

NOTAS SOBRE POLUIÇÃO DO AR-I

Para o Curso de Física da Poluição do Ar FAP346, 2º Semestre/2012

Prof. Américo Sansigolo Kerr

Contribuições na pesquisa bibliográfica para atualização de informações e revisão:

Alexandre Correia, Lilian Cristiane Almeida dos Santos,

Marcos Aurélio Leite, Maria Emília Rehder Xavier, Thiago Gomes Veríssimo

Wilmer José Díaz Acosta.

1. INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente não é algo conflitante com o progresso e a melhoria da qualidade de vida do homem. Ao contrário, é uma das indicações desta qualidade de vida, já que o homem não é algo dissociado da natureza, mas parte dela. Uma agressão à natureza é uma agressão às condições em que a vida humana se desenvolve.

É comum entre os ambientalistas uma relação mística com a natureza, procurando justificar a preservação ambiental ainda que isto acarrete perdas para o conjunto da sociedade ou para o país. Na verdade este tipo de posicionamento resulta de uma aceitação inconsciente do discurso difundido pelas classes dominantes, que procuram confundir seus interesses econômicos com os interesses da sociedade e do país.

Todavia, do ponto de vista da maioria da sociedade, a satisfação dos interesses de lucro imediato das classes dominantes resulta em enormes prejuízos à saúde, esbanjamento de energia, excesso de trabalho, dilapidação dos recursos naturais (degradação dos rios; destruição de florestas que contêm uma enorme quantidade de riquezas naturais; exploração rapinante de minérios; agricultura desequilibrada, degradando o solo e nos expondo à contaminação por agrotóxicos). Apenas como exemplo, a Sociedade Americana de Pneumologia avalia que cerca de 50 bilhões de dólares poderiam ser poupados anualmente nos Estados Unidos caso os padrões de qualidade do ar fossem seguidos. A Associação Médica de Ontário, no Canadá, estima que em 2000 cerca de 630 milhões de dólares americanos foram gastos apenas com despesas médicas decorrentes da exposição à poluição (OMA, 1999). Ou ainda, estima-se que a perda nas colheitas norte-americanas, devido aos danos por ozônio urbano, é de cerca de 1 bilhão de dólares (Cortese, 1990).

A questão do meio ambiente deve ser vista de uma maneira integrada, porque a mesma concepção social imediatista e individualista que trata a poluição do ar como “inevitável” ou como um “mal necessário”, está presente na poluição das águas, na destruição das florestas, nas contaminações por agrotóxicos, no planejamento urbano....

Um sistema de transporte baseado largamente em veículos individuais representa uma enorme quantidade de energia, recursos naturais e trabalho empregados para um meio de locomoção inseguro e extremamente ineficiente nos grandes centros urbanos. Tem representado, ainda, a principal fonte de poluição antropogênica, devido ao volume de combustíveis fósseis que consome.

Na agricultura, ao não se observar processos naturais de recomposição do solo, controle ecológico das pragas, ou ainda a utilização de fontes energéticas próprias, estabelece-se um processo cíclico de desgaste e reposição artificial do solo, monocultura com devastação e uso intensivo de defensivos, emprego de recursos energéticos não renováveis gerando poluentes. Este tipo de agricultura vincula-se, ainda, aos interesses das indústrias produtoras de insumos agrícolas convencionais (que no caso dos fertilizantes, por exemplo, é responsável pela má qualidade do ar em Cubatão - Vila Parisi, o que também provoca a maior parte dos ataques à vegetação da Serra do Mar naquela região).

Estes desatinos são fruto da concepção filosófica dominante em nossa sociedade, baseada no lucro e não no bem estar do cidadão, e que tem poderes para polarizar a própria criação científica, tecnológica, cultural e artística em função de seus interesses. Desta forma, regularmente, as “soluções” apontadas para a questão ambiental são resultado de uma visão “pragmática”, representando paliativos que não atacam as raízes dos problemas.

Poderíamos imaginar assim que nos encontramos presos a um ciclo vicioso inabalável. Contudo, trata-se de uma situação geradora de contradições gritantes, assimiladas particularmente por aqueles que têm tradição de refletir criticamente sobre seu trabalho.

Este curso de Física da Poluição do Ar tem por objetivo trabalhar alguns elementos básicos associados à questão da poluição e destacar alguns tópicos onde o Físico pode dar uma excelente contribuição em instrumentação, aplicações e desenvolvimento de modelos. Contudo, o aluno deve estar preparado e disposto a trabalhar a dimensão interdisciplinar deste tema.

É indispensável que os profissionais que atuam nesta área tenham uma boa formação técnica e científica. Mas também devem ter sempre presente a forte e imediata vinculação que esta temática tem com interesses econômicos e sociais. Portanto, é fundamental uma reflexão constante sobre as consequências e usos que podem ser feitos de nosso trabalho.

Na medida do possível serão elaborados textos sobre os temas tratados, procurando complementar e sistematizar as informações de aula e suprir os poucos volumes de livros disponíveis na biblioteca.

2. O AR, OS POLUENTES E OS POLUIDORES

2.1. A CONTAMINAÇÃO DE UM BEM SOCIAL

O ar tem uma característica de uso social extremamente marcante: é um fluido gasoso que transita livremente na atmosfera, sem o qual não se consegue sobreviver mais que alguns poucos minutos. Um contaminante lançado ao ar difunde-se ao sabor das condições próprias de dispersão da atmosfera, atingindo toda superfície terrestre em diferentes velocidades e graus de intensidade.

Para a espécie humana, a Tabela 2.I permite comparar as necessidades de suprimentos de ar, água e alimentos. Consome-se uma massa diária de ar da ordem de 10 vezes a massa de alimentos e cerca de 7 vezes a de água, sendo que ele rapidamente entra em contacto com nosso sangue através dos alvéolos pulmonares. Assim os níveis de contaminação do ar são muito mais restritivos que os dos demais suprimentos. Considere-se, ainda, que o nível de consumo de ar aumenta de um fator 6 a 10 quando se está em atividade física (Tabela 2.II), representando portanto um problema bem mais sério para aqueles que trabalham próximo a fontes de poluição.

Tabela 2-I

Comparação entre necessidades humanas de suprimentos (mulher adulta) - (Perkins, 1974)		
Componente	Consumo Diário (kg)	Tempo de Sobrevivência na Ausência
Ar	14	5 minutos
Água	2,0	5 dias
Alimento	1,4	5 semanas

Tabela 2-II

Necessidades biológicas de AR para o Homem (homem de 68,5 Kg) - (Perkins, 1974)			
Atividade	Litros/minuto	x10 ³ l/dia	Kg/dia
Descansando	7,4	10,6	12
Trabalho leve	28	40,4	45
Trabalho pesado	43	62	69

Os níveis de qualidade do ar são definidos a partir da medida da concentração de alguns poluentes na atmosfera. Eles são próprios de atividades antropogênicas, caracterizando situações de danos à saúde razoavelmente bem conhecidas. É o caso do CO, SO₂, NO_x, O₃, orgânicos voláteis, matéria particulada.

Os contaminantes do ar são componentes traços, uma vez que 99% do ar seco constitui-se de nitrogênio e oxigênio. As fontes geradoras de contaminantes podem ser naturais ou antropogênicas. Portanto, a natureza também polui, contrariamente ao que indica o senso comum. Normalmente são processos perfeitamente integrados aos ciclos naturais, tomando parte na geração de chuvas, transporte de nutrientes ou sementes, polinização, etc, que provocam concentrações baixas.

Mas, por vezes, ocorrem “acidentes” como as emissões por vulcões que chegam a afetar o clima global. É famosa a história de Pompeia que em 79 DC sucumbiu à uma erupção

do Vesúvio. Estima-se que sua população tivesse entre 10 a 20 mil habitantes e a maioria pereceu soterrada por lascas ou por ação dos gases tóxicos lançados pelo vulcão (Fig. 2-1). Outro caso famoso foi o da enorme bolha de CO₂ que se



Figura 2-1 Estátuas moldadas a partir da injeção de gesso nos vazios deixados pelos corpos soterrados pelas cinzas do Vesúvio, em Pompéia, Itália, 24 de agosto de 79 DC. Em alguns casos é possível notar a tentativa de proteger-se da asfixia pelos gases emanados do vulcão.

Emissões Mundiais de CO₂ devido ao consumo de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão)

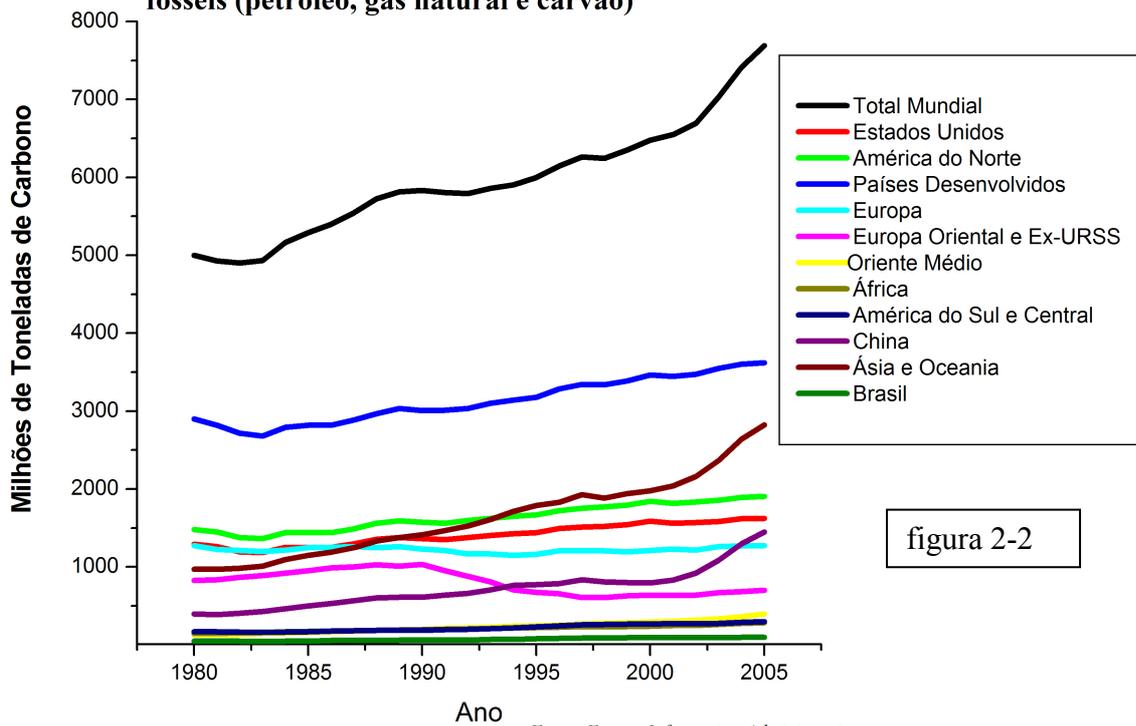


figura 2-2

desprende do fundo de um lago na República de Camarão¹, causando grandes danos. O poder de corrosão do aerossol marinho também é muito conhecido por quem vive a beira mar e há os que padecem de crises respiratórias por reação alérgica a grãos de pólen, transportados pelo ar.

As emissões naturais somam uma massa maior que as antropogênicas. Todavia, estas últimas são problemáticas por estarem concentradas, particularmente nos grandes centros urbanos e industriais. Além disso elas introduzem variações nos padrões naturais de composição da atmosfera, podendo provocar desequilíbrios de consequências gravíssimas. São bastante conhecidas as questões do efeito estufa, as chuvas ácidas e a destruição da camada de ozônio.

O efeito estufa é benéfico enquanto gerador de aquecimento atmosférico, indispensável à sobrevivência dos seres vivos. Mas pode tornar-se desastroso a partir da elevação progressiva das concentrações de alguns gases que contribuem para este efeito (CO₂, Metano etc) e que podem produzir uma elevação desequilibrada e catastrófica da temperatura da atmosfera. As chuvas ácidas devem-se especialmente às emissões de SO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis (principalmente nas frações mais pesadas da destilação do petróleo e no carvão mineral) e do NO_x gerado em motores de combustão interna - eles podem sofrer transformações na atmosfera, convertendo-se em ácido sulfúrico e ácido nítrico, removidos pelas chuvas. Já a destruição da camada de Ozônio, especialmente pelos gases CFCs, importa em um aumento da taxa de transmissão da radiação ultravioleta sobre a superfície terrestre, com forte poder mutagênico para os seres vivos.

O ar e a natureza como um todo são bens sociais. Não deve ser a perspectiva da catástrofe ou mesmo da barbárie a orientar nossa ação ambientalista. Mesmo porque haverá sempre uma personalidade “pragmática” a soldo dos interesses do capital, para delinear um futuro menos dramático. É o direito de todo cidadão a uma vida digna, com educação, saúde, moradia transporte, que também deve orientar a defesa de um meio ambiente equilibrado e saudável.

2.2. OS VILÕES SÃO CONHECIDOS

Para se enfrentar a poluição do ar é necessário identificar as principais fontes geradoras, apontar soluções e indicar as consequências de sua aplicação. Além disso, há locais onde os problemas são graves ou significativos, como é o caso de grandes centros urbanos ou dos polos industriais, e em outros é pequeno, havendo tendência a considerar que neles não se faz necessária uma intervenção.

Todavia, sob o ponto de vista de impacto global e de responsabilidade social, as soluções não poluentes também representam aquelas que são mais racionais e benéficas. Mesmo emissões localizadas e consideradas pequenas podem ser danosas para as pessoas que vivem no entorno da fonte.

¹Em 21 de agosto de 1986 o lago de Nyos no Camarão emitiu uma nuvem tóxica de CO₂ causando a morte de 1.700 pessoas que viviam nas proximidades e de milhares de animais. Acredita-se que o CO₂ foi liberado por um deslizamento subterrâneo ou por um pequeno terremoto.

Tabela 2-III Distribuição Percentual do Consumo Energético por tipo de fonte (ano de 2008) (Energy Information Administration, 2011)

Região ou País	Fonte Energética (Participação em %)					
	Petróleo	Gás Natural	Carvão	Hidro e Renováveis ^a	Nuclear	Outras
Mundo	36,1	21,9	27,5	10,2	1,76	2,53
Estados Unidos	42,3	23,2	22,4	6,99	2,75	0,48
América do Norte	41,3	23,4	19,8	9,60	2,51	0,82
Países desenvolvidos ^b	41,6	22,3	19,2	9,05	1,86	2,36
Europa Oriental e ex-União Soviética	21,0	49,5	17,6	5,94	1,86	0,41
Ásia em desenvolvimento ^c	26,1	8,19	56,2	9,14	0,29	3,13
Oriente Médio	57,9	45,7	1,56	0,39	0,00	5,07
África	33,8	19,1	24,5	19,7	0,20	0,83
América do Sul e Central	45,9	16,6	2,89	35,4	0,26	0,00
China	19,6	3,13	70,1	7,42	0,26	0,00
Brasil	33,3	6,30	3,94	47,2 ^d	0,38	0,22

^a Energia solar, eólica, lenha, lixo;

^b Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Groenlândia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coréia do Sul, Luxemburgo, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Porto Rico, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos;

^c Afeganistão, Bangladesh, Butão, Brunei, Burma, Camboja, China, Fiji, Polinésia Francesa, Hong Kong, Índia, Indonésia, Kiribati, Coréia do Norte, Laos, Macau, Malásia, Maldivas, Mongólia, Nauru, Nepal, Nova Caledônia, Niue, Paquistão, Papua Nova Guiné, Filipinas, Samoa, Cingapura, Sri Lanka, Taiwan, Tailândia, Tonga, Vanuatu, Vietnã;

^d Fontes renováveis: lenha, carvão vegetal, álcool, bagaço de cana.

A maior parte da poluição do ar antropogênica está associada aos processos de geração de energia, destacando-se a queima de combustíveis fósseis para a movimentação dos meios de transporte. A figura 2-2 mostra a evolução das emissões de dióxido de carbono² devidas ao consumo de combustíveis fósseis.

Portanto, discutir a parcela de responsabilidade de cada região do globo terrestre na degradação da qualidade do ar é analisar, principalmente, as tabelas de fontes e de consumo energético mundiais (Tabelas 2.III e 2.IV). Fica clara aí a relutância dos Presidentes dos Estados Unidos, primeiro George Bush, em comparecer à Eco-92, e posteriormente seu filho, por coincidência com o mesmo nome, em ratificar o protocolo de Kyoto e Barack Obama, mesmo com um discurso mais progressista na questão ambiental, deixou novamente de representar os Estados Unidos na Conferência Rio+20. Os Estados Unidos ainda são os maiores consumidores de energia no mundo, com uma distribuição per capita quase 5 vezes maior que a média mundial. Cerca de 85% de sua energia vem da queima de petróleo, carvão ou gás natural, incrementando os níveis de CO₂, SO₂ e outros componentes atmosféricos, com reflexos, por exemplo, sobre o efeito estufa e a produção de chuva ácida.

Assim, uma ação eficaz de redução das emissões tem que estar fundada na diminuição global do consumo energético e no uso de fontes de energia limpas, o que envolve repensar os meios de transporte, o planejamento urbano e os processos de produção agrícola e industrial. Além disso, em cada processo atualmente em uso, ou nos novos que venham a ser adotados, é fundamental que se exija sempre os melhores mecanismos de controle na emissão de poluentes.

2.3. COMPOSIÇÃO DO AR

A Tabela 2.V fornece a composição do ar troposférico não poluído seco e úmido. O teor de vapor de água na atmosfera varia bastante, entre praticamente seco e supersaturado³, o que corresponde a uma concentração de 0 a 4% em massa. Esta é uma composição média pois obviamente sofre variações próximo às fontes geradoras de certos componentes (que podem ser extensas como um oceano ou intensas e localizadas como um vulcão em atividade), além do que sua composição tem variado ao longo do tempo, inclusive por obra da poluição antropogênica⁴.

² O CO₂ não é monitorado como poluente pelas agências de controle ambiental, porque seus níveis de concentração na atmosfera não têm representado riscos diretos à saúde humana. O problema com as emissões deste gás relaciona-se ao papel que desempenha no Efeito Estufa e na tendência a mudanças climáticas globais que parecem estar se delineando em nosso planeta.

³ O ponto de supersaturação corresponde à ocorrência de precipitações (chuva, neve,...), por isto esta concentração não é ultrapassada.

⁴ No tóxico sofre efeito estufa discute-se como avaliar a composição do ar no passado próximo ou distante.

Tabela 2-IV Participação no consumo energético global (ano de 2008) (Energy Information Administration, 2011)

Região ou País	Percentual da população mundial (%)	Energia Total (10 ⁹ MWh)	Energia per capita (MWh/capita)	Participação Relativa	
				Energia total (mundo=100%)	Energia per capita (mundo=100%)
Mundo	100	148	22.0	100	100
Estados Unidos	4.5	29.0	95.1	19.6	432
América do Norte	6.9	36.0	77.6	24.3	353
Países desenvolvidos	18.0	71.6	59.2	48.4	269
Europa Oriental e ex-União Soviética	5.1	14.8	43.5	10.0	198
Ásia em desenvolvimento	53.0	40.4	11.3	27.3	51.5
Oriente Médio	3.0	7.5	36.6	5.1	166
África	14.3	5.5	5.7	3.7	26.0
América do Sul e Central	6.7	8.1	18.0	5.5	81.7
China	19.7	25.2	19.0	17.0	86.3
Brasil	2.9	3.7	19.3	2.5	87.6

Energia total estimada disponível nos estoques mundiais de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão)

9 x 10¹² MWh

Energia total proveniente do Sol incidente sobre a superfície da Terra durante 1 ano^c

7 x 10¹⁴ MWh

^a Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Groenlândia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coreia do Sul, Luxemburgo, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Porto Rico, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos;

^b Afeganistão, Bangladesh, Butão, Brunei, Burma, Camboja, China, Fiji, Polinésia Francesa, Hong Kong, Índia, Indonésia, Kiribati, Coreia do Norte, Laos, Macau, Malásia, Maldivas, Mongólia, Nauru, Nepal, Nova Caledônia, Niue, Paquistão, Papua Nova Guiné, Filipinas, Samoa, Cingapura, Sri Lanka, Taiwan, Tailândia, Tonga, Vanuatu, Vietnã;

^c Considerando a radiação solar no topo da atmosfera como 342Wm⁻² (já distribuída sobre a superfície terrestre) e a fração da radiação solar transmitida através da atmosfera como 44% (Seinfeld, 1998).

As composições gasosas costumam ser expressas em partes por milhão ppm (quantidades traço) ou µg/m³ (m³ de ar à 25°C e 760 mmHg), sendo esta última a forma mais adequada. As medidas em ppm podem ser baseadas em massa ou em volume, causando confusão quando não está especificado. Para se calcular os fatores de conversão entre ppm em volume e µg/m³, usa-se a lei dos gases (PV=nRT)⁵ e o peso molecular (PM) do gás:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ ppm (vol.) do componente} &= \frac{1 \text{ litro do componente}}{10^6 \text{ litros de ar}} = \\
 &= \frac{\left(\frac{1l}{22,4l}\right) \cdot PM \cdot 10^6 \text{ M g}}{10^6 l \cdot \frac{298K}{273K} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/l} \quad \text{E. 2.3-1} \\
 \rho \quad 1 \text{ ppm (vol.)} &= 40,9 \cdot PM \frac{\text{M g}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

2.4. Características dos Poluentes

Os contaminantes do ar são componentes traços, uma vez que 99% do ar seco constitui-se de nitrogênio e oxigênio. Nos pontos tratados a seguir são dadas informações sobre alguns gases traços atmosféricos. Procura-se indicar suas fontes, concentrações e processos de remoção da atmosfera. Deve-se ter em mente que este tipo de inventário baseia-se em estimativas sobre um sistema complexo (todo o globo terrestre), havendo diversidade e controvérsias entre avaliações. Mas ele nos possibilita uma visão geral plausível destes componentes.

Além dos gases traço, o material particulado em suspensão na atmosfera também será analisado. Ele tem uma composição química variada e resulta de uma gama grande de processos.

⁵ P=pressão, V=volume, n=número de moles, R=constante universal dos gases, T=temperatura em Kelvin. Nestas circunstâncias, à 273 K (0° C), um mol de qualquer gás ideal ocupa 22,4 litros.

Tabela 2-V - Composição gasosa do ar não poluído

Componente	Base Seca		Base Úmida	
	ppm (vol)	Mg/m ³	ppm (vol)	Mg/m ³
Nitrogênio	780.900	8,0 x 10 ⁸	756.500	8,69 x 10 ⁸
Oxigênio	209.400	2,74 x 10 ⁸	202.900	2,65 x 10 ⁸
Água	-	-	31.200	2,30 x 10 ⁷
Argônio	9.300	1,52 x 10 ⁷	9.000	1,47 x 10 ⁷
Dióxido de Carbono	315	5,67 x 10 ⁵	305	5,49 x 10 ⁵
Neônio	18	1,49 x 10 ⁴	17,4	1,44 x 10 ⁴
Hélio	5,2	8,50 x 10 ²	5,0	8,25 x 10 ²
Metano	1,0-1,2	6,56-7,87 x 10 ²	0,97-1,16	6,35-7,63 x 10 ²
Criptônio	1,0	3,43 x 10 ³	0,97	3,32 x 10 ³
Óxido nitroso	0,5	9,00 x 10 ²	0,49	8,73 x 10 ²
Hidrogênio	0,5	4,13 x 10 ¹	0,49	4,00 x 10 ¹
Xenônio	0,08	4,29 x 10 ²	0,08	4,17 x 10 ²
Vapores Orgânicos	Ca. 0,02	-	ca. 0,02	-

Nos próximos parágrafos e subitens especifica-se alguns dos termos comumente utilizados e a caracterização de alguns poluentes.

Fontes são os elementos geradores do contaminante que podem ter origem natural ou antropogênica. Portanto, a natureza também polui, contrariamente ao senso comum. Normalmente são processos perfeitamente integrados aos ciclos naturais, tomando parte na geração de chuvas, transporte de nutrientes, polinização, transporte de sementes etc, que provocam concentração baixas. As emissões naturais somam uma massa maior que as antropogênicas. Ressalve-se, contudo, que essas últimas causam um dano pontual maior, por estarem concentradas, particularmente nos grandes centros urbanos e industriais e podem acarretar danos globais expressivos ao meio ambiente, como a destruição da camada de ozônio e mudanças climáticas globais.

O **tempo de residência** é o tempo de vida médio de uma dada substância, e define os níveis de concentração na atmosfera a partir das taxas de emissão (massa em suspensão = taxa de emissão x tempo de residência).

Processos de remoção são os mecanismos através dos quais os contaminantes são retirados da atmosfera. Os gases tendem a sofrer reações químicas, condensação e posterior coagulação, convertendo-se em partículas e sendo removidos como tal. Podem também ser adsorvidos em superfícies, como as das próprias partículas. Estas últimas podem ser removidas por impactação, ou como núcleos de condensação de chuva se forem pequenas (em torno de 0,1 µm) e, dependendo da composição, podem ainda ser arrastadas nos choques com gotas de chuva ou sofrer sedimentação gravitacional (mais eficiente com partículas maiores que 10 µm)

Alguns poluentes são usados como indicadores da qualidade do ar, especialmente porque são comuns dentro das atividades antropogênicas e têm uma epidemiologia razoavelmente bem conhecida. É o caso do Material Particulado, SO₂, CO, NO_x, O₃ e Compostos de Carbono.

2.4.1. Material Particulado

O Particulado ou aerossol atmosférico como já dissemos não se constitui de um componente químico único. Possui uma distribuição de tamanho variada, indo desde 0,001 µm até aproximadamente 100 µm, quando a ação de sedimentação é intensa. Para fins de difusão na atmosfera, o comportamento do particulado menor que 10 µm, é próximo ao de um gás.

Pode ser gerado por processos mecânicos (borbulhagem no mar, moagens, ressuspensão de poeira do solo por vento ou deslocamento de veículos etc) ou condensação e posterior coagulação de gases, principalmente resultantes de combustões. Os que advêm de processos mecânicos são grossos (> 2,5 µm) e normalmente são retidos nas vias superiores do sistema respiratório. Partículas maiores que 15µm costumam não penetrar no sistema respiratório, porque seu arraste pelo fluxo de ar inalado não consegue vencer a força da gravidade. Já as partículas com diâmetro < 2,5 µm originadas normalmente em processos de combustão, conseguem ultrapassar os mecanismos de proteção, existentes nas vias superiores do sistema respiratório.

A Fig 2-3 ilustra uma distribuição de superfície por tamanho de partícula, típica para o aerossol atmosférico. Nela também estão indicados os processos de geração, evolução e remoção das partículas.

Além de danos à saúde, o particulado influi nas condições meteorológicas. São núcleos de condensação de chuvas, interferindo nos seus ciclos, nas inversões térmicas, no balanço radioativo solar (reflexão, espalhamento e absorção da radiação) ou, ainda, prejudicar significativamente as condições de visibilidade, como ocorre nas grandes queimadas.

Sua produção em combustões deve-se à queima incompleta, vindo portanto acompanhado de CO. Esta parcela de particulado pode ser reduzida melhorando a tecnologia de combustão utilizada (principalmente em veículos automotivos). Em processos industriais pode-se reduzir o particulado introduzindo coletores nas tubulações de exaustão. São as câmaras de sedimentação, ciclones, filtros de manga (tecidos coadores), precipitadores eletrostáticos e torres de pulverização (esta última é conveniente quando se tem gases associados, como SO₂ e fluoretos).

2.4.2. Compostos de S

Os principais compostos encontrados atmosfera contendo S, são: COS, CS₂, CH₃SCH₃, H₂S, SO₂ e sulfatos.

O SO₂, do ponto de vista antropogênico origina-se na queima de combustíveis fósseis como o petróleo e carvão. Quanto mais pesado o derivado do petróleo, tanto maior seu teor de S, por causa de retenção do S no processo de destilação.

Os compostos de S, especialmente o SO₂ podem converter-se em sulfatos e mesmo em partículas líquidas de ácido sulfúrico, provocando as chuvas ácidas. Em qualquer destas formas é danoso para a saúde humana.

Mais de 2/3 dos gases de enxofre na troposfera têm origem antropogênica, sendo a maior parte emitida na forma de SO₂. Noventa por cento das emissões ocorrem no hemisfério Norte, sendo 1/6 de origem natural e 5/6 antropogênica. No hemisfério Sul, 2/3 têm origem natural e 1/3 devem-se à atividades humanas. Estima-se que cerca de 20 a 30 Teragramas de compostos de S são emitidos por ano para a atmosfera, por fontes naturais e que entre 65 a 90 Teragramas são emitidos por fontes antropogênicas (Charlson & Wigley, 1994).

Pode-se reduzir a concentração de S dessulfurizando-se os combustíveis antes de utilizá-los, ou evitando-se o emprego de combustíveis fósseis. A saída de gases em instalações industriais podem reter o SO₂ utilizando-se de torres de pulverização, onde o gás tem que passar através de um leito úmido onde encontra-se um absorvedor ou catalisador e mover-se contra um jato pulverizado de água. Isto também controla a emissão de material particulado.

As fontes naturais de compostos de S são os oceanos, decaimento biológico, ação biológica em áreas alagadas (e.g. pântanos e mangues) e emissões por vulcões.

2.4.3. Compostos de N e O₃

Os compostos de nitrogênio mais importantes na atmosfera são o N₂O, NO, NO₂, NH₃ e sais de N (NO₃⁻, NO₂⁻ e NH₄⁺).

O NO e um pouco do NO₂ de origem antropogênica são fruto de processos de combustão onde se emprega ar como comburente. Como já dissemos ao comentar a Tabela 2.V, 99% do ar é composto por oxigênio (21%) e nitrogênio (78%). Apesar de apenas o oxigênio participar da reação de combustão, o nitrogênio que entra misturado em grande quantidade acaba sofrendo oxidação, em níveis tanto mais altos quanto maiores forem as pressões e temperaturas envolvidas. Estas condições são críticas nos engenhos automotivos, particularmente nos motores diesel. Na atmosfera o NO oxida-se para NO₂.

Pode converter-se em ácido nítrico, participando também da acidificação das chuvas e impingindo danos ao sistema respiratório. Como o SO₂, também aumenta a incidência de doenças respiratórias.

O NOx é oxidante fotoquímico, contribuindo, na presença de luz solar, para a elevação dos níveis de ozônio na atmosfera. Este último é um poluente secundário (majoritariamente produzido na atmosfera a partir de um poluente primário) extremamente danoso para o sistema respiratório, provocando também irritações nos olhos. Participa na formação do smog fotoquímico (será discutido de forma detalhada quando tratarmos de reações fotoquímicas).

O nitrogênio é um nutriente essencial para todos seres vivos. Os compostos nitrogenados gerados por fontes naturais estão associados especialmente aos processos de fixação de Nitrogênio ao solo, por ação de micro-organismos.

As emissões de amônia associam-se aos dejetos animais, amonização de húmus e emissões pelo solo.

2.4.4. Monóxido de Carbono

O CO origina-se da combustão incompleta dos hidrocarbonetos (CH_n). Numa reação completa, todo o CH_n é convertido em CO₂ mais H₂O, sendo que o CO₂ não é tratado ainda como um poluente pelas agências ambientais pois

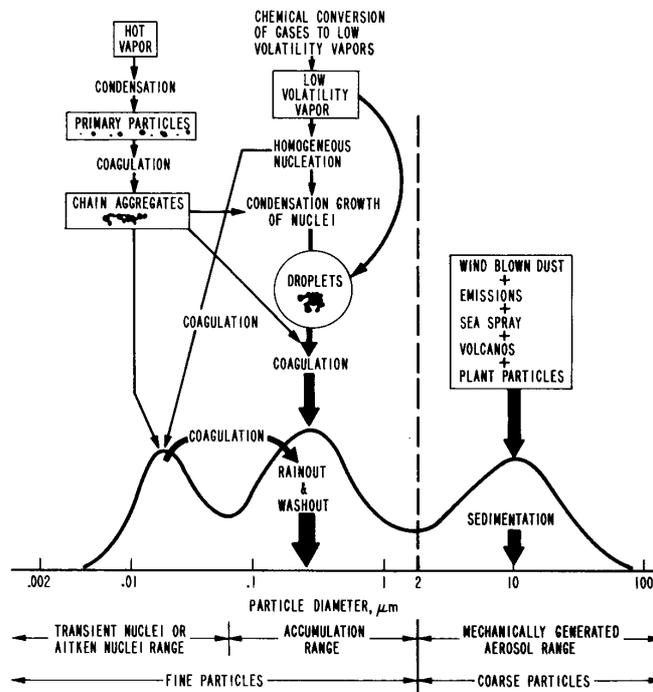


Figura 2-3

exige níveis muito altos para ser danoso à saúde⁶.

Reduzir as emissões de CO exige que se melhore os processos de combustão de modo a se conseguir uma estequiometria o mais balanceada possível. Isto também significa, portanto, um melhor rendimento na queima do combustível. Ainda que escape CO numa combustão, ele pode ser convertido a CO₂ por catalisadores.

2.4.5. Outros compostos contendo carbono

O hidrocarboneto mais abundante na atmosfera é o metano (CH₄). Provém em grande parte de emissões relacionadas ao uso e produção de combustíveis fósseis. Mas também temos contribuições significativas provindas da fermentação intestinal de animais, produção de arroz irrigado, lixo etc. Os compostos orgânicos voláteis (VOC) em geral têm sua origem principal na combustão incompleta e evaporação de solventes e combustíveis fósseis.

Na natureza o hidrocarboneto mais abundante é o metano. É gerado principalmente a partir de terrenos alagadiços. Mas também há emissões de VOCs devidas à vegetação, especialmente por coníferas.

Estes compostos orgânicos participam da oxidação fotoquímica na atmosfera, tomando parte no *smog* fotoquímico.

Tabela 3-I Estimativa de Emissão das Fontes de Poluição do AR na RMSP em 2004 (1000 t/ano) (CETESB, 2005)

Fonte de Emissão		Poluentes						
		CO	HC	NO _x	SO _x	MP	SOMA	
Móveis	Tubo de Escapamento de Veículos	Gasool(1)	811	83	46	8.1	5.4	954
		Álcool	218	24	13	-	-	255
		Diesel	414	66	296	12	16	803
		Táxi	2	0.4	0.5	0.3	0.1	4
		Moto e similares	261	34.4	1.6	0.5	0.7	298
	Cárter E	Gasool(1)	-	135	-	-	-	135
		Álcool	-	17	-	-	-	17
	Evaporativa	Moto e similares	-	20.3	-	-	-	20.3
	Pneus	Todos os tipos	-	-	-	-	9.0	9.0
	Operações de Transfêrência de Combustíveis	Gasool(1)	-	12	-	-	-	12
Álcool		-	0.5	-	-	-	0.5	
Fixas	Queima ao ar livre (1978)							
	Operação de Processos Industriais (1990)		39	12	14	17	32	113
	TOTAL		1745	405	371	38	63	2621
Indústrias Inventariadas		750	800	740	245	308		

(1) Gasool = gasolina contendo 22% de álcool

3. Fontes Geradoras da Poluição do Ar - Ação Prioritária

Para se enfrentar a questão da poluição do ar é necessário inicialmente identificar quais são as principais fontes geradoras, apontando soluções e indicando suas implicações

Como já foi dito, a maior parte da poluição do ar de origem antropogênica está associada ao processo de geração de energia, e particularmente com a parcela usada na movimentação dos meios de transporte. Nos Estados Unidos (Perkins, 1974), cerca de 55% das fontes de poluição do ar dizem respeito à transportes, enquanto no Brasil a contribuição de veículos é mais significativa, pois temos um maior percentual de hidreletricidade, que é considerada energia limpa, além de haver menor controle das emissões veiculares. Estimativas da CETESB (2005) para São Paulo, por exemplo, indicam que 96% da emissão de poluentes tem origem veicular (Tabelas 3-I e 3-II). Observa-se também que 53% dos poluentes estão associados aos veículos de passeio (não contando táxis e motos), correspondendo 36% aos movidos à gasolina e 9.7% aos movidos à álcool (veja que o álcool também polui). Já para os veículos pesados movidos à diesel (ônibus e caminhões principalmente) estima-se uma contribuição de 31%. A figura 3-1 mostra a evolução

⁶ Apesar do CO₂ ser pouco danoso nos níveis de concentração usualmente atingidos na atmosfera, é um dos gases com maior parcela de responsabilidade na intensificação do efeito estufa, que será discutido em outro tópico

histórica da frota de veículos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), desde 1893 até 2001. Os saltos existentes nos dados são provavelmente devidos a mudanças da metodologia estatística ou falhas no registro. O ajuste dos dados até 1994 indica que a frota de veículos cresceu exponencialmente a partir de 1920, dobrando o número total de veículos a cada 7,1 anos. A partir de 1994, com o início do Plano Real, o desenvolvimento econômico ocorre de forma mais branda, que se reflete num crescimento mais lento da frota de veículos, que passa a apresentar um comportamento aproximadamente linear.

A Tabela 3-III apresenta fatores de emissão médios, considerando a distribuição de veículos do ano de 2004 em São Paulo.

Vê-se portanto que o controle de veículos, principalmente os de passeio, representa um ponto chave no combate à poluição do ar global, sendo mais grave quando se trata de um grande centro urbano.

O PROCONVE (Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotivos), que regula as emissões de poluentes para veículos novos, representou uma medida necessária. Todavia isto não basta, e é pouco. No caso de São Paulo, 87% da frota corresponde à veículos de passeio (para o Brasil 80%), enquanto contribui com o transporte de apenas 36% dos passageiros. Já a frota de ônibus (aproximadamente 12.000) representa menos de 0,5% da frota, e transporta 64% dos passageiros (Pacce, 1989). Ao mesmo tempo não há medida que controle o aumento de emissões pelo envelhecimento da frota de veículos.

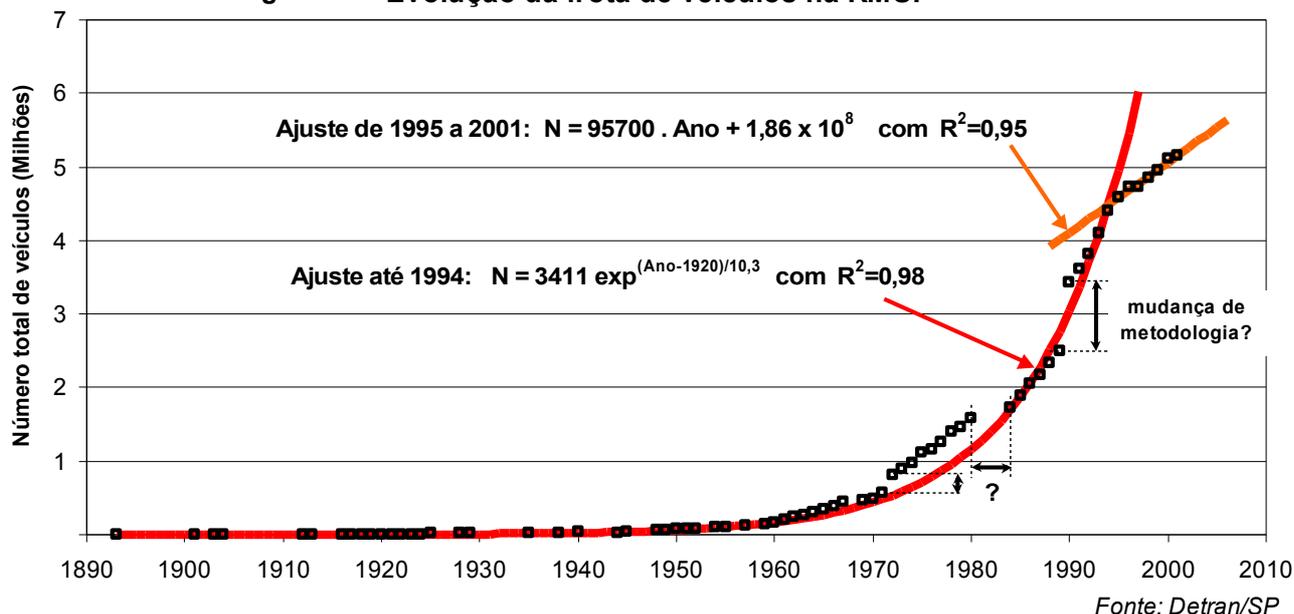
Novamente esses números reforçam a linha de interligação entre os problemas. Um sistema de transporte que permite o uso intensivo de veículos de passeio, não é apenas poluente, mas é ineficiente, pois tal volume de veículos atrapalha a velocidade de transporte da coletividade, sendo o principal responsável pelos engarrafamentos. Mesmo o usuário de carro, de modo geral, conseguiria se deslocar com maior velocidade e de modo mais econômico, se o fizesse com um transporte coletivo ágil e desembaraçado do tráfego de veículos individuais.

Deve haver uma ação governamental centralizada, buscando implantar num primeiro momento, pelo menos nas maiores cidades, uma organização do sistema viário urbano que garanta a circulação adequada e prioritária de transportes coletivos (restrição à circulação em áreas centrais e criação de faixas exclusivas). Este processo deve ser acompanhado de uma discussão ampla com a sociedade, para que haja uma compreensão das enormes vantagens que isso acarretaria, mesmo para aquela parcela da população que hoje tem o "privilégio" de ser mal transportada pelos veículos de passeio. Em um segundo momento, com maior investimento de recursos, deve-se procurar implantar ou ampliar sistemas de transporte coletivo mais eficientes, como os corredores exclusivos para ônibus, além de expansão dos metrô e trens de subúrbio.

Não há como deixar de perceber que estas medidas conduzem a uma redução no uso dos carros de passeio, diminuindo portanto seu desgaste, manutenção, consumo de combustíveis e lubrificantes, e até mesmo reduzindo a necessidade de possuí-los. Estas medidas afetariam portanto estes setores da economia, exigindo uma ação planejada de governo, de modo que esta orientação no sistema de transportes não traumatize o conjunto da sociedade, mas resulte, como deve ser, em benefícios.

Uma diminuição significativa na produção de transportes individuais preservaria mais os recursos naturais envolvidos em sua manufatura e propulsão, além de minimizar os investimentos de expansão e manutenção do sistema viário. Ainda teríamos, portanto, uma diminuição extra de poluentes pois estas medidas acarretariam redução no consumo global de energia. Com relação aos possíveis prejuízos aos trabalhadores empregados nas atividades atingidas, nos parece óbvio que toda esta mão de obra qualificada poderia tranquilamente ser deslocada para outras áreas de

Figura 3-1 Evolução da frota de veículos na RMSP



qualificação técnica correlata, como o setor industrial gerador de transporte coletivo, ou construção civil para aqueles envolvidos com obras viárias.

Tabela 3-II Participação percentual das fontes de emissão para cada poluente e sobre o total

Fonte de Emissão			Poluentes						
			CO	HC	NOx	SOx	MP	MP(2)	Total(3)
Móveis	Tubo de Escapamento de Veículos	Gasool(1)	47	21	12.3	21.4	8.5	8.0	36.4
		Álcool	12	5.8	3.5				9.7
		Diesel	24	16	80	31	26	31	30.6
		Táxi	0.1	0.1	0.13	0.79	0.16	0.2	0.1
		Moto e similares	15.0	8.5	0.43	1.32	1.11	0.9	11.4
	Cárter e Evaporativa	Gasool(1)		33					5.2
		Álcool		4.3					0.7
	Pneus	Moto e similares		5.0					0.8
		Todos os tipos					14.2		0.3
		Operações de Transferências de Combustíveis	Gasool(1)		2.9				0.4
	Álcool			0.12				0.0	
Fixas	Queima ao ar livre (1978)								
	Operação de Processos Industriais (1990)		2.2	3.0	3.8	45	50	10	4.3
	Ressuspensão de Partículas Aerossóis Secundários							25	
								25	
	TOTAL		100	100	100	100	100	100	100
Indústrias Inventariadas		750	800	740	730	883	883		
emissões por veículos		98	97	96	57	52	40	96	
emissões por automóveis particulares								53	
emissões por veículos diesel								31	

(2) Contribuição conforme modelo receptor para partículas inaláveis. A contribuição dos veículos (40%) foi rateada entre veículos a gasolina e diesel de acordo com os dados de emissão disponíveis (tabela-III).

(3) Excluiu-se a coluna MP (2) desta soma, pois representa apenas uma forma diferente de estimar o rateio entre fontes de material particulado.

Tabela 3-III Fatores de emissão veiculares médios em 2004 (cetesb, 2005)

Fontes de Emissão	Tipo de Veículo	Fator de Emissão (g/km)				
		CO	HC	NOx	SOx	MP
Tubo de Escapamento de Veículos	Gasool(1)	12.1	1.24	0.68	0.12	0.08
	Álcool	19.7	2.12	1.17	--	--
	Flex (Álcool)	0.49	0.15	0.14	--	--
	Diesel	15.6	2.48	11.17	0.43	0.62
	Táxi	0.91	0.17	0.21	0.11	0.06
	Motocicleta e similares	18	2.37	0.11	0.04	0.05
Cárter e Evaporativa	Gasool(1)	-	2	-	-	-
	Álcool	-	1.5	-	-	-
Pneus	Motocicleta e similares	-	1.4	-	-	-
	Todos os tipos	--	--	--	--	0.07

Este é um processo que faz parte mesmo de uma reorientação global da divisão de trabalho dentro da sociedade. O que parece simples no papel é extremamente complicado de ser efetivado, pois certamente contará com a reação do empresariado atingido, tentando criar fatores que levem a população a também se sentir prejudicada pelas mudanças. Por isso uma ação política de um governo não comprometido com os detentores do poder econômico é fundamental, conduzindo este processo juntamente com uma discussão permanente com a coletividade.

Com relação aos veículos diesel pesados, o maior volume é de caminhões. Inventário de 1986, indicava que 56% das cargas eram transportadas pela via rodoviária, reconhecidamente menos eficiente do ponto de vista de balanço

energético e segurança. A rede ferroviária sofreu uma redução e estagnou-se a partir de 1960. O que certamente facilitou a expansão das indústrias automobilísticas correspondentes (ANFAVEA, 1988).

O governo voltar a investir em um sistema de transporte de cargas energeticamente mais eficiente é fundamental do ponto de vista do controle da poluição do ar e dos interesses econômicos da maioria da população.

3.1. Outras Medidas de Controle

Uma vez que a maior parte da poluição do ar tem origem nos processos geradores de energia, que se baseiam majoritariamente na queima de combustíveis, é necessário uma ação governamental exigindo uma maior eficiência no uso dos recursos energéticos, e ampliando, para além da hidreletricidade, a participação de fontes limpas, como a solar e eólica:

- criação de um sistema amplo, sob controle estatal, voltado à produção, instalação e manutenção de coletores solares para aquecimento ou pré aquecimento de água em instalações domésticas, hospitalares e industriais.

- implementação de um programa de reforma agrária que inclua em suas diretrizes a constituição de áreas de plantio em torno dos centros urbanos, que garantam o suprimento local de produtos agrícolas básicos. Além disto significar menor consumo de energia no transporte, é sabido que as técnicas agrícolas mais simples, usadas pelos pequenos proprietários, são dezenas de vezes menos consumidoras de energia. O pequeno produtor tem também um menor poder especulador, resultando em um abastecimento mais barato para a população.

- construção de centros de difusão e orientação para o uso de técnicas agrícolas ecologicamente equilibradas, integrados com universidades e institutos de pesquisa agrícolas. Os financiamentos oficiais devem estar condicionados à introdução progressiva de tecnologias harmoniosas com o meio ambiente, cuidando-se neste processo de preservar a produtividade necessária ao abastecimento de alimentos. Novamente aqui deve haver choque com os interesses econômicos dos produtores dos insumos tradicionais - fertilizantes químicos, agrotóxicos etc.

- introduzir políticas de redução de lixo, compreendendo por exemplo: 1) emprego de embalagens reaproveitáveis (refil, vasilhame com retorno etc); 2) aumentar a durabilidade de produtos, impondo limitações a descartáveis e a produtos de baixa qualidade; 3) embalagens que facilitem o processo de separação e reciclagem de materiais; 4) estabelecimento nacional, com prioridade aos maiores centros urbanos, de processos de coleta seletiva de lixo. A reciclagem Adequada dos materiais presentes no lixo representa uma economia de matéria prima básica e da energia que teria sido usada no seu processamento. O lixo orgânico separado pode ser bio digerido, gerando metano (gás combustível) e adubo orgânico. A degradação do lixo orgânico nos depósitos e lixões em geral, representa incômodo e risco de saúde para as populações próximas, trazendo sempre o risco de contaminação do lençol freático. Ao mesmo tempo o gás metano lançado ao ar, devido a esta degradação, é um componente mais sério para o efeito estufa que o CO₂, pois seu tempo de residência na atmosfera é maior.

- criação de linhas de financiamento aos municípios para tratamento de sistema de esgotos (sem projetos megalomaniacos), gerando, por exemplo gás metano e fertilizantes orgânicos. O problema com o metano é análogo ao do item anterior, e os demais resíduos, regularmente lançados nos rios, têm participação expressiva para degradá-los.

- um projeto a ser estudado, seria o da constituição de um sistema, sob controle estatal, voltado a produção, instalação e manutenção de módulos de conversão de energia eólica em elétrica, fixáveis em residências. Estas residências poderiam ter relógios medidores de entrada e saída de energia elétrica, de modo que quando houvesse excedente de energia na residência, ela poderia ser lançada na rede elétrica da cidade, sendo este valor descontado de seu consumo.

- ampliação do investimento em formação de pessoal, pesquisa e controle técnico, em processos de racionalização do uso de energia convencional e de fontes alternativas.

- manutenção de uma rede de controle da qualidade do ar, águas e solo em pontos do território nacional, equipada para monitorar regularmente os parâmetros indicadores de qualidade do meio ambiente e capacitada para acionar as medidas de controle necessárias. Os pontos mínimos devem ser as capitais, polos industriais e centros urbanos de grande porte. Já existem organismos nacionais com esta capacitação, mas é necessário imprimir-lhes uma estrutura jurídica de funcionamento, que garanta seu caráter público, mas com autonomia política com relação aos ocupantes dos cargos de governo.

Dentro desta discussão inicial percebe-se que as indústrias, normalmente as mais visadas como agentes poluidores diretos, não aparecem como personagens centrais. Para o caso de São Paulo, um grande centro urbano e industrial, a estimativa global de participação destas fontes é de 4,3% e no caso dos EUA de 14%.

Isto contudo não significa que se deva estar desatento em relação a elas, pois têm uma participação extremamente significativa em alguns poluentes. É o caso do material particulado, que em São Paulo está regularmente fora dos padrões, e com o qual as indústrias contribuem com 10%, neste inventário da CETESB, ou do SO₂ em que participam com 50%. Além disso representam um potencial de risco quando manipulam cargas expressivas de produtos perigosos e passíveis de emissão acidental, representando também problemas pontuais graves constantemente sentidos pela população que trabalha ou reside em suas circunvizinhanças. Em polos industriais como Camaçari, Contagem, Cubatão a situação é mais crítica, e neste último caso em particular, apesar de uma grande quantidade de medidas de controle adotadas, os parâmetros de avaliação continuam a indicar condições inadequadas para a qualidade do ar.

4. Danos da poluição atmosférica à saúde humana

4.1. Considerações históricas

Medições sistemáticas sobre a composição da atmosfera e demais propriedades qualificadoras do meio ambiente permitem analisar objetivamente como nosso organismo interage com tais condições e como elas vêm evoluído ao longo do tempo. Todavia os próprios órgãos sensoriais costumam perceber condições ambientais que podem ser lesivas ao organismo. Enquanto não nos afastamos delas ou as saneamos, fica uma sensação de repugnância ou incomodo nos alertando do problema que, eventualmente, pode causar dano cumulativo ou ser fatal.

Assim, desde os primórdios da humanidade e mesmo sem dispor de instrumentos de medida, o homem frequentemente se viu obrigado a responder a incidentes naturais e às suas práticas geradoras de poluição atmosférica ou que representam uma intervenção desequilibrada no meio ambiente. Nos limitaremos aqui a tratar os problema antropogênicos, sobre os quais seria possível estabelecer alternativas.

Stern et al. (1973), comenta que uma das explicações para os hábitos nômades das tribos nos primórdios da história relaciona-se à necessidade periódica que tinham de se afastarem dos dejetos animais, vegetais e do lixo humano que produziam. Estudos arqueológicos registram o uso controlado do fogo por homínídeos há 1,42 milhões de anos e o domínio de técnicas para acendê-lo a partir de 7000 AC (Britannica, 2001).

Fumaça e resíduos da combustão incompleta passaram a ser lançados nos sítios de moradia. A descoberta das chaminés representou a possibilidade de evitar a inalação direta destas emissões, permitindo que se diluíssem na atmosfera antes de chegarem ao sistema respiratório. Mas diante do adensamento das áreas urbanas isso mostrava-se insuficiente. O filósofo Seneca, em 61 DC, relata sobre a mudança de sua disposição quando se afastava do “ar pesado de Roma e do fedor das chaminés fumacentas, as quais, sendo ativadas, despejavam para fora quaisquer vapores pestilentos e fuligem que tivessem guardado dentro de si...”. Mas muito antes disto, em 55 AC, o poeta romano Lucretius já externava em sua poesia “De rerum natura” (A natureza das coisas), seu pessimismo com a degradação promovida pela humanidade sobre a natureza. A dimensão dos impactos ambientais promovidos pelo império romano (fig. 4-1), em seus quase 1000 anos de existência, pode ser avaliado, pelo volume de minério que extraíam em 50 AC (cerca de 5x10⁶ t, empregadas para cunhar 50 t de moedas de prata/ano), por seus aquedutos ou pela rede de estradas que construiu e que em 200 DC atingia cerca de 100 mil km de vias principais, interligando ecossistemas diversos.

Desde o momento em que a combustão passou a ser empregada como fonte energética, estabeleceu-se, paralelamente, um problema de contaminação antropogênica. Inicialmente voltada à cocção de alimentos, aquecimento, iluminação e técnica de preparo da terra para o plantio, ela passou progressivamente a ser a base de processos produtivos como a elaboração de artefatos cerâmicos e na metalurgia. Durante a idade do bronze (~3000 AC) a combustão possibilitava extrair cobre e estanho e depois combiná-los para obter o bronze, assim como na idade do ferro (início ~1200 AC) era básica para a produção deste metal.

Lenha, palhas e esterco seco representavam a principal fonte de energia térmica. Com o crescimento das populações, especialmente a partir do século XIV, as florestas rareavam próximo aos centros urbanos. Por volta de 1700 toda madeira da Inglaterra estava essencialmente cortada e o carvão mineral firmava-se cada vez mais como a única fonte efetiva de energia térmica (Wilson e Jones, 1974).

Há registros antigos de uso do carvão em piras funerárias na idade do bronze e em acampamentos durante o império romano em torno de 400 DC. Mas a descoberta europeia do potencial energético superior deste mineral parece coincidir com os relatos de Marco Polo, por volta de 1300, em seu livro “Il Milione”. Ele escreveu sobre o uso do carvão nas civilizações asiáticas que eram mais avançadas tecnologicamente (Britannica, 2001).

Formado a partir da compactação e endurecimento de depósitos sedimentares de resíduos vegetais, o carvão mineral abriga o enxofre residual das estruturas proteicas dos vegetais. Sua combustão lança na atmosfera quantidades significativas de SO₂



Figura 4-1 Roma imperial, área entre o Coliseu e o Circo Máximo – maquete reconstrutiva em plástico, Museo da Civilização Romana

e fumaça (carbono elementar, outras partículas e resíduos de combustão incompleta), o que causa incômodos óbvios para quem se encontra nas vizinhanças. Em função destas características a difusão de seu uso foi lenta. Era tido como um combustível “não natural” e o odor sulfuroso de sua queima confirmava a sua associação com “forças demoníacas” em um período em que a inquisição prosperava (Stern, 1968).

O uso do carvão em Londres registra sucessivos problemas de poluição atmosférica ao longo da história. Isso pode ser intuído de uma série de conflitos desde os primeiros séculos do segundo milênio. Em 1273 foi proibida a queima de carvão. Em outros momentos do reinado de Eduardo I (1272-1307), registra-se protestos da nobiliarquia contra o uso do “carvão marinho” e em 1306 novamente o rei emitiu uma proclamação real proibindo o uso do “carvão marinho” nos fornos. No reinado de Eduardo II (1307-1327), um homem foi ostensivamente torturado por ter usado carvão e com isso ter enchido o ar com um “odor pestilento”. Elizabeth I (1558-1603) barrou a queima de carvão em Londres enquanto o parlamento estivesse em sessão. Por volta de 1661 a poluição na cidade estava tão ruim que motivou John Evelyn (um dos fundadores da Royal Society) a entregar ao Rei Charles II uma brochura sobre a inconveniência da poeira e fumaça na cidade, juntamente com algumas sugestões para resolver o problema (Fig 4-2). Note-se que a repetição de regulamentações acusam que não surtiram efeito, uma vez que não se apresentava uma alternativa limpa para substituir tal fonte de energia. Tudo indica que a despeito das proibições, o carvão continuava a ser queimado (Chambers, 1968 e Stern et al., 1973; Britannica, 2001).

A revolução industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII (fig. 4-3), marca uma nova era sobre diferentes aspectos da sociedade humana e intensifica de modo assustador a intervenção antropogênica sobre o meio ambiente em geral e a qualidade do ar em particular. A construção da primeira máquina a vapor em 1698 prenunciou a substituição da força animal, rodas de água e moinho de ventos por estas máquinas. Em 1712 elas começam a ser usadas para bombear água para fora das minas, permitindo que atingissem maior profundidade e produtividade. James Watt em 1769 patenteou uma máquina a vapor mais eficiente que tornou-se chave para a revolução industrial. O consumo de combustíveis fósseis desde então expandiu-se exponencialmente, sustentando-se sobre o carvão. A poluição do ar aumentava de forma alarmante e a intuição secular correlacionava-a aos frequentes problemas de saúde, que afetavam especialmente o sistema respiratório.

Mas foram alguns episódios históricos famosos que evidenciaram e permitiram sustentar de modo bastante claro a associação entre poluição do ar e danos à saúde, especialmente pelas proporções alarmantes dos danos registrados. Em Londres, a capital inglesa símbolo da revolução industrial, houve um excesso de 3500 a 4000 mortes durante o mês de dezembro de 1952 (Logan, 1953). As

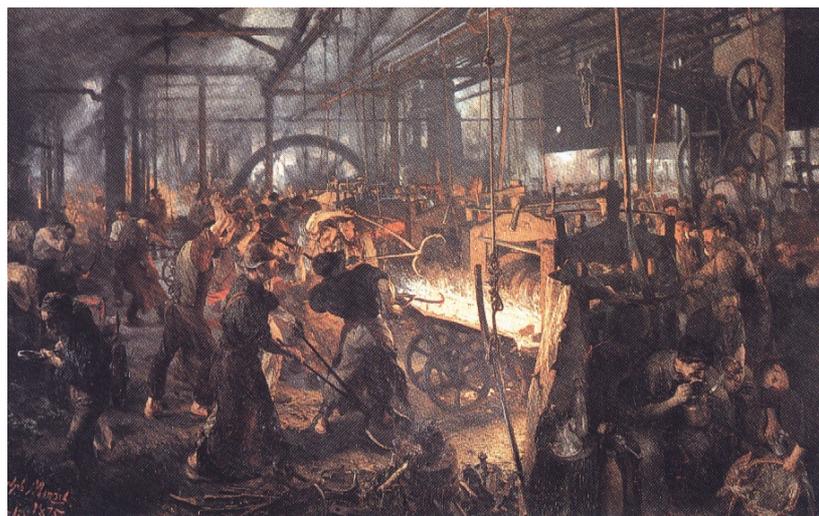


Figura 4-3 Fundição, de Adolph von Menzel (Alemanha). Mostra o ar carregado dentro de uma fundição. O ambiente da revolução industrial afetou inclusive alguns artistas que surpreenderam as classes dominantes ao deixarem de retratar apenas temas que a elas interessavam.

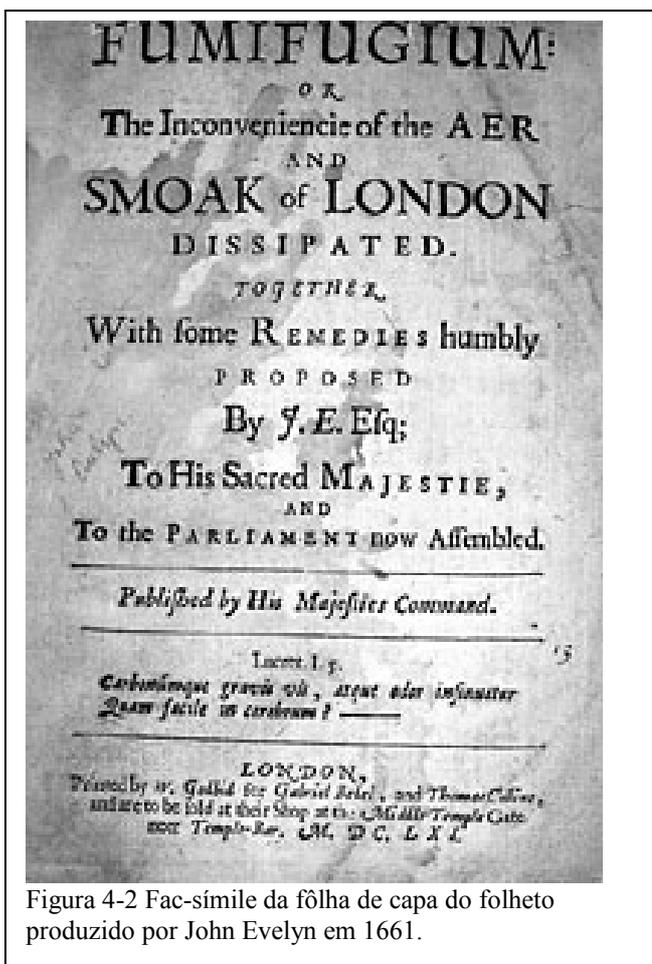


Figura 4-2 Fac-símile da fôlha de capa do folheto produzido por John Evelyn em 1661.

¹ Depois da ocupação romana, não há referências ao uso do carvão mineral na Inglaterra até 1228. A partir deste ano ele passou a ser coletado nas áreas de Fife e Northumberland, onde lascas arrancadas de veios minerais submarinos chegavam às praias arrastados pelas ondas.

medidas de poluição do ar disponíveis acusaram valores máximos de $4,46 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de fumaça e $3,75 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 . Apesar deste ser o registro mais dramático, desde 1873 aquela cidade apresentava excessos de mortes relacionados a picos de poluição atmosférica, bem como posteriormente nos anos de 1955, 56, 57, 59 e 62. Apesar deste ser o caso histórico mais alarmante, não foi o primeiro caso documentado na literatura sobre associação entre danos à saúde e poluição do ar. Firket (1931) relacionou aumento de doenças respiratórias, complicações cardiovasculares e um excesso de 60 mortes no Vale de Meuse, na Bélgica. Também é famoso o episódio em Donora, Pensilvânia, que entre 26 e 31 de outubro de 1948 teve 43% da população afetada devido aos altos níveis de poluentes atmosféricos (Goldsmith, 1968; Wilson e Jones, 1974).

Em anos subsequentes cresceu progressivamente a preocupação com os efeitos danosos da poluição atmosférica e não apenas em situações agudas, que a princípio são mais fáceis de se controlar. As atenções voltaram-se para a detecção de níveis de concentração de poluentes atmosféricos que possam ser considerados inofensivos para a saúde humana, mesmo que os indivíduos estejam permanentemente expostos a eles. É preciso ter atenção, contudo, para o fato de que mesmo tendo estes estudos avançado muito nas últimas décadas, os interesses econômicos resistem à implantação de seus resultados na legislação ambiental. Mesmo quando ocorre a regulamentação legal, isso não garante que ela seja cumprida. Na cidade de São Paulo, por exemplo, regularmente os padrões de qualidade do ar são excedidos.

Boa parte dos estudos relacionando poluição com aumento das taxas de morbidade ou mortalidade em seres humanos centraram suas atenções nas concentrações de SO_2 e material particulado. Resíduos indesejados e secularmente associados ao uso intenso da combustão, particularmente de carvão mineral, eles passaram a ser objeto de medidas regulares tão logo intensificaram-se as pressões sociais por melhoria da qualidade do ar. Com isso há séries históricas longas de suas concentrações atmosféricas em muitas regiões, o que facilita o estudo da correlação entre saúde e concentração atmosférica de poluentes.

O consumo de petróleo cresceu progressivamente a partir da perfuração do primeiro poço de petróleo na Pensilvânia-EUA, em 1859, ultrapassando o uso do carvão por volta de 1962, principalmente devido ao seu emprego como combustível para veículos. Se por um lado as pressões sociais obrigaram a adoção de medidas que reduziram a emissão do SO_2 lançados na atmosfera, o contínuo aumento no consumo veicular dos combustíveis fósseis acrescentou milhões de toneladas/ano de CO , NO_x , Orgânicos Voláteis (VOC) e partículas na atmosfera. O smog fotoquímico e o O_3 passaram a ser gerados em grande quantidade em decorrência das reações fotoquímicas que ocorrem com estas emissões automotivas.

Neste novo cenário cresceu bastante a preocupação com o aerossol atmosférico antropogênico, pois tem sido o componente que apresenta maior correlação com danos à saúde. Mas o O_3 também mostra-se problemático, figurando hoje em segundo lugar nestas preocupações.

A discussão neste tópico particular estará limitada ao que seria o dano direto do poluente sobre a saúde humana. Um tratamento mais profundo da questão teria que considerar, ainda, o equilíbrio ou satisfação emocional e psicológico do indivíduo. Seria o caso, por exemplo de odores desagradáveis, que mesmo não causando danos físicos, acabam provocando desconforto e irritação. Esse é o caso do entorno de lixões e usinas de tratamento de lixo ou, mesmo, a exaustão de fábricas de alimento e cozinhas de restaurantes que podem ser agradáveis por um momento, mas terminam sendo irritantes para aqueles que habitam em sua vizinhança. Também deixaremos para os temas específicos o que seriam “efeitos colaterais”, por exemplo, da redução da camada de ozônio ou de alterações do efeito estufa e as prováveis mudanças climáticas globais.

4.2. Como avaliar impactos da poluição do ar na saúde?

Esse é um trabalho que envolve separar os efeitos dos poluentes de outros fatores que podem estar associados a eles ou, ainda de outros elementos que podem introduzir problemas de saúde comparáveis ou superiores àqueles associados aos poluentes. No primeiro caso seria evitar o que alguns caracterizam como “efeito refrigerante diet”: poder-se-ia concluir equivocadamente que o diet engorda, porque detecta-se que pessoas obesas têm alto consumo deste tipo de refrigerante. Ou seja, haveria um “fator verdadeiro”, causador tanto do dano à saúde quanto da poluição. Por exemplo, altos níveis de poluição atmosférica relacionam-se a grandes centros urbanos e a seus sistemas de transporte. Além de poluírem o ar estes patrocinam engarrafamentos e o stress e fadiga deles decorrentes. O estilo de vida nestes centros urbanos costumam ser mais sedentários também. Essas são condições favoráveis aos distúrbios cardiovasculares que precisam ser cotejadas devidamente no tratamento analítico para serem separadas da parcela referente à poluição do ar. No segundo caso temos questões como as diferenças de condições socioeconômicas, que têm reflexos profundos na qualidade de vida e, conseqüentemente, na saúde das pessoas. Isso representa elementos que vão desde as condições de salubridade no espaço de trabalho, qualidade da habitação, saneamento básico da área de moradia, padrão de alimentação, disponibilidade de atendimento de saúde etc. Há, ainda, fatores pessoais que podem influenciar profundamente os resultados, como o hábito de fumar, sexo do indivíduo, carga genética, disposição para fazer exercícios físicos etc.

Equacionar esta enorme quantidade de variáveis de forma a obter resultados cientificamente aceitáveis é complexo e envolve uma série de cuidados. Não é objetivo deste texto aprofundar-se sobre esta questão. Iremos apenas relacionar alguns aspectos relevantes.

Figura 4-4

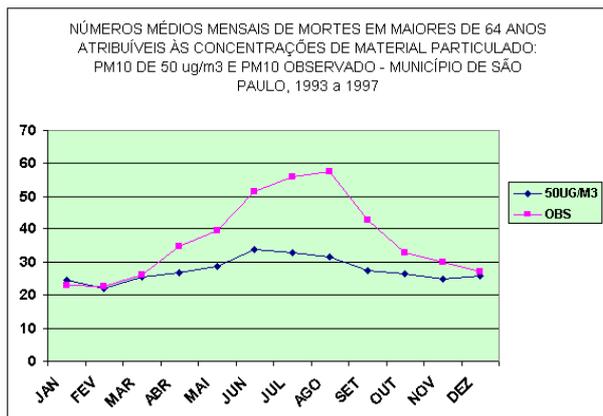
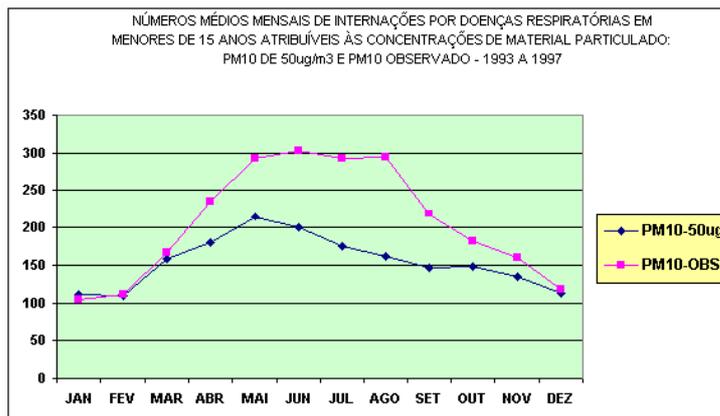


Figura 4-5



O procedimento científico padrão para se identificar o efeito de um determinado agente é fixar todas as variáveis relevantes para o processo em estudo e alterar apenas aquela relacionada ao agente que se deseja testar. Isso é possível apenas em condições de laboratório. Contudo não é ético avaliar a injúria que uma substância presumivelmente tóxica pode provocar ao organismo, experimentando-a sobre seres humanos. A alternativa é realizar o estudo em animais. Isso, contudo, introduz a dificuldade de selecionar espécies animais para as quais a substância a ser testada seja tóxica e definir a equivalência dose-dano entre o organismo testado e o homem. De qualquer forma os experimentos laboratoriais, permitem testar o potencial e tipo de dano associado a cada tipo de poluente, o que é virtualmente inviável de se conseguir diretamente no meio ambiente onde os poluentes encontram-se misturados.

Mas o que a ética não permite fazer em laboratório fechado, tem estado presente nos grandes centros urbanos e industriais, poluídos pelo *laissez-faire* da sociedade capitalista. São milhões de pessoas submetidas a um coquetel de poluentes o que acaba compondo, infelizmente, um enorme laboratório “natural” para estudar efeitos desta poluição sobre o organismo humano. Mas quando devidamente conduzidos e debatidos com a população, os resultados destes estudos têm gerado argumentos importantes nas lutas pela melhora da qualidade do ar e da vida em nossa sociedade.

Há uma série de questões a serem consideradas para equacionar devidamente estudos nesta área. O primeiro deles é o de empregar metodologias que: 1) possibilitem discriminar entre os efeitos dos poluentes e aqueles fatores urbanos, sociais ou pessoais que, como já comentamos, podem interferir nos índices de mortalidade ou de morbidade, assim como a poluição; 2) discriminar a ação dos diferentes poluentes e, também, a existência de efeitos sinérgicos entre eles. Mas além disso há uma multiplicidade de fatores para os quais é necessário ter atenção, como: 1) os níveis de concentração dos poluentes serem afetados pelas condições climáticas, ao mesmo tempo em que por si só elas podem introduzir condições adversas à saúde como é o caso do período de inverno; 2) o fato de que os níveis de poluição não são uniformemente distribuídos nas diferentes áreas da cidade; 3) processos migratórios que podem transportar pessoas com problemas que nada têm a ver com os índices de poluição de uma região². Lave e Seskin (1970, 1977), realizaram uma extensa análise sobre o problema da poluição do ar e a saúde humanas, revisando um número muito grande de trabalhos realizados até então sobre este tema. Apesar dos autores serem economistas e darem um tom tecnicista para questões que na verdade envolvem concepção de sociedade, o trabalho deles é rico no sentido da discussão de metodologia e do controle dos diferentes problemas circunscritos a este tipo de estudo.

O que se procura fazer é trabalhar com informações do sistema de saúde sobre taxa de morbidade e/ou mortalidade, buscando correlacioná-las com os correspondentes valores de concentração de poluentes na atmosfera. Tomando-se os devidos cuidados, a grande quantidade de casos desta base de dados permite a extração de resultados assentados sobre uma boa margem de confiabilidade estatística.

Em São Paulo, as pesquisas realizadas pelo Departamento de Poluição Atmosférica da Faculdade de Medicina da USP, coordenadas pelo Prof. Paulo Saldiva, indicam um aumento de até 12% no risco de morte por doenças respiratórias em dias de elevadas concentrações de poluentes, mas além dessas situações extremas a exposição prolongada (meses ou anos) mesmo a níveis baixos de poluição pode provocar doenças do sistema respiratório em pessoas saudáveis, agravar o quadro de pessoas que já possuem problemas respiratórios e mesmo levar à morte (Fapesp, 1997). No caso de eventos de altas concentrações de poluentes, há um aumento de 25% na procura por atendimento em prontos-socorros infantis. No inverno o número de internações em São Paulo aumenta até 15% e a mortalidade de idosos aumenta 12%. Os efeitos crônicos (isto é, a longo prazo) da exposição à poluição ocorrem na forma de inflamações difusas pelo tecido respiratório, das vias aéreas superiores até os alvéolos pulmonares. As substâncias e o material particulado inalado aderem-se à mucosa e provocam uma disfunção do batimento ciliar que normalmente funciona como uma espécie de filtro do ar inalado. Com isso, aumenta o risco de contração de doenças respiratórias mesmo em pessoas saudáveis (Fapesp, 1997).

² Esse, por exemplo, foi o caso da associação que chegou a ser proposta em Cubatão entre poluição e o nascimento de crianças com malformações congênitas como a anencefalia (c.f. Kucinski ou Monteleone, 1982). Isso acabou sendo inviabilizado posteriormente porque percebeu-se que havia um fluxo migratório muito grande de populações pobres do nordeste brasileiro para a região de Cubatão, o que introduzia outros fatores significativos de correlação com aquele tipo de problema.

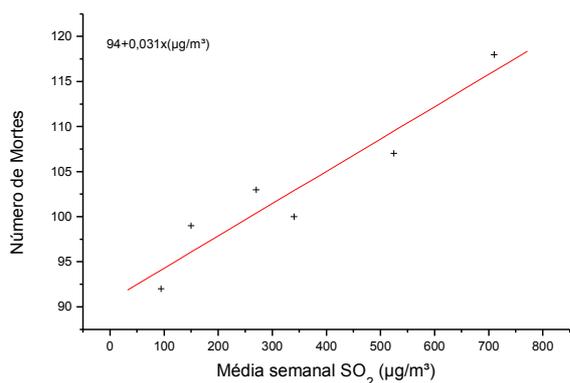


Figura 4-7 Número de mortes avaliados sobre 156 semanas de inverno em Oslo, Noruega (1958/9 a 1964/5).

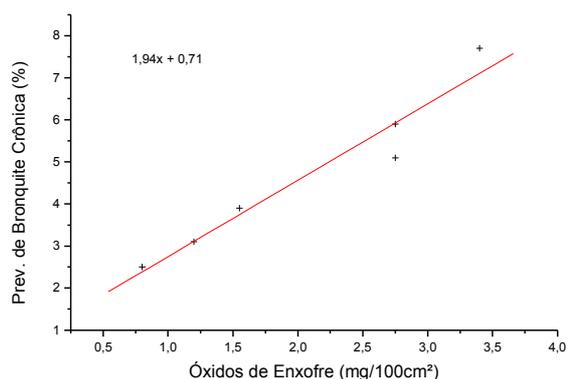


Figura 4-8 Prevalência de bronquite crônica em diversas cidades japonesas

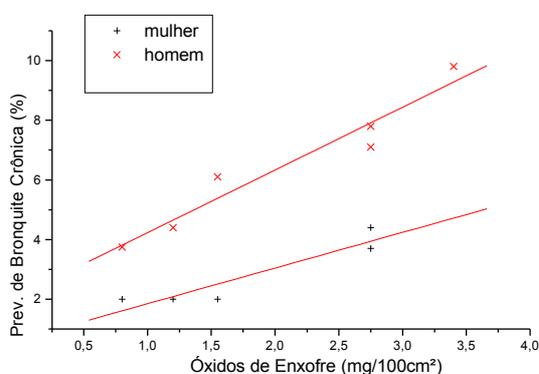


Figura 4-9 Prevalência de bronquite crônica em diversas cidades japonesas, separando-se os indivíduos por sexo.

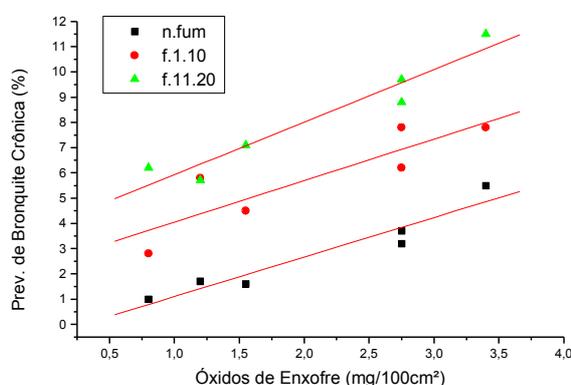


Figura 4-10 Prevalência de bronquite crônica em diversas cidades japonesas, separando-se os indivíduos não fumantes daqueles que fumam até 10 cigarros/dia e de 11 a 20 cigarros/dia.

Apresentaremos a seguir resultados de estudos para alguns poluentes.

4.3. Estudos sobre danos de alguns poluentes específicos

4.3.1. Material Particulado

Atualmente o Material Particulado tem sido considerado como o poluente mais problemático para a saúde humana. Como discutimos anteriormente, partículas maiores que $15\mu\text{m}$ costumam não penetrar no nariz, porque seu arraste pelo fluxo de ar inalado não consegue vencer a força da gravidade. Já as partículas com diâmetro $< 2,5\mu\text{m}$ conseguem ultrapassar os mecanismos de proteção, existentes nas vias superiores do sistema respiratório. Portanto, a fração fina normalmente representa o maior problema para a saúde, pois pode penetrar até o pulmão, oferecendo um maior potencial de dano, dependendo de sua composição.

Estima-se que cerca de 1,9% das mortes em áreas urbanas da Grã-Bretanha estejam diretamente ligadas à poluição causada pelo material particulado (COMEAP, 2000). Em São Paulo foram avaliados os números de mortes de idosos (figura 4-4) e internação de jovens (figura 4-5) atribuídos às concentrações do material particulado (Freitas et al., 2002). Nota-se que se o padrão de concentração média anual de $50\text{mg}/\text{m}^3$ fosse seguido, haveria uma substancial redução do número de mortes e internações.

O SO_2 tende a ser adsorvido sobre a superfície do particulado, sendo este um mecanismo através do qual penetra até o pulmão, quando normalmente ficaria retido na partes úmidas das vias respiratórias superiores. Em função disso o padrão para o produto entre a concentração de Partículas e SO_2 é muito mais restritivo do que quando se considera cada um destes poluentes individualmente.

4.3.2. Compostos de S

Em função da particular associação entre queima de combustíveis fósseis e emissões de SO_2 , há um grande acúmulo de estudos relacionando concentrações de SO_2 com problemas de saúde. Mas outros compostos químicos de S na atmosfera que derivam do SO_2 , também podem ser problemáticos para o sistema respiratório, provocando congestionamento das vias superiores e enfisema nos tecidos pulmonares.

A Fig 4-6 ilustra danos por SO_2 , considerando a relação entre tempo de exposição e sua concentração na atmosfera. A parte hachurada representa uma combinação de valores sobre os quais detectou-se aumento da incidência de mortes. A parte reticulada indica valores sobre os quais suspeita-se que a saúde seja afetada.

Nas áreas urbanas da Grã-Bretanha, estima-se que 0,81% do número total de mortes sejam causadas diretamente por altas concentrações de SO_2 (COMEAP, 2000).

A Figura 4-7 mostra a correlação entre número de mortes e níveis de SO_2 para Oslo. As Figuras 4-8, 2-9 e 4-10 permitem uma análise da correlação entre incidência de bronquite crônica e a medida de precipitação de Óxidos de Enxofre (Wilson e Jones, 1974). Neste caso, pode-se perceber como outros fatores podem interferir nesta análise, como é o caso do tabagismo ou do sexo do indivíduo.

4.3.3. Monóxido de Carbono

O CO tem uma afinidade com a hemoglobina próxima de 200 vezes superior à do O_2 . Desta forma uma elevação nos seus níveis de concentração atmosférica conduz à uma redução na capacidade de transporte de O_2 pelo sangue, até que as CO-hemoglobinas sejam repostas por outras novas. Os efeitos a longo prazo de uma exposição continuada ainda não são bem estudados, mas há indicações de que propicie doenças cardiovasculares. Respostas de curto prazo a exposições elevadas podem provocar dores de cabeça e sonolência, com conseqüente amortecimento da capacidade de reflexo. A Fig 4-11 ilustra seus efeitos.

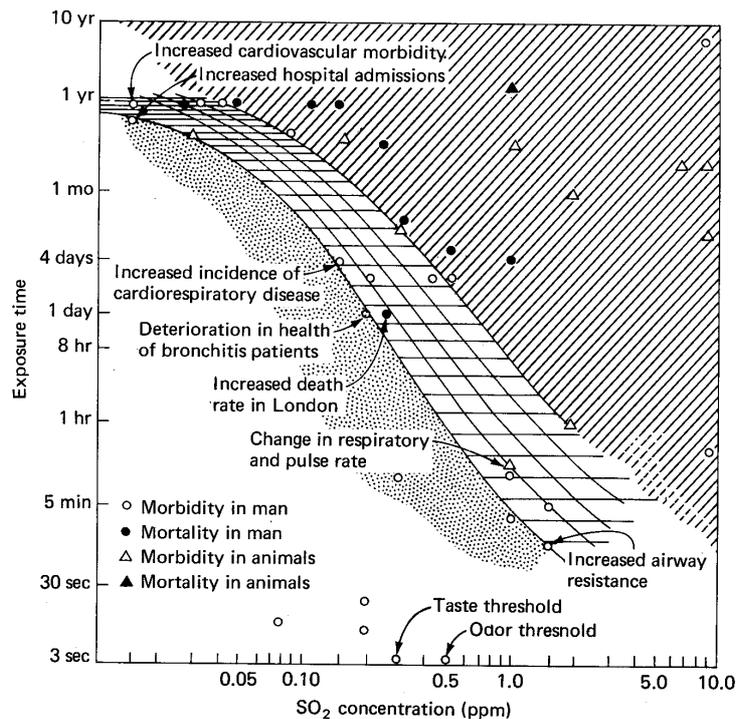


Figura 4-6

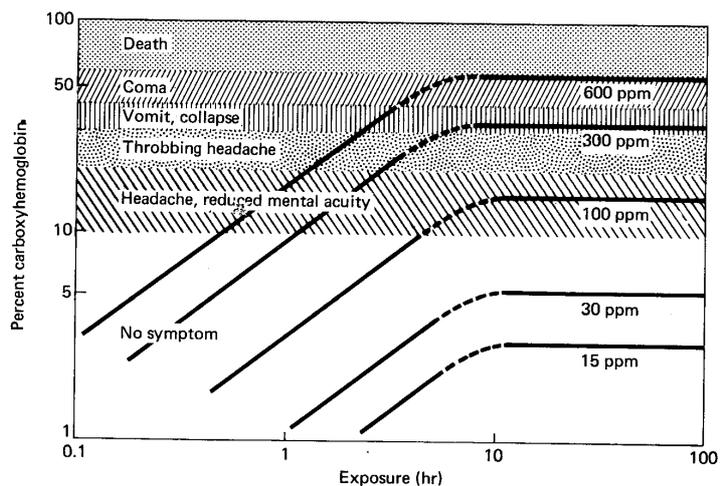


Figura 4-11

5. Danos a Vegetais e a Materiais

Os contaminantes atmosféricos causam também danos aos vegetais e aos materiais.

Os vegetais sofrem em suas folhas que danificam seus estômatos e provocam o surgimento de pontos de tecido vegetal necrosado. Identifica-se que o SO_2 , O_3 e fluoretos causam este tipo de problema. Os poluentes podem ainda afetar seu desenvolvimento, atacar brotos germinais e "vitrificar" as faces inferiores das folhas. Há uma série de estudos também que verificaram a contaminação do vegetal a partir das raízes, devido à ação dos contaminantes precipitados sobre o solo.

Os materiais sofrem ação de corrosão por parte de poluentes como SO_2 , um dos principais responsáveis pelas chuvas ácidas. Na Europa por exemplo existe uma série de trabalhos apontando o ataque que as chuvas ácidas acabam provocando à obras de arte (estátuas de mármore e fachada de edifícios históricos). Fadiga e perda de tensão são efeitos provocados pelo SO_2 , NO_x e O_3 . Este último em particular é um poderoso oxidante fazendo inclusive com que as borrachas se tornem quebradiças.

6. Amostras de Poluentes

A Figura 6-1 ilustra uma estação amostradora para controle da qualidade do ar. Neste caso particular ela está instalada em um contêiner. No seu interior ficam os equipamentos mais sensíveis, enquanto sobre seu teto ficam os coletores do ar que será analisado, sensores para parâmetros meteorológicos (velocidade do vento, termômetro, pluviômetro etc) e coletores de partículas.

6.1. AFG - Amostrador de Fino e Grosso

Trata-se de um sistema bastante simples para coleta de aerossol atmosférico. O GEPA (Grupo de Estudos de Poluição do Ar do IFUSP) regularmente emprega estes amostradores, que separam o aerossol atmosférico aspirado em duas faixas de diâmetro aerodinâmico médio de partículas (F): $2,5\mu\text{m} < F < 15\mu\text{m}$ e $F < 2,5\mu\text{m}$. Este fracionamento do material particulado permite estudar separadamente as 2 modas finas e a moda grossa, observadas no aerossol atmosférico (Whitby, 1978). As partículas de cada uma destas modas são geradas e removidas segundo processos distintos. Elas também interagem de modo diferenciado com o sistema respiratório humano.

Abaixo, descreve-se simplificada o modo como é operado. As ilustrações correspondentes estão nas Figuras 6-2, 6-3 e 6-4. Convém observar, contudo, que há outros sistemas amostradores semelhantes. O mais indicado atualmente é que na fração grossa trabalhe-se com $2,5\mu\text{m} < F < 10\mu\text{m}$, o que possibilita acompanhar diretamente os padrões de qualidade do ar definidos na legislação. Os fluxos de ar empregados, também podem variar conforme o equipamento. Fluxos maiores são interessantes em áreas em que os níveis de concentração são baixos.

(i) O ar é admitido via um chapéu seletor cujo diâmetro de corte foi projetado para $15\mu\text{m}$. O aerossol é coletado por dois filtros fixados sequencialmente em um suporte específico. O primeiro filtro (policarbonato - Nuclepore com orifícios de $8\mu\text{m}$), retém partículas com $F > 2,5\mu\text{m}$ (particulado grosso) e o segundo (policarbonato - Nuclepore com orifícios de $0,4\mu\text{m}$), retém as partículas restantes (particulado fino). Esta sequência de seleção é que promove o fracionamento do aerossol nas faixas de tamanho especificadas.

(ii) Emprega-se bombas de vácuo limpas (com diafragmas de borracha) para aspirar o ar com fluxo de $\sim 7\text{ l/min}$.

(iii) O volume de ar amostrado é lido em um medidor de volume de gás (totalizador) como aqueles fabricados pelo Liceu de Artes e Ofício.

(iv) Na entrada e na saída da bomba de vácuo instala-se dois vasos, com volume de 2 litros, construídos com tubos de PVC. Eles servem para atenuar as vibrações no fluxo provenientes do uso de bombas de diafragma. Estas vibrações podem comprometer a eficiência dos filtros ou prejudicar o funcionamento dos totalizadores.

6.1.1. Detalhando o AFG

O chapéu coletor de aerossol foi projetado para segregar partículas com diâmetro aerodinâmico médio (F) menor que $15\mu\text{m}$ ($F < 15\mu\text{m}$).

Os filtros Nuclepore de policarbonato possuem orifícios circulares com diâmetro bem definido. O diâmetro de corte do filtro com orifícios de $8\mu\text{m}$ é de $2,5\mu\text{m}$. Portanto, em associação com o chapéu seletor, esse filtro retém a

Fig. 6-1
Estação Amostradora,
V. Parisi/Cubatão-SP

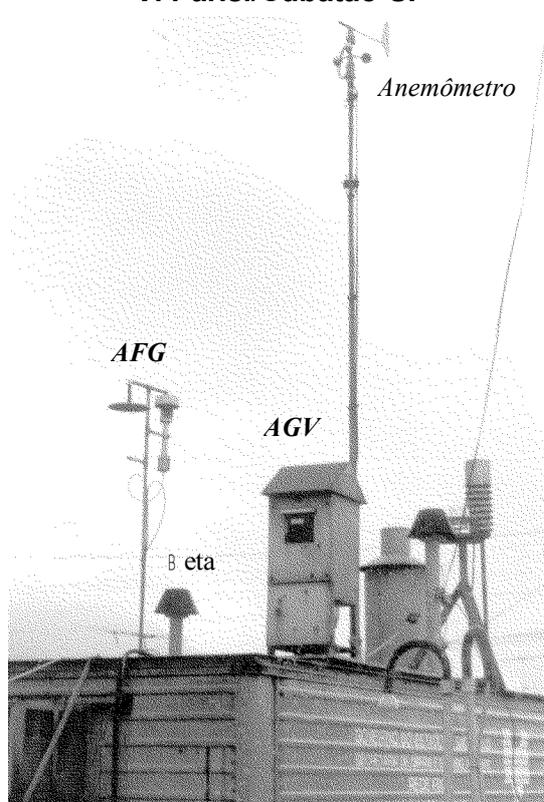


Fig. 6-2 - Esquema de Amostragem com AFG

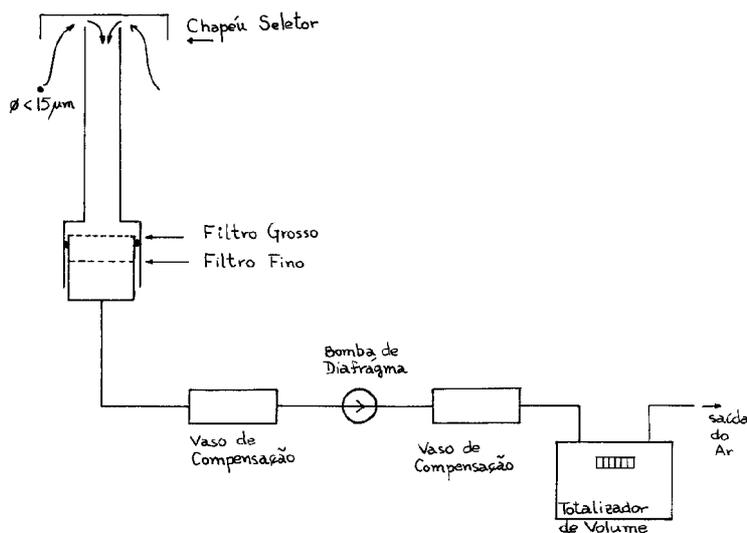


Figura 6-3
Suporte dos filtros no AFG

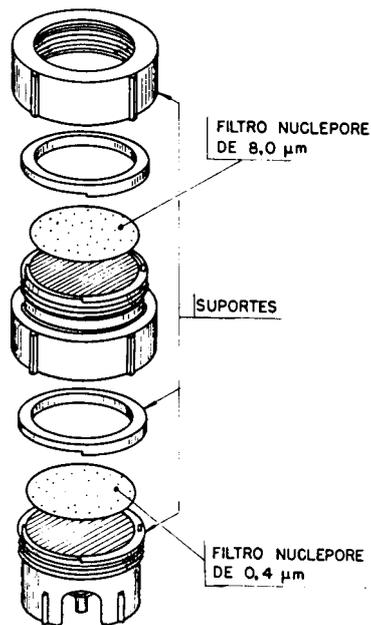
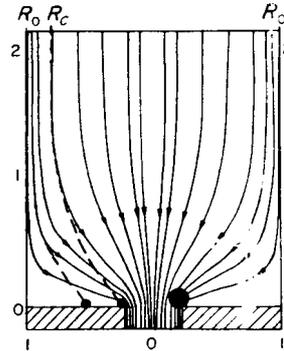


Figura 6-4
Impactação e Intercepção em filtro Nuclepore
 (Manton, 1978)



R_o = Raio equivalente da área específica (por poro)
 R_c = Raio da trajetória crítica

fração grossa do aerossol ($2,5\mu\text{m} < F < 15\mu\text{m}$). No filtro de $0,4\mu\text{m}$ fica retido o particulado fino ($F < 2,5\mu\text{m}$), que atravessou o filtro grosso.

Acredita-se que os três principais mecanismos de captura de partículas neste tipo de filtro sejam: (1) intercepção das partículas maiores nas bordas do orifício; (2) impactação das partículas pesadas na superfície do filtro; (3) difusão de partículas pequena nas paredes dos orifícios. Pode-se adicionar mais dois processos tidos como de menor importância: (4) retenção total de partículas grandes no orifício; (5) efeitos eletrostáticos [Heidam, 1981].

A Fig.6-4 [Manton,1978] ilustra os dois primeiros processos.

A intensidade da velocidade perpendicular à superfície do filtro (velocidade de face), o diâmetro e a altura dos poros no filtro, são características importantes para a eficiência de coleção do particulado.

6.1.2. Dicotômico

A Fig.6-5 ilustra sua construção. Seu chapéu de coleta do aerossol foi projetado para selecionar partículas com $F < 15\mu\text{m}$ (há outros projetados para $10\mu\text{m}$).

As partículas que entram no amostrador são separadas por impactação inercial em uma fração grossa ($2,5\mu\text{m} < F < 15\mu\text{m}$) e fina ($F < 2,5\mu\text{m}$) e em seguida são coletadas em filtros específicos (normalmente usado filtro de fibra de vidro para amostras orgânicas e teflon para analisar inorgânicos por XRF).

A Fig 6-6 mostra esquema do funcionamento da impactação inercial. O fluxo de ar que segue para o sistema de captação de partículas finas ($15,0 \text{ l/min}$) é bem superior aquele que suga as partículas grossas ($1,7 \text{ l/min}$). Desta forma, as partículas menores (mais leves) que conseguem acompanhar as linhas de fluxo, seguem a corrente de ar principal, saindo pelo espaço de separação entre os dois tubos axialmente alinhados, sendo retidas no filtro logo abaixo. Já as partículas

Figura 6-5 - Dicotômico (Andersen, 1981)

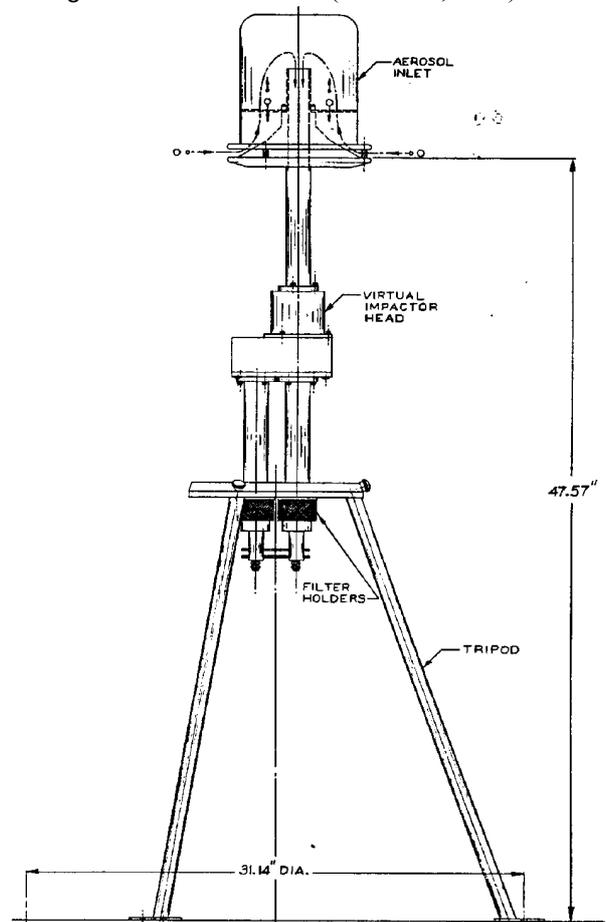


Figura 6-6 - Separação Inercial (Andersen,1981)

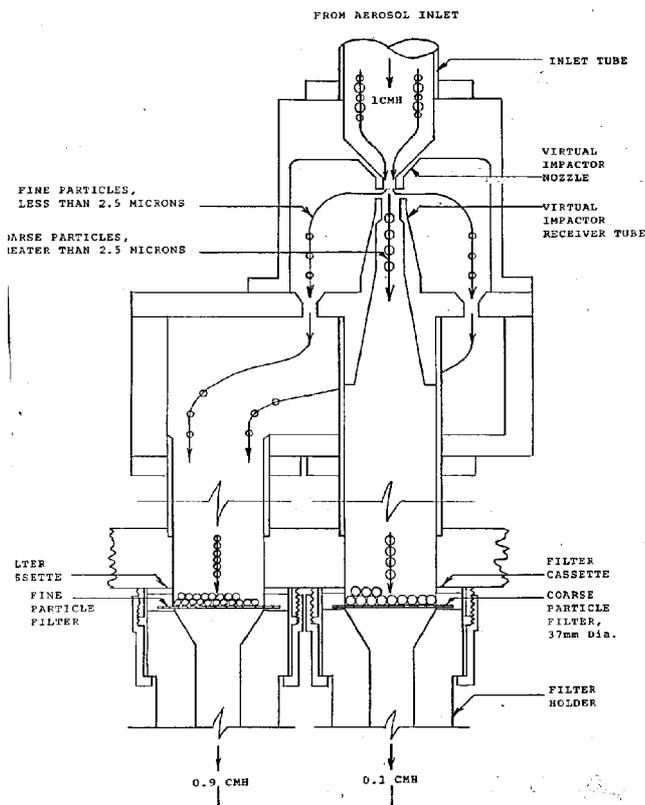
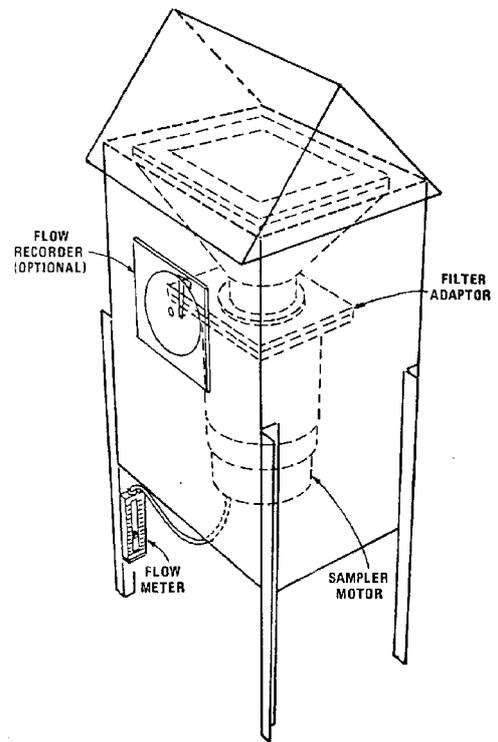


Figura 6-7 - HIVOL (OMS, 1976)



grossas (mais pesadas), por terem uma inércia maior, escapam da linha de fluxo e “impactam” no orifício do prolongamento de tubo, sendo arrastadas até o filtro onde são coletadas.

Note-se que a concentração de particulado fino está associada apenas ao fluxo de ar que segue para o filtro fino (15,0 l/min), enquanto a concentração de particulado grosso relaciona-se ao fluxo total (16,7 l/min). É conveniente, também, que se corrija a massa de grossos obtida, subtraindo dela a pequena fração de finos que termina acompanhando o fluxo de coleção das partículas grossas.

A estabilidade do fluxo de ar aspirado é fundamental para definir as curva de eficiência deste sistema.

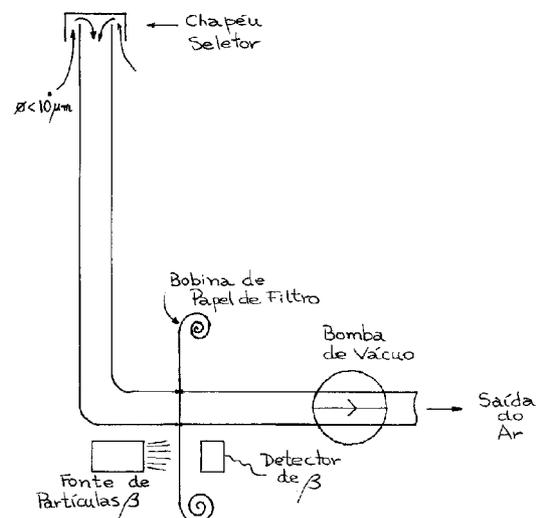
6.1.3. HIVOL

Conhecido como “amostrador de grandes volumes”, é largamente empregado pelas agências de controle da qualidade do ar.

Trata-se basicamente de um sistema onde o ar é aspirado através de um filtro por uma turbina aspiradora de alta capacidade, movida a motor de escovas. Opera-se com um fluxo constante situado entre 1,1 e 1,7 m³/min (Fig.6-7). O filtro de fibra de vidro tem uma superfície de 20cm X 25cm e retém partículas com $F > 0,1\mu\text{m}$.

Tradicionalmente ele coleta o material particulado total em suspensão na atmosfera ($0,1\mu\text{m} < F < 100\mu\text{m}$) mas, atualmente, recomenda-se o emprego de um chapéu seletor para particulado inalável ($F < 10\mu\text{m}$) no ponto de admissão do ar. As características de construção e operação deste equipamento estão descritas, por exemplo, em norma ABNT ou manual da Organização Mundial de Saúde (1976).

Figura 6-8
Esquema do Amostrador β



O período normal de amostragem é de 24h. Eventualmente pode-se empregar período mais curto (12h, por exemplo), nas no resultado final deve-se considerar a média sobre 24h.

6.1.4. *beta*

É um sistema utilizado para amostragens contínuas e automáticas.

A Fig.6-8 mostra um esquema do funcionamento dos aparelhos utilizados pela CETESB na sua rede automática de amostragem.

O ar é admitido em um ponto protegido por um chapéu seletor de particulado inalável ($F < 10\mu\text{m}$). Durante um período de 50 min. ele é forçado através de uma área definida de uma tira contínua de papel de filtro apropriado, onde o material particulado fica retido. Em mais 10 minutos, o que completa um ciclo de uma hora, é feita a determinação automática da massa de aerossol coletada, por correlação com a absorção da radiação beta neste ponto do filtro (antes e depois da amostragem).

O sistema de detecção da radiação disponibiliza um sinal eletrônico digitalizado que, juntamente com o volume estimado pelo fluxo médio ajustado, permite o cálculo da concentração por um computador acoplado. Este computador é conectado via modem à linha telefônica, fazendo a transmissão horária das informações.

7. Aerossóis Atmosféricos

No item 2.4.1 das Notas Sobre Poluição do Ar - I, foi dada uma noção introdutória sobre Material Particulado (ou Aerossóis Atmosférico), enquanto poluente atmosférico, apresentando-se, inclusive, uma figura que sintetiza os processos de geração e remoção de partículas para as diferentes modas da distribuição típica de tamanho por superfície. É importante que você domine estas noções introdutórias.

No item 6 destas mesmas notas, encontra-se, também, a discussão de uma série de instrumentos empregados para a medição de partículas.

Agora nós iremos ampliar o estudos sobre os aerossóis atmosféricos. Eles representam um componente extremamente importante no ar. Além dos danos diretos que podem trazer à saúde, interferem em condições meteorológicas como o processo de formação de nuvens ou a absorção e espalhamento de radiação eletromagnética. Pode, assim, determinar o nível de visibilidade atmosférica e interferir nas condições climáticas, como ocorre com o efeito estufa. Eles também representam um registro de informações sobre suas fontes geradoras e sobre os gases que sofrem conversão gás partícula, adsorção ou que reagem quimicamente na superfície de partículas.

Nos itens seguintes iremos discutir algumas características gerais dos aerossóis, distribuições de tamanho, espalhamento de luz e técnicas de análise físico-químicas. Em um curso específico sobre este tema caberia, além de uma maior detalhamento destes tópicos, incluir estudos sobre dinâmica de uma partícula (Lei de Stokes e Movimento Browniano), termodinâmica e teoria de nucleação de partículas (homogênea e heterogênea) e, ainda, a dinâmica de populações de aerossóis (coagulação e crescimento).

As duas principais referências empregadas aqui foram Seinfeld (1986, 1998) e Hinds (1982, 1999).

7.1. Características gerais dos Aerossóis

Aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão em um gás, compreendendo uma faixa de tamanho entre 0,001 a 100 μm . Podem ter diferentes formatos e composição química. Há uma série de denominações empregadas para grupos específicos de aerossóis:

poeira (dust): partículas sólidas produzidas por processos mecânicos (moagem, peneiramento etc).

partícula grossa (coarse particle): com diâmetro superior a 2 μm

partícula fina (fine particle): com diâmetro menor que 2 μm .

fumos (fume): partículas sólidas produzidas pela condensação de vapores ou produtos gasosos de combustão; normalmente são menores que 1 μm .

fumaça (smoke): fumaça visível, resultante de combustão incompleta; as partículas podem ser sólidas ou líquidas e usualmente são menores que 1 μm .

névoa (mist): partículas líquidas formadas por condensação ou atomização, com tamanhos desde submicron até 20 μm .

nevoeiro (fog): névoa visível.

smog (smoke+fog): produtos de reação fotoquímica, usualmente combinado com vapores de água; as partículas geralmente são menores que 1 ou 2 μm .

nuvens (cloud): um aerossol visível com contornos definidos.

Os aerossóis atmosféricos primários são resultado de injeções diretas na atmosfera. Os secundários são formados na atmosfera, a partir de transformações como as reações fotoquímicas que originam o smog fotoquímico.

Um aerossol mono-disperso apresenta um diâmetro de partículas muito bem definido. O polidisperso tem uma ampla faixa de tamanhos.

A densidade das partículas irá depender das substâncias que as geraram. Já no caso de fumos ou de fumaça, tem-se uma densidade aparente pois encontramos interstícios vazios em meio ao material que compõem a partícula.

A Tabela 7-I fornece estimativas para emissões globais de origem natural e antropogênica. Perceba-se que as estimativas para emissões naturais apresentam valores superiores às antropogênicas. Contudo, devemos nos lembrar que as emissões geradas por ações humanas localizam-se especialmente nos centros urbanos, o que introduz concentrações elevadas de poluentes nestas regiões.

A densidade de partículas, no caso de fase líquida ou de fragmentos de sólidos, é a mesma da substância que a compõe. A Tabela 7-II permite observar concentrações típicas, segundo as características destas regiões. Perceba-se que, como seria de se esperar, os níveis de concentração em centros urbanos cresce em função do número de seus habitantes.

No ar também podemos encontrar partículas biológicas, com vida ou passíveis de terem vida. A Tabela 7-III lista aquelas que são mais conhecidas.

Tabela 7-I Estimativas de Emissões de partículas na atmosfera (Hinds, 1999) (Tg/ano)

Emissões Naturais	Faixa	Melhor valor
Poeira do Solo	1000-3000	1500
Sal Marinho	1000-10000	1300
Lascas vegetais	26-80	50
Poeira vulcânica	4-10000	30
Incêndios Florestais	3-150	20
Conversão Gás Partícula	100-260	180
Fotoquímico	40-200	60
TOTAL	2200-24000	3100
Emissões Antropogênicas		
Emissão direta	50-160	120
Conversão Gás Partícula	260-460	330
Fotoquímico	5-25	10
TOTAL	320-640	460

Tabela 7-II Concentrações típicas para diferentes tipos de localidades (Hinds, 1982/1999) (Particulado Total em Suspensão; considera-se uma faixa de 1 a 2 km de altura na troposfera)

Local	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Fundo	20
Rural	40
Urbano <10 ⁵ Habitantes	86
10 ⁵ - 10 ⁶ Habitantes	104
>10 ⁶ Habitantes	154

Tabela 7-III - Partículas biológicas (com vida ou passíveis de terem vida) (Hinds, 1982)

	Diâmetro (μm)	Concentração (número/m^3)
Vírus	0,015 - 0,45	-
Bactérias	0,3 - 15	0,5 - 100
Fungos	3 - 100	100 - 10.000
Algas	0,5	10 - 1000
Esporos	6 - 60	0 - 100.000
Pólen	10 - 100	0 - 1000

Parte significativa do particulado fino origina-se e processos de combustão, particularmente de combustíveis fósseis. Desta forma, sua composição típica costuma apresentar níveis elevados de C e S. Em locais em que se usa o Pb como antidetonante para a gasolina, ele é um elemento traço que se associa ao aerossol fino, ainda que em concentrações relativamente baixas. Já o particulado grosso tem uma componente muito forte de ressuspensão de solo. Desta forma sua composição básica irá apresentar elementos típicos de solo, como é o caso de Al, Si, Ca e Fe.

7.2. Distribuição de Tamanho de Partículas

O primeiro aspecto a considerar é de ordem prática. O que é tamanho de partícula? Como já dissemos, elas têm composição e formas diferentes. Também não é tarefa fácil indicar a densidade de cada uma delas, especialmente porque variam com sua composição e fase (estado da matéria). Pode-se considerar o *diâmetro do volume equivalente*,

ou seja, o diâmetro de uma partícula esférica feita do mesmo material (mesma densidade) e ocupando o mesmo volume. Outra opção é considerar o *diâmetro de Stokes*. Neste caso considera-se uma partícula esférica, de mesma densidade, e que tenha a mesma velocidade de sedimentação (velocidade limite de queda no ar). Mas o *diâmetro aerodinâmico* é aquele que em geral é o mais empregado. Considera-se o diâmetro de uma partícula esférica com densidade 1 g/cm³ e que tenha a mesma velocidade de sedimentação que a partícula original. Este é o modo de se lidar generalizadamente na atmosfera com a diversidade de composição (densidades) e formatos de partículas.

Conhecida uma distribuição de número de partículas, $n(D_p)$, onde D_p é o diâmetro da partícula, a concentração de número de partículas em uma faixa de diâmetros será dada por:

$$N = \int_0^{\infty} n(D_p) dD_p \quad [\text{unidades de } n \text{ serão } 1/(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3)] \quad \text{E. 7-1}$$

Frequentemente obtêm-se mais informações quando se trabalha com as distribuições de superfície (S) ou volume (V), sendo esta última equivalente à distribuição por massa, pois $m = R \cdot V$, sendo R a densidade. Medidores como o Impactador em Cascata fornecem a distribuição de massa.

Para superfície, multiplica-se a distribuição de número de partículas pela área da esfera equivalente. Então temos:

$$n_s(D_p) = \pi D_p^2 n(D_p) \quad [\text{unidades de } n_s \text{ serão } \mu\text{m}^2/(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3)] \quad \text{E. 7-2}$$

Para volume, multiplica-se a distribuição de número de partículas pelo volume da esfera equivalente. Então temos:

$$n_v(D_p) = \frac{\pi}{6} D_p^3 n(D_p) \quad [\text{unidades de } n_v \text{ serão } \mu\text{m}^3/(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3)] \quad \text{E. 7-3}$$

Se houver possibilidade de definir uma densidade, em g/cm³, a distribuição de massa será:

$$n_m(D_p) = \frac{\pi R D_p^3}{6 \cdot 10^6} n(D_p) \quad [\text{unidades de } n_m \text{ serão } \mu\text{g}/(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3)] \quad \text{E. 7-4}$$

Se integrarmos as equações 7-2, 7-3 e 7-4, de 0 a ∞ , iremos obter o total de superfície, volume e massa, respectivamente, das partículas.

Os dois momentos mais utilizados de uma distribuição são a média e a variância e são assim calculados:

Média

$$\bar{D}_p = \frac{\int_0^{\infty} D_p n(D_p) dD_p}{\int_0^{\infty} n(D_p) dD_p} \quad \text{E. 7-5}$$

Variância:

$$S^2 = \frac{\int_0^{\infty} (D_p - \bar{D}_p)^2 n(D_p) dD_p}{\int_0^{\infty} n(D_p) dD_p} \quad \text{E. 7-6}$$

Para se obter volumes e superfícies médios, basta dividir as integrais das respectivas distribuições E.7-2 e E.7-3, pelo número total de partículas, dado por E.7-1.

7.2.1. Distribuição Log-Normal

A expressão para a distribuição normal é:

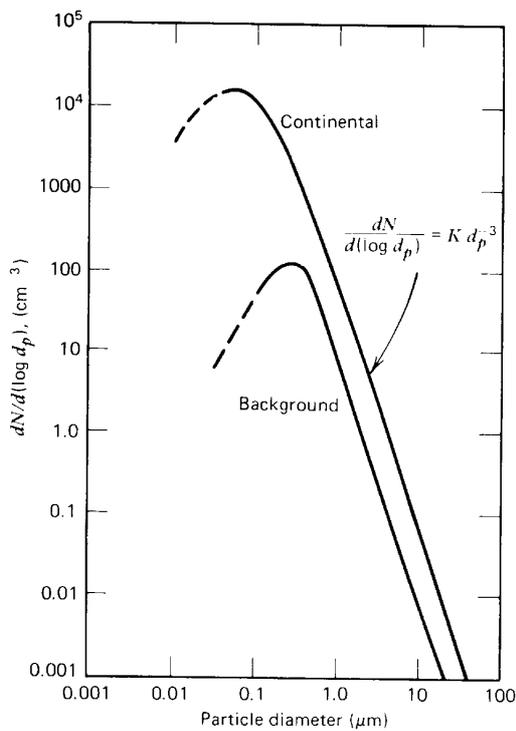


Figura 7-1
Distribuições de número de partículas em função do diâmetro. Lei de Junge (Hinds, 1982).

$$n(u) = \frac{N}{(2^p)^{1/2} S(u)} \exp\left[-\frac{(u - \bar{u})^2}{2S^2(u)}\right] \quad \text{E. 7-7}$$

Sendo u a variável em questão e S é obtido pela E.7-6 com u no lugar de D_p

Enquanto uma distribuição normal vale sobre um intervalo de $-\infty$ a $+\infty$, o diâmetro de partículas existe no intervalo de 0 a $+\infty$ e sua distribuição não é simétrica. Empiricamente observa-se que são obtidos bons ajustes à distribuições de tamanho de partículas quando se emprega uma distribuição log-normal. Neste caso usa-se o logaritmo do diâmetro da partícula ao invés do próprio diâmetro. Veja que desta forma também se resolve o problema do intervalo de validade da função, uma vez que, para uma variável que existe entre 0 e $+\infty$, o seu log varia entre $-\infty$ a $+\infty$.

A distribuição log-normal fica:

$$n(\ln D_p) = \frac{N}{(2^p)^{1/2} \ln S_g(D_p)} \exp\left[-\frac{(\ln D_p - \ln \bar{D}_{pg})^2}{2 \ln^2 S_g(D_p)}\right] \quad \text{E. 7-8}$$

Note que neste caso usa-se a média geométrica, no lugar da média e o desvio padrão geométrico no lugar do desvio padrão. Perceba-se, também, que para integração deve-se usar o diferencial $d(\ln D_p)$ no lugar de dD_p . Caso se deseje trabalhar com dD_p , deve-se usar a relação entre eles:

$$\frac{d(\ln D_p)}{dD_p} = \frac{1}{D_p} \quad \text{p} \quad d(\ln D_p) = \frac{dD_p}{D_p} \quad \text{E. 7-9}$$

7.2.2. Distribuições características de Aerossóis Atmosféricos

A figura 7-1 apresenta duas distribuições típicas para número de partículas na atmosfera. A função matemática que apresenta bom ajuste para estas distribuições é uma função potencial:

$$\frac{dN}{d(\log D_p)} = K' d^{-K} \quad \text{E. 7-10}$$

sendo $K \gg 3$

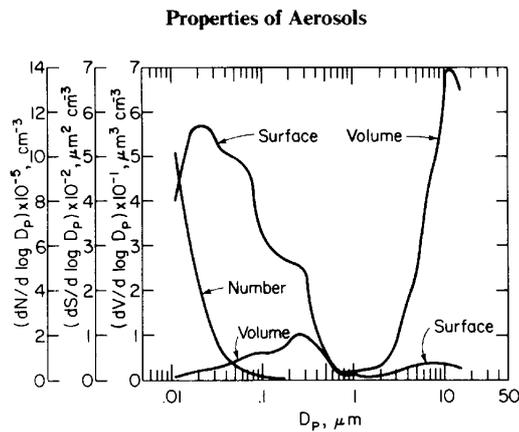


Figura 7-3
Distribuições de número, superfície e volume de partículas pelo diâmetro (Willeke and Whitby, 1975)

Esta é chamada a Lei de Junge para distribuições de aerossóis atmosféricos. Perceba que regiões continentais, onde temos atividades rurais ou urbanas, apresentam distribuições com intensidades muito superiores, particularmente para partículas finas ($D_p < 1 \mu\text{m}$). Isso é função, principalmente, do grande volume de partículas geradas a partir de processos de combustão.

Perceba que a distribuição de número de partículas fornece pouca informação sobre o aerossol atmosférico, especialmente para partículas grossas, cujas concentrações em número são pequenas. Por outro lado, podemos perceber pela Figura 7-2 que as distribuições de superfície e volume possibilitam a visualização tanto das modas de partículas finas quanto das grossas, as quais mostram que existe um vale em torno de $D_p = 2 \mu\text{m}$, que separa dois grupos de partículas em 3 modas de distribuição. A figura 2-2 do item 2.4.1, analisa como estas modas representam processos diferenciados de geração e de remoção de partículas.

8. Bibliografia

- Anuário Estatístico 1957-1987, ANFAVEA, 1988.
- Bermann, Célio (2002). Panorama Energético no Brasil
- Britannica (2001) Deluxe Edition CD-ROM.
- Charlson, Robert J. and Wigley, Tom M. L., 1994. Sulfate Aerosol and Climatic Change, Scientific American, February, p.28 a 35.
- CETESB, (2005). Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2004, Companhia de Tecnologia Ambiental, série relatórios, Secretaria do Meio Ambiente ISSN 0103-4103.
- Chambers, Leslie A. (1968). Classification and Extent of Air Pollution Problems, in Air Pollution, vol.1 – Air Pollution and its effects, edited by Arthur C. Stern, Academic Press, pp.: 1-21.
- Charlson, Robert J. and Wigley, Tom M. L., 1994. Sulfate Aerosol and Climatic Change, Scientific American, February, p.28 a 35.
- COMEAP (Committee on the Medical Effects of Air Pollutants) (2000). The Quantification of the Effects of Air Pollution on Health in the United Kingdom. <http://www.doh.gov.uk/hef/airpol/airpol7.htm>
- Cortese, Anthony D.; 1990. Cleanaing the Air, Env. Sci. Technol., Vol. 24, 4.
- Energy Information Administration (2011). *International Energy Annual 2011*. <http://www.eia.doe.gov/>.
- FAPESP (1997) A poluição causa doenças e mata. Notícias Fapesp N. 21, junho 1997.
<http://www.fapesp.br/ambie21.htm>
- Firket M. (1931). Sur les causes des accidents survenus dans la vallée de la Meuse, lors des brouillards de décembre 1930, Bull. Acad. Roy. Med. Belg., 11: 683-741.
- Freitas, Clarice U.; Pereira, Luiz A. A.; Saldiva, Paulo H. N. (2002) Vigilância dos Efeitos na Saúde Decorrentes da Poluição Atmosférica: Estudo De Factibilidade. Centro de Vigilância Epidemiológica da Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo. http://www.cve.saude.sp.gov.br/htm/doma_vig.htm
- Goldemberg, J.; Johansson,T.B.;Reddy,A.K.; Williams,R.H.; 1988. Energia para o desenvolvimento, T.A.Queiroz, Editor, Ltda.
- Goldsmith, J. R., (1968). Effects of air pollution on human health, in Air Pollution, vol.1 – Air Pollution and its effects, edited by Arthur C. Stern, Academic Press, pp.: 547-615.
- Hariss, R.C.; S.C.Wofsy; M.Garstag; E.V. Browell; L.C.Mollion; R.J.McNeal; J.M.Hoell, R.J.Bendura; S.M.Beck; R.L.Navarro; J.T.Rilley; R.L.Snell; The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2A): Dry Season 1985, J.Geophy, Research, 93, 1351-1360, 1988.
- Hidy, G. M. (1975). Summary of the California Aerosol characterization experiment, Journal of Air Pollution Control Associatio, 25, 1106-1114.
- Hinds, Willian C., (1982, 1999) Aerosol Technology, properties behavior, and measurement of airborne particles, John Wiley & Sons.
- Kucisnki, Bernardo; ou Monteleone Roque (1982). Cubatão uma tragédia ecológica, Ciência Hoje, Nº 1, pp.: 11-24.
- Lave, Lester B. e Seskin, Eugene P. (1970). Air Pollution and Human Health, Science, 21 August, V. 169, Nº 3947, pp. 723-733.
- Lave, Lester B. e Seskin, Eugene P. (1977). Air Pollution and Human Health, The Johns Hopkins University Press, 368p.
- Logan WPD. (1953). Mortality in the London fog incident, 1952. Lancet, 1: 336-338.
- Murgel,E.M.; Szwarc,A.; Santos,M.D.S.R.; Branco,G.M.; Carvalho,H.. 1987. Inventário de emissão veicular - metodologia de cálculo; CETESB, Rev.Eng.Sanitária, vol 26:3.

- OMA, Ontario Medical Association (1999). The Illness Costs of Air Pollution in Ontario: A Summary of Finding. <http://www.oma.org/phealth/icap.htm>
- Organization Mundial de la Salud, 1976. Selection de Procedimentos para Medir la Contaminacion del Aire, Genebra, Suíça.
- Pacce, I; Yamamoto,N.P.; Rangel,R.; Terra em Trânsito Folha d',11/07/89.
- Perkins, Henry C.; 1974. Air Pollution, Mc Graw-Hill Kogakusha Ltda, Tokio, Japão.
- Ryazanov, V.A.; Arch.Environ.Health 5, 479-494 (1962).
- Seinfeld, John H., (1986). Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons.
- Seinfeld, John H., Pandis, Spyros, N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, INC..
- Stern, Arthr C.; Wohler, Henry C.; Boubel, Richare W.; Lowry P.; 1973. Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, New York.
- Stern, A.C.; (Editor); Air Pollution, 2ª edição, Vol.III, Academic Press, New York, 1968.
- Vasconcelos, Eduardo Alcantara de (1988). Trânsito em São Paulo: análise sócio-política da intervenção do estado na circulação urbana, FFLCH-USP, Departamento de Ciências Sociais, tese de Mestrado – Tabela 49.
- Willekc, K. and Whitby, K.T., (1975). Atmospheric Aerosols: size distribution interpretation, Journal of Air Pollution Control Association, **25**, 529-534.
- Wilson, Richard and Jones, “William J., 1974. Energy, Ecology and the Environment, Academic Press, Inc.

Anexo-I - Qualidade do Ar

Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

(Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90)

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 (PTS)	24 horas ¹	240	150	Amostradores de Grandes Volumes
	MGA ²	80	60	
Partículas inaláveis (PM10)	24 horas ¹	150	150	Separação inercial/filtração
	MAA ³	50	50	
Fumaça	24 horas ¹	150	100	Refletância
	MAA ³	60	40	
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 horas ¹	365	100	Pararosanilina
	MAA ³	80	40	
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1 hora ¹	320	190	Quimiluminescência
	MAA ³	100	100	
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora ¹	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo
		35 ppm	35 ppm	
	8 horas ¹	10.000	10.000	
Ozônio (O ₃)	1 hora ¹	9 ppm	9 ppm	Quimiluminescência
		160	160	

(1) – Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano
 (2) – Média Geométrica Anual
 (3) – Média Aritmética Anual

Critérios para episódios agudos de poluição do ar (Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90)			
Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas Totais em Suspensão PTS - ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	375	625	875
Partículas Inaláveis PM10 - ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	250	420	500
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	250	420	500
Dióxido de Enxofre SO ₂ - ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	800	1.600	2.100
SO ₂ X PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24 h	65.000	261.000	393.000
Dióxido de Nitrogênio NO ₂ - ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1 h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de Carbono CO - (ppm) – 8 h	15	30	40
Ozônio O ₃ - ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1h	400 *	800	1.000

(*) – O nível de atenção na Legislação do Estado de São Paulo é de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Diretrizes da OMS:

PM_{2.5}	PM₁₀
10 µg/m ³ média anual	20 µg/m ³ média anual
25 µg/m ³ média 24h	50 µg/m ³ média 24h

O₃
100 µg/m ³ 8h-média horária

NO₂
40 µg/m ³ média anual
200 µg/m ³ média por 1-hora

SO₂
20 µg/m ³ média 24h
500 µg/m ³ média por 10-minutos

PADRÃO PARA MP2,5 (Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm): Não existe padrão para MP2,5 na legislação nacional. A US-EPA estabelece que a média aritmética das médias anuais (calculadas a partir das médias de 24 horas) dos últimos três anos consecutivos não pode ultrapassar 15µg/m³ e o percentil 98 das médias de 24h em três anos não pode ultrapassar 65µg/m³ para nenhuma estação da região (isso quer dizer que 98% das médias têm que estar abaixo deste valor).

ESTRUTURA DO ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR USADO PELA CETESB

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