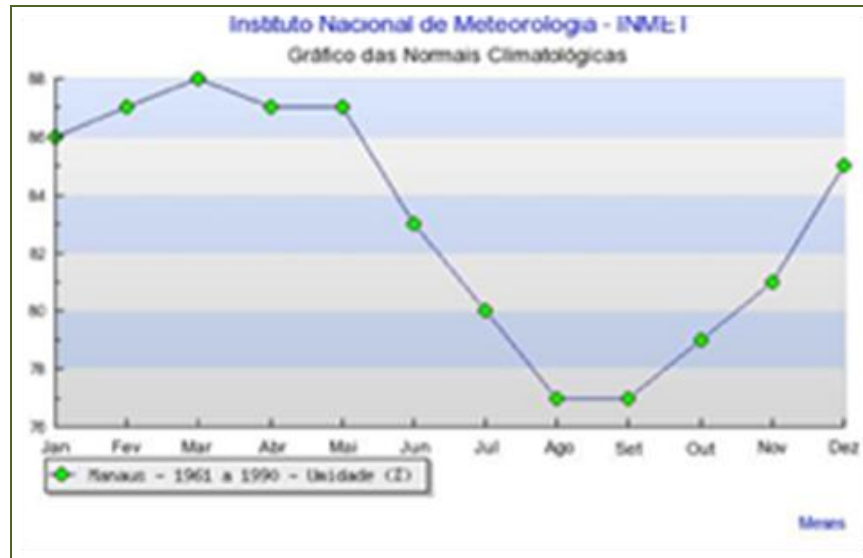


Figura 05: Tendência da Umidade Durante os Meses do Ano em Manaus  
Fonte: INMET

Nos meses mais quentes, os valores da umidade relativa chegam a níveis preocupantes. Esse fato é motivado pelas elevadas temperaturas que aumentam a capacidade de a atmosfera reter umidade, reduzindo o volume de chuvas.

**VENTOS:** Na ausência de vento ou quando sua velocidade é muito pequena, uma característica do clima equatorial, a dispersão dos poluentes é um processo muito lento. Isso porque a direção e a velocidade dos ventos são determinantes para a maior ou menor concentração dos poluentes nas áreas próximas às fontes de emissão, além de responderem pelo alcance e pela trajetória dos mesmos. Isso quer dizer que, quanto menor a velocidade dos ventos, maiores as chances de aumentar o tempo de residência dos poluentes nas proximidades das fontes de emissão.

**TEMPERATURA:** O comportamento da temperatura é outra importante característica regional a considerar, pois pode alterar significativamente, o processo de dispersão atmosférico.

Em temperaturas elevadas o ar quente, próximo à superfície da Terra arrasta os poluentes num movimento vertical convectivo (ascendente) e com isso evita a permanência das substâncias indesejáveis nos níveis inferiores da atmosfera.

Entretanto, como ficou demonstrado nos capítulos anteriores desta revisão, nos episódios de inversão térmica, a estabilidade da atmosfera mantém os poluentes encurralados limitando a capacidade de dispersão dos mesmos.

**PRECIPITAÇÃO:** A abundância de chuvas é um dos elementos climáticos mais importantes, característico do clima Equatorial quente e úmido.

As precipitações são primordialmente de características convectivas (causadas pelo movimento ascendente de massas de ar quentes), ocorrendo com mais frequência nos horários de maior aquecimento.

Apesar de existirem apenas duas estações, uma seca e outra chuvosa, as precipitações não são uniformes nem espacialmente nem sazonalmente, ocorrendo uma variabilidade no volume de chuvas de um ano para o outro, ou mesmo intensidades diferentes na duração das estações, conforme informam Oliveira, Randow e Manzi (2010):

A variabilidade temporal dos totais mensais caracteriza a sazonalidade deste parâmetro, com uma estação seca definida, a qual apresenta certa variabilidade interanual, com alteração na duração e intensidade. Em 2005 foi registrado o menor índice de precipitação na estação seca, com total de 207 mm, representando apenas 9% do total anual, enquanto em 2007 foi de 610 mm, 22% da precipitação anual. Na estação chuvosa de 2004 a precipitação atingiu um maior índice, 1212 mm, o equivalente a 47% do total anual, mas em 2001 foi inferior a 600 mm, 27% do total anual.

No estado do Amazonas, os níveis de precipitação também variam de um município para outro em decorrência das dimensões quase continentais que o Estado apresenta. Um estudo realizado em Benjamin Constant apresentou totais anuais de precipitação maiores que em Manaus em 76,5% dos anos, no período estudado (NASCIMENTO, 2009).

Segundo a autora, “mesmo o período mais seco para Benjamin Constant, apresenta médias de 106,0 mm (em julho) e 108,2 mm (em agosto), enquanto em Manaus o período seco tem médias abaixo de 100,00 mm, com exceção de junho, com 108,6 mm” (NASCIMENTO, 2009).

Por outro lado a disponibilidade de radiação solar, as elevadas temperaturas, aliadas à presença de vapor d'água na atmosfera contribuem para aumentar a atividade das moléculas e, conseqüentemente, para a alta reatividade química da atmosfera no Amazonas

#### 2.2.6 Padrões de Qualidade do Ar

O estabelecimento dos Padrões de Qualidade do Ar pela Legislação Brasileira teve, como objetivo, assegurar a saúde humana e ambiental. Essa é uma preocupação das sociedades contemporâneas, pois a deterioração da qualidade do ar significa, em última instância, igual deterioração da qualidade de vida. No Brasil, os padrões de Qualidade do Ar são definidos pela Resolução CONAMA nº 03, de 28/06/1990.

Art. 1º - São padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. A Resolução também estabelece que poluente atmosférico é “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos.

Esses parâmetros estabelecem quais os poluentes que devem ser monitorados, os padrões de qualidade, primário e secundário, e também determinam os métodos que devem ser usados.

Portanto eles definem, legalmente, o limite máximo para a concentração de um determinado poluente atmosférico e têm como objetivo criar uma base para políticas de prevenção da degradação da qualidade do ar (CONAMA, 1990).

Os padrões primários constituem metas de curto e médio prazo e significam os níveis máximos toleráveis de concentração do poluente considerado. Os padrões secundários significam os níveis máximos desejáveis de concentração dos poluentes, sendo entendidos como metas de longo prazo (CONAMA, 1990).

Os padrões nacionais de qualidade do ar fixados pela Resolução CONAMA nº 03/90 são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05: Padrões Conforme CONAMA nº 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 ou método equivalente
	MGA (2)	80	60	
Partículas Inaláveis	24 horas (1)	150	150	Separação ou método equivalente
	MAA (3)	50	50	
Dióxido de Enxofre	24 horas	365	100	Pararosanflina ou método equivalente
	MAA (3)	80	40	
Monóxido de Carbono	1 hora (1)	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo ou método equivalente
	8 horas	35 ppm	35 ppm	
		10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora (1)	320	190	Quimioluminescência ou método equivalente
	MAA (3)	100	100	
<b>Ozônio</b>	<b>1 hora (1)</b>	<b>160</b>	<b>160</b>	<b>Quimioluminescência ou método equivalente</b>

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

(2) Média geométrica anual. (3) Média aritmética anual.

A mesma Resolução também estabelece critérios para a elaboração de planos de emergência para episódios agudos de poluição do ar. Especificamente para o  $\text{NO}_2$ , esses critérios são os seguintes (Tabela 06):

Tabela 06: Episódios Agudos de Poluição do Ar para o NO<sub>2</sub>

Parâmetro	Atenção	Alerta	Emergência
Dióxido de Nitrogênio	1.130	2.260	3.000
(ppb)	600,61	1.201,23	1.594,56

É importante salientar que, uma das principais ferramentas da sociedade para se defender da poluição atmosférica é a legislação ambiental a qual precisa estar atualizada sob pena de não cumprir com eficiência esse papel. No entanto, os níveis de concentração regulamentados pela legislação brasileira datam ainda de 1990.

Os padrões CONAMA foram considerados ultrapassados pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente-CONSEMA do estado de São Paulo o qual, seguindo recomendação ditada pela Organização Mundial de Saúde-OMS, aprovou em 25 de maio de 2011 o relatório interinstitucional definindo novos parâmetros para medição da qualidade do ar. O relatório publicado pela OMS em 2006 alerta os governos para que reformulem os padrões da qualidade do ar vigentes em seus países e apresenta diretrizes de qualidade do ar estabelecendo a redução dos limites até então adotados (CONSEMA, 2011).

A Tabela 07 apresenta os limites anteriores e os limites propostos pela OMS:

Tabela 07: Comparando os Padrões da Qualidade do Ar (OMS/CONAMA)

Poluentes	Padrões OMS anteriores µg/m <sup>3</sup>	Padrões OMS atuais µg/m <sup>3</sup>	Padrões CONAMA (primários) µg/m <sup>3</sup>
Partículas inaláveis (média diária)	150	50	150
Ozônio (média horária)	160	100	160
SO <sub>2</sub> (média diária)	100	20	365



<b>Poluentes</b>	<b>Padrões OMS anteriores</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Padrões OMS atuais</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Padrões CONAMA (primários)</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO <sub>2</sub> (média horária)	200	200	320

Ressalta-se que, mesmo os padrões antigos recomendados pela OMS para o SO<sub>2</sub> e para o NO<sub>2</sub> eram menos permissivos que os padrões CONAMA. Ainda assim, apesar de ultrapassada, a legislação ambiental não é cumprida em vários estados do Brasil.

As grandes diversidades entre os municípios brasileiros implicam em resultados diferenciados quanto às políticas ambientais. No Amazonas, além das fragilidades institucionais e orçamentárias, forças econômicas (setor empresarial) resistem ao controle da poluição mantendo o foco no progresso associado ao crescimento urbano. Apenas algumas cidades brasileiras possuem um sistema regular de monitoramento e controle da qualidade do ar. Destacam-se, São Paulo e várias outras cidades do estado paulista, Curitiba, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Porto Alegre, Recife, Fortaleza, Brasília e Cuiabá, operando com estações automáticas de amostragem, o que possibilita o registro de maior quantidade de dados (DANNI-OLIVEIRA, 2008).

### **2.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A ATMOSFERA**

No final do século XIX, a estrutura básica da física clássica, formada pela mecânica newtoniana, pela termodinâmica de Clausius e pelo eletromagnetismo de Maxwell, descrevia com precisão satisfatória o comportamento da matéria e da energia como coisas absolutamente distintas. Naquele século, a teoria ondulatória do campo eletromagnético era um dos maiores sucessos da física, e é natural que a sociedade científica da época, não estivesse preparada para compartilhar a ideia da natureza corpuscular da radiação eletromagnética. “Aceitava-se que matéria era formada por corpúsculo ou partícula e a luz tinha uma natureza ondulatória”

(CAMARGO, 2007-2012).

Alguma coisa, no entanto, precisava ser esclarecida. Nem todos os conhecimentos da época eram suficientes para explicar, por exemplo, o estudo da distribuição de energia da luz emitida pelos corpos negros (corpo que tem a propriedade de reemitir toda a radiação que incide sobre ele). A busca de algumas explicações levou a algo totalmente novo e revolucionário: a elaboração da Teoria da Relatividade de Einstein e da Teoria Quântica de Max Planck.

Max Planck foi o primeiro pesquisador a postular que a radiação eletromagnética, emitida por um corpo negro, era **quantizada**, isto é em forma de pequenas quantidades de valor definido. Este “**pacote mínimo**” de energia foi denominado “quantum” de energia ou **foton** (LENZI e FAVERO, 2011, p. 44).

No entanto, foi Einstein, provavelmente, quem viu nas propriedades do efeito fotoelétrico, um sinal muito claro da composição corpuscular da radiação e com base nas concepções de Planck, desenvolveu suas próprias conclusões sobre o produto da interação da radiação com a matéria (ROSA, 2010).

De acordo com Einstein, a luz deve ser considerada não apenas como um fenômeno ondulatório “mas também como tendo propriedades de partícula, de maneira que é absorvida (ou emitida) pela matéria unicamente em pacotes finitos chamados hoje de fótons” (BAIRD, 2002, p. 52).

Em 1913, Niels Bohr vem completar o grande sucesso do ‘quantum’ de Planck e da interpretação de Einstein, ao quantizar o átomo, usando as hipóteses dos seus antecessores e explicando a natureza das raias espectrais do átomo de hidrogênio (MORAES, 2010).

Hoje, compreende-se que matéria e energia não são entidades distintas e se convertem uma na outra, conforme o postulado de Einstein ( $E = mc^2$ ). A energia radiante é a energia dos fótons determinada pelo comprimento de onda, frequência e velocidade. Assim, a mecânica quântica revolucionou as noções de energia, matéria e causalidade construindo novas e importantes

descobertas cujos desdobramentos mudaram os rumos das sociedades. No mundo atual, a produção de TVs, CDs, DVDs, LCD, PLASMA, CHIPS são modernidades que tiveram origem com a descoberta do “quantum” de radiação.

Também houve uma revolução no estudo dos fenômenos atmosféricos, pois a circulação da atmosfera é controlada pela radiação eletromagnética emitida pelo sol, principal fonte de energia responsável pelo desencadeamento dos processos químicos, físicos e biológicos que acontecem em todas as suas camadas, principalmente na estratosfera e troposfera. Conseqüentemente, o conhecimento das “intimidades” do átomo proporcionou a melhor compreensão dos fenômenos atmosféricos regidos pela radiação solar.

### 2.3.1 O Espectro Eletromagnético

Efeitos da radiação solar são aspectos importantes da Química da Atmosfera que envolve reações de fotólise e oxidação (fotooxidação). Baseada nesses efeitos, a interação da luz com a matéria oferece diferentes possibilidades de realizar medições. Faz parte do estudo da espectroscopia, cujos métodos são baseados na medida da quantidade de radiação emitida ou absorvida pela matéria. Esses métodos classificam-se conforme a região do espectro eletromagnético envolvida na medida, o qual cobre uma enorme faixa de energia que varia de  $10^{19}$  Hz (raios gama) a  $10^3$  Hz (ondas de rádio) (FILGUEIRAS, 1996, SKOOG *et. al.*, 2006).

A radiação eletromagnética é transmitida a grandes velocidades através do espaço e tem propriedades que a caracterizam como onda e como partícula ao mesmo tempo. Quando se trata da interação entre radiação e matéria, é mais conveniente considerar a energia radiante como constituída por fótons (partículas de energia) cuja energia está relacionada com o comprimento de onda e frequência através da fórmula (FILGUEIRAS, 1996, BAIRD, 2002):

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Onde  $E$  é a energia de um fóton de radiação eletromagnética;  $h$  é a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  Js); e  $\nu$  é a frequência da radiação eletromagnética, inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação,  $\lambda$ .

O sol emite radiações de diversos comprimentos de onda que correspondem às radiações ultravioleta (UV), visível e infravermelha (IV), com teor de energia decrescente, nessa ordem.

O conjunto ordenado da radiação eletromagnética é denominado espectro eletromagnético e as divisões principais do espectro são mostradas na Figura 06:

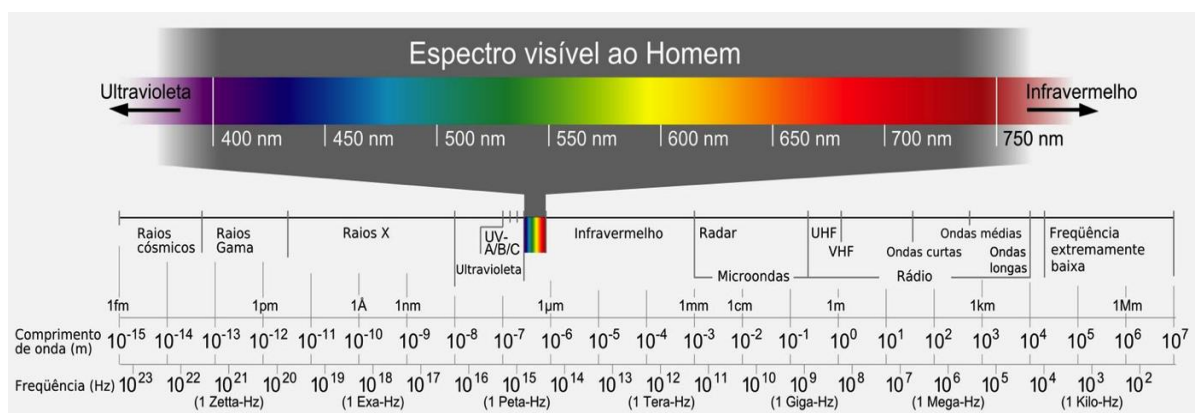


Figura 06 : O Espectro Eletromagnético  
 Fonte: pion.sbfisica.org.br, 2010.

A visão humana é limitada a apenas um intervalo do espectro eletromagnético, entre 400 nm e 750 nm, aproximadamente, classificada como luz visível. A região do espectro classificada como ultravioleta (UV), tem frequência maior do que a luz visível, sendo, portanto, mais energética, podendo romper ligações entre os átomos nas moléculas e assim, promover reações químicas (FILGUEIRAS, 1996).

A energia UV se estende para depois da luz visível, começando na extremidade violeta, portanto, fora do alcance da visão humana (depois do violeta) e é dividida em três níveis: UVA (400 a 320 nm) chega até a superfície terrestre atingindo a derme e sendo responsável pelo bronzeamento; UVB (320 a 280 nm) chega apenas uma parte à superfície terrestre, o

restante é absorvido por espécies químicas presentes na atmosfera; e UVC (280 a 200 nm) que é a radiação mais perigosa, no entanto, é quase totalmente absorvida pela camada de ozônio na estratosfera (BAIRD, 2002; HIGSON, 2009).

“No outro extremo do espectro, após a porção vermelha da região visível”, encontra-se a radiação infravermelha (750 a 100.000 nm) a qual coincide com a faixa de energia necessária para fazer vibrar os átomos em suas ligações, sem, contudo ter energia suficiente para romper essas ligações e provocar uma reação química (FILGUEIRAS, 1996; BAIRD, 2002, p. 45).

Sob a ação da energia solar, vários fenômenos acontecem na atmosfera, porém, nem toda a radiação solar atinge a superfície terrestre, porque uma parte dessa radiação interage com os constituintes atmosféricos podendo desencadear fenômenos de absorção, reflexão ou dispersão. Uma parte dessa energia é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera, e outra atinge a Terra na forma de ondas eletromagnéticas, principalmente luz visível. De 100% da energia solar que chega à atmosfera, cerca de 40% incidem sobre as nuvens. Estas absorvem 1% e refletem 25%, chegando apenas 14% à superfície da Terra. Dos 60% que não incidem em área coberta pelas nuvens, 7% são refletidos e difundidos por aerossóis e 16% são absorvidos por gases atmosféricos, restando 37% que atingem o solo terrestre. Portanto, 51% da energia do sol chega à Terra. Destes 51%, subtraem-se 5% que são refletidos pela própria superfície e o restante, 46% é absorvido e reirradiado em forma de calor, promovendo o aquecimento da Troposfera (TORRES e MACHADO, 2011).

Analisando os valores acima, verifica-se que só chega à superfície da Terra a radiação menos energética. A fração que não atinge a superfície terrestre é barrada em função das interações entre a radiação solar e a matéria, interação essa que depende da energia do *quantum* da radiação podendo ser “com o núcleo dos átomos (raios cósmicos) ou com a eletrosfera e

elétrons de valência (raios X, ultravioleta, visível etc)” (LENZI e FAVERO, 2011, p. 42).

É interessante observar que a energia que vem do sol em direção ao Planeta, é constante, mas a insolação (quantidade de energia que efetivamente atinge a superfície terrestre) varia de acordo com dois fatores principalmente: i) inclinação dos raios solares e ii) tempo de exposição (MORETO, 2007).

### 2.3.2 Reações Fotoquímicas

Quando uma reação é iniciada pela ação da energia radiante do sol, ela é chamada de “reação fotoquímica”. Constitui um estudo complexo, pois envolve muitos fenômenos importantes na atmosfera como a depleção do ozônio e a formação do *smog* fotoquímico além de vários outros aspectos da ciência que trata dos estados excitados da matéria.

Devido à grande disponibilidade de energia solar a atmosfera é um espaço propício para a ocorrência das reações fotoquímicas. Aliás, toda a química da atmosfera tem início nos processos fotoquímicos, pois a principal fonte de energia para as reações atmosféricas é a energia solar. Mas a disponibilidade de radiação com energia fotônica suficiente, não significa, necessariamente, que a reação deva ocorrer, embora seja uma condição necessária.

Para uma molécula ser ativada há que atender uma condição indispensável: a absorção de um único fóton com energia suficiente para causar uma mudança de estado. Esse parece ser o aspecto mais atraente do estudo da atmosfera, poluída ou não poluída, a absorção de energia por algumas espécies químicas, geralmente na região do visível ou ultravioleta do espectro solar, tornando-as eletronicamente excitadas e extremamente reativas (BAIRD, 2002).

Diz-se que o átomo encontra-se no “estado excitado” porque apresenta uma configuração energética menos estável. Em outras palavras, essa condição de instabilidade leva o átomo a reagir ou retornar, subsequentemente ao “estado fundamental” liberando a energia absorvida.

Explica-se o “estado excitado” porque nas moléculas em geral, os elétrons ocupam orbitais de mais baixa energia (estado fundamental) com, no máximo, dois elétrons no mesmo orbital, apresentando spins opostos (emparelhados). Um dos elétrons pode ser promovido para um orbital mais energético pela ação de radiação específica e, nesse caso, diz-se que está desemparelhado. Se o spin do elétron excitado for antiparalelo ao spin do seu companheiro no orbital anterior, a molécula estará no estado excitado *singlet* e caso contrário será *triplet* (CILENTO, 1993; MANAHAN, 2005).

Entre as diferentes formas com que matéria e radiação eletromagnética interagem, as que envolvem transições entre estados energéticos são as mais interessantes. Essas transições dependem do tipo de material e das características da radiação, tais como frequência e intensidade. Isso quer dizer que incidem, normalmente, em partes diferentes do espectro eletromagnético. Podem ser divididas em vários tipos, sendo os principais, as transições eletrônicas, vibracionais e rotacionais. As transições eletrônicas acontecem quando um elétron passa de um estado de menor energia para um estado de maior energia ao absorver a radiação, praticamente sem alterar a posição de seus núcleos (OLIVEIRA, 2001).

Entende-se, de acordo com a mecânica quântica, que os elétrons assumem estados discretos de energia (os elétrons são quantizados) e só passam de um estado energético para outro se ganham ou perdem energia. A energia, portanto, quando absorvida, é capaz de levar o elétron para um outro nível deixando-o excitado, mas o estado excitado não significa, necessariamente, uma reação fotoquímica, é o início de um processo que pode resultar em perda de energia, dissociação, reação química, luminescência ou fotoionização além de outras excitações eletrônicas com posterior desdobramento em reações fotoquímicas (LENZI e FAVERO, 2011).

As moléculas não permanecem no “estado excitado”, isto é, “não retém o excesso de energia fornecido pelo fóton durante muito tempo” (BAIRD, 2002, p. 53).

Em uma pequena fração de segundo, elas devem usar a energia para reagir fotoquimicamente ou voltar ao seu estado fundamental – o arranjo de elétrons de mais baixa energia (o mais estável) – seja pela própria emissão de um fóton ou convertendo o excesso de energia em calor o qual torna-se rapidamente distribuído entre as várias moléculas vizinhas por meio de colisões (i.e., as moléculas devem “usar a energia ou perdê-la) (BAIRD, 2002, p. 53-54).

As moléculas, segundo Manahan (2005) podem perder o excesso de energia de maneiras diversas tais como:

- Uma espécie qualquer (M) absorve o excesso de energia que, em seguida, é dissipada como calor:  $O_2^* + M \rightarrow O_2 + M^*$ ;
- A molécula excitada se dissocia:  $O_2^* \rightarrow O^* + O^*$ . Esse processo é responsável pela predominância de oxigênio atômico na atmosfera superior. Para Schirmer e Lisboa (2008) quando as ligações químicas na molécula se rompem, podem se formar radicais livres que são átomos ou fragmentos de moléculas cujo desemparelhamento de elétrons lhes dá uma elevada reatividade. Devido à forte tendência dos elétrons em formar pares, os radicais livres são instáveis e por isso muito reativos, razão porque desencadeiam a maioria dos processos químicos importantes na atmosfera. No entanto, nas camadas mais externas da atmosfera, devido à grande rarefação, os radicais livres podem permanecer por longos períodos sem colidir com outras espécies reativas.
- A molécula excitada reage com outras espécies:  $O_2^* + O_3 \rightarrow 2O_2 + O^*$ ;
- A molécula excitada pode perder energia emitindo radiação eletromagnética (luminescência):  $NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu$ . Quando a molécula excitada é formada por processos químicos, tem-se a quimiluminescência:  $O_3 + NO \rightarrow NO_2^* + O_2$ ;



- A espécie excitada pode transferir energia para outra espécie:  $O_2^* + Na \rightarrow O_2 + Na^*$ ;
- Pode ocorrer também a fotoionização através da perda de elétrons. Nesse caso o elétron é deslocado definitivamente ionizando o átomo ou molécula. Diz-se, no caso de a radiação expulsar o elétron, que a mesma é ionizante:  $N_2 \rightarrow 2N^+ + 2e^-$ . Os íons formados podem permanecer na atmosfera superior por longos períodos antes de se recombinarem para formar espécies neutras. Caso a energia não seja capaz de libertar o átomo de seu elétron, ela é denominada “radiação não ionizante”.

Para que ocorra uma reação fotoquímica, outra condição é necessária: que a energia absorvida tenha um comprimento de onda específico, no entanto, essa tendência em absorver a radiação específica é influenciada pelos diferentes níveis de energia dos elétrons. Dessa forma, alguns constituintes da atmosfera produzem efeitos consideráveis de absorção, isto é, as moléculas absorvem a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda em função de seus estados eletrônicos. Essa propriedade permite que os processos de absorção e emissão tenham grande utilidade na Química Analítica, pois a emissão da radiação é altamente específica e diretamente proporcional à concentração do analito. Por esse motivo, esse fenômeno é utilizado na Química Analítica para fins de análise através das técnicas de Emissão Atômica e Absorção Atômica (BAIRD, 2002).

Determinadas espécies absorvem energia na região do visível (de 400 nm a 750 nm), outras absorvem radiação ultravioleta (de 200 nm a 400 nm). O oxigênio molecular e o nitrogênio molecular, por exemplo, filtram a radiação solar na estratosfera e com isso evitam que a radiação de comprimento de onda curto, menor que 220 nm, chegue à superfície da Terra. A molécula de  $O_2$  pode se dissociar ao absorver um fóton de energia menor ou igual a 241nm, conforme a equação (BAIRD, 2002; HIGSON, 2009):



Isso acontece porque os fótons UV e visível são da mesma ordem de grandeza que as variações de entalpia de algumas reações, portanto, são capazes de dissociar a molécula. Por exemplo, a reação de dissociação do  $\text{O}_2$  demonstrada acima, requer uma variação de entalpia ( $\Delta H^\circ$ ) de  $495 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Considerando-se iguais a variação de entalpia para a reação de dissociação, e a energia requerida para essa reação nas condições estratosféricas, o comprimento de onda da radiação correspondente é calculado por (BAIRD, 2002):

$$\lambda = 119.627 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ nm} / 495 \text{ kJ mol}^{-1} = 241 \text{ nm}$$

Onde **119.627 kJ mol<sup>-1</sup> nm** representa o produto  $hc$  da equação de Plank quando o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é expresso em nanômetros. Conseqüentemente, de acordo com Baird (2002, p. 53) “qualquer molécula de  $\text{O}_2$  que absorva um fóton de luz de comprimento de onda de 241 nm ou menor terá um excedente de energia suficiente para se dissociar”.

Se a energia do fóton não for suficiente, a molécula de  $\text{O}_2$  não se dissocia, tornando-se “excitada” (acumula o excesso de energia). Esse excesso de energia pode ser convertido em um novo fóton que será emitido ou em calor transmitido para outras espécies através de colisões. Algumas espécies presentes na atmosfera são moléculas eletronicamente excitadas, íons e radicais livres, extremamente reativas e, por isso, proximamente relacionadas com a Química da Atmosfera. Como exemplo, o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) é uma das espécies mais ativas fotoquimicamente a qual absorve radiação produzindo moléculas eletronicamente excitadas (MOZETO, 2001; MANAHAN, 2005):



As reações de fotodissociação e fotoionização ocorrem nas camadas superiores da atmosfera dando como resultado a absorção quase total da radiação solar pelas moléculas e átomos,

impedindo as radiações mais energéticas de atingir a superfície terrestre.

[...] a absorção ocorre devido à presença de moléculas ou átomos com fortes bandas ou linhas em uma dada faixa de comprimentos de onda. [...] o oxigênio molecular e o ozônio apresentam fortes bandas de absorção na região do ultravioleta (0,001-0,39  $\mu\text{m}$ ) do espectro eletromagnético, e outras espécies como  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  absorvem fortemente na região do infravermelho (0,7 – 1000  $\mu\text{m}$ ). [...] A superfície terrestre absorve radiação solar principalmente na região do visível e reemite no infravermelho (ECHER, SOUZA e SCHUCH, 2001).

Na estratosfera, as principais reações fotoquímicas estão relacionadas com a formação e depleção não catalítica do ozônio, fenômeno esse, responsável pelas elevadas temperaturas dessa região da atmosfera conhecida como “camada de ozônio”. Acima da estratosfera, a concentração de moléculas é muito baixa devido à rarefação do ar, razão porque a maioria do oxigênio se encontra na forma atômica como resultado da dissociação do oxigênio molecular por fótons UV-C da luz solar e, nesse caso, não se forma ozônio. “A colisão eventual de um átomo de oxigênio com outros leva à formação de moléculas de  $\text{O}_2$ , as quais novamente se dissociam por via fotoquímica em reações subsequentes, quando mais luz solar é absorvida”. Na estratosfera, porém, a intensidade da radiação UV-C é menor e o ar é mais denso, conseqüentemente a concentração do oxigênio molecular é bastante superior. Nestas condições “o destino mais provável dos átomos de oxigênio estratosférico, criados pela decomposição fotoquímica do  $\text{O}_2$ , é a sua colisão com moléculas de oxigênio diatômico intactas e não dissociadas, resultando, assim, na produção de ozônio”, sendo essa, toda a fonte de ozônio na estratosfera (BAIRD, 2002, p. 55).



M é um terceiro corpo que absorve o excesso de energia da reação, estabilizando o  $\text{O}_3$ . Segundo Baird (2002) a velocidade dessa reação depende da quantidade de radiação ultravioleta e das concentrações dos reagentes (átomos e moléculas de oxigênio) a uma dada altitude.

Na baixa estratosfera, apesar de ser maior a abundância do oxigênio molecular, forma-se pouco O<sub>3</sub> porque é menor a quantidade da espécie mais reativa, o oxigênio atômico (dissociado). Além disso, a radiação UV mais energética foi freada antes de atingir essa altitude (BAIRD, 2002).

Consequentemente, a densidade do ozônio atinge o máximo na região onde o produto da intensidade da luz UV-C e a concentração de O<sub>2</sub> é máxima. Essa densidade máxima de ozônio ocorre a cerca de 25 km sobre áreas tropicais, de 21 km sobre latitudes intermediárias e de 18 km sobre regiões subárticas (BAIRD, 2002, p. 56).

Conforme Mozeto (2001), o ozônio também pode ser produzido na estratosfera, através da seguinte reação fotoquímica:



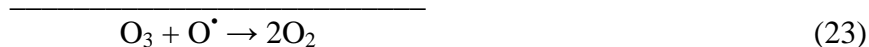
Essa reação química filtra a radiação na faixa de 220 nm a 320 nm. Como o átomo de oxigênio livre que se forma é extremamente reativo, combina-se com uma molécula de O<sub>2</sub> para formar outra molécula de O<sub>3</sub> (Equação 19). Esse conjunto de reações é responsável por manter constante a concentração de ozônio na “camada de ozônio” estratosférica. O ozônio assim formado, reduz a incidência da radiação ultravioleta que chega à Terra, podendo se regenerar com relativa rapidez. Funciona, portanto como um filtro solar impedindo que radiações ultravioletas prejudiciais ao equilíbrio ecológico e à saúde humana, atinjam a biosfera (MOZETO, 2001).

Os ecossistemas, em condições naturais, sem a interferência humana, estão permanentemente interagindo em busca do estado menos energético, isto é, do equilíbrio, portanto, a radiação ultravioleta também é responsável pela decomposição não catalítica do ozônio formado na estratosfera. “Assim, a absorção de um fóton UV-C ou UV-B por uma molécula de ozônio estratosférico tem como resultado a decomposição da molécula” (O<sub>3</sub> + fóton (<320 nm) → O<sub>2</sub><sup>\*</sup> + O<sup>\*</sup>) (BAIRD, 2002, p. 57).

Da mesma forma como anteriormente descrito, os átomos de oxigênio produzidos pela fotólise do ozônio, ou do  $O_2$ , reagem em seguida com moléculas de  $O_2$  regenerando o  $O_3$ .

O ozônio na estratosfera está constantemente sendo formado, decomposto e regenerado durante as horas de luz diurna mediante uma série de reações que ocorrem simultaneamente. [...] é produzido na estratosfera porque há luz UV-C adequada procedente da luz solar para dissociar algumas moléculas de  $O_2$ , produzindo assim átomos de oxigênio, a maioria dos quais colide com outras moléculas de  $O_2$  e forma então o ozônio (BAIRD, 2002, p.57).

Além desses processos existem outros mecanismos de depleção do ozônio na estratosfera, os quais se baseiam na decomposição catalítica da molécula de ozônio. Os radicais livres que participam dessas reações, comumente designados por X, são catalisadores capazes de retirar um átomo de oxigênio da molécula e permanecerem intactos no final, permitindo, assim, a destruição de outras moléculas de ozônio (BAIRD, 2002, MANAHAN, 2005, SCHIRMER e LISBOA, 2008):



Essa é uma reação em cadeia na qual uma única molécula de  $X^{\bullet}$  (catalisador) pode destruir muitas moléculas de ozônio. A reação continua indefinidamente, até que, por alguma reação secundária a espécie  $X^{\bullet}$  se torne inativa. A espécie  $X^{\bullet}$  pode ser, entre outros, o radical hidroxila ( $OH^{\bullet}$ ), os átomos de cloro (Cl) e bromo (Br) e o óxido nítrico (NO) (SPIRO e STIGLIANI, 2009).

Pode ocorrer a destruição catalítica do ozônio mesmo em uma atmosfera não poluída, pois pequenas quantidades de catalisadores estão presentes na atmosfera, como por exemplo, a molécula de NO produzida a partir da reação do óxido nitroso ( $N_2O$ ) que migra da troposfera e colide com um átomo de oxigênio excitado.



O NO formado, retira um átomo de oxigênio da molécula de ozônio, e se oxida a NO<sub>2</sub> (Equação 25) regenerando-se em seguida (Equação 26) (BAIRD, 2002, MANAHAN, 2005, SCHIRMER e LISBOA, 2008, SPIRO e STIGLIANI, 2009):



A radiação solar que atravessa a estratosfera e atinge a superfície terrestre, ainda que menos energética, fornece energia suficiente para desencadear uma série de reações fotoquímicas de oxidação nas moléculas orgânicas, óxidos de nitrogênio e outros compostos, na maioria dos casos, via radicais livres. Nos últimos anos, uma quantidade maior de radiação ultravioleta tem sido transmitida à troposfera devido à fotodissociação, alterando assim a química da troposfera (KERR e Mc ELROY, 1993; KIRCHHOFF *et. al.*, 1997).

Na troposfera o oxigênio molecular é muito mais abundante do que na estratosfera, pois a densidade do ar é inversamente proporcional à altitude, conseqüentemente, considerando a pequena quantidade de oxigênio dissociado e a absorção da radiação ultravioleta de alta energia nas camadas superiores, forma-se, naturalmente, muito pouco ozônio na troposfera.

No entanto, o ozônio formado na troposfera devido aos gases de escapamento de automóveis, queimada de florestas e alguns processos de combustão é extremamente tóxico e nocivo. É um gás de efeito estufa que, apesar de ter um tempo de permanência relativamente pequeno (de semanas a alguns meses), constitui um problema de difícil solução, pois sua causa está ligada ao uso dos combustíveis fósseis, historicamente comprometidos com o desenvolvimento das sociedades (KERR e Mc ELROY, 1993; KIRCHHOFF *et. al.*, 1997).

### 2.3.3. O Ozônio Troposférico e seus Precursores

As altas concentrações de ozônio na troposfera são indesejáveis e o aumento da concentração desse poluente nas áreas urbanas das grandes metrópoles é indiscutível (MARTINS, et. al., 2003). Sua presença é designada pelo termo *smog* (*smoke + fog*) fotoquímico e é produzido a partir de reações fotoquímicas que envolvem as emissões de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (COVs).

As maiores concentrações de ozônio ocorrem em regiões distantes das fontes de emissão, devido ao transporte de seus precursores, os compostos orgânicos voláteis (solventes, lubrificantes e combustíveis em geral) e óxidos de nitrogênio. Os compostos orgânicos voláteis, além de contribuírem para a formação do ozônio troposférico em áreas urbanas, contribuem também para o aquecimento global e para a destruição da camada de ozônio. São emitidos a partir de indústrias químicas e petroquímicas (fontes fixas) e pelas fontes móveis representadas pelos veículos automotores. Têm, geralmente, elevada pressão de vapor, sendo vaporizados facilmente na temperatura e pressão ambientes. “Estes compostos compõem uma lista considerável de compostos químicos (mais de 600), onde quase um terço destes constitui-se substâncias tóxicas”. Apesar de alguns terem pouca reatividade química, grande parte deles participa de reações fotoquímicas da atmosfera. Os mais reativos possuem dupla ligação o que os torna capazes de adicionar radicais livres (SCHIRMER e LISBOA, 2008 p. 42).

Na Troposfera o processo de formação do ozônio se inicia com os óxidos de nitrogênio. Estes são originados, naturalmente, por descargas elétricas ou provenientes do solo devido às transformações microbianas. São gasosos os óxidos, nitroso ( $N_2O$ ), nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), entre os quais os mais danosos são o NO e o  $NO_2$  designados por  $NO_x$ . Os  $NO_x$  impactam significativamente a atmosfera pelos seus efeitos tóxicos, pela formação de chuva ácida resultante da reação com o vapor d'água, pela formação de ozônio e outros

oxidantes fotoquímicos através da absorção de radiação ultravioleta, ou ainda por contribuírem para a depleção da camada de ozônio (MARTINS, et. al., 2003; MANAHAN, 2005).

O N<sub>2</sub>O é menos reativo que os NO<sub>x</sub> devido a sua estrutura diamagnética, dado que os elétrons emparelhados lhe confere maior estabilidade. O óxido nítrico e o dióxido de nitrogênio possuem caráter paramagnético, isto é, apresentam, em suas estruturas, elétrons desemparelhados. Essa característica dá às suas moléculas maior reatividade (LENZI e FAVERO, 2011).

A maior parte do NO encontrado na atmosfera provém dos processos de combustão que, como já foi explicado, fornece energia necessária à reação: N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → 2NO. Uma vez formado o NO se oxida a NO<sub>2</sub> (LENZI e FAVERO, 2011).

O NO<sub>2</sub> é um importante poluente secundário constituindo, talvez, o mais sério poluente atmosférico:

O maior problema é talvez a formação de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), a partir do NO<sub>2</sub>, que juntamente com o ácido sulfúrico produzido pela emissão de SO<sub>x</sub>, causa problemas de corrosão em metais, mármore e outras pedras, além das chuvas ácidas que destroem florestas e tornam lagos tão ácidos que impedem a vida de peixes (GARCIA, 2002, p.181).

No entanto, o mecanismo de formação dos óxidos de nitrogênio a partir dos gases N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> durante a combustão não é um processo tão simples como demonstrado na Equação (27).



Na temperatura ambiente, a reação acima praticamente não ocorre, mas nos processos de combustão, as temperaturas elevadas favorecem a formação de altos níveis de NO.

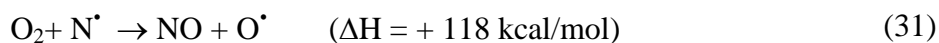
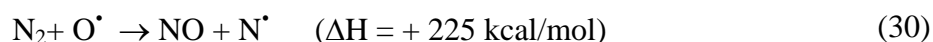
O mecanismo da reação (27) pode ser interpretado, admitindo-se haver, inicialmente, uma dissociação das moléculas N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> catalisada por um terceiro corpo M, o qual absorve o



excesso de energia desenvolvida na reação, pois de outra forma ocorreria a destruição da molécula resultante (equações 28 e 29) (LENZI e FAVERO, 2011; MANAHAN, 2005).



Os átomos  $\text{O}^\bullet$  e  $\text{N}^\bullet$ , mais energéticos, formam o NO (equação 30 e 31) que é oxidado a  $\text{NO}_2$ <sup>17</sup> (equação 32).



A oxidação de NO a  $\text{NO}_2$  não é realizada pelo oxigênio molecular. A reação inicial se dá com radicais livres  $\text{OH}^\bullet$  e sua espécie derivada  $\text{HOO}^\bullet$  (hidrogênio peróxido), ambas fundamentais na remoção dos poluentes da atmosfera (BAIRD, 2002).



As reações de formação do NO (equação 30 e 31) não alcançam o equilíbrio porque a temperatura dos gases queimados cai durante o curso da expansão e conseqüentemente a reação estaciona e as concentrações de NO são mantidas no mesmo nível das condições da exaustão (SANTOS, D.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I., 2010 e PEIXOTO, 2008). Isso acontece porque a reação inversa que regeneraria os gases  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  também possui elevada energia de ativação.

---

<sup>17</sup> Apesar de menos tóxico que o  $\text{NO}_2$ , o NO, assim como o CO, tem efeito sobre a hemoglobina reduzindo a eficácia do transporte de oxigênio sanguíneo, no entanto, como a concentração do óxido nítrico na atmosfera poluída é menor que a de CO, seu efeito também é igualmente reduzido. A toxidez do  $\text{NO}_2$  é mais severa, pois, a exposição de alguns minutos a uma hora de 50 a 100 ppm de  $\text{NO}_2$  causa inflamação do tecido pulmonar por um período de 6 a 8 semanas, quando então o indivíduo se recupera (MANAHAN, 2005).

A reação representada pela equação (30) é muito mais lenta que a (31), evidentemente devido à dificuldade de romper as ligações da molécula  $N_2$  estável, mas por ser mais lenta é a reação que controla a taxa de formação do NO (SPIRO e STIGLIANI, 2009; BAIRD, 2002).

Os dois óxidos ( NO e  $NO_2$ ), existem em equilíbrio dinâmico porque são interconvertíveis e estão comumente presentes nas áreas próximas do local onde ocorreu a combustão. O  $NO_2$  ao absorver energia, produz uma molécula eletronicamente excitada,  $NO_2^*$  (equação 33), a qual sofre fotólise (dissociação da molécula pela absorção de um foton), produzindo oxigênio atômico muito reativo (equação 34) (BAIRD, 2002; GARCIA, 2002; MANAHAN, 2005). Esse processo é o primeiro passo para a formação do *smog* fotoquímico<sup>18</sup>.



Havendo condições meteorológicas que favoreçam a fotólise a concentração de  $NO_2$  diminui. Esse fato foi observado em um estudo desenvolvido na Amazônia segundo o qual a média diária da concentração de  $NO_2$  variou de forma bem definida, apresentando valores mínimos ao meio dia e máximos durante a noite o que pode ser explicado por causa da maior intensidade solar e menor ângulo zenital e, conseqüentemente maior penetração dos raios solares responsáveis pela fotólise do  $NO_2$  (MOURA, et. al., 2004).

Acrescente-se que o  $NO_2$  na atmosfera poluída é uma das espécies fotoquimicamente mais ativas, sendo um dos responsáveis pelo aumento das concentrações do ozônio troposférico. (MANAHAN, 2005; SPIRO e STIGLIANI, 2009). O oxigênio atômico, formado na reação (34), reage com o oxigênio molecular formando o ozônio (equação 35) que, por sua vez, também oxida a molécula de NO regenerando o  $NO_2$ .

---

<sup>18</sup> O  $NO_2$  é o responsável pela cor amarelada do smog porque absorve “luz visível próximo ao limite do violeta e, conseqüentemente, a luz solar transmitida através da névoa, parece amarela” (BAIRD, 2002, p. 113).

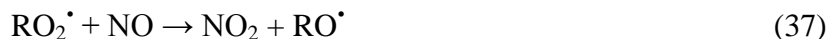


Em atmosferas não poluídas, as reações (33), (34), (35) e (36) estão em equilíbrio fotoquímico, portanto a produção líquida do  $\text{O}_3$  é zero, pois o ozônio formado na reação (35), é consumido na reação (36). Da mesma forma, o dióxido de nitrogênio é restaurado (reação 36) no mesmo processo em que é destruído (reação 34), tendo-se, numa atmosfera pura, um estado fotoequilibrado, isto é, as concentrações de  $\text{O}_3$  no ar alcançam um estado estável sendo mantidas e controladas pela velocidade das reações fotoquímicas (SCHIRMER e LISBOA, 2008; SPIRO e STIGLIANI, 2009; BAIRD, 2002).

No entanto, a estabilidade da concentração do  $\text{O}_3$  não justifica o nível de ozônio encontrado em atmosferas poluídas. Explica-se o fato porque em atmosferas poluídas costumam ser altas as concentrações de hidrocarbonetos e demais compostos orgânicos derivados dos processos de transporte, abastecimento e combustão incompleta dos combustíveis fósseis. Na presença desses compostos, o  $\text{NO}$  é convertido a  $\text{NO}_2$  sem consumir o  $\text{O}_3$  (YNOUE, 2002).

Nesse caso, o estado de equilíbrio é rompido por causa das reações do  $\text{NO}$  com os compostos orgânicos voláteis, principalmente os insaturados com dupla ligação, produzidos na oxidação de moléculas de hidrocarbonetos. Esses compostos insaturados podem adicionar-se aos radicais livres formados, e oxidar o  $\text{NO}$  sem consumir o  $\text{O}_3$ . Quando se encontram, na atmosfera, os compostos orgânicos voláteis (hidrocarbonetos etc.), o  $\text{NO}$  reage, preferencialmente, com eles e não com o ozônio. Além de se acumular ozônio na troposfera, formam-se, adicionalmente, outros oxidantes fotoquímicos muito reativos como, por exemplo, os peroxiacetil nitratos – PAN, o nitrato de peroxibenzoila (PBN), acroleína, acetilperóxido, peróxido de hidrogênio, benzopireno, aldeídos, cetonas etc. (SPIRO e STIGLIANI, 2009;

BAIRD, 2002; SCHIRMER e LISBOA, 2008 ). Exemplificando o acúmulo de ozônio na troposfera a partir da reação dos radicais peróxido com o NO:



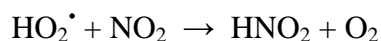
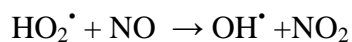
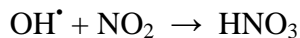
O resultado líquido das reações (37), (38) e (39) é:  $\text{RO}_2^\bullet + \text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{RO}^\bullet + \text{O}_3$ .

Logo, o simples aumento da emissão de NO<sub>x</sub> para a atmosfera, não significa aumento das concentrações de ozônio, uma vez que um outro componente, os compostos orgânicos voláteis (COVs), também atuam no processo.

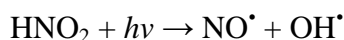
Adicionalmente, pode-se supor que o aumento no consumo de combustíveis fósseis torne a presença desses compostos na troposfera, cada vez mais comum. Provavelmente é por esse motivo que, na baixa atmosfera de algumas cidades brasileiras, a concentração de ozônio alcança níveis elevados, geralmente excedendo as concentrações permitidas em áreas urbanas. Manaus ajusta-se a essas condições, pois além da dependência dos combustíveis fósseis para o fornecimento da energia elétrica, o fluxo de veículos é intenso em todas as épocas do ano e durante todo o dia o que deve favorecer a evaporação de hidrocarbonetos.

O primeiro estudo sobre os níveis de concentração de compostos orgânicos voláteis realizado em Campinas obteve perfis de 22 compostos presentes no centro da cidade, destacando-se maiores concentrações do tolueno e m,p-xileno. Realizadas as análises estatísticas de correlação linear entre as concentrações dos compostos monitorados foi verificado que os mesmos provêm de uma mesma fonte, provavelmente, a frota veicular (JUNQUEIRA, ALBUQUERQUE e TOMAZ, 2005).

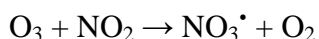
De acordo com Miñarro (2009), algumas reações que podem ocorrer entre os NO/NO<sub>2</sub> e os radicais hidroxila (OH<sup>•</sup>) e hidroperóxido (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>) durante o dia, são as seguintes:



Observa-se, ainda segundo Miñarro (2009), que os radicais OH<sup>•</sup> e HO<sub>2</sub><sup>•</sup> oxidam o NO também sem consumir o ozônio, conseqüentemente, essas reações são parcialmente e indiretamente responsáveis por parte do ozônio encontrado na troposfera. As reações também estão em equilíbrio, pois o ácido nitroso formado (HNO<sub>2</sub>) pode se dissociar e começar um novo ciclo de reações:



Durante a noite, o ozônio formado de dia oxida o NO<sub>2</sub> a NO<sub>3</sub>. A reação se desenvolve através da formação de vários óxidos de nitrogênio que são instáveis diante da radiação solar (MIÑARRO, 2009).



Ao final forma-se ácido nítrico (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + H<sub>2</sub>O → 2 HNO<sub>3</sub>), presente na neblina ácida das primeiras horas da manhã, a qual posteriormente é depositada sob a forma de chuva ácida ou de nitratos (MIÑARRO, 2009).

O radical OH<sup>•</sup>, como se pode observar pelas reações de oxidação demonstradas, representa um papel muito importante na química da atmosfera, pois participa do processo de autodepuração da própria atmosfera além de contribuir com a formação do *smog* fotoquímico. O radical OH<sup>•</sup>

é um limpador natural da atmosfera, pois oxida os gases poluentes transformando-os em substâncias mais solúveis. A química dessas reações de purificação é complexa e ainda não está totalmente esclarecida, mas se sabe que o radical  $\text{OH}^\bullet$  reage com alguns contaminantes como os  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{SO}_2$ , oxidando-os e convertendo-os em substâncias solúveis, facilitando, assim, a precipitação através das chuvas (NEBEL, 1999).

O mecanismo de formação do radical  $\text{OH}^\bullet$  tem início na formação do oxigênio atômico, ou por fotólise do  $\text{O}_3$  ou do  $\text{NO}_2$ . O radical  $\text{OH}^\bullet$  se forma continuamente quando os átomos de oxigênio livres reagem com o vapor d'água:  $\text{O}^\bullet + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{OH}^\bullet$ . Seu elétron desemparelhado lhe confere uma reatividade especial, levando-o a reagir rapidamente com os componentes traços da atmosfera e transformando-os em substâncias passíveis de serem eliminadas por precipitação. Com o  $\text{NO}_2$ , por exemplo, forma-se ácido nítrico ( $\text{NO}_2 + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{HNO}_3$ ) que é eliminado da atmosfera por precipitação (LENZI e FAVERO, 2011).

Na luz do dia há uma tendência de aumentarem os níveis de ozônio, porém durante a noite, devido à ausência da radiação solar, a fotólise do  $\text{NO}_2$  e conseqüentemente a formação do átomo de oxigênio livre e do ozônio não ocorrem. Nessas condições o  $\text{NO}_2$  pode reagir diretamente com o ozônio promovendo a sua eliminação ( $\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3^\bullet + \text{O}_2$ ) (LENZI e FAVERO, 2011).

Para determinar as concentrações dos  $\text{NO}_x$ , na atmosfera, o método utilizado e recomendado é a espectroscopia por quimiluminescência que mede a potência radiante emitida pelo analito energizado numa reação química. Não obstante o crescimento da espectroscopia nas análises químicas, a aplicação da quimiluminescência à química analítica, conforme Skoog, Holler e Nieman (2002), ainda é recente, além de estar limitado a um pequeno número de espécies,

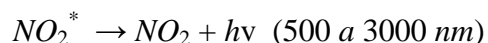
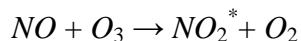
cujas reações químicas produzem moléculas excitadas que emitem luz quando retornam ao estado fundamental.

No entanto, conforme ressalta Skoog, Holler e Nieman (2002, p. 337), “muitos compostos que reagem para produzir quimiluminescência são componentes importantes para o ambiente. Para essas espécies, a alta seletividade, a simplicidade e a extrema sensibilidade do método explicam o aumento recente do seu uso”.

A Quimiluminescência, especificamente, é um fenômeno observado quando uma reação química produz uma molécula eletronicamente ativada. Como se viu nos exemplos acima, algumas reações químicas resultam em moléculas energizadas, isto é, passam de um estado de energia mais baixo chamado *estado fundamental* para um *estado excitado*. Quando retornam ao estado fundamental, essas moléculas emitem radiação eletromagnética (luz) ou transferem sua energia para outra espécie que então produz emissão (SKOOG, HOLLER e NIEMAN, 2002). A radiação emitida pode ser medida, fornecendo, assim, informações valiosas sobre a concentração do analito.

Segundo Skoog, Holler e Nieman (2002) os métodos de quimiluminescência são bastante sensíveis, com limites de detecção por vezes, em faixas menores que partes por bilhão. Baseiam-se no princípio de que a reação do NO com o ozônio produz moléculas de NO<sub>2</sub> em estado eletrônico excitado. Quando essas moléculas de NO<sub>2</sub> decaem para um estado de menor energia emitem radiação no infravermelho, com uma intensidade linear proporcional à concentração do NO. Geralmente, segundo os autores, não é necessário nenhum dispositivo de seleção de comprimento de onda, pois a fonte de radiação é a própria reação química entre o analito e o reagente. O retorno espontâneo das moléculas de NO<sub>2</sub> excitadas ao seu estado

fundamental é acompanhado de emissão de radiação com comprimento de onda característico [ $\lambda = 500$  a  $3000$  nm].



#### 2.3.4. Vibrações Moleculares

Radiações na região do infravermelho (IV) do espectro também podem ser absorvidas na atmosfera. Essas radiações (IV) não tem energia suficiente para promover os elétrons a níveis mais energéticos nem romper ligações químicas, mas são muito importantes no processo de retenção do calor. No entanto, contrariamente ao que se poderia imaginar, nem todos os gases da atmosfera possuem moléculas capazes de interagir com a radiação IV, levando a um aumento da temperatura no sistema Terra-Atmosfera. Por exemplo, os gases nitrogênio e oxigênio que respondem pela maior parte da mistura gasosa da atmosfera, não fazem nenhuma diferença para a temperatura do planeta (WALKER & KING, 2008; MARTINS, et. al., 2003). A radiação infravermelha pode ser imaginada como uma onda que atravessa a molécula. Nesse caso, a molécula precisa ter seus átomos relativamente livres para vibrar (flexionar ou mover) em torno de suas ligações. Esse movimento é devido à existência de dipolos eletromagnéticos formados por átomos diferentes ligados entre si por elétrons de valência em orbitais ligantes (HIGSON, 2009).

A interação entre a molécula e a radiação infravermelha é a base para a compreensão do fenômeno do aquecimento global e está relacionada com a estrutura molecular e com os movimentos vibracionais da molécula, mais especificamente, com a variação do momento dipolar no curso da vibração. Se a frequência vibracional da molécula coincidir com a frequência da radiação IV incidente, poderá ocorrer ressonância, entre a radiação



eletromagnética e o campo elétrico oscilante transferindo a energia da radiação para a molécula (ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004; SEINFELD, 2004; HIGSON, 2009).

Em outras palavras a absorção da energia se dá quando a frequência da luz se situa próxima da frequência vibracional da molécula. Ao absorver energia, a vibração natural da molécula sofre uma variação na sua amplitude, sem, contudo, alterar a frequência da vibração molecular (HIGSON, 2009). Conseqüentemente, se essa vibração gerar mudanças no momento dipolar da molécula, ela será ativa no infravermelho.

Para absorver energia, portanto, é necessário que a molécula possua um dipolo elétrico (permanente ou transitório) e que esse dipolo oscile em ressonância com a radiação. No caso dos constituintes majoritários do ar (nitrogênio e oxigênio), suas moléculas homotômicas são lineares e têm momento dipolar nulo. Além de não possuírem momento dipolar permanente, a vibração de seus átomos não provoca nenhuma alteração no momento dipolar transitório. Por isso elas não interagem com a radiação IV e, conseqüentemente não contribuem para o aquecimento global (MARTINS, 2004; ROCHA, ROSA e CARDOSO, 2004; SEINFELD, 2004; HIGSON, 2009). Outras moléculas possuem átomos mais eletronegativos, i. e., com tendência maior de manter elétrons de ligação mais intensamente, formando-se dipolos. Os principais absorventes da radiação de longo comprimento de onda na atmosfera são: o gás carbônico, o metano, o óxido nítrico, o ozônio e o vapor d'água, entre eles, como já foi dito, o  $\text{CO}_2$  é, no estágio de desenvolvimento atual da sociedade, o mais importante absorvedor de radiação infravermelha.

## METODOLOGIA

Para conhecer os níveis de concentração dos NO<sub>x</sub> em área urbana impactada pela queima de combustíveis fósseis, a problemática vivenciada foi o monitoramento da qualidade do ar atmosférico no contexto de um projeto de pesquisa realizado pela Universidade Federal do Amazonas através do NIEMA, com recursos do CNPq.

### 3.1. O MONITORAMENTO

Existem principalmente dois tipos de monitoramento: o monitoramento das emissões diretamente na fonte e o monitoramento da qualidade do ar propriamente dito. No primeiro caso, mede-se a concentração dos poluentes que são lançados para a atmosfera por dutos e chaminés. O monitoramento da qualidade do ar, por seu turno, trata da medição das imissões dispersas no ar ambiente. Ambos são importantes, pois fisicamente e quimicamente relacionados, retratam o caminho que os poluentes percorrem no ar atmosférico, arrastados pelos ventos, lavados pelas águas das chuvas ou transformados pelas reações químicas e pela energia solar (VALOIS, CARTAXO e CHAAR, 2011).

Não foi possível medir as emissões diretamente nas chaminés das usinas termelétricas devido às dificuldades encontradas junto ao setor elétrico no Amazonas. Por esse motivo, este trabalho se alicerçou no monitoramento da qualidade do ar, isto é, nas imissões dispersas na atmosfera urbana da cidade de Manaus (Figura 08).

#### 3.1.1 Escolha do Local da Coleta

A escolha do local para a instalação da estação de monitoramento (EMMQA) constituiu uma etapa das mais difíceis. Após várias tentativas infrutíferas junto a órgãos públicos federais a

escolha recaiu em terreno pertencente à Prefeitura Municipal de Manaus, precisamente, no Centro de Saúde Dra. Luiza do Carmo, situado na Vila da Felicidade, no bairro do Mauazinho (às margens da Rodovia 319, conhecida como Estrada da CEASA) (Figura 07).

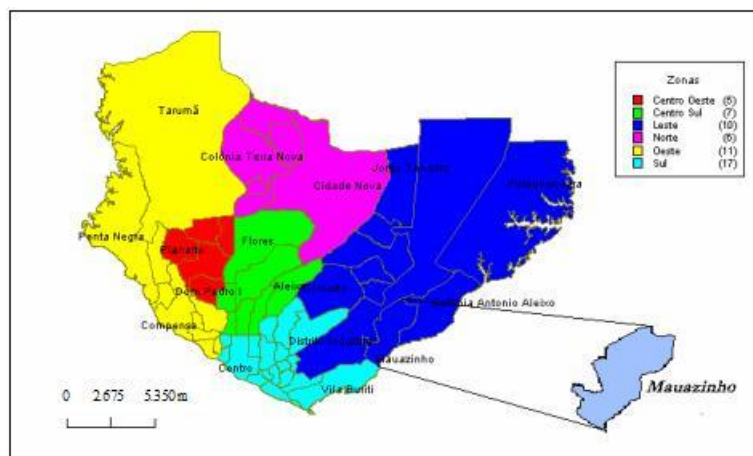


Figura 07: Mapa de Manaus com Destaque para o Bairro do Mauazinho  
Fonte: Elaborado por João Danúzio Filho

O bairro do Mauazinho possui uma população de 23.560 habitantes e ocupa uma área de 723,73 ha, situado na Zona Leste da cidade, próximo ao Distrito Industrial (DEPI, 2010). O bairro foi escolhido como local para o monitoramento, por concentrar o maior número de termelétricas da cidade de Manaus e, embora não se descarte a participação das fontes móveis na análise dos resultados desta pesquisa, tomou-se, como hipótese a contribuição maior das fontes de geração de energia elétrica, dada a grande concentração das mesmas na área em estudo.

Dentre as UTEs administradas pela Amazonas Energia S/A, instaladas no bairro onde foi feita a coleta dos dados, destacam-se (NIEMA, 2011):

- UTE de Mauá: situada no bairro do Mauazinho, em operação com quatro unidades geradoras que utilizam turbinas a vapor, perfazendo um total de 137,2 MW de potência instalada. O combustível utilizado é o óleo combustível OC1A que possui alta

viscosidade e é parte remanescente da destilação das frações do petróleo. Possui alto teor de enxofre, sendo largamente utilizado para fins industriais. No ano de 2011 começou a ser substituído o óleo combustível por gás natural, mas seu uso ainda está restrito a algumas turbinas;

- UTE Electron: uma usina flutuante atracada próxima a UTE de Mauá, às margens do Rio Negro. Com potência instalada de 120 MW, distribuídas em seis unidades geradoras que utilizam turbinas a gás modelo GE MS 5001 P e o combustível é o óleo Diesel.
- El Paso Amazonas – Planta A: também se encontra no bairro do Mauazinho, ao lado da UTE de Mauá. Utiliza óleo Diesel como combustível em suas duas unidades geradoras, na qual há turbinas a gás Pratt Whitney FT4 em operação. A potência instalada é de 44 MW;
- El Paso Amazonas – Planta B: também se localiza ao lado da UTE de Mauá, no bairro de Mauazinho. Com duas unidades geradoras que utilizam turbinas a gás FRAME 7 a base de óleo Diesel, totalizando 110 MW;
- El Paso Rio Negro – Planta W: totaliza o complexo de geração de energia de Mauá, encontra-se ao lado da UTE de Mauá. Possui potência instalada de 157,5 MW, distribuídas em 10 (dez) unidades do tipo motor de combustão interna, marca WARTSILA. Utiliza óleo combustível OPGE, um óleo especial para geração de energia elétrica.

Além dessas, também localizada no Bairro do Mauazinho, a Breitener Tambaqui de propriedade da Matriz Breitener Energética S/A, a qual gera 83,3 MW de energia, complementa a demanda existente na Capital.

É necessário salientar ainda que, na região, também se encontra a Refinaria de Manaus, Isaac Sabbá (REMAN), antiga Companhia de Petróleo da Amazônia, contribuindo com emissões fugitivas de compostos orgânicos voláteis constituintes do petróleo e suas frações, além das emissões originadas nas diversas etapas do processo de refino propriamente dito.

Em função dessa grande concentração de fontes de emissões, a EMMQA foi montada a uma distância de 1,73 km do complexo termelétrico de Mauá, 2,72 km da UTE Breitener Tambaqui e 2,84 km da Refinaria de Manaus (REMAM) conforme Figura 08. A área de abrangência da estação de monitoramento, portanto, está coerente com o recomendado pela literatura para bairros com atividade uniforme, cuja escala é entre 500 a 4.000 metros (SÃO PAULO, 2002).

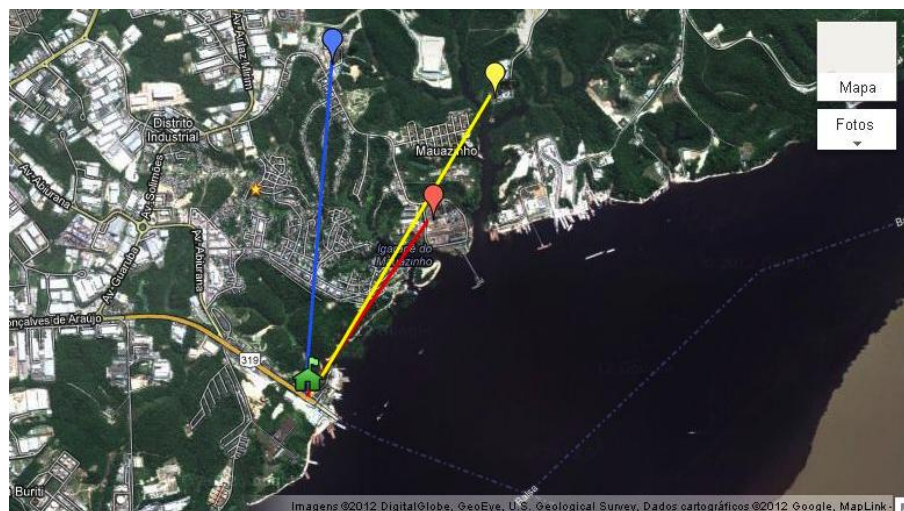


Figura 08 : Distância entre a EMMQA e as Fontes de Emissão.  
Fonte: Google, 2010.

Além das termelétricas e dos veículos automotores, outras fontes também foram consideradas, porém a contribuição do conjunto de fontes de emissão não apresentou relevância considerável, por se tratarem de atividades pouco representativas nas áreas urbanas, como a queima de resíduos, lavanderias, padarias, motéis, etc., geralmente denominadas fontes de poluição não industriais (CAVALCANTI, 2010).

### 3.1.2 A Escolha do Método

É correto dizer que toda análise química apresenta limitações, pois sempre haverá uma margem de erro quer se trate de métodos passivos, manuais ou contínuos. Esta pesquisa utilizou os dados fornecidos por um monitor automático em tempo real da Thermo Environmental, adquiridos pelo NIEMA com o objetivo de monitorar a qualidade do ar sob a influência das usinas termelétricas na cidade de Manaus.

Os monitores automáticos, apesar de terem um custo inicial e operacional alto, utilizam equipamentos de última geração e fornecem maior número de dados em tempo real, sem necessidade de manuseio da amostra. Possuem validação automática e alta tecnologia exigindo habilidade profissional da equipe. As vantagens das medições instantâneas ou mesmo periódicas são, principalmente:

- A maior confiabilidade dos sistemas, uma vez que ficam eliminados os problemas de transporte e manuseio; e
- O fato de fornecerem dados instantâneos e uma base de dados representativa das emissões.

Para atividades de monitoramento, principalmente em se tratando de monitoramento atmosférico, os sistemas instrumentais representam uma alternativa vantajosa, constituindo-se em uma ferramenta poderosa para suprir as exigências ambientais. São equipamentos utilizados em todas as redes de monitoramento de poluentes atmosféricos e cada modelo é capaz de avaliar um contaminante, podendo ser instalado no próprio local onde, devido a características especiais, supõe-se a ocorrência de potenciais impactos no ar atmosférico.

### 3.1.3 A EMMQA

O analisador NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> -Modelo 42i, instrumento de coleta desta pesquisa é amplamente difundido e testado no mundo inteiro pelos órgãos ambientais. No entanto, apesar de apresentar vantagens, precisa de equipamentos auxiliares como:

- Abrigo com ar condicionado;
- Um sistema de geração de ar zero (ar puro para calibração do zero no instrumento);
- Um sistema de calibração por diluição (multicalibrador); e finalmente,
- Cilindros de gás comprimido padrão para realizar as calibrações.

Todo o conjunto dos equipamentos possuem aprovação legal dada pelo órgão ambiental americano, EPA (Environmental Protection Agency).

O analisador NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> foi instalado na EMMQA, juntamente com os outros analisadores regulados pela Resolução CONAMA n. 03/90:

- Monitor Contínuo de Partículas PTS e PM<sub>10</sub> (monitoramento de aerossóis);
- Analisador de CO (modelo 48i);
- Analisador de SO<sub>2</sub> (modelo 43i); e
- Analisador de O<sub>3</sub> (modelo 49i).

A Figura 09 mostra a visão interna e externa da EMMQA.



Figura 09: Visão Interna e Externa da EMMQA

Os equipamentos, bem como a estação são os mesmos utilizados em várias redes de monitoramento instaladas no Brasil (São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul etc.), sendo os primeiros na cidade de Manaus.

### 3.1.4 Descrição do Instrumento da Pesquisa

O funcionamento do analisador utilizado nesta pesquisa baseia-se na detecção fotométrica da quimiluminescência (Figura 10):



Figura 10: Analisador de NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> -Modelo 42i (Parte frontal e interna).  
Fonte:ThermoElectron Corporation

A reação ( $NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2$ ) tem um nível de rendimento que aumenta com a



temperatura, sendo grandemente favorecida nos processos de combustão, tanto nas descargas de chaminés de termelétricas como nos tubos de descarga dos automóveis. Esse fato justifica a utilização do método de quimiluminescência no monitoramento de NOx, sendo, além disso, o método recomendado pelos órgãos ambientais (SKOOG, HOLLER e NIEMAN, 2002).

É apresentado na Figura 11, um esquema do sistema de medição de um analisador de óxidos de nitrogênio por quimiluminescência.

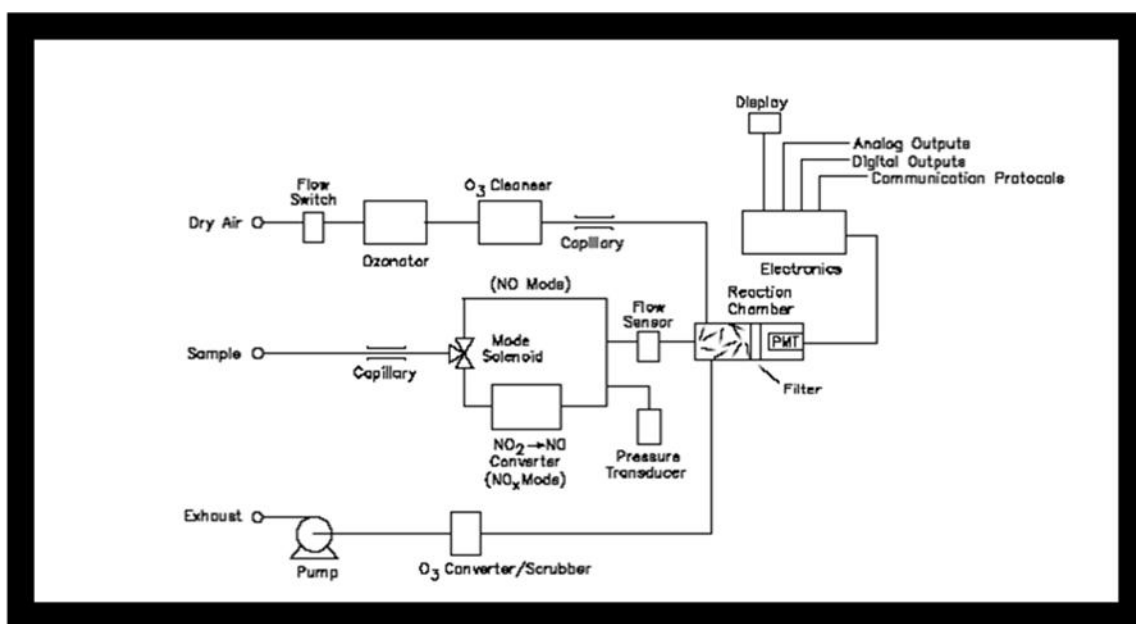


Figura 11: Diagrama de Fluxo do Analisador  
Fonte: ThermoElectron Corporation

O NO<sub>2</sub> não é sensível a este método, não podendo, portanto, ser medido diretamente, apesar de ser o gás de interesse. O modelo 42i tem projeto de câmara única e fotomultiplicador único, que realiza ciclos entre os modos de medição de NO e NOx. Por esse motivo, antes de ser medido, o NO<sub>2</sub> é convertido em NO, num conversor de Molibdênio aquecido até uns 325°C. A amostra entra no equipamento, atravessa o capilar e segue para uma válvula solenoide que tem duas saídas:

1<sup>a</sup>. A amostra de ar ambiente entra diretamente na câmara de reação para determinação do NO nela existente;

2<sup>a</sup>. A amostra de ar passa previamente através de um conversor, onde as moléculas de NO<sub>2</sub> atmosférico são convertidas a NO.

O somatório das moléculas de NO convertidas com as moléculas de NO existentes na amostra será determinado na câmara de reação como NO<sub>x</sub>. O ar seco entra por outro orifício em direção ao ozonizador onde é gerado o ozônio necessário à reação de quimiluminescência. Um tubo fotomultiplicador detecta a luminescência gerada e as concentrações do NO e NO<sub>x</sub> são armazenadas na memória. A diferença entre as duas concentrações é a concentração do NO<sub>2</sub>.

Dessa forma, mede-se o NO<sub>2</sub> indiretamente por diferença entre o NO e o NO<sub>x</sub>. A intensidade da luz emitida na reação é proporcional à concentração de NO presente, o que permite utilizar a reação ( $\text{NO}_2^* \rightarrow \text{NO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ ) na medição direta das concentrações de óxido nítrico no ar ambiente.

### 3.1.5 Metodologia de Calibração do Monitor

A calibração dos equipamentos automáticos é uma exigência importante para se obter dados confiáveis, consistindo na introdução de diferentes concentrações de gás no analisador a fim de ajustá-lo convenientemente. O processo de calibração consiste em estabelecer uma relação entre um valor de concentração conhecido e o valor medido. Os padrões podem ser introduzidos através da entrada de span, ou através da entrada da amostra, ambas localizadas na parte posterior da EMMQA (Figura 12)



Figura 12: Equipe Técnica Realizando Calibração

O equipamento só deve ser calibrado depois de estar ligado por várias horas (pelo menos 08 horas). A calibração consiste em duas etapas:

- Calibração do Zero do Instrumento
- Calibração com um gás padrão com concentração conhecida para várias concentrações.

Inicialmente, liga-se o ar zero (zero air supply) posicionando o termostato em 450° e verificando se a pressão do manômetro está próximo de 30 PSI. Em seguida liga-se o multicalibrador colocando-se a saída da mangueira na entrada “*sample*” do analisador.

Na parte posterior da EMMQA, encontra-se o compressor de ar que deve ser ligado, verificando sua pressão (30 PSI). Abre-se então o cilindro específico para o analisador de NOx e verifica-se igualmente a pressão que deve estar também em torno de 30 PSI.

As etapas seguintes consistem em: (i) No multicalibrador, enviar o ar zero para o analisador; (ii) Verificar se a concentração no analisador encontra-se em zero, ou próximo de zero e inserir o novo valor; (iv) No multicalibrador, escolher a concentração do span desejada e voltar à tela inicial para enviar o span ao analisador; (v) Verificar se a concentração de saída no analisador encontra-se próximo do especificado no multicalibrador. Por fim, colocar o valor da concentração mostrado no multicalibrador, no campo “span concentration”.

### **3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A coleta foi iniciada no dia 11 de fevereiro e os dados para este estudo referiram-se aos meses de fevereiro a julho de 2011. Os resultados foram trabalhados estatisticamente e relacionados com as condições meteorológicas fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia, e com os padrões CONAMA e OMS.

Os padrões OMS foram incluídos para mostrar um cenário mais atual do problema da poluição atmosférica na região em estudo. Apesar de as normas brasileiras estabelecerem padrões mais liberais e até mesmo por essa razão, a preocupação em relacionar os resultados também com o padrão da OMS se justifica porque, segundo uma avaliação da OMS sobre a carga de enfermidades devidas à contaminação do ar, mais de dois milhões de mortes prematuras podem ser atribuídas, a cada ano, aos efeitos da contaminação do ar (OMS, 2005).

Antes de proceder a análise dos dados, foram efetuadas as conversões dos padrões de qualidade do ar para “partes por bilhão”. O analisador de NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> -Modelo 42i fornece os resultados em partes por bilhão (ppb) e por esse motivo os padrões primários CONAMA e OMS foram transformados nas mesmas unidades do analisador para facilitar a análise dos dados. Os valores, depois de convertidos foram os seguintes: 106,3 ppb para o padrão OMS e 170,08 ppb para o padrão CONAMA.

### 3.2.1 Variabilidade Mensal das Condições Meteorológicas

Foram obtidas, junto ao INMET, as medidas das seguintes variáveis meteorológicas para o período da pesquisa:

- Temperatura do Ar (°C);
- Umidade Relativa (%);
- Insolação (horas);
- Velocidade do Vento (m.s<sup>-1</sup>); e

➤ Precipitação.

A Umidade Relativa do Ar na cidade de Manaus durante os seis meses da pesquisa ficou assim caracterizada: valores elevados nos meses mais chuvosos, correspondentes ao “inverno regional” e valores mais baixos no início do período da seca conhecido como “verão regional” (Tabela 08)

Tabela 08: Umidade Relativa Média do Ar nos Meses da Pesquisa (%)

Variáveis/Meses	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho
Umidade Relativa do Ar	85	83	84	82	76	69

Fonte: INMET (2011)

Com relação à direção dos ventos, os valores encontrados ficaram entre 0° e 45° significando que os ventos predominantes na cidade, sopraram da direção Norte a Nordeste.

Quanto à velocidade dos ventos, a maior velocidade média registrada foi no mês de julho conforme Tabela 05. Devido a ocorrência de velocidades nulas em alguns dias, considerou-se importante apresentar os valores da mediana como tenência central. Assim, para a velocidade dos ventos as medianas foram as seguintes (Tabela 09):

Tabela 09: Velocidade Média dos Ventos nos Meses da Pesquisa (m.s<sup>-1</sup>)

<b>Fevereiro</b>	1,3
<b>Março</b>	0,7
<b>Abril</b>	0,7
<b>Maió</b>	0,7
<b>junho</b>	0,7
<b>Julho</b>	1,7

Fonte: INMET (2011)

As temperaturas mensais durante os meses da pesquisa revelaram, apesar da pequena amplitude, uma tendência à elevação, à proporção que se aproximam os meses da estação seca. Essa informação confirma a proporção inversa entre temperatura e umidade e também foi muito importante para o entendimento do desempenho dos poluentes durante os seis meses da pesquisa. A Tabela 10 mostra as temperaturas médias mensais registradas no período entre os meses de fevereiro a julho.

Tabela 10: Temperatura Média nos Meses da Pesquisa (°C)

<b>Fevereiro</b>	26,17
<b>Março</b>	26,58
<b>Abril</b>	26,73
<b>Mai</b>	27,2
<b>Junho</b>	28,18
<b>Julho</b>	28,74

Fonte: INMET (2011)

Os valores médios mensais para a pluviosidade durante os meses de fevereiro a julho de 2011 são demonstrados na Tabela 11:

Tabela 11: Pluviosidade Média nos Meses da Pesquisa (mm)

<b>Fevereiro</b>	493,3
<b>Março</b>	329,1
<b>Abril</b>	515,9
<b>Mai</b>	222,4
<b>Junho</b>	125,34
<b>Julho</b>	20,20

Fonte: INMET (2011)

Os índices de precipitação demonstraram que o mês de Junho marca o fim da estação chuvosa, pois a partir de então, os índices sofrem uma redução considerável e no mês de julho pode-se dizer que praticamente não choveu (Tabela 07). Considerando-se que o conjunto dos dados meteorológicos são importantes para avaliar a influência sobre a dispersão dos NOx na atmosfera, a Figura 13 mostra a variação simultânea desses parâmetros.

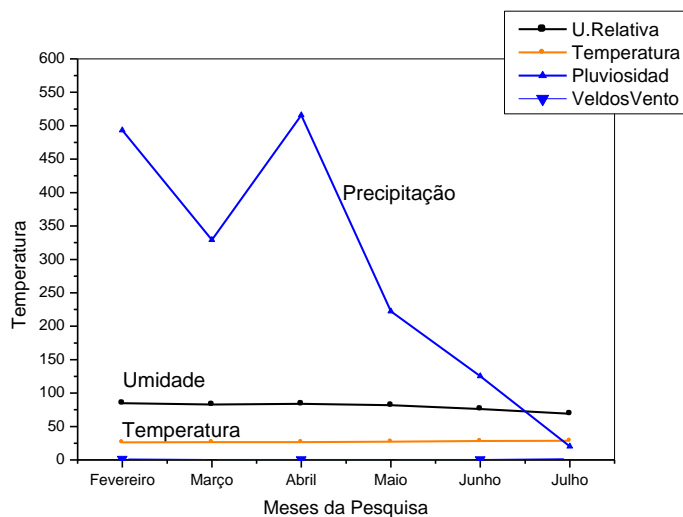


Figura 13: Variação Simultânea dos Parâmetros Meteorológicos

### 3.2.2 Estatística Descritiva dos Dados Amostrais

O equipamento faz a validação automática dos dados, no entanto, qualquer medida está sempre afetada por erros aleatórios, pois mesmo que as calibrações tenham sido regulares e rigorosas, sempre hão de existir flutuações imprevisíveis. Por esse motivo os dados foram tratados estatisticamente com o escopo de encontrar as respostas necessárias ao atendimento dos objetivos desta pesquisa.

A análise estatística descritiva teve, como objetivo, sintetizar os valores de forma a obter uma visão global da variação e determinar características buscando detectar as inconsistências ocorridas durante o processo de coleta de dados.

Segundo Carvalho (2003), a incerteza é uma característica marcante nos processos de monitoração ambiental. São incertezas quantitativas devidas às medições, qualquer que seja o método utilizado, e incertezas ligadas à falta de informação. Ainda que não se possa eliminá-las totalmente, é necessário minimizá-las procurando aumentar a qualidade dos dados e, dessa forma, assegurar resultados confiáveis. A não realização desse estudo prévio pode levar a interpretações incorretas ou inconclusivas, que poderiam interferir no resultado da pesquisa. A Tabela 12 contém os resultados da análise.

Tabela 12: Estatística Descritiva para NO, NO<sub>x</sub> e NO<sub>2</sub> (ppb)

ESTATÍSTICA	VARIÁVEL		
	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>
MÍNIMO	0,369	29,610	0,450
MEDIANA	234,323	338,900	75,650
MÉDIA	274,263	396,960	122,710
MÁXIMO	887,483	998,350	899,150
DESVIO PADRÃO	185,716	221,377	135,045

Fonte: NIEMA/Estatística

Pela grande diferença entre os valores da mediana e da média, são identificados indícios de que as distribuições não são simétricas. Percebe-se que os óxidos NO e NO<sub>2</sub> apresentam uma amplitude significativa entre os valores máximos e mínimos. Além disso, o valor elevado do Desvio Padrão também é indicativo da grande variabilidade dos dados.

Visando observar essa variabilidade em todos os meses da pesquisa, foram elaboradas também, as estatísticas descritivas mensais para os óxidos NO/NO<sub>2</sub>. Os valores estatísticos mensais apresentados na Tabela 13 têm a mesma similitude daqueles apresentados na Tabela 12, ou sejam:

- A pouca simetria devido à grande diferença entre os valores da mediana e da média;
- A grande amplitude entre os mínimos e os máximos; e



➤ A variabilidade muito grande evidenciada pelo valor elevado do Desvio Padrão.

A Tabela 13 demonstra a assimetria dos dados estatísticos para cada um dos meses estudados.

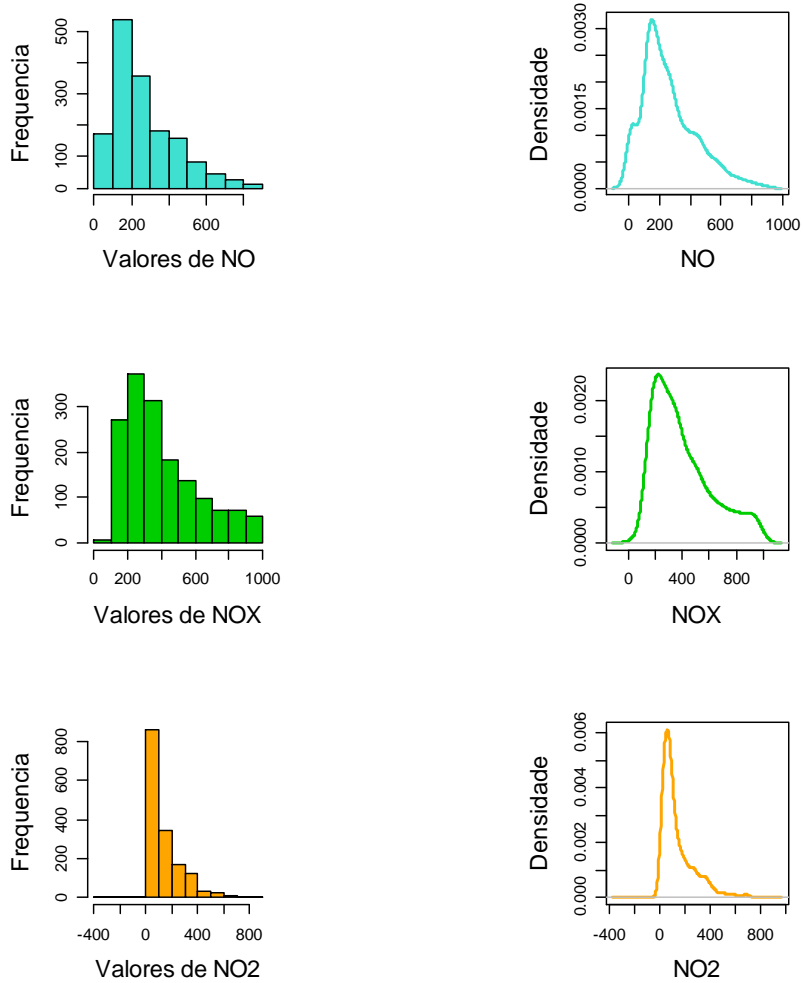
Tabela 13: Estatística Descritiva Mensal para os Óxidos de Nitrogênio

Mês	Estatística	Variável (ppb)		
		NO	NOX	NO2
Fevereiro	Mínimo	0, 369	102, 200	0, 730
	Mediana	236, 284	360, 600	86, 700
	Média	279, 461	412, 900	133, 780
	Máximo	887, 483	970, 200	869, 930
	Desvio Padrão	192, 354	225, 813	73, 324
Março	Mínimo	11, 650	29, 780	0, 460
	Mediana	256, 540	361, 920	77, 240
	Média	295, 680	420, 750	125, 070
	Máximo	876, 510	998, 350	899, 150
	Desvio Padrão	189, 589	230, 195	137, 150
Abril	Mínimo	10, 890	103, 400	3, 820
	Mediana	221, 500	320, 400	63, 120
	Média	263, 110	375, 900	112, 880
	Máximo	867, 740	986, 600	618, 350
	Desvio Padrão	157, 855	204, 328	110, 828
Maio	Mínimo	2, 620	29, 610	0, 730
	Mediana	223, 850	314, 840	71, 900
	Média	263, 420	379, 500	116, 080
	Máximo	359, 180	503, 430	142, 470
	Desvio Padrão	188, 186	218, 283	141, 689
Junho	Mínimo	10, 250	60, 270	-310, 920
	Mediana	207, 160	339, 880	104, 460
	Média	250, 680	402, 240	151, 560
	Máximo	810, 570	994, 060	794, 490
	Desvio Padrão	161, 876	216, 668	132, 997
Julho	Mínimo	1, 510	20, 490	5, 230
	Mediana	199, 080	355, 460	120, 290
	Média	234, 050	414, 330	180, 270
	Máximo	681, 950	990, 450	700, 940
	Desvio Padrão	147, 257	221, 093	137, 582

Fonte: NIEMA/Estatística

A assimetria também pode ser observada nos histogramas, os quais descrevem a frequência dos dados referentes à concentração das espécies estudadas (NO-NO<sub>x</sub>-NO<sub>2</sub>). Nos histogramas elaborados pode ser notada de forma bastante clara, uma assimetria à direita, bem evidente em suas distribuições, confirmada também pelos gráficos das densidades.

Diante dessas observações, verifica-se a necessidade de novos estudos estatísticos para identificar um modelo probabilístico que descreva adequadamente as concentrações dos compostos pesquisados.



A Figura 14 mostra os histogramas e as densidades para os óxidos de nitrogênio.

Figura 14: Gráficos Histograma e Densidade

Foram calculados os coeficientes de correlação linear para identificar a “tendência linear” no comportamento da dispersão entre as concentrações do NO<sub>2</sub> e as variáveis, precipitação e temperatura máxima e mínima (Tabela 14).

Tabela 14: Coeficientes de Correlação Linear

Variável	Variável		
	Precipit.	Tem. Mín.	Tem. Máx.
NO <sub>2</sub>	- 0, 156	0, 251	0, 435

Ao examinar a Tabela 14, verifica-se que não é possível identificar nenhuma “tendência” bem clara nos valores dos coeficientes para estabelecer um grau de associação linear entre duas variáveis. No entanto, apesar de os coeficientes não apresentarem valores próximos de 1 (um), que indicariam forte correlação linear, observa-se, devido ao sinal (positivo), uma tendência linear positiva entre a temperatura (máxima e mínima) e o dióxido de nitrogênio. Esse fato pode ser interpretado como, “quanto maior for a temperatura do dia, maiores serão as concentrações do NO<sub>2</sub> presentes no ar”.

Em sentido inverso, quando se observa os valores do coeficiente de correlação para a precipitação, constata-se que existe uma tendência linear negativa entre a precipitação e o dióxido de nitrogênio, o que deve ser tomado no sentido de que “quanto maior for o nível de precipitação durante o dia, menores serão as concentrações do NO<sub>2</sub>”.

Após a estatística descritiva, os dados originais passaram por um processo denominado de “Identificação de Discrepâncias” que busca identificar os valores coletados em condições anormais (falha de equipamento, problemas de calibração, queda de energia, erro do operador, erro de leitura, etc.). Esse cuidado faz parte do processo de validação dos dados o qual fornece

evidências probabilísticas que os valores extremos em questão não se ajustam à distribuição dos dados sendo, portanto, um dado discrepante.

Foram descartados os valores discrepantes em desacordo com o conjunto dos dados, pois principalmente quando estão muito afastados dos demais (para mais ou para menos), podem prejudicar os resultados da pesquisa. São denominados “observações discrepantes ou *outliers*, e para detecta-los é necessário dispor de um critério de detecção” (PINHEIRO, CUNHA e CARVAJAL, 2009).

O setor de estatística do NIEMA recomendou, como critério estatístico para eliminar os dados discrepantes, os limites entre o primeiro e o terceiro quartil. Esse critério foi aplicado aos dados de cada mês igualmente e os que ficaram de fora desse intervalo foram eliminados. Na Tabela 15 tem-se os valores numéricos para os quartis de cada óxido, bem como o valor mediano de cada um.

Tabela 15: Limites (quartis) e Valores Medianos dos NOx (ppb)

<b>Estatística</b>	<b>NO</b>	<b>NO2</b>
1° Quartil	137, 488	49, 830
Mediana	220, 040	88, 880
3° Quartil	356, 615	190, 980

Fonte: NIEMA/Estatística

Com os dados da amostra resultante e com os valores das condições meteorológicas diários foram calculadas as médias e elaborados os gráficos mensais. No entanto, as médias diárias não são suficientes para compreender o comportamento dos gases NO/NO<sub>2</sub> nos diferentes horários do dia, porque as concentrações dos poluentes e as variáveis meteorológicas oscilam muito interferindo e contribuindo mutuamente para os resultados.

A média consiste em transformar as variáveis numa constante, o que não representa a realidade, pois mesmo considerada como um número que tem a faculdade de representar uma série de valores, a média não pode, por si só, destacar o grau de homogeneidade ou heterogeneidade que existe entre os dados.

### 3.2.3 Análise Gráfica dos Dados Amostrais

Para melhor observar a influência de algumas variáveis meteorológicas sobre os níveis de concentração dos NOx, além dos gráficos com as médias diárias de cada mês, também foram elaborados, para alguns dias, os gráficos horários, onde mais informações pareceram necessárias ao melhor entendimento dos fenômenos estudados.

#### FEVEREIRO

A média mensal encontrada para esse mês foi de 96,38 ppb, dentro dos limites considerados aceitáveis pela legislação brasileira vigente e pela Organização Mundial da Saúde.

Considerando-se que o monitoramento só teve início no dia 11 desse mês, as médias diárias correspondem ao intervalo entre o dia 11 e o dia 28, ilustrados na Figura 15.

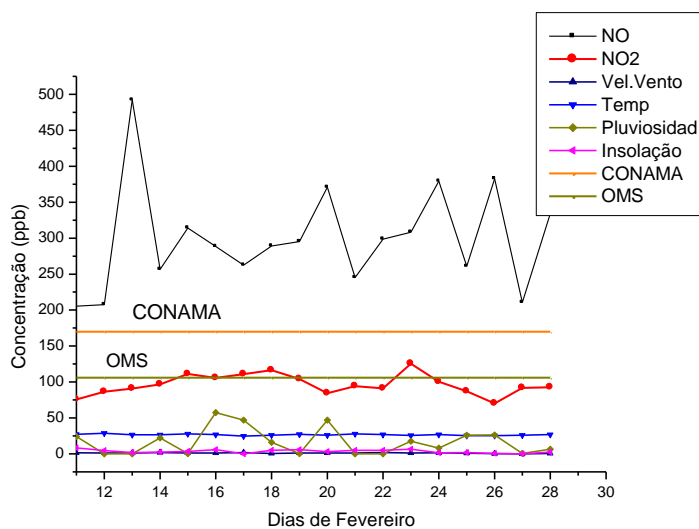


Figura 15: Médias Diárias de NO e NO<sub>2</sub> no Mês de Fevereiro

Verifica-se pequena variabilidade da temperatura durante o mês e pouca influência no comportamento das concentrações dos poluentes.

Não houve nenhuma ultrapassagem ao padrão CONAMA mas o padrão OMS foi violado quatro vezes. Os níveis de concentração considerados críticos para os poluentes indicadores da qualidade do ar não foram atingidos em nenhum dia do mês de Fevereiro. Dentre esses níveis, classificados em Atenção, Alerta e Emergência, este último não deve nunca ser alcançado, na medida em que os dois anteriores desencadeiam ações do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar previsto na Resolução n. 03/90 do CONAMA.

Ao contrário da temperatura, a pluviosidade apresentou uma grande variabilidade entre os dias 11 e 28 de fevereiro,

Ao analisar a Tabela 16 e a Figura 15 verificou-se, em alguns dias, elevadas concentrações coincidindo com baixa pluviosidade e muita pluviosidade contribuindo para menores concentrações do poluente. No dia 15 por exemplo, a concentração de NO<sub>2</sub> foi elevada e o nível de precipitação foi baixo. Por outro lado os dias 16 e 20 apresentaram os mais elevados índices de precipitação e a concentração média de NO<sub>2</sub> baixou a níveis inferiores ao padrão OMS. As condições meteorológicas importantes para os dias analisados estão relacionadas na Tabela 16.

Tabela 16: Condições Meteorológicas no Mês de Fevereiro

<b>Dias/Fevereiro</b>	<b>NO (ppb)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (ppb)</b>	<b>Velocidade dos Ventos</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Insolação (horas)</b>
11	205,37	75,56	1,7	27,1	24,1	8,5
12	207,41	86,43	1,3	28,6	0	4,5
13	492,12	90,92	1,3	26,7	0	2
14	256,72	96,61	2	26,7	22,3	2,5

15	314,22	111,31	1,3	27,8	0,4	3,5
16	288,40	105,50	1,3	26,8	57,4	6
17	262,43	110,80	2	24,8	46,8	0
18	289,00	<b>116,49</b>	0,7	25,9	16	5
19	295,24	103,99	1,3	27,1	0,4	6
20	370,85	84,18	1,3	26,1	47	3
21	245,19	94,27	1,3	27,7	0	5
22	298,55	91,16	2	26,9	0	5
23	308,13	125,42	1,3	25,6	17,6	6,5
24	379,31	100,32	1,7	26,9	8	1,5
25	261,03	87,23	1	25,3	26	2
26	382,57	70,20	0,3	25,2	26,2	0,5
27	210,52	91,71	0	25,9	0,7	0
28	334,17	92,77	0,7	27	6,4	2,5

Em dias de muita precipitação é normal que se espere um nível mais baixo nas concentrações dos poluentes, pois o ar atmosférico possivelmente estará limpo de impurezas. Nos meses de chuva, a precipitação é o fator que tem maior influência na dispersão dos poluentes, pois a chuva, como se viu na revisão teórica, é um dos recursos que a natureza utiliza para fazer sua própria purificação, mas não é o único.

Temperatura, radiação solar e nebulosidade, são igualmente importantes para o diagnóstico da qualidade do ar. Na cidade de Manaus, esses fatores competem entre si no processo de limpeza da atmosfera, resultando na interação simultânea de todos os parâmetros com efeitos muitas vezes imprevisíveis.

O óxido nítrico, que resulta da queima de toda espécie de combustíveis tanto por fontes móveis como fixas é a principal fonte de NO<sub>2</sub> atmosférico ( $\text{NO} + \text{O} \rightleftharpoons \text{NO}_2$ ). Essa reação, como se viu na revisão teórica, é reversível. Em condições meteorológicas favoráveis (luz

solar) ocorre a reação inversa, a fotólise do  $\text{NO}_2$  e, se outro fator não interferir, como nebulosidade por exemplo, a concentração do  $\text{NO}_2$  na atmosfera pode ser reduzida.

A intensidade da radiação solar incidente é influenciada pela nebulosidade, pois as nuvens refletem e absorvem parte dessa radiação. Considerou-se, neste trabalho, o número de horas de sol isto é a insolação total diária.

Verifica-se ainda, que o conjunto das concentrações de  $\text{NO}$  é mais elevado que do  $\text{NO}_2$ , pois a emissão direta de  $\text{NO}_2$  para a atmosfera é muito pequena em relação à do  $\text{NO}$ . Isso quer dizer que a maior fração dos  $\text{NO}_x$  formados durante a queima de combustíveis fósseis é emitida como  $\text{NO}$  (95% e 5% respectivamente) (PRIMO, 2005).

A Figura 15 foi elaborada com base nas concentrações médias diárias do mês de fevereiro. No entanto, ao estudar a influência dos agentes meteorológicos, verificou-se que, num mesmo dia, os picos de concentração se alternam sugerindo a alternância também, no sentido da reação de oxidação do  $\text{NO}$  ou fotólise do  $\text{NO}_2$ . Os agentes meteorológicos atuam num mesmo dia implicando variações substanciais nas concentrações dos poluentes. Dois dias podem apresentar a mesma média e, no entanto, em um deles o período da noite foi mais poluído que o período do dia ou vice-versa. Também é possível que uma única e elevada emissão em determinada hora do dia, influencie uma média alta, enquanto o inverso, isto é, a média baixa ser influenciada por uma emissão isolada.

Assim, para ilustrar o comportamento das concentrações de  $\text{NO}/\text{NO}_2$  durante o dia, utilizando os dados gerados pelo analisador automático, foram elaborados gráficos horários para o dia 12 (ausência de chuva e temperatura média elevada) e os dias 16 e 17 que tiveram índices elevados de precipitação.



O comportamento horário das emissões de NO<sub>2</sub> durante o dia 12 de fevereiro é verificado na Figura 16.

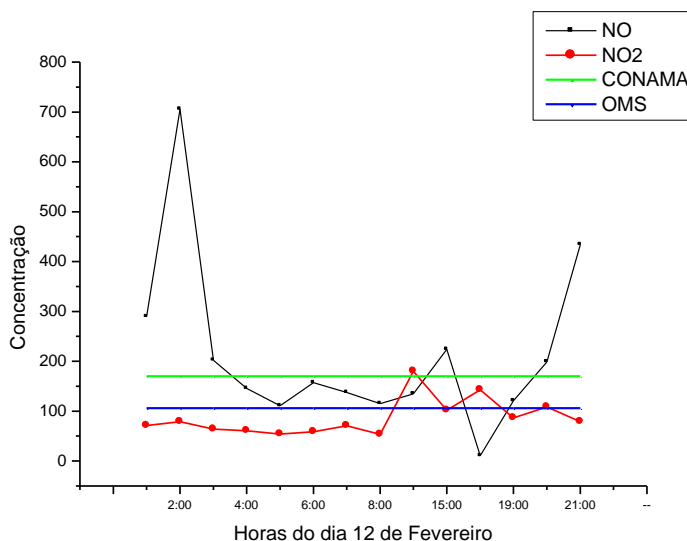


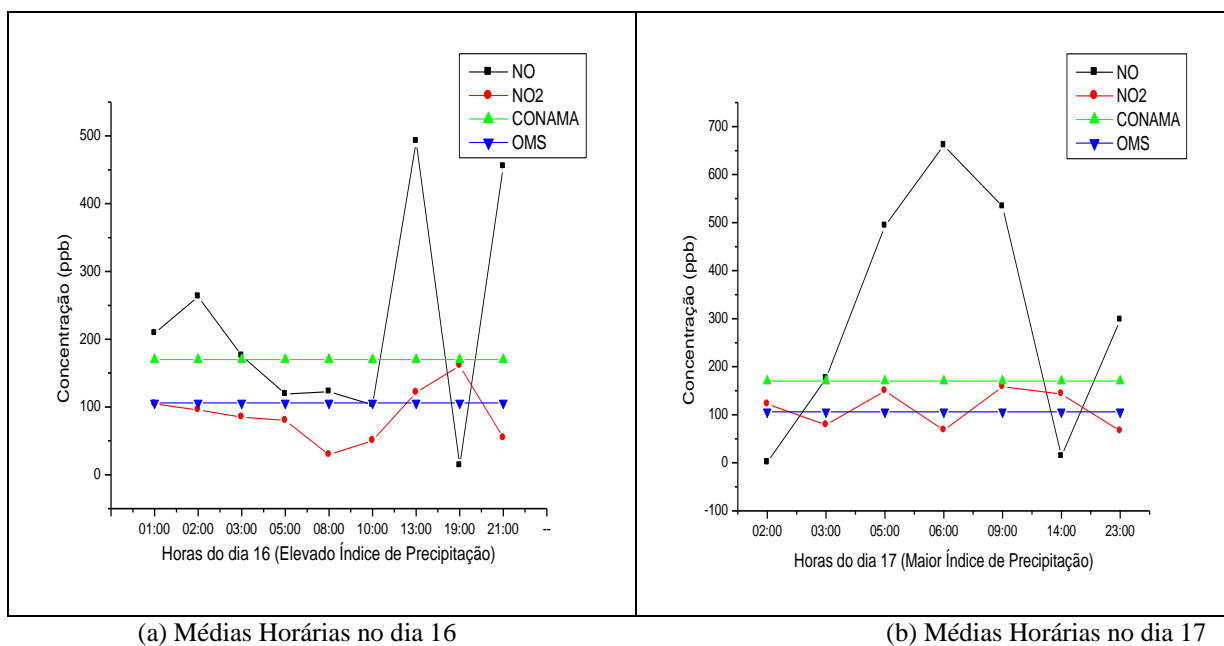
Figura 16: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> em 12 de Fevereiro (ppb)

No dia 12, as elevadas concentrações de NO<sub>2</sub> nas primeiras horas da tarde, violaram os padrões de qualidade do ar. As 4,5 horas de insolação devem ter ocorrido na parte da manhã, quando o nível de NO<sub>2</sub> foi reduzido em virtude da fotólise. Nas outras horas do dia que transcorreu sem a ocorrência de chuvas e com ventos cuja velocidade média foi de 1,3 m.s<sup>-1</sup>, os níveis de NO<sub>2</sub> foram mais elevados.

Observa-se que o NO emitido na madrugada foi rapidamente consumido e como não houve aumento proporcional do NO<sub>2</sub>, pode-se supor três situações:

- Oxidação pelo O<sub>3</sub> formado no dia anterior;
- Reação com outros precursores e aumento da concentração do O<sub>3</sub> troposférico; e/ou
- Oxidação do NO<sub>2</sub> e possível formação de chuva ácida.

Os elevados níveis de pluviosidade dos dias 16 e 17 possivelmente diluíram o  $\text{NO}_2$ . Não houve ultrapassagem do padrão CONAMA e o padrão OMS sofreu duas violações no dia 16 e quatro no dia 17 conforme se pode verificar através da Figura 17.



(a) Médias Horárias no dia 16

(b) Médias Horárias no dia 17

Figura 17 (a, b): Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> nos dias 16 e 17

No dia 16, além das chuvas abundantes, 06 horas de insolação fizeram com que os níveis de NO<sub>2</sub> na atmosfera caíssem. No entanto, o número maior de ultrapassagens do padrão OMS, no dia 17, apesar das chuvas, deve ter sido motivado pela ausência de insolação.

### MARÇO

A Figura 18 descreve o comportamento dos NO/NO<sub>2</sub> nos 10 primeiros dias do mês de março, cuja concentração média foi de 93,03 ppb, igualmente abaixo dos padrões de qualidade do ar. Os dias não analisados decorreram da necessidade de manutenção e calibração dos analisadores, bem como de problemas relacionados com o fornecimento de energia elétrica.

Como pode ser verificado na Figura 18, o padrão CONAMA não foi alcançado e o padrão OMS foi violado duas vezes. Os maiores picos de NO<sub>2</sub> foram verificados nos dias 03 e 07. No

dia 03 apesar de 46,8 mm de chuva, o nível de insolação foi zero e consequentemente não houve fotólise.

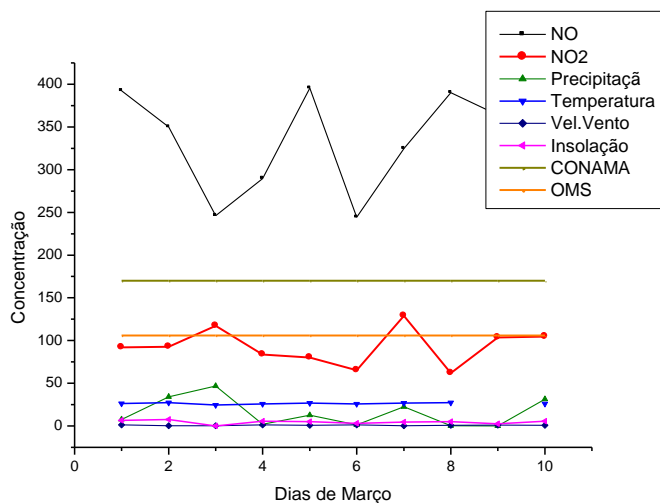


Figura 18: Médias diárias de NO e NO<sub>2</sub> no mês de Março (ppb)

As condições meteorológicas importantes nesses 10 dias analisados estão destacados na Tabela 17.

Tabela 17: Condições Meteorológicas no Mês de Março

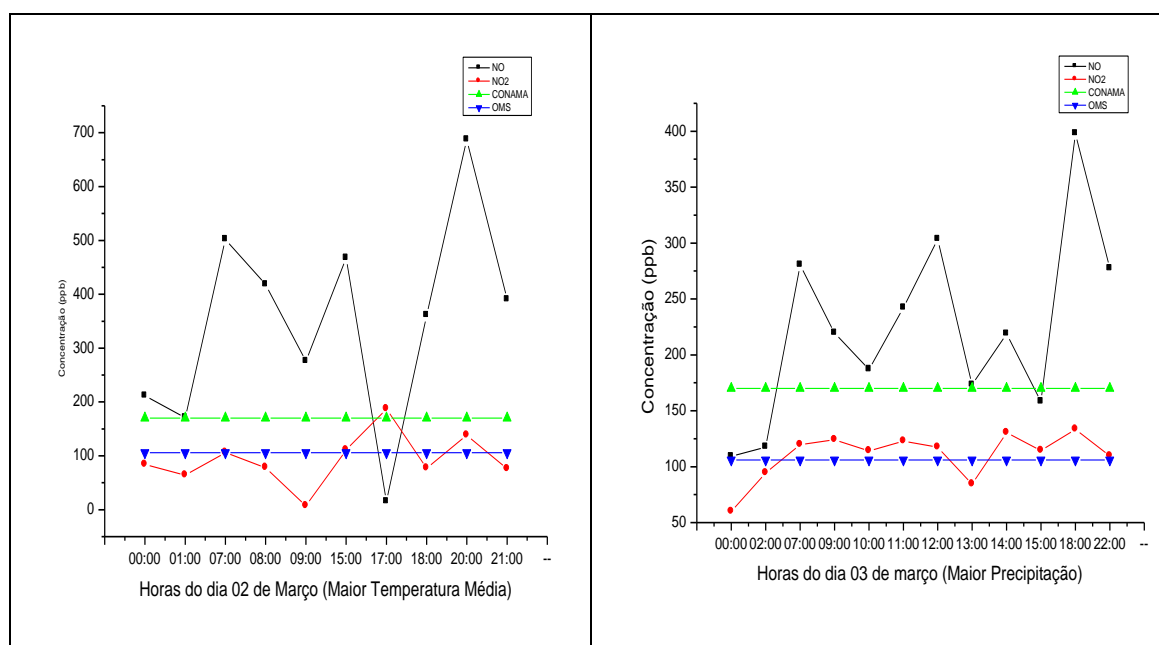
Dias/Mês	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	Precipitação (mm)	Temperatura (°C)	Velocidade dos Ventos	Insolação (horas)
1	392,50	92,10	7,7	26,2	1,3	6,5
2	349,94	92,79	34,1	27,4	0,3	7,5
3	246,06	117,22	46,8	24,4	0,3	0
4	289,48	83,66	2	25,9	1,3	5,5
5	395,35	80,21	12,6	26,9	0,7	5
6	244,33	65,29	1,2	25,8	1,3	3
7	324,76	128,92	22,6	26,7	0,3	4,5
8	390,24	61,95	0,2	27,4	0,7	5
9	364,05	103,61	0	-	1	2,5

10	316,52	104,53	31,4	26,1	0,7	5,5
----	--------	--------	------	------	-----	-----

O dia 07 choveu menos e a concentração de NO<sub>2</sub> foi mais alta, no entanto, pouca precipitação e temperaturas elevadas não significam que houve maior período de insolação, porque temperaturas elevadas podem produzir maior nebulosidade e dessa forma reduzir a a intensidade da radiação solar que efetivamente chega até a superfície da terra .

O comportamento dos índices do NO<sub>2</sub> nos dias 02 (maior temperatura) e 03 (maior precipitação) foi analisado com base nas médias horárias registradas automaticamente pelo analisador.

A Figura 19 ilustra a variação registrada nos dias 02 e 03 relacionando os poluentes com os padrões da qualidade do ar.



(a) Médias Horárias no dia 02 de Março

(b) Médias Horárias no dia 03 de Março

Figura 19 (a,b): Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> nos dias 02 e 03 de Março

No dia 02, houve precipitação de 34,1 mm, mas em contrapartida foram assinaladas as temperaturas mais elevadas do mês e a velocidade do vento foi insignificante. Nesse dia a

menor concentração de NO<sub>2</sub> foi registrada por volta das 9:00 h da manhã quando a intensidade da radiação solar já é intensa. Às 17:00 h, a radiação solar está reduzida, e as elevadas temperaturas devem ter contribuído, direta ou indiretamente, para a oxidação do NO cujos níveis de concentração baixaram. O padrão CONAMA foi ultrapassado às 17:00 h e o padrão OMS sofreu duas ultrapassagens, às 17:00 h e às 20:00 h.

No dia 03 as menores concentrações de NO<sub>2</sub> ocorreram durante a madrugada e às 13:00 h e os mais elevados valores foram registrados às 14:00 h e às 18:00 h.

### ABRIL

As chuvas fortes acompanhadas de descargas elétricas foram responsáveis por muitos problemas elétricos na Estação de Monitoramento, razão porque apenas os dias 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30 apresentaram dados em condições de serem validados (Figura 20).

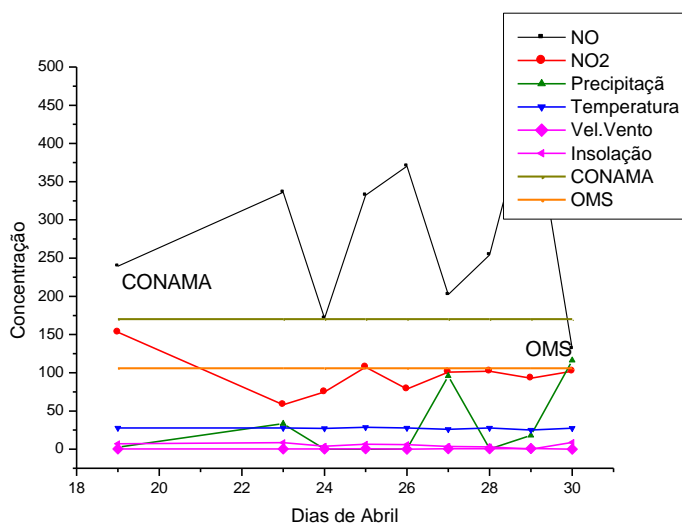


Figura 20: Médias diárias de NO e NO<sub>2</sub> durante o mês de Abril

Ressalta-se que o mês de abril foi o mês mais chuvoso do período da pesquisa, apresentando um total de precipitação de 515,9 mm. Nesse mês, a média da concentração do NO<sub>2</sub> foi de

96,62 ppb. O padrão CONAMA não foi superado e o padrão OMS foi ultrapassado 02 vezes (19 e 25). Não foram atingidos os limites dos episódios agudos de poluição do ar.

É importante a observação da curva de precipitação na Figura 20, pois nem sempre os maiores índices de precipitação correspondem aos menores valores para o NO<sub>2</sub>. Algumas exceções importantes são notadas. Nos dias 24 e 26 as concentrações de NO<sub>2</sub> ficaram abaixo do padrão OMS, mas não houve precipitação. Nesses dias a radiação solar pode ter sido o fator determinante para a aceleração da reação de fotólise do NO<sub>2</sub>. É possível também que as fortes chuvas do dia 23 tenham contribuído para a limpeza da atmosfera estendendo seus efeitos até o dia seguinte.

Com relação ao dia 23, confirma-se a hipótese (maior precipitação, maior dispersão), pois, como era de se esperar, os 33,4 mm de chuvas que caíram no dia 23 provavelmente foram determinantes para que esse dia fosse o menos poluído entre os dias avaliados.

A influência dos parâmetros meteorológicos durante os dias do mês de abril são confirmados quando se analisa os dados apresentados na Tabela 18 em conjunto com a Figura 20.

Tabela 18: Condições Meteorológicas no Mês de Abril

<b>Dias/Mês</b>	<b>NO (ppb)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (ppb)</b>	<b>Precipitação</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Velocidade dos Ventos</b>	<b>Insolação</b>
<b>19</b>	239,38	153,13	2,8	27,9	0,3	7
<b>23</b>	336,11	58,08	33,4	27,7	0,3	8,5
<b>24</b>	171,25	74,80	0	27,3	0,3	4
<b>25</b>	332,27	107,38	0	28,7	0,7	6,5
<b>26</b>	370,21	78,62	0	27,9	0	6
<b>27</b>	202,29	100,88	96	26,1	0,7	3,5
<b>28</b>	254,13	101,94	0,4	27,9	0,7	3
<b>29</b>	460,65	92,87	18	25,1	1	0

30	131,52	101,92	116,2	27,6	0	9
----	--------	--------	-------	------	---	---

No dia 27 houve muita precipitação e os níveis de concentração do NO<sub>2</sub> ficaram em 100,88 ppb, abaixo do padrão OMS. Apesar disso, se considerarmos que nos três dias anteriores não houve precipitação, pode-se supor um acúmulo da poluição na atmosfera (o tempo de residência dos NO<sub>x</sub> é de 24:00 h) o que, aliado à ausência de ventilação, teria contribuído, parcialmente, para dificultar a dispersão.

Para melhor compreensão desses resultados foi elaborado um gráfico com a distribuição horária das concentrações dos óxidos NO/NO<sub>2</sub>, relacionadas aos padrões CONAMA e OMS para os dias 27 e 30 (maior precipitação) e o dia 25 (maior temperatura média).

No dia 27 os níveis de NO<sub>2</sub> baixaram durante o horário de maior insolação como mostra a Figura 21. As concentrações mais baixas de ambos os gases ocorreram às 17 h, quando as chuvas devem ter precipitado os poluentes.

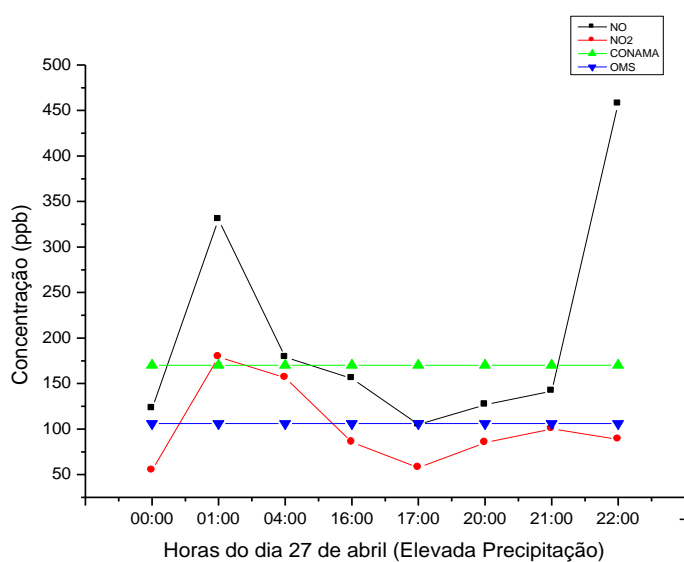


Figura 21: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> no dia 27 de Abril

No dia 30 a concentração do NO<sub>2</sub> não ultrapassou os limites de qualidade do ar. Apesar de a velocidade do vento ter sido zero, representando condições prejudiciais à dispersão, o maior valor para precipitação e a insolação mais alta do mês (9 horas) são condições que contribuíram para a dispersão do NO<sub>2</sub>.

No dia 30 a grande precipitação registrada, provavelmente deve ter ocorrido nas primeiras horas do dia, quando, observando a figura 22 verifica-se o pico inferior do NO (4:00 h). As médias horárias das concentrações coletadas no dia 30 estão representadas na Figura 22.

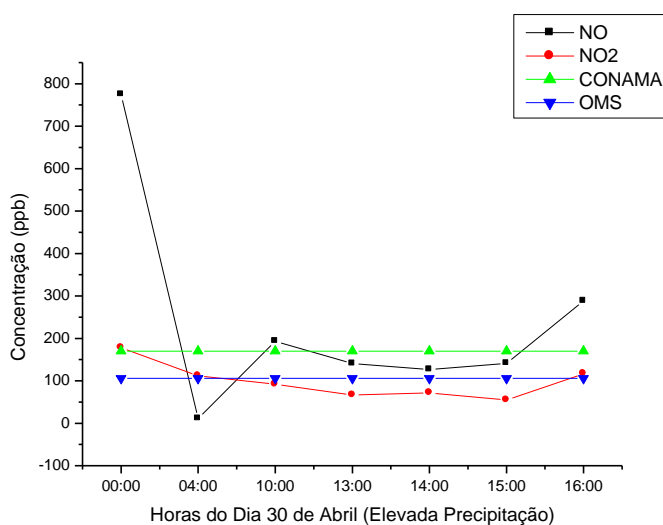


Figura 22: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> no dia 30 de Abril

Os picos superiores de NO e de NO<sub>2</sub> à meia-noite podem ser decorrentes de emissões do dia anterior, ausência de radiação solar e pequena velocidade do vento, permitindo que a poluição permaneça por um tempo maior na atmosfera até a dispersão.

No período de máxima radiação solar os níveis de NO<sub>2</sub> baixaram, voltando a se elevar depois do pôr do sol, momento em que também a baixa umidade relativa prejudicou a dispersão.



Em geral, como diz Primo (2005), altos índices de umidade relativa têm maior eficiência na remoção dos poluentes. O tempo de insolação e a umidade relativa no dia 30 estão demonstrados na Tabela 19.

Tabela 19: Condições Apresentadas no Dia 30 de Abril

Temperatura Máxima (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa (%) (0h;12h;18h)
30,5	9	95/80/60

A umidade não sofre grande variação de um dia para o outro, no entanto, num mesmo dia, conforme é confirmado pela Tabela 18, os valores podem ser bem distintos dependendo do horário da medição. A variação da umidade relativa num mesmo dia também induz uma variação na concentração dos poluentes.

Entre as 10:00 h e 16:00 h do dia 30 as médias horárias do NO<sub>2</sub> foram relativamente baixas (inferiores ao padrão OMS), por esse motivo pode-se supor que a média diária ficou elevada devido ao pico ocorrido à 0:00 h e às concentrações elevadas após as 16:00 h.

No dia 25 a temperatura média foi a mais elevada do mês, 28,7 °C e a temperatura máxima 34,5 °C. Pouca movimentação do ar, nenhuma precipitação e sete horas de insolação sugerem a influência da radiação solar na fotólise do NO<sub>2</sub>.

A Figura 23 ilustra as médias horárias do NO<sub>2</sub> no dia 25 de abril.

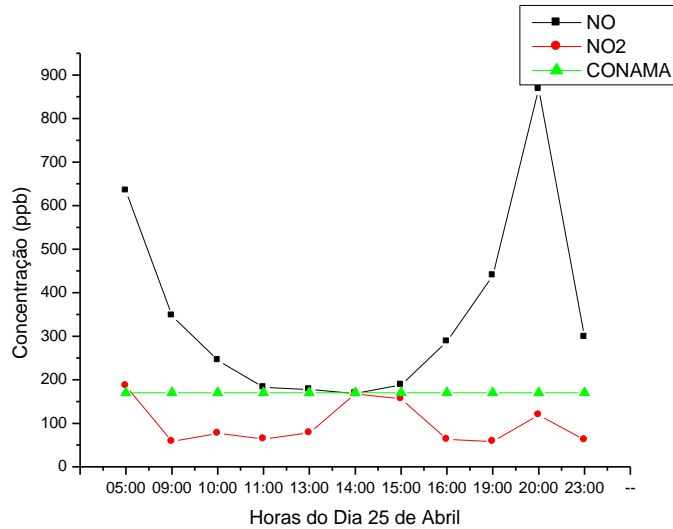


Figura 23: Médias Horárias de NO<sub>2</sub> no dia 25 de Abril

As maiores concentrações de NO<sub>2</sub> ocorreram no início da manhã logo após o pico de NO, no início da tarde e após um pico maior de NO às 20:00 h. Observa-se, através da Figura 23, uma eficiência no equilíbrio da reação  $\text{NO} \rightleftharpoons \text{NO}_2$  às 14:00 h significando igual equilíbrio na ação dos fatores, radiação solar e radicais oxidantes na atmosfera.

É possível supor que a temperatura e as 07 horas de insolação tenham competido para melhorar a eficiência desse equilíbrio.

### MAIO

No mês de maio as chuvas começam a ser menos frequentes e as temperaturas mais elevadas. O padrão CONAMA não foi violado, mas o padrão OMS foi ultrapassado nas médias de nove dias do mês de Maio (Figura 24).

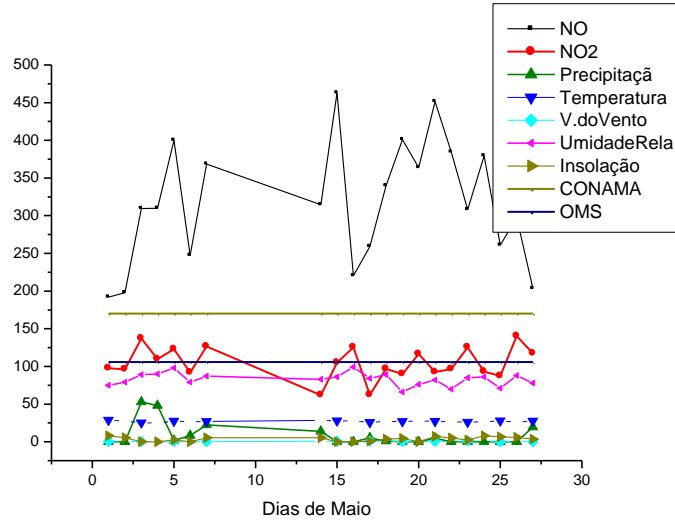


Figura 24: Médias Diárias de NO/NO<sub>2</sub> no mês de Maio (ppb)

No Amazonas, são raros os dias de céu claro e sem nuvens. Esses eventos ocorrem com mais frequência no pleno verão amazônico (estação seca), mas na quase maioria dos dias o céu está sempre coberto de nuvens, prejudicando a incidência da radiação solar.

Em dias claros e na ausência de chuvas, a concentração do NO<sub>2</sub> é inversamente proporcional à radiação solar. Esse fato foi comprovado em estudos realizados na floresta amazônica os quais revelaram a existência de uma relação inversa entre a fotólise e a concentração de NO<sub>2</sub> em atmosfera limpa de nuvens. Em dias nublados, no entanto, a formação do NO<sub>2</sub> é fortemente dependente da nebulosidade (MOURA et. al., 2001).

No mês de maio, a variável que mais parece influenciar as concentrações de NO<sub>2</sub> é a umidade, cuja curva, verificada na Figura 24, segue a mesma orientação da curva do NO<sub>2</sub>. Um exemplo desse fenômeno ocorreu no dia 16, quando são observadas concentrações elevadas de NO<sub>2</sub>, ausência de precipitação, nenhuma insolação e a maior umidade relativa do mês. A Tabela 20 detalha os parâmetros meteorológicos nos dias analisados durante o mês de maio.

Tabela 20: Condições Meteorológicas no mês de Maio

Dias de Maio	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	Precipitação (mm)	Temperatura Média (°C)	Velocidade do Vento (km/h)	Umidade Relativa (%)	Insolação (horas)
1	191,90	97,62	0	29	0,7	75	8
2	197,80	96,25	0	27,5	1	79	5,5
3	309,61	137,09	52,8	25,5	0,3	89	0
4	309,86	109,63	48	24,7	0	90	0
5	400,21	123,07	1,7	27,7	0,7	98	2,5
6	247,31	91,98	8,3	26,4	0	79	0
7	368,43	126,49	22,6	27,3	0,3	87	5,5
14	314,63	61,88	14	28,5	0,7	83	5,5
15	462,97	104,92	0	28,1	0,7	86	0
16	220,40	125,19	0	27,5	0,3	99	0
17	259,02	62,15	5	26	1	84	0,5
18	339,57	96,62	1	26,9	1	89	3,5
19	400,93	89,91	0	27,1	0,3	66	4,5
20	363,81	116,49	0	27,4	0,3	76	0
21	451,43	92,68	4,9	27,6	0,7	82	7
22	384,30	96,43	0	26,3	0,3	70	5
23	308,14	125,42	0	26,4	1,3	85	2,5
24	379,33	93,18	0	26,3	1,3	86	8
25	261,03	87,23	0	28,1	0	71	6,5
26	297,53	140,30	0	26	0,7	88	6
27	203,35	117,46	19,6	27,7	0	78	3,5

A média da concentração para o NO<sub>2</sub> foi de 104,38 ppb. A maior concentração ocorreu no dia 26, quando foram registradas elevadas temperaturas e ausência de precipitação. O dia 14 apontou as mais baixas concentrações de NO<sub>2</sub> e 14 mm de precipitação.

No entanto o dia que mais choveu foi o dia 03 embora a concentração média de NO<sub>2</sub> tenha sido elevada, acima do padrão OMS. É importante atentar também para a ausência de insolação nesse dia e para os dois dias anteriores sem chuvas, ambas as condições

desfavoráveis à dispersão dos gases na atmosfera. O dia 04 também teve pluviosidade elevada, porém na ausência de insolação não houve fotólise.

A Figura 25 ilustra as médias horárias do NO<sub>2</sub> no dia 01 de maio.

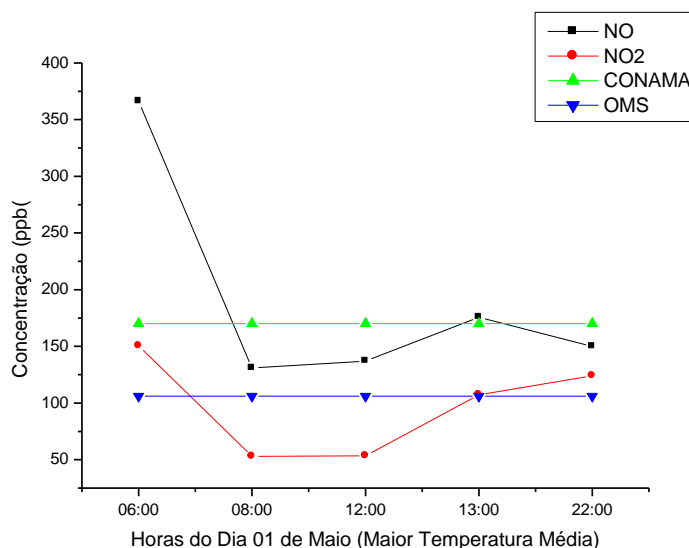


Figura 25: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> no dia 01 de Maio

Os níveis de NO<sub>2</sub> verificados nas primeiras horas do dia devem-se às elevadas concentrações de NO na atmosfera. Com o raiar do sol, a partir das 6:00 h esses níveis são reduzidos (fotólise).

Percebe-se, pela Figura 25 que, a partir das 12:00 h, a concentração do NO<sub>2</sub> volta a se elevar em função da elevação também, dos níveis de NO. Às 22:00 h, com a ausência da radiação solar, aumenta a velocidade da reação de oxidação, aumentando a concentração do NO<sub>2</sub> e diminuindo a do NO.

A partir do dia 15 os níveis de precipitação foram muito baixos ou inexistentes sendo essa uma possível explicação para as elevadas concentrações reveladas nos dias 16, 20, 23 e 26. Nos dias 16 e 20, por exemplo, não houve precipitação e a insolação foi zero e no dia 23, foram

registradas apenas duas horas e meia de insolação. Feitos os descontos, esse fato significa mais de 09 horas de céu encoberto.

### JUNHO

No mês de junho, choveu menos que em maio (125,34 mm durante todo o mês) e a concentração média mensal do NO<sub>2</sub> foi de 106,99 ppb, considerando que não houve coleta de dados no dia primeiro e no intervalo entre os dias 12 e 26.

As principais condições meteorológicas estão relacionadas na Tabela 21.

Tabela 21: Condições Meteorológicas no Mês de Junho

Dias/Mês	NO (ppb)	NO2 (ppb)	Velocidade do Vento (m/s)	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	Insolação (horas)	Umidade Relativa
2	397,34	76,43	0,7	28,6	13,3	9	91
3	260,56	85,67	0,7	29	0	8	70
4	263,24	82,63	1,0	28,9	0	9,5	68
5	184,73	94,58	0,7	28,6	0	7	80
6	324,61	84,58	1,4	27,6	0	1,8	78
7	303,33	123,66	1,4	28,4	10,6	5,8	68
8	218,95	146,91	0,3	28,9	5,2	7,2	76
9	159,92	120,51	2,1	29,5	0	6,2	85
10	219,28	120,89	2,1	29,2	0	10	65
11	143,49	118,71	2,4	29,5	0	9,8	70
12	296,73	108,97	2,1	26,7	0	8,5	73
26	270,86	125,75	1,4	28,3	3,8	7	69
27	249,27	92,73	1,0	28,2	0	3,8	62
28	168,98	90,56	1,4	25,8	6,8	0,2	61
29	306,94	102,42	1,4	26,7	31,1	4,5	60
30	261,65	136,89	1,4	28	0,5	7,5	58

Observando-se a Tabela 21 e a Figura 26 verifica-se que o padrão CONAMA, como nos outros meses não foi ultrapassado, mas na metade dos dias avaliados, as concentrações de NO<sub>2</sub> superaram os padrões de qualidade do ar recomendados pela OMS. Como não houve grande contribuição das chuvas, a poluição foi se acumulando na atmosfera revelando maiores concentrações de NO<sub>2</sub> que nos meses anteriores.

A Figura 26 apresenta as concentrações dos NO<sub>x</sub> no mês de junho.

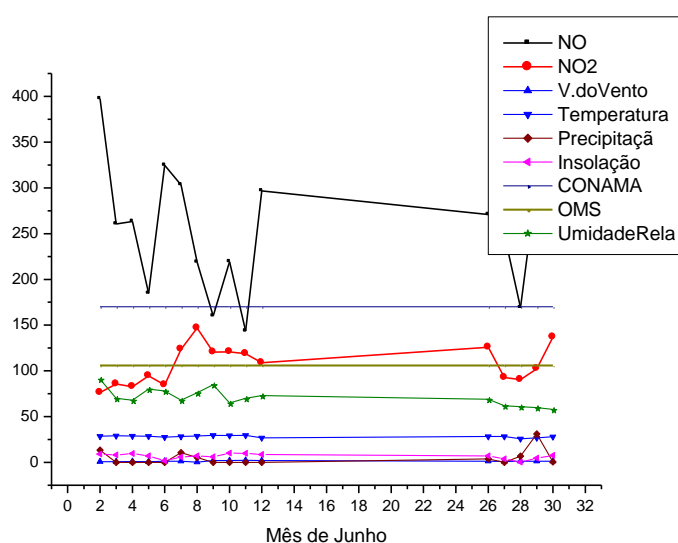


Figura 26: Médias Diárias de NO/NO<sub>2</sub> no mês de Junho (ppb)

A maior precipitação ocorreu no dia 29 coincidindo com a queda dos níveis de concentração dos dois óxidos sendo que o NO<sub>2</sub> ficou abaixo dos padrões regulados pelo CONAMA e OMS.

Foi elaborado um gráfico para o dia 02 que está representado na Figura 27.

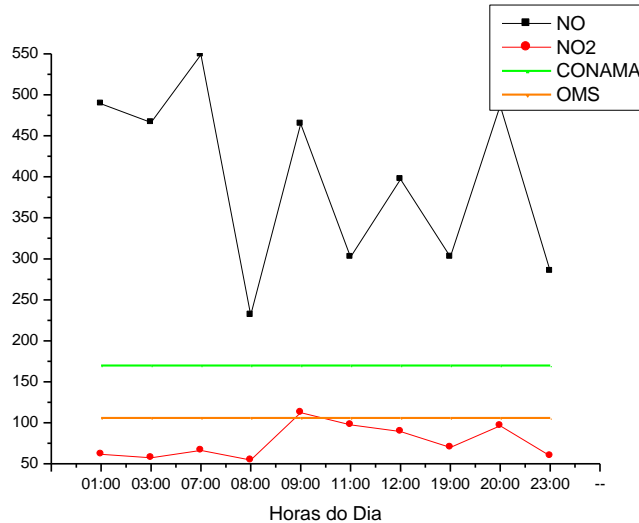


Figura 27: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> no dia 02 de Junho (ppb)

A concentração média mais baixa foi registrada no dia 02 somando-se aos parâmetros que favorecem a dispersão, precipitação de 13,3 mm, insolação de 09 horas e a maior umidade do mês. Ressalta-se, como em outras vezes, a elevada concentração de NO nas primeiras horas do dia, motivadas, possivelmente, pelas emissões do dia anterior. O óxido nítrico, presente na atmosfera durante a madrugada foi precipitado provavelmente, pelos 13,3 mm de chuva que caíram nesse dia, justificando as baixas concentrações do NO<sub>2</sub> nesse horário.

É evidente também, nesse dia, a influência da radiação solar na fotólise do NO<sub>2</sub>, pois a partir das 9:00 h e por todo o período de maior insolação as concentrações do NO<sub>2</sub> permaneceram abaixo dos padrões regulados pelo CONAMA e OMS. Às 9:00 h, novas emissões elevaram a concentração do NO e do NO<sub>2</sub> que logo em seguida sofreu fotólise (9 horas de insolação). Apenas nesse horário, os níveis de NO<sub>2</sub> superaram o limite OMS.

## JULHO



Caracterizado como o primeiro mês do “verão regional” (estação seca), no mês de julho choveu apenas 20,20 mm, mas se por um lado praticamente não choveu, todos os dias foram ensolarados. A Figura 28 mostra o comportamento dos gases NO/NO<sub>2</sub> no mês de julho.

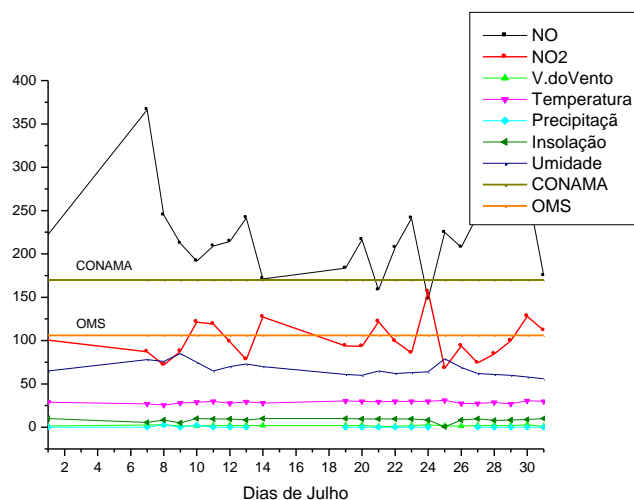


Figura 28: Médias Diárias de NO/NO<sub>2</sub> no mês de Julho (ppb)

A concentração média mensal foi 100,11 ppb um pouco menor que no mês de junho. No mês de julho também não ocorreram violações ao padrão COMAMA mas o padrão OMS foi ultrapassado sete vezes. A radiação solar, a umidade mais baixa e as elevadas temperaturas foram os fatores com maior influência nas concentrações do NO<sub>2</sub>. Observa-se, como aconteceu nos meses de maio e junho, que a umidade mostra uma influência significativa. Os pontos da curva de maior umidade relacionam-se com os picos inferiores do NO<sub>2</sub>.

Os parâmetros meteorológicos e os dados validados do mês de Julho estão relacionados na Tabela 22.

Tabela 22: Condições Meteorológicas do mês de Julho

Dias/Mês	NO (ppb)	NO2 (ppb)	Velocidade do Vento (m/s)	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	Insolação (horas)	Umidade (%)
----------	-------------	--------------	---------------------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------

1	222,46	100,48	1,5	28,9	0	10	65
7	366,47	87,11	2,6	27	0	5,5	78
8	244,78	71,86	3	25,5	3	8,5	76
9	212,12	87,68	1,5	28	0	5	85
10	191,73	121,34	1,5	29	2,5	10	75
11	209,07	119,17	2,06	29,8	0	9,5	65
12	214,24	98,68	2,09	27,8	0	9,5	70
13	241,58	78,15	2,06	29,4	0	8,5	73
14	171,09	127,23	2,00	28	0,5	10	70
19	183,54	93,79	2,06	30,3	0	10	61
20	216,49	93,37	2,09	30	0	9,5	60
21	158,59	121,69	1,08	29,4	0	9,5	65
22	207,52	99,25	1,09	30	0	9,5	62
23	241,15	85,72	2,05	29,9	0	9,5	63
24	147,84	156,70	3,0	30	0	8,5	64
25	224,79	68,05	1,5	31	0,7	0,5	79
26	207,65	93,77	1,5	27,6	0,3	8,5	69
27	244,94	74,20	2,06	27,4	<b>0,0</b>	9,9	62
28	297,86	84,64	2,09	28,6	<b>0,0</b>	8	61
29	297,86	99,86	2,06	27	<b>0,0</b>	8,5	60
30	275,60	127,90	3,02	30,5	<b>0,0</b>	9	58
31	174,82	111,84	1,03	30	<b>0,0</b>	10	56

A maior concentração de NO<sub>2</sub> ocorreu no dia 24, com baixos valores para a umidade e elevadas temperaturas. Os máximos de insolação ocorreram nos dias 01, 10, 14, 19 e 31. Entre esses, os dias 01 e 19 mostraram baixas concentrações do poluente talvez devido aos elevados níveis de insolação que favorecem a fotólise. As raros episódios de precipitação durante o mês contribuíram para a acumulação dos poluentes na atmosfera.

Observa-se em alguns dias desse mês que alguns picos das concentrações do NO<sub>2</sub> coincidiram com os picos inferiores do NO sugerindo eficiência no equilíbrio químico. Para avaliar o comportamento das concentrações dos gases NO e NO<sub>2</sub> durante as horas do dia, foram elaborados os gráficos para os dias 24 e 25, conforme Figura 29. O dia 24 apresentou baixa umidade sendo o sexto dia sem ocorrência de precipitação e o dia 25 assinalou o segundo maior índice de umidade do mês e a menor concentração de NO<sub>2</sub>.

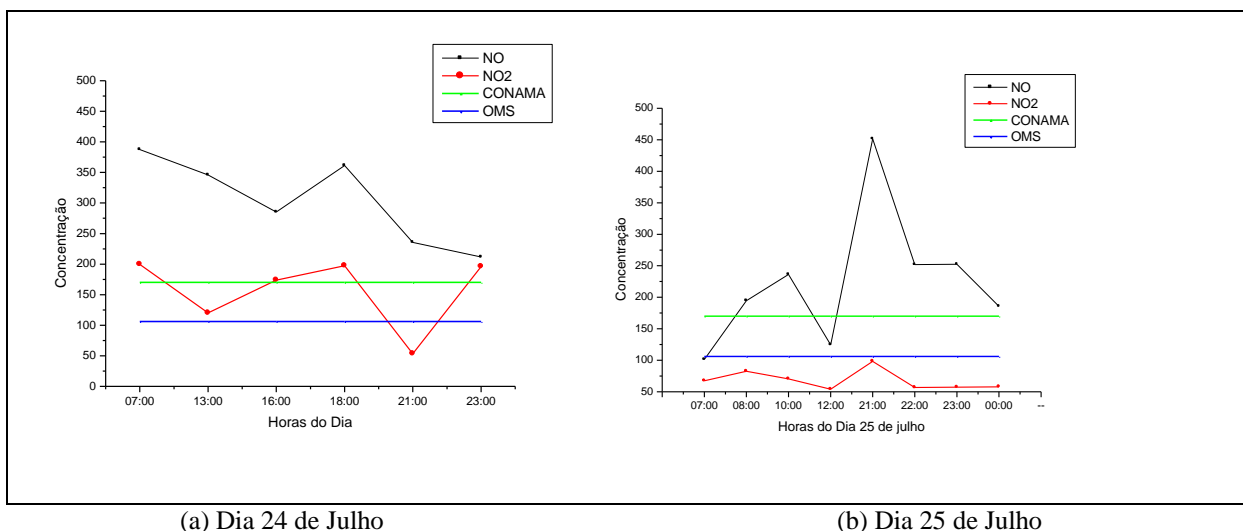


Figura 29 (a,b): Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> nos dias 24 e 25 de Julho (ppb)

No dia 24, as elevadas concentrações verificadas, conforme a Figura 28(a), podem ser motivadas pelas temperaturas elevadas e umidade reduzida. Durante o dia, as concentrações de NO<sub>2</sub> se apresentaram elevadas mostrando picos superiores aos limites do padrão CONAMA antes das 7:00 h e depois das 15:00 h.

No horário de maior radiação solar, os níveis baixaram, mas ainda permaneceram superiores ao padrão OMS. Menores valores para a concentração do NO<sub>2</sub> foram verificadas no começo da noite, até as 21:00 h. Após esse horário, as concentrações do poluente voltaram a se elevar e às 23:00 h já apresentavam níveis acima dos padrões de qualidade do ar. A Figura 28(b) mostra que os níveis de NO<sub>2</sub>, durante todo o dia 25 de julho, se mantiveram abaixo dos limites permitidos pelos órgãos ambientais sugerindo que o NO<sub>2</sub> formado foi dispersado em consequência da maior umidade presente no ar atmosférico.

O dia 30 foi representado na Figura 30 por ter registrado a mais baixa umidade e a temperatura média mais elevada. Nesse dia, somente a partir das 21:00 h os níveis de NO<sub>2</sub> ficaram abaixo dos padrões de qualidade do ar, valendo notar que por volta das 15:00 h, até o padrão CONAMA foi violado.

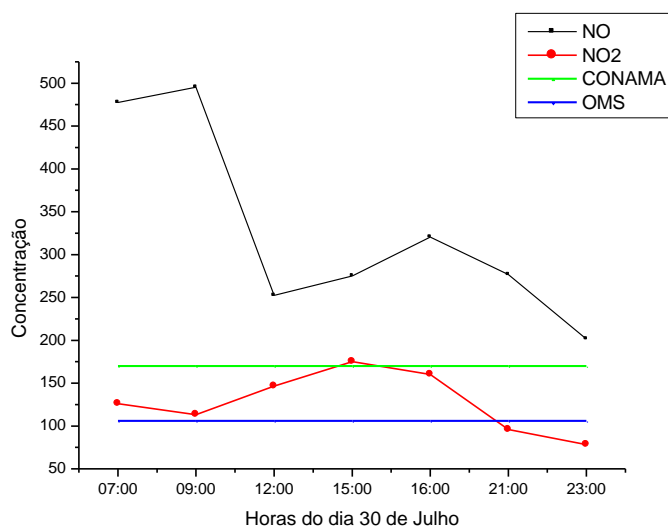


Figura 30: Médias Horárias de NO/NO<sub>2</sub> no dia 30 de Julho (ppb)

### 3.2.4 Análise do Conjunto de Dados

Alguns dias não foram considerados nesta pesquisa devido a problemas técnicos com o monitor, com a instalação da EMMQA ou ainda por problemas com o abastecimento de energia elétrica. Esses entraves constituem algumas das maiores dificuldades para o monitoramento do ar atmosférico em Manaus, e, no caso desta pesquisa, impediram a coleta de alguns dados preciosos para a análise.

Apesar disso, verificou-se um crescente agravamento da poluição atmosférica relacionada ao dióxido de nitrogênio durante os meses de fevereiro a julho de 2011 (Figura 31).

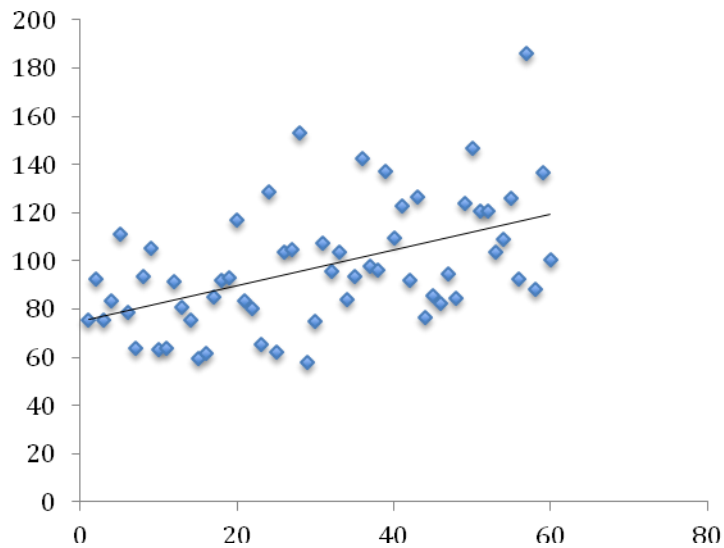


Figura 31 : Tendência Crescente dos Níveis de Concentração de NO<sub>2</sub> nos meses da pesquisa

Apesar de não ter havido ultrapassagem ao padrão CONAMA, o padrão OMS foi violado em números crescentes demonstrando que as variações de precipitação, temperatura, umidade e radiação solar ocorridas nesse período, bem como o nível de emissões, determinaram as alterações na qualidade do ar da área em estudo.

A Tabela 23 resume os episódios de ultrapassagem do padrão OMS apresentados no decorrer dessa análise. Vale ressaltar que em nenhum mês dessa pesquisa os episódios agudos de poluição do ar (EAPA) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/1990, foram ultrapassados.

Tabela 23: Ultrapassagem do Padrão OMS nos Mês da Pesquisa

MÊS	OMS
Fevereiro	04
Março	02
Abril	02
Maio	09

Junho	08
Julho	07

Apesar de não ser o mais poluente, o mês de maio teve um número maior de violações dos padrões de qualidade do ar.

O número total de dias e de horas validados e analisados foram, 95 dias e 941 horas, distribuídos conforme a Tabela 24.

Tabela 24: Dias e Horas Analisados e Validados

<b>Mês</b>	<b>Número de Dias</b>	<b>Número de Horas</b>
<b>Fevereiro</b>	17	234
<b>Março</b>	10	106
<b>Abril</b>	09	111
<b>Mai</b>	21	154
<b>Junho</b>	16	156
<b>Julho</b>	22	180
<b>Totais</b>	95	941

As médias encontradas para as concentrações do poluente NO<sub>2</sub> nos seis meses da pesquisa demonstram que a menor média coube ao mês de março, talvez não por ter sido o menos poluído, mas por ter um número menor de dados horários. Também se ressalta que os meses mais chuvosos, Fevereiro, Março e Abril tiveram concentrações inferiores a 100 ppb. O mês de maio, com chuvas menos frequentes, apresentou concentrações mais elevadas. O mês de Junho revelou os maiores níveis de NO<sub>2</sub> e o mês de julho expôs níveis inferiores ao padrão OMS, possivelmente pela maior insolação registrada (Tabela 25).

Tabela 25: Médias das Concentrações do NO<sub>2</sub> nos Seis Meses da Pesquisa (ppb)

<b>Meses</b>	<b>Dias Avaliados</b>	<b>Concentração Média</b>
--------------	-----------------------	---------------------------

<b>Fevereiro</b>	16	96,38
<b>Março</b>	10	93,03
<b>Abril</b>	09	96,62
<b>Mai</b>	21	104,38
<b>Junho</b>	12	106,99
<b>Julho</b>	15	100,11

#### 3.2.4 Análise da Variabilidade das Concentrações em Função das Condições de Dispersão

Como se avaliou no início dessa análise, as condições meteorológicas que influenciam a dispersão dos poluentes NO e NO<sub>2</sub> na atmosfera, não apresentam um padrão de comportamento específico para as estações do ano como acontece nas Regiões Temperadas e no sul do país (No inverno, temperaturas baixas, pouca insolação e raras precipitações. No verão, radiação solar intensa, muita chuva e temperaturas elevadas). Em Manaus, as duas únicas “estações”, podem ocorrer num mesmo dia, embora, alguns parâmetros possam ser um pouco menos intensos ou amenos no “inverno” ou no “verão” com resultados significativos para a poluição do ar.

Existe uma grande interação entre a energia proveniente do sol, as precipitações, o vento e as concentrações dos poluentes que são emitidos para a atmosfera, pois dependendo da “estação do ano”, esses fatores incluindo a temperatura e a umidade são condições importantes para a dispersão dos poluentes na cidade de Manaus. O comportamento diário dos gases NO e NO<sub>2</sub>, apresentou, algumas vezes, uma elevação na concentração durante a madrugada. Isso acontece porque o período noturno é o mais desfavorável à dispersão, devido à redução da Camada Limite Planetária.

Investigando-se a importância da pluviosidade verificou-se que os dias mais favoráveis à dispersão foram os dias chuvosos, diminuindo significativamente a concentração do NO<sub>x</sub>. Foi

observado com certa regularidade nos meses chuvosos, um comportamento inversamente proporcional, isto é, muita precipitação significa baixa concentração do poluente e vice-versa, quando não chove, os poluentes apresentam geralmente os seus máximos de concentração.

As exceções podem estar relacionadas à influência simultânea de outros fatores como temperatura, insolação, umidade (fenômenos físicos) ou a presença no ar de substâncias oxidantes que interferem no equilíbrio químico (fenômenos químicos). Isso porque o fator pluviosidade, como, aliás, todos os fatores que influenciam nos fenômenos atmosféricos, não são absolutos nem atuam isoladamente, mas em conjunto com os demais parâmetros.

Por outro lado, a disponibilidade da radiação solar e a grande quantidade de vapor d'água são importantes, pois favorecem a alta reatividade química na atmosfera amazônica provocando a alternância dos níveis de NO e NO<sub>2</sub> (ARTAXO, 2005).

Tem-se aí, os dois principais fatores que contribuem para os maiores ou menores níveis de NO<sub>x</sub>: (i) A radiação solar que fotolisa o NO<sub>2</sub>; e (ii) Os radicais oxidantes que oxidam o NO a NO<sub>2</sub> e que por sua vez dependem da disponibilidade de vapor d'água na atmosfera.

A influência da radiação solar foi notada em todos os meses avaliados, com maior intensidade no mês de julho. Verificou-se que, com energia solar suficiente, o NO<sub>2</sub> sofreu fotólise, porém na ausência de insolação ou na falta de um condicionante capaz de dispersar os poluentes (chuva ou vento), as elevadas temperaturas parecem contribuir para que permaneçam por mais tempo na atmosfera.

Logo, a radiação solar interfere no equilíbrio durante o período de insolação mas não parece ser o principal parâmetro a determinar a maior ou menor concentração dos NO<sub>x</sub> na atmosfera da cidade de Manaus, ou pelo menos não o é durante a estação das chuvas.



Na estação seca, os valores da radiação solar são muito elevados o que fornece condições para reduzir os níveis de NO<sub>2</sub> devido à fotólise. Isso, porém, nem sempre ocorre por causa da nebulosidade que é intensa nesta região durante todos os meses do ano. Segundo um estudo realizado na Região Amazônica por Moura (2004, pag. 3), no período diurno, a concentração do NO<sub>2</sub> depende da nebulosidade, no entanto é muito difícil selecionar dias claros e dias nublados, pois “todos os dias apresentam uma quantidade elevada de nuvens”.

Também, em todos os dias analisados, a nebulosidade parece ter sido um fator limitante para a intensidade da radiação solar incidente, pois as nuvens refletem e absorvem parte dessa radiação, portanto, o aumento da nebulosidade no decorrer do dia, reduz a radiação incidente nas camadas inferiores da atmosfera.

A influência da umidade relativa do ar também foi verificada quanto à diluição dos poluentes. Com comportamento contrário à temperatura, no período chuvoso, a umidade relativa é mais alta que nos meses secos, quando as temperaturas se elevam. Esse fato sugere que maiores temperaturas e menor umidade relativa contribuíssem para as crescentes concentrações dos NO<sub>x</sub> durante os meses desta pesquisa. A temperatura, embora não tenha variado muito no decorrer dos seis meses, interferiu nas concentrações dos poluentes, pois, como afirma Primo (2005), a velocidade das reações químicas que não são iniciadas pela luz, sofre a influência da temperatura.

Como as chuvas são mais raras no período da seca (verão), pode-se considerar que a radiação solar e as altas temperaturas passam a representar os fatores meteorológicos de maior importância para o estudo da variação das concentrações do NO<sub>2</sub> durante essa época. Além disso, por falta de precipitação, as concentrações dos poluentes na atmosfera tendem a ser mais elevadas e o período é mais crítico em relação à qualidade do ar. Essa realidade é bem

diferente da realidade verificada em outras regiões do país, onde o inverno apresenta altas concentrações de poluentes.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

*A vida inventa!  
A gente principia as coisas,  
no não saber porque,  
e desde aí perde o poder de continuação  
porque a vida é mutirão de todos  
por todos remexida e temperada*

*(João Guimarães Rosa)*

Quando se trata do ar atmosférico é impossível estabelecer fronteiras, pois a vida em todo o planeta se sustenta na qualidade dos ecossistemas e nas interrelações entre eles. A presença no ar, de matéria ou formas de energia que possam causar danos de qualquer natureza é mais do que uma definição simplista de poluição, precisa ser tomada como um alerta e como motivação para a criação e implementação de programas de monitoramento ambiental.

O nível de poluição atmosférica é determinado com base na quantificação dos poluentes presentes no ar e nas condições meteorológicas responsáveis pela maior ou menor dispersão dessas substâncias. Isso porque quando as substâncias poluentes são emitidas para a atmosfera passam a sofrer a influência da meteorologia local. Fatores como pressão, temperatura, umidade, velocidade dos ventos, além da topografia da região, variam no tempo e no espaço, e, como consequência, a dispersão dos poluentes na atmosfera também varia regionalmente e sazonalmente. Por essa razão, concentrações elevadas de poluentes não significam que houve excesso de emissões.

O clima quente e úmido do Amazonas difere das outras regiões do país por apresentar umidade e temperaturas elevadas durante quase todo o ano. Chuvas abundantes ocorrem com frequência sazonal, episódios de enchentes que inundam e fertilizam a terra e episódios de

seca que complicam o cotidiano do homem amazonense o qual se alimenta da pesca e se comunica através das inúmeras vias fluviais. Essas características se devem à posição geográfica da região (próxima à linha do Equador) e à presença de rios caudalosos e da floresta tropical úmida muito importante para o ciclo do carbono.

Outra extraordinária diferença climática, em relação às demais regiões brasileiras, é a velocidade do vento que, neste recanto equatorial do planeta, não se movimenta como em outras paragens de clima temperado, dificulta a diluição dos poluentes e, conseqüentemente, aglomera concentrações maiores na atmosfera. Se, como ocorre com o bairro do Mauazinho, várias fontes de emissão se localizam numa mesma área, é de se esperar níveis elevados na concentração dos poluentes e possivelmente problemas sérios com a qualidade do ar para as pessoas que ali residem.

Esta pesquisa destacou essas e outras diversidades que a cidade de Manaus apresenta, tanto pela posição geográfica que ocupa em relação às outras cidades de outros Estados brasileiros, como pela posição no globo terrestre em relação ao sol, fatores esses que lhe dão características especiais.

O elevado número de UTE's na cidade tem trazido preocupações quanto às prováveis conseqüências desse crescimento na qualidade do ar ambiental, pois os poluentes liberados durante o processo de combustão estão na origem de vários impactos ao ambiente e à saúde humana. Adicionalmente, como ficou demonstrado no decorrer deste estudo, o bairro do Mauazinho possui um ingrediente a mais que pode comprometer a qualidade do ar: o maior número de termelétricas em relação aos outros bairros ou regiões da cidade de Manaus.

Os NOx, por exemplo, em elevadas concentrações, poderão sofrer reações durante o seu trajeto pela atmosfera, e como foi detalhado nesta análise, podem produzir outros compostos

identificados como poluentes secundários. A participação antropogênica desses óxidos na atmosfera inicia nos processos de combustão com a formação do óxido nítrico e continua através do equilíbrio químico entre o NO e o NO<sub>2</sub>, isto é, entre a reação de oxidação do NO e a reação de fotólise do NO<sub>2</sub>. O mecanismo dessas reações, e as variações que podem ocorrer na presença dos compostos orgânicos voláteis, são complexos e sofrem a influência de vários outros fatores, principalmente a energia do sol, que é quase sempre uma constante nos dias amazônicos.

Os óxidos de nitrogênio são precursores do ozônio troposférico, um oxidante fotoquímico muito poderoso, cuja formação depende da intensidade de radiação solar, da concentração dos NO<sub>x</sub> e dos COVs presentes na atmosfera. Períodos nublados são comuns na cidade de Manaus e apresentam pouca intensidade de radiação solar. No entanto, durante o tempo de insolação supõe-se que a radiação solar favoreça a reação de fotólise do NO<sub>2</sub>, podendo levar ao aumento da concentração do ozônio na troposfera.

Em Manaus, a energia proveniente do sol varia muito durante o dia, podendo se apresentar no decorrer de 12 horas, nublado durante algumas horas, chuvoso ou ensolarado em outras. Esse fato determina variações, também, nas concentrações de NO<sub>2</sub> na atmosfera.

Durante o horário noturno estendendo-se pela madrugada, a ausência dos processos fotoquímicos na remoção do NO<sub>2</sub> e a contínua emissão de NO<sub>x</sub> no início da noite (horário de pico) para a atmosfera, possivelmente determinaram o aumento das concentrações do poluente. Além disso, duas outras explicações podem ser aventadas: as inversões térmicas e a diminuição da Camada Limite Planetária que indicam condições desfavoráveis à dispersão dos poluentes durante a noite.

Também é possível atribuir a presença significativa de NOx na atmosfera, às condições operacionais da geração de energia elétrica que, ocasionalmente, podem alterar as características da emissão. Portanto, a ocorrência de grandes picos pode estar diretamente associada à condição operacional das máquinas naquele momento de queima do combustível.

Os valores encontrados para as concentrações de NOx foram elevados considerando que se trata de uma área sem grande fluxo de veículos. Pelo fato de ser intensamente impactada pelas UTE's, é de se supor a maior contribuição termelétrica, mas por outro lado, impõe-se a necessidade da elaboração de um inventário das fontes de poluição em toda a cidade para identificar outras possíveis procedências. O inventário de emissões deve conter as fontes de poluentes atmosféricos existentes em cada região da cidade e as respectivas contribuições para o total de emissões geradas.

Afinal, a avaliação da qualidade do ar não é tão-somente uma questão de medição dos poluentes presentes na atmosfera, nem mesmo a explicação, ainda que convincente, das causas da poluição, é um processo que envolve também a identificação das fontes que causam os efeitos observados e a previsão de impacto das fontes que se planeja instalar. Por esse motivo além do monitoramento propriamente dito, para atuar no controle e redução das emissões é necessário conhecer todas as interrelações que envolvem o problema da poluição e as principais ferramentas que podem auxiliar nesse processo são o monitoramento, o inventário das emissões e a modelagem da qualidade do ar.

Isso só será possível com um Programa de Gestão da Qualidade do Ar que tenha, como meta primeira, além da elaboração do inventário de fontes de emissões e a aquisição e instalação de uma rede de Monitoramento da Qualidade do Ar, um programa de modelagem. Aliado a essas atividades, um Programa Educacional que oriente e divulgue as informações é um coadjuvante

importantíssimo na promoção do bem estar, considerando que os problemas da poluição do ar, água e de todos os ecossistemas planetários é responsabilidade de cada cidadão desse mundo.

Também se mostrou que a influência diária das condições climáticas específicas da região amazônica no processo de dispersão e concentração dos poluentes demanda um tratamento diferenciado com respeito ao gerenciamento da qualidade do ar e ao controle da poluição na capital Amazonense. Essa situação é tanto mais real em decorrência da maior concentração de habitantes em relação aos outros municípios do Estado, do crescimento da demanda energética e do aumento da frota veicular.

Na impossibilidade de estabelecer uma relação direta entre as imissões de NO<sub>x</sub> (concentrações encontradas no ar atmosférico) e as atividades relacionadas ao fornecimento de energia, resta refletir sobre o fato de que quaisquer que sejam as fontes de poluição, os danos sobre a cidade de Manaus e seus habitantes ainda são desconhecidos pela população.

Os resultados obtidos neste estudo assinalam para a necessidade de se expandir a pesquisa para outras áreas da cidade de Manaus, também sobre a influência de termelétricas, embora em termos quantitativos possam ser menos impactantes. Ainda nesse sentido, há que ser levada em conta igualmente, a substituição da matriz energética pelo gás natural a qual tem sido vista como uma saída salvadora. No entanto, os óxidos de nitrogênio que se formam durante qualquer combustão, aliados às emissões fugitivas de metano, principal componente do gás natural, podem vir a ser mais perigosos no futuro do que o CO<sub>2</sub>, considerado hoje, o vilão do aquecimento global. Essas informações podem ser importantes para nortear políticas urbanas e estudos de localização de novas fontes potencialmente poluidoras.

No momento atual de expansão da geração termelétrica, a legislação ambiental precisa ser revista para estabelecer fatores de emissão representativos da realidade nacional e regional. A

Resolução nº 03 de 1990 está defasada nacionalmente porque não contempla todos os poluentes e porque os padrões estabelecidos não mais traduzem as necessidades geradas pelo desenvolvimento acelerado. E com respeito à cidade de Manaus a revisão e atualização da norma é indispensável por dois motivos principais, além, obviamente do aumento do tráfego na cidade: o tipo de geração de energia elétrica predominantemente termelétrica e o tipo de clima.

Não se pretendeu, com esta pesquisa, esgotar as possibilidades do estudo dos NO<sub>x</sub> na atmosfera da cidade de Manaus, nem mesmo na região que foi objeto deste estudo. Este trabalho deverá continuar através do NIEMA e de parcerias que possivelmente se somarão aos esforços de seus pesquisadores. Como exemplo, o monitoramento dos óxidos de nitrogênio concomitante ao do ozônio e compostos orgânicos voláteis é imprescindível para o melhor esclarecimento do comportamento desses compostos na atmosfera. Os projetos de “Qualidade do Ar” desenvolvidos pelo NIEMA podem trazer essas respostas futuramente.

Existem incertezas agregadas aos dias em que não foi possível obter medições. Essas incertezas poderiam ter sido reduzidas se o fornecimento de energia na cidade fosse mais estável e se os recursos financeiros oriundos do CNPq, cobrissem os gastos com assistência dos equipamentos. Muito tempo foi gasto com telefonemas e *e-mails* para a empresa representante dos monitores em busca de orientação. Esses problemas fazem parte das dificuldades frequentemente enfrentadas por pesquisas realizadas na região Amazônica e traduzem o esforço que os pesquisadores das Universidades vivenciam.

A cidade de Manaus está inserida no meio da floresta amazônica, isolada do ponto de vista político, físico e energético e talvez, por essa razão não se dê muita importância às demandas ambientais mais valorizadas nos centros de maior desenvolvimento do país. Políticas Públicas



de Meio Ambiente exigem grandes investimentos, tanto do setor público como privado. Ocorre que as regiões em desenvolvimento têm prioridades para ações que, ao contrário, estimulam a poluição. Criam-se com isso, muitas contradições, cujas soluções não passam simplesmente pelo esforço na produção de leis, decretos e demais atos normativos, valendo observar que os modelos de políticas ambientais criados nessas regiões são ditados por realidades de desenvolvimento estranhas à realidade local.

É digno de elogios o trabalho que a equipe do NIEMA executa, principalmente quanto à gestão dos projetos de qualidade do ar e esta pesquisa retrata apenas uma pequena amostra do que pode e está sendo feito em termos de monitoração, avaliação e diagnóstico do nível de qualidade da atmosfera na cidade de Manaus. Espera-se, com a continuação das atividades, abrir uma janela para a discussão dos problemas da poluição que não persista nas tentativas de soluções alienígenas e que atendam às necessidades locais contando com ampla participação dos setores da sociedade como a iniciativa privada, o poder público, as organizações sociais e as não governamentais. É importante que novos experimentos sejam feitos, inclusive com a participação de técnicos da área de saúde para melhor compreensão dos possíveis efeitos no bem-estar das pessoas.

Finalmente, espera-se que este trabalho reforce a consciência ambiental de tantos que se dispuserem, pacientemente, a ler seu conteúdo. Existe tecnologia para monitorar e controlar as emissões de forma a não colocar em risco a vida da biosfera. No entanto, tal como afirma Mozeto (2001), nenhum programa de monitoração alcançará esses objetivos sem a valorização da ciência ambiental e sem uma cobrança exigente e especializada da sociedade.

## REFERÊNCIAS

AFONSO, Júlio Carlos; SILVA, Raquel Medeiros. A Evolução da Balança Analítica. In: *Química Nova*, Assuntos Gerais, Vol. 27, nº 6, p. 1-21-1027, 2004.

ALBERTIN, Ricardo; ARRIBAS, Marco A.G.; BASTOS, Erick L.; RÖPKE, Sascha; SAKAI, Patrícia N. SANCHES, Audrey M.M.; STEVANI, Cassius V. UMEZU, Ilda S.; YU, Joana; BAADER, Wilhelm J. Quimioluminescência Orgânica: Alguns Experimentos de Demonstração para a Sala de Aula. In: *Química Nova*, 2 (6), 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v21n6/2912.pdf>. Acesso em 05.01.2012.

ALKMIN, José Tadeu Diniz. *Potencial de Cogeração no Estado do Amazonas* Série Sistemas Energéticos V. Manaus: EDUA, 2000. 217p.

ALVES, Célia; PIO, Casimiro; GOMES, Paulo. Determinação de Hidrocarbonetos Voláteis e Semi-Voláteis na Atmosfera. *Química Nova*, Vol. 29, No, 3, 477-488, 2006.

ALVIM, D.S.; GATTI, L.V.; MACHADO, S.C.; DOMINGUES, L.G.; YAMAZAKI, A.; VILARRUBIA, A.C.F.; FRANCO, M.A.A.. Determinação da Emissão Veicular de Compostos Orgânicos Voláteis em Túnel Viário na Cidade de São Paulo. In: 49º Congresso Brasileiro de Química. *A Química e a Sustentabilidade*. Porto Alegre, 2009.

ARAGÃO, Maria José. História da Química. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. ISBN 978-85-7193-199-2.

ARAÚJO, Joel de. Estado, Educação e Cidadania: Vetores de Reflexão em Busca da Sustentabilidade na [NOVA] Ordem. In: *Educação Ambiental em Ação*, nº 6. 17 de setembro, 2003.

ARTAXO, Paulo; GATTI, Luciana V.; LEAL, Ana M. Córdova; LONGO, Karla M.; FREITAS, Saulo R. de; LARA, Luciene L.; PAULIQUEVIS, Theotonio M.; PROCÓPIO, Aline S.; RIZZO, Luciana V. *Química Atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica*. Acta Amazonica, v. 35, n.2, p. 184-196, 2005.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. *Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. Porto Alegre: Bookman, 2006, 968p. ISBN 85-363-0668-8.

BAIRD, Colin. *Química Ambiental*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BATISTA, Vinícius Pereira. *A Relação entre o Consumo e a Escassez dos Recursos Naturais: uma Abordagem Histórica*. Universidade UNIGRANRIO. Faculdade de Economia e Finanças do Rio de Janeiro. Saúde & Amb. Rev., Duque de Caxias, v.5, n.1, p.08-14, jan-jun 2010.

BEN. Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética, 2008. Ano base 2007. Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2008. 44p.

\_\_\_\_\_. Balanço Energético Nacional. Resultados Preliminares. Empresa de Pesquisa Energética. Ano Base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 54p.

\_\_\_\_\_. Balanço Energético Nacional. Resultados Preliminares. Empresa de Pesquisa Energética. Ano Base 2011. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 51p.

BRAGA, Benedito et al. *Introdução à engenharia ambiental*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRANCO, Gabriel Murgel; BRANCO, Adriano Murgel; BRANCO, Fábio Cardinale; MARTINS, Márcio Henrique Bernardes. Perspectivas de alteração da Matriz Energética do Transporte Público Urbano por Ônibus. Questões Técnicas, Ambientais e Mercadológicas. Environmental – Tecnologia com conceitos ambientais Ltda. São Paulo, dezembro, 2009

BRASIL. Decreto nº 6.0747 de 22 de fevereiro de 2007. Institui a Política Nacional de Desenvolvimento Regional - PNDR e dá outras providências. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6047.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6047.htm). Acesso em 23.03.2012.

BRÜSEKE, Franz Josef. Pressão modernizante, Estado territorial e sustentabilidade. In: CAVALCANTI, Clovis (Org). Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas. São Paulo: Cortez, 1997.

CAMARGO, Ademir J.. Química Quântica. Notas de Aula. Universidade Estadual de Goiás – UEG. Copyright, 2007-2012. Disponível em: [http://www.fisica.ueg.br/ademir/aulas/Apostila\\_quimica\\_quantica\\_V3.pdf](http://www.fisica.ueg.br/ademir/aulas/Apostila_quimica_quantica_V3.pdf). Acesso em: 23.03.2012.

CANDIANI, Giovano; GONZALEZ, Mariana Pedrosa e GUERRA, Sinclair Mallet Guy. Rumo a um Futuro Energético Sustentável? In: *Novas Trajetórias Energéticas*. Santo André: Biblioteca Virtual de Derecho, Economia y Ciências Sociales. Setembro, 2009. Disponível em: <http://www.eumed.net/libros/index.htm>. Acesso em 23.01.2010.

CANDIDO, Luiz Antonio; MANZI, Antonio Ocimar; TOTA, Júlio; SILVA, Paulo Ricardo Teixeira da; SILVA, Frérida Seixas Moreno da; SANTOS, Rosa Maria Nascimento dos; CORREIA, Francis Wagner Silva. O clima atual e futuro da Amazônia nos cenários do IPCC: a questão da savanização. *Cienc. Cult.* [online]. 2007, vol.59, n.3, pp. 44-47. ISSN 0009-6725.

CARDOSO, Alexandre N.; SAMINEZ, Tereza C.; VARGAS, Milton A. Fluxo de gases-traço de Efeito Estufa na Interface Solo/Atmosfera em solos de Cerrado. In: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 17. EMBRAPA, novembro, 2001.

CARTAXO, Elizabeth; COELHO, Ilsa Valois; PAIXÃO, Vladimir. Sustentabilidade do programa “Luz Para Todos” no estado do Amazonas. Revista Brasileira de Energia. Vol. 12. N. 01. Ano 2006.

\_\_\_\_\_; ROCHA, Leonardo; FROTA, Whylker. Quantificação preliminar dos níveis de emissões de dióxido de carbono das Unidades Termelétricas a óleo combustível e óleo DIESEL no município de Manaus no período de 2006 a 2010. de Tecnologia, UFAM. Trabalho apresentado à Disciplina “Energia e Meio Ambiente”.

CARBONE, Samara. Modelagem de Ozônio Troposférico em Regiões Urbanas – Aperfeiçoamento do Módulo Químico no Modelo CIT. Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Departamento de Ciências Atmosféricas. Dissertação de Mestrado, Junho, 2008.

CARVALHO JR, João Andrade; LACAVALA, Pedro Teixeira. *Emissões em processo de combustão*. São Paulo: UNESP, 2003.

CARVALHO, V. S. B. ; WALDHEIM, P. V. ; MAIA, L.F.P.G. . Primeira Campanha de Monitoramento da Qualidade do Ar no Município de Belford Roxo Utilizando o Sistema DOAS. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. PABSP5 – Poluição Atmosférica, Queimadas, Biometeorologia e a Saúde Pública.

CAVALCANTI, Paulina Maria Porto Silva. Modelo de Gestão da Qualidade do Ar – Abordagem Preventiva e Corretiva. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE. Tese de Doutorado, 2010.

CILENTO, Giuseppe. Fotobioquímica Escura. In: Divulgação. Química Nova 16 (6), 1993.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no

CONSEMA. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Conselho do Meio Ambiente aprova novos padrões de medição da qualidade do ar em SP. In: Envolverde, Jornalismo & Sustentabilidade, 27.05.2011. Disponível em: <http://envolverde.com.br/saude/qualidade-do-ar/conselho-de-meio-ambiente-aprova-novos-padroes-de-medicao-da-qualidade-do-ar-em-sp/>. Acesso em 15.03.2012.

CORREIA, José de Castro. Atendimento energético a pequenas comunidades isoladas: barreiras e possibilidades. In: *T&C Amazônia*, Ano III, Número 6, Janeiro de 2005.

CORREIA, Rosângela. Avaliação das Emissões Atmosféricas de Compostos Nitrogenados (NOx) e das Fontes Potenciais de Emissão em Refinarias de Petróleo: estudo de caso na Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão. Universidade Federal Fluminense. Centro

Tecnológico. Laboratório de Tecnologia, Gestão de Negócios e Meio Ambiente – LATEC. Dissertação de Mestrado, 2004.

\_\_\_\_\_; BARROS, Angela Maria; FERAUCHE, Rodrigo Paiva. Gestão Integrada: emissões atmosféricas e energia. In: IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 31 de julho a 02 de agosto, 2008.

D'AMÉLIO, Mônica Tais Siqueira. Estudo de Gases de Efeito Estufa na Amazônia. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, 2006.

DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. Poluição do Ar Como Causa de Morbidade e Mortalidade da População Urbana. In: R.Raega, Curitiba, n.15, p.113-126, 2008.

DE NEVERS, Noel - Air Pollution Control Engineering. New York: Mc Graw Hill, 2000. 506 p.

DETRAM. Departamento Estadual de Trânsito do Amazonas. Gerência de Engenharia e Estatística. Veículos por Tipo e Procedência. 2009/2010.

ECHER, E.; SOUZA, M. P. and SCHUCH, N. J.. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. *Rev. Bras. Ensino Fís.* [online]. 2001, vol.23, n.3, pp. 276-283. ISSN 1806-1117. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172001000300004>.

FARIAS, Luciana A.; FÁVARO, Déborah I. T.. Vinte Anos de Química Verde. Conquistas e Desafios. In: Assuntos Gerais, *Química Nova*, Vol. 34, nº 6 p. 1089-1093, 2011.

FELLENBERG, Günter. Introdução aos problemas da poluição ambiental. Trad. Juergen Heinrich. São Paulo: EPU: Editora da Universidade de São Paulo, 1980.

FILGUEIRAS, C. A. L.; Espectroscopia e Química. *Química Nova na Escola* 1996, nº 3, p. 22-25.

GARCIA, Roberto. Combustíveis e combustão industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GARCIA, Etelvina Norma. *Zona Franca de Manaus: história, conquista e desafios*. Manaus: Norma ed. Suframa, 2004. 230p.

GOLDENBERG, José; LUCON, Oswaldo. *Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento*. 3.ed. rev. ampl. – São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

GONÇALVES, N.M.S. Impactos pluviais e desorganização do espaço urbano em Salvador. In: MENDONÇA, F.de A.; MONTEIRO, C.A.F. (Orgs.). *Clima Urbano*. São Paulo-SP: Contexto, 2003.192p.

GONZATTI, Sônia Elisa Marchi; SARAIVA, Maria de Fátima O.; RICCI, Trieste Freire. Um curso introdutório à astronomia para a formação inicial de professores de ensino fundamental, em nível médio. Programa de Pós-Graduação em ensino de Física. UFRGS, v. 19, n. 3, 2008. ISSN 1807-2763.

HALL, Antony. *Amazônia: desenvolvimento para quem?* Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991. 304p.

HÉMERY, Daniel; DEBEIR, Jean-Claude; DELÉAGE, Jean-Paul. *Uma História da Energia*. Edunb – Editora Universidade de Brasília. Brasília, 1993.

HIGSON, Séamus P. J.. *Química Analítica*. Trad. Mauro Silva. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-85-7726-029-4.

HILSDORF, Jorge Wilson; BARROS, Newton Deleo de; TASINARI, Celso Aurélio; COSTA, Isolda. *Química Tecnológica*. São Paulo: Cengage Learning, 2009. ISBN 85-221-0352-6.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; REIS, Lineu Belico dos.. *Energia e Meio Ambiente*. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de Dados, Estados e Cidades. ESTIMATIVAS DAS POPULAÇÕES RESIDENTES, EM 1º DE JULHO DE 2009, SEGUNDO OS MUNICÍPIOS. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2009/estimativa.shtm>. Acesso em 20.09.2010.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Estações Convencionais, Gráficos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php>. Acesso em: 13.06.2011.

JUNQUEIRA, T. L.; ALBUQUERQUE, E, L.; TOMAZ, E. Estudo sobre compostos orgânicos voláteis em Campinas-SP. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. UNICAMP, 2005

KAMPEL, Silvana Amaral; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira. Análise espacial do processo de urbanização da Amazônia. Relatório técnico, dezembro, 2001.

KERR, J.B. e MCELROY, C.T. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, v. 262, p. 1032-1034, 1993.

KIRCHHOFF, V.W.J.H., CASICCIA S, C.A.R., E ZAMORANO B, F., The Ozone Hole over Punta Arenas, Chile, *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 8945-8953, 1997.

KURZ, Robert. *O combustível da máquina mundial: a crise do petróleo*. Folha de São Paulo: 11/jul/2004. Disponível em: [http://www.resistir.info/energia/Kurz\\_petróleo.html](http://www.resistir.info/energia/Kurz_petróleo.html). Acesso em: 15.04.2005.

LAVOISIER, Antoine-Laurent. *Tratado Elementar de Química*. Trad. Fulvio Lubisco. São Paulo: Madras, 2007. ISBN 978-85-370-0140-0.

LAZARA, Fábila. *REPORTAGEM ESPECIAL: Refém do diesel, Amazonas busca alternativas para geração elétrica*. Rede Brasileira de Jornalismo Ambiental. AmbienteBrasil, 2009. Disponível em: <http://noticias.ambientebrasil.com.br/exclusivas/2008/01/17/35866-reportagem-especial-refem-do-diesel-amazonas-busca-alternativas-para-geracao-eletrica.html>. Acesso em 20.09.2010.

LEIS, Hector R. *Modernidade Insustentável: crítica do ambientalismo à sociedade contemporânea*. Centro Latino Americano de Ecologia Social (CLAES). Montevideo: Coscoroba, 2004.

LEIS, Hector R. *Ambientalismo: um projeto realista-utópico para a política mundial*. In: *Meio ambiente, desenvolvimento e cidadania: desafios para as Ciências Sociais*. 3.ed. São Paulo: Cortez, 2001. 220p.

LENZI, Ervim; FAVERO, Luzia Otilia Bortotti. *Introdução à Química da Atmosfera: Ciência, Vida e Sobrevivência*. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1633-7.

LIBERATO, Ailton Marcolino; BRITO, José Ivaldo Barbosa. *Influência de Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico da Amazônia Ocidental*. In: *Revista Brasileira de Geografia Física*, 03, 2010, p. 170-180.

LIMA, Ed Pinheiro; GIMENES, Marcelino Luiz; MOTA LIMA, Oswaldo Curty da. *Estimação das emissões originadas de veículos leves na cidade de Maringá para o ano de 2005*. *Acta Scientiarum Technology*. Maringá, Vol. 31, No 1, 2009. DOI: 10.4025/actascitechnol.v31i1.6864.

LOPES, R. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; DONZELES, S. M. L. *Controle da combustão em fornalhas a lenha*. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas, 2003

LYNAS, Mark. *Seis Graus: o aquecimento global e o que você pode fazer para evitar uma catástrofe*. Trad. Roberto Franco Valente. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2008. ISBN 978-85-378-0105-5.

LOUREIRO, Kelly; CARLO, Joyce; LAMBERTS, Roberto. *Estudos de Estratégias Bioclimáticas para a Cidade de Manaus*. In: *ENTAC 2002*. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu. Paraná-Brasil. 7 a 10 de maio de 2002.

LOVELOCK, James. *A Vingança de Gaia*. Trad. Ivo Korytowski. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006. ISBN 85-98078-16-6.

MAIOLI, Otavio Luiz Gusso; NASCIMENTO, Gilsiane Nogueira. *Composição da Atmosfera, Ciclos Globais e Tempo de Vida*. Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Vitória, 2005. Disponível em <<http://www.ambiente.com.br/main.php?ver=artigo&id=7>>. Acesso em 08.02.2012.

MANAHAN, Stanley E. *Environmental Chemistry*. Estados Unidos da América: CRC Press, 2005.

MARINHO, Najara da Silva. *Mapeamento da Distribuição de Dióxido de Nitrogênio na Cidade de Manaus*. Programa de Pós-Graduação em Química - PPGQ. Universidade Federal do Amazonas – UFAM. Dissertação de Mestrado, 2007.

MARQUES, Valdo S. O efeito estufa e o aquecimento global. *Anu. Inst. Geocienc.*, 1992, vol.15, p.93-106. ISSN 0101-9759.

MARTINS, Claudia Rocha; PEREIRA, Pedro Afonso de P.; LOPES, Wilson Araújo; ANDRADE, Jailson B. de. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a importância da Química da Atmosfera. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*. N. 5, novembro, 2003.

MARTINS, Dirceu de Oliveira. *Estudo do Controle de Emissões de Compostos Orgânicos voláteis em Tanques de Armazenamento de Produtos Químicos*. Universidade Federal da Bahia. Deptº de Engenharia Ambiental. Dissertação de Mestrado, 2004.

MARTINS, Leila Droprinchinski. *Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo*. Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Departamento de Ciências Atmosféricas. São Paulo, 2006.

MARTINS, Samantha. *A Atmosfera. Meteoropole*, 2011. Disponível em: [www.meteoropole.com.br](http://www.meteoropole.com.br). Acesso em 06.04.2011.

MELO, Gilberto Caldeira Bandeira de; MITKIEWICZ, Grace Fátima Miranda. *Dispersão Atmosférica de Poluentes em um Complexo Industrial Siderúrgico*. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancun, México, 27 a 31 de outubro, 2002.

MILLER Jr, G. Tyler. *Ciência Ambiental*. Trad. All Tasks. São Paulo: Thomson Learning, 2007. ISBN 85-221-0549-9.

MIÑARRO, Marta Doval. *Evaluación de la Norma UNE EN 14211: 2006 para la medida de*



Óxidos de Nitrogênio em Aire: propuesta de modificaciones. Universidad de Murcia. Facultad de Química. Departamento de Ingeniería Química. Tese de Doutorado, maio/2009.

MORAES, Benedito Tadeu Ferreira. A Fórmula de Planck e o Impacto da Teoria Quântica. Instituto Federal do Pará – IFPA, Belém/PA, 2010. Disponível em:  
<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/706/422>.  
Acesso em: 12.02.2012.

MORETTO, Ligia Maria. A Mudança do Clima Global: o efeito estufa e a diminuição da camada de ozônio. In: Consórcio Inter-Universitário Nacional “A Química para o Ambiente” e IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada, 2007. ISBN: 88-88214-12-7.

MOZETO, Antonio A. *QUÍMICA ATMOSFÉRICA: A Química sobre as nossas cabeças*. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição especial – Maio 2001.

MOURA, M. A. L. ; MEIXNER, Franz X ; CHAGAS, Ericka Voss ; QUERINO, Carlos Alexandre Santos ; MARIANO, Glauber Lopes . ANÁLISE DA FOTÓLISE DE NO<sub>2</sub> EM DIAS CLAROS E NUBLADOS NA AMAZÔNIA CENTRAL. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004. v. unico.

NASCIMENTO, Telma Santos do. Precipitação na Amazônia: análise da variação entre as porções central e ocidental. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009. Disponível em:  
[http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos\\_completos/eixo8/063.pdf](http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo8/063.pdf).  
Acesso em 29.04.2012.

NEBEL, Bernard J., WRIGHT, Richard T., Ciências Ambientais: Ecologia y Desarrollo sostenible. Mexico: Pearson Education, 1999.

NIEMA. Núcleo Interdisciplinar de Energia, Meio Ambiente e Água. Monitoramento da Qualidade Ambiental do Ar no Entorno das Usinas Termelétricas do Amazonas. In: *Relatório Técnico do Projeto ENERAR*. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2011.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. *Uso Racional: a fonte energética oculta*. In: Estudos Avançados, 21 (59), 2007.

O’CONNOR, Rod. Introdução à Química. Trad. Elia Tfouni. São Paulo: Harper & Row do Brasil Ltda, 1977.

OLIVEIRA, Luiz Fernando. Espectroscopia Molecular. In: Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, nº 4, maio, 2001.

OLIVEIRA, Maria Betânia Leal de; RANDOW, Celso von; MANZI, Antonio Ocimar. Variabilidade Interanual e Sazonal da Precipitação e Evapotranspiração na Amazônia Central. Universidade do Estado do Amazonas – UEA/EST. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

– CCST/INPE, 2010. Disponível em:

[http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/774\\_54896.pdf](http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/774_54896.pdf). Acesso em 23.03.2012.

OLIVEIRA, Julieta Saldanha de; MARTINS, Marcio Marques; APPELT, Helmoz Rosemiam. Trilogia: Química, Sociedade e Consumo. In: Química Nova na Escola. Química e Sociedade. Vol. 32, nº 3. Agosto, 2010.

OLIVEIRA, Andréa Marins de; PERGHER, Sibebe Berenice Castellã; MORO, Celso Camilo *et al.* Nitric oxide decomposition on copper supported on zeolites. Química Nova, 2004, vol.27, n. 2. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422004000200010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000200010&lng=en&nrm=iso). ISSN 0100-4042. Acesso em 23.03.2012.

OLIVEIRA, Jorge Luiz Fernandes; SANTOS, Isimar de Azevedo; LANDAU, Luiz. Diagnóstico Climatológico do Campo do Vento na Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: XII congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu-PR, 2002.

OMS. Organización Mundial de la Saúde. Guías de Calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno, y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de los riesgos. Atualización mundial, 2005.

PACHECO, Maria Raquel Pereira dos Santos and HELENE, Maria Elisa Marcondes. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>. *Estud. av.* [online]. 1990, vol.4, n.9, pp. 204-220. ISSN 0103-4014.

PEREIRA JR, Nei; GOMES, Edelvio de B. e SORIANO, Adriana Ururahy. Biodegradação de Hidrocarbonetos. In: Séries em Biotecnologia. Volume 3. Rio de Janeiro: Escola de Química/UFRJ; FAPERJ; CNPq; PETROBRÁS, 2009.

PINHEIRO, Paulo Cesar e VALLE, Ramon Molina. Controle de Combustão: otimização do excesso de ar. In: Congresso de Equipamentos e automação da Indústria Química e Petroquímica. Agosto, 1995. Rio de Janeiro: IBIQUIM- Associação Brasileira da Indústria Química e Produtos Derivados, 1995, p. 157-162.

PINHEIRO, João Ismael D.; CUNHA, Sonia Baptista da; CARVAJAL, Santiago Ramírez; GOMES, Gastão Coelho. Estatística Básica: a arte de trabalhar com dados. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. ISBN 978-85-352-3030-7.

PION. Ligado na Física. Espectro Eletromagnético, 2010. Disponível em:

<http://pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por/Multimedia/Imagens/Eletromagnetismo/Espectro-eletromagnetico>. Acesso em 23.03.2012.

PIRES, Dilson Ojeda. Inventário de Emissões Atmosféricas de fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ, 2005.

PRETTO, Angélica. O Estudo do Comportamento dos Gases-Traço O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e de COVs na Atmosfera da Cidade de São Paulo. IPEN: Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. 2005. Tese de Doutorado

PRIMO, Kristiane Ramos; SALOMON, Karina Ribeiro; TEIXEIRA, Flávio Neves; LORA, Electo Silva. Estudo de Dispersão Atmosférica dos Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) Emitidos Durante a Queima de Bagaço em uma Usina de Açúcar. In: *Renabio: Biomassa & Energia*, v. 2, n. 1, p.79-90, 2005.

PROCLIRA, Clima e Ambiente. Atmosfera. Módulo 2. Universidade de Évora. Outubro de 2007a. Disponível em: <http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo2.pdf>. Acesso em: 23.03.2012.

\_\_\_\_\_, Clima e Ambiente. Atmosfera Módulo 5. Julho de 2007b. Universidade de Evora. Disponível em: <http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo5.pdf>. Acesso em 24.04.2012.

PROCÓPIO, Argemiro. *L'Amazonie et la Mondialisation: essai d'écologie politique*. Paris: L'Harmattan, 2000.

RIBEIRO, L.S.. O impacto do gás natural nas emissões de gases de efeito estufa: o caso do município do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ. Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Rio de Janeiro, março, 2003.

RIFKIN, Jeremy. *A economia do hidrogênio*. São Paulo: M. Books do Brasil, 2003. 300p.

ROCHA, Julio César; ROSA, André Henrique; CARDOSO, Arnaldo Alves. *Introdução à Química Ambiental*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

RODRIGUES, Arlete Moysés. *Problemática Ambiental: Agenda Política Espaço, território, classes sociais*. Boletim Paulista de Geografia. "Perspectiva Crítica". Nº 83. Dezembro de 2005, p. 91-110. Associação dos Geógrafos Brasileiros. AGB-SP.º

ROSA, Pedro Sérgio. O INÍCIO DA MECÂNICA QUÂNTICA – A NECESSIDADE DE UM NOVO MODELO TEÓRICO. Primeira parte: A Física “Quântica” antes de Einstein. A proposta de Max Planck. In: Revista Sapere. Revista Científica da Faculdade de Tecnologia de Tatuí. Vol 02, Nº 02. Julho a Dezembro de 2010.

SANTOS, D.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I. Materiais e energia. Convenção termoquímica de combustíveis. *Corrosão e Protecção de Materiais*, v. 29, n. 3, p. 78-90, 2010.

SANTOS, Antonio Carlos; PEIXOTO, roberto Aguiar. Efeito da Adição de Etanol à Gasolina na Emissão de Gases do Efeito Estufa. In: *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, pag. 33-41. Janeiro – Dezembro 2008.

SÃO PAULO, Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP. Estação São Caetano do Sul. Diretoria de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental. Departamento de Qualidade Ambiental. Divisão de Qualidade do Ar. Fevereiro, 2002.

SCHIRMER, Waldir Nagel. LISBOA, Henrique de Melo. Química da Atmosfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. In: Tecno-Logia, Vol 12, nº 2008.

SEINFELD, J. H. Air Pollution: A Half Century of Progress. American Institute of Chemical Engineers Journal, v.50, nº6, p. 1096-1108, June 2004.

SILVA, R. G. da. A biometeorologia e o desafio das mudanças climáticas. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/ambiente/biometeorologia/index.htm>. Acesso em: 2/12/2009

SILVA, Antonio José Roque da. *Mecânica Quântica, Ciência Básica e Geração de Riqueza*. Revista Usp, São Paulo, n. 76, p.88-95. Dezembro/Fevereiro, 2007-2008. Disponível em <http://www.revistasusp.sibi.usp.br/pdf/revusp/n76/09.pdf>. Acesso em 22/10/2010

SKOOG, Douglas A., WEST, Donald M., HOLLER, F. James, CROUCH, Stanley R.. Fundamentos de Química Analítica. São Paulo: Thomson Learning, 2007. ISBN 85-221-0436-0.

SPIRO, Thomas G.; STIGLIANI, William M. Química Ambiental. 2.ed. Trad. Sonia Midori Yamamoto. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 978-85-7605-196-1.

STERN, Nicholas. O Caminho para um Mundo Sustentável. Trad. Ana Beatriz Rodrigues. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. ISBN 978-85-352-3611-8.

TEIXEIRA, Elba Calezzo; FELTES, Sabrina; SANTANA, Eduardo Rodrigo Ramos. Estudo das Emissões de Fontes Móveis na Região Metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. In: Química Nova, vol. 31, nº 2. São Paulo, 2008.

THÉRY, Hervé; MELLO, Neil Aparecida. *Atlas do Brasil: disparidades e dinâmicas do território*. Universidade de São Paulo, 2005. 2.ed. 309p

TOLENTINO, Mário; ROCHA-FILHO, Romeu C.. Química no efeito estufa. In: Química e Sociedade. Química Nova na Escola, nº 8, novembro, 1998.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; MACHADO, Pedro José de Oliveira. Introdução à Climatologia. São Paulo: Cengage Learning, 2011. ISBN 978-85-221-1147-3.

UEDA, Ana Claudia; TOMAZ, Edson. Inventário de Emissão de Fontes Veiculares da Região Metropolitana de Campinas, São Paulo. In: Química Nova, Vol. 34, nº 9, p. 1496-1500, 2011.

UNFPA. Fundo de Popularização das Nações Unidas. Pessoas e Possibilidades em um Mundo de 7 Bilhões. In: Relatório sobre a Situação da População Mundial, 2011. Disponível em: <http://www.un.org/files/PT-SWOP11-WEB.pdf>. Acesso em: 23.03.2012.

VALOIS COELHO, Ilsa Maria e CARTAXO, Elizabeth Ferreira. Universalização da Energia Elétrica: uma análise política da distribuição de energia e da sua importância sócio-ambiental para o Amazonas. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Encontro de Energia no Meio Rural, 2004*. Campinas (SP). Available from: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200059&Ing=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200059&Ing=en&nrm=iso)> .

VALOIS, Ilsa. As possibilidades da Educação Ambiental para a Redução do Desperdício de Energia Elétrica na Cidade de Manaus. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade da Amazônia, 2007.

\_\_\_\_\_; CARTAXO, Elizabeth. Aplicabilidade das Leis e Normas do Setor Elétrico Brasileiro nos Estados da Amazônia Ocidental. In: *THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2009*.

\_\_\_\_\_; CARTAXO, Elizabeth; CHAAR, Jamal. Emissões de Gases Poluentes na Atmosfera Urbana da Cidade de Manaus devida à Queima de Combustíveis Fósseis. In: *The 8<sup>th</sup> Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2009*.

\_\_\_\_\_; CARTAXO, Elizabeth e CHAAR, Jamal. Transport as a Threat to Sustainable Development. In: *The 24<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems – ECOS 2011*. Book of Proceedings. Novi Sad, Serbia 4-7 July, 2011.

\_\_\_\_\_, I. M.; CARTAXO, E. F.; CHAAR, J.S.. A mudança na Matriz Energética e o Potencial Impacto dos Óxidos de Nitrogênio na Atmosfera Urbana da Cidade de Manaus. In: *The 9<sup>th</sup> Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2011*.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. *Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas*. São Paulo: Annablume, 2000. 282p.

VEIGA, J. E.. *Aquecimento Global: frias contendas científicas*. São Paulo: SENAC, 2008, p. 11, 12.

WALKER, Gabrielle & KING, David. *O Tema Quente: Como combater o Aquecimento Global e Manter as Luzes Acesas*. Trad. Caroline Chang. Rio de Janeiro: Objetiva LTDA, 2008. ISBN 978-85-7302-902-4

XAVIER, Maria Emília Rehder e KERR, Américo Sansigolo. A análise do Efeito Estufa em

Textos Para-Didáticos e Periódicos Jornalísticos. In: Cad. Bras. Ens. Fís., v. 21, n. 3: p. 325-349, dez 2004.

YNOUE, R. Y. ; ANDRADE, M. F. . SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FORMAÇÃO DE OZÔNIO NAS ÁREAS VIZINHAS À REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu, PR. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.