

# Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um Desenvolvimento Sustentável

2ª edição atualizada e ampliada

EDITOR  
ARLINDO PHILIPPI JR



Copyright © 2018 Editora Manole Ltda., conforme contrato com o editor.

PROJETO GRÁFICO E CAPA  
Nelson Mielnik e Sylvia Mielnik

FOTOS DA CAPA  
Ana Maria da Silva Hosaka e  
Opção Brasil Imagens

DIAGRAMAÇÃO  
Acqua Estúdio Gráfico

PRODUÇÃO EDITORIAL  
Editor gestor: Sônia Midori Fujiyoshi  
Editora responsável: Ana Maria da Silva Hosaka

SECRETARIA EDITORIAL  
Mary Lobas de Castro

APOIO TÉCNICO E EDITORIAL  
Alexandre de Oliveira e Aguiar  
Mary Lobas de Castro  
Pedro Caetano Sanches Mancuso  
Tadeu Fabrício Malheiros  
Tatiana Tucunduva P. Cortese

PROMOÇÃO E REALIZAÇÃO  
Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Saúde  
e Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Saúde Global e  
Sustentabilidade  
Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade  
de Saúde Pública, USP  
Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável / editor Arlindo Philippi Junior. – 2. ed. rev. e atual. – Barueri: Manole, 2018. – [Coleção Ambiental; v.23]

Bibliografia.  
ISBN: 978-85-204-3210-5

1. Desenvolvimento sustentável 2. Gestão ambiental 3. Saneamento 4. Saúde ambiental 5. Saúde pública I. Philippi Junior, Arlindo. II. Série.

17-05543

CDD-628.

Índices para catálogo sistemático:  
1. Saneamento, saúde e ambiente : Engenharia  
sanitária 628

Todos os direitos reservados.

Nenhuma parte deste livro poderá ser reproduzida, por qualquer processo, sem a permissão expressa dos editores. É proibida a reprodução por xerox.

A Editora Manole é filiada à ABDR – Associação Brasileira de Direitos Reprográficos.

1ª edição – 2005 (reimpressões: 2007, 2010, 2013, 2014)

2ª edição – 2018

Editora Manole Ltda.  
Avenida Ceci, 672 – Tamboré  
06460-120 – Barueri – SP – Brasil  
Fone: (11) 4196-6000  
www.manole.com.br  
info@manole.com.br

Impresso no Brasil  
Printed in Brazil

**Arlindo Philippi Jr**

*Engenheiro civil e sanitarista, Faculdade de Saúde Pública da USP*

**Tadeu Fabrício Malheiros**

*Engenheiro ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos da USP*

## A QUESTÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As atividades antrópicas têm contribuído, ao longo da história, no conjunto de emissões para a atmosfera, com impactos variados na saúde pública, no bem-estar das comunidades e no meio ambiente (World Bank, 1999a; Ostro, 2004).

As emissões provenientes dessas atividades, como na queima de madeira, carvão e outros combustíveis fósseis, nos processos industriais, nas atividades agropecuárias, para atendimento aos padrões de consumo e de produção da sociedade, variam ao longo do tempo, em função de um conjunto de fatores culturais e tecnológicos.

Assim, ao longo da história do planeta, a atmosfera, enquanto recurso natural, recebeu concentrações de substâncias nela lançadas por processos induzidos pela própria natureza, tais como erupções vulcânicas, evaporação, ventos e tormentas, decomposição de vegetais e animais, e incêndios florestais, entre outros. Porém, o crescimento dos espaços urbanos, associado ao aumento populacional e à dificuldade de suprir soluções na mesma velocidade do aparecimento de problemas decorrentes desse crescimento, elevou os níveis de poluição ambiental, como no caso da poluição atmosférica, de forma localizada e também global.

O que se observa, então, é um processo crescente de exaustão da capacidade de suporte dos ecossistemas, sobretudo junto às regiões onde as aglomerações urbanas se instalaram, considerando que a capacidade de autodepuração desses sistemas é limitada, no tempo e espaço (Calvert e Englund, 1984). Impactos de escala global também vêm ocorrendo, com alterações significativas na atmosfera, como a questão do aumento acelerado de gases de efeito estufa, redução da camada de ozônio, chuva ácida, entre outros. O Quadro 1 apresenta os níveis de poluição por material particulado em algumas cidades em países em desenvolvimento, com destaque para a concentração de material particulado que está significativamente acima dos padrões de qualidade do ar. A Environmental Protection Agency (EPA) da Califórnia, Estados Unidos, estabelece o padrão de material particulado fino (MP10; média anual) em  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (EPA, 2015; EU, 2015; Cetesb, 2015).

**Quadro 1** – Os dez países com os piores níveis de poluição por material particulado em cidades, conforme o Observatório Global de Saúde da Organização Mundial de Saúde (OMS).

País	Cidade	População (número de habitantes) (data de referência) (escala) <sup>1</sup>	Material particulado fino – PM10 (média anual em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	Ano de referência
República Islâmica do Irã	Ahvaz	$1,1 \times 10^6$ (2011) (cidade)	372	2009
Mongólia	Ulaanbaatar	$1,1 \times 10^6$ (2011) (cidade)	279	2008
Índia	Ludhiana	$1,6 \times 10^6$ (2011) (cidade)	251	2008
Paquistão	Quetta	$560,3 \times 10^3$ (1998) (cidade)	251	2003-2004
Botsuana	Gaborone	$244,9 \times 10^3$ (2014) (cidade)	216	2005
Emirados Árabes Unidos	Al Ain	$435,9 \times 10^3$ (2013) (cidade)	158	2008
China	Lanzhou	$3,6 \times 10^6$ (2010) (cidade nível-prefeitura)	150	2009

(continua)



**Quadro 1** – Os dez países com os piores níveis de poluição por material particulado em cidades, conforme o Observatório Global de Saúde da Organização Mundial de Saúde (OMS). *(continuação)*

País	Cidade	População (número de habitantes) (data de referência) (escala) <sup>1</sup>	Material particulado fino – PM10 (média anual em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>2</sup>	Ano de referência
Turquia	Van	$387,7 \times 10^3$ (2014) (cidade)	146	2008
Senegal	Dakar	$2,6 \times 10^6$ (2013) (cidade)	145	2010

Fonte: <sup>1</sup>City Population (2015); <sup>2</sup>WHO (2011).

De acordo com Kojima e Lovei (2001), milhares de pessoas morrem anualmente como consequência da exposição à poluição atmosférica nas áreas urbanas, além dos milhões de casos de doenças respiratórias, associadas também a esse problema.

Em novas estimativas divulgadas hoje, a Organização Mundial da Saúde relata que em 2012 cerca de 7 milhões de pessoas morreram – uma em cada oito do total de mortes globais – como resultado da exposição à poluição do ar. Estes dados mais do que duplicam as estimativas anteriores e confirmam que a poluição do ar é hoje o maior fator de risco para a saúde ambiental do mundo. Reduzir a poluição do ar poderia salvar milhões de vidas [...] Em particular, os novos dados revelam uma ligação mais forte entre exposição a poluição do ar (interior e exterior) e as doenças cardiovasculares, como acidente vascular cerebral e doença isquêmica do coração, bem como entre a poluição do ar e câncer. (WHO, 2014, tradução dos autores)

Dessa forma, esse quadro resulta em última instância em impactos econômicos às nações, ao bem-estar das comunidades e ao meio ambiente. Requer ação coordenada entre atores de diferentes setores governamentais e não governamentais para maior sensibilização dessa problemática e da urgência de esforços de caráter integrado no seu enfrentamento. Portanto, o enfoque para a resolução dessa questão deve incluir:

- Estabelecimento de políticas que priorizem ações integradas na reversão dessa problemática.
- Desenvolvimento de programas de educação para o desenvolvimento sustentável.
- Minimização da produção de resíduos, por meio da mudança nos padrões de consumo e de produção.
- Definição e aplicação de procedimentos adequados, do ponto de vista da proteção ambiental e responsabilidade social, de tratar resíduos gerados.
- Repensar a forma de ocupação e uso do solo, respeitando os limites de capacidade de suporte e do tempo de autodepuração dos espaços.

## ATMOSFERA E A QUESTÃO DA POLUIÇÃO

### Atmosfera: um recurso natural finito

A camada de gases que envolve o planeta Terra é composta por uma mistura de gases, dos quais o nitrogênio e o oxigênio representam 99%, que é denominada atmosfera. É chamada de homosfera a camada da atmosfera que se estende até uma altura de 100 km, cuja composição molecular é praticamente constante, em consequência das movimentações verticais do ar e dos ventos. A composição dessa camada está apresentada na Tabela 1. Embora a atmosfera se estenda muito além dessa altura, 99,999% da massa atmosférica está compreendida dentro da homosfera (Turco, 1997).

**Tabela 1** – Composição característica da homosfera.

Substância	Composição em volume
Nitrogênio	78,08%
Oxigênio	20,95%
Argônio	0,93%
Dióxido de carbono	0,0358%
Hidrogênio	0,00005%

(continua)

**Tabela 1** – Composição característica da homosfera. (*continuação*)

Substância	Composição em volume
Óxido nitroso	0,00003%
Ozônio	0,000004%
Todos os demais	0,004116%

Fonte: Turco (1997).

Quanto ao seu perfil vertical de temperatura, a atmosfera é classificada em troposfera, região na qual a temperatura decresce com a altitude, até cerca de 10 a 16 km, em função da latitude e época do ano, e que compreende 90% da massa total atmosférica. É na troposfera que residem todas as formas de vida do planeta (Braga et al., 2002). Posteriormente, vem a camada da estratosfera, onde a temperatura aumenta com a altitude, estendendo-se até uma altura de 50 km. É nessa região que se localiza a camada de ozônio (Braga et al., 2002). A camada seguinte é a mesosfera, cuja curva de temperatura volta a cair com a altitude, registrando-se nela as menores temperaturas da atmosfera (Braga et al., 2002). A última camada é a termosfera, chamada também de ionosfera, que alcança até aproximadamente 190 km, sendo importante para as telecomunicações (Braga et al., 2002).

Outra forma de classificação, que é baseada nas propriedades físicas e químicas da atmosfera, divide a atmosfera em quimiosfera e ionosfera. A quimiosfera, que se eleva até uma altura de 50 km, caracteriza-se pelas propriedades químicas moleculares e atômicas. A ionosfera, com capacidade de refletir ondas de radioemissão, contém grandes quantidades de íons (Guimarães, 1992; Turco 1997).

O conteúdo de vapor d'água é variável, podendo atingir valores que vão de 0,05% na região polar continental a 2,5% em zonas equatoriais úmidas. O conteúdo de vapor d'água exerce influência nos movimentos de massas de ar, no espalhamento de luz, na absorção de calor, no comportamento aerodinâmico das partículas em suspensão e nas reações térmicas e fotoquímicas na atmosfera (Garcez e Alvarez, 1999; Guimarães, 1992).

## Poluição atmosférica: aspectos históricos

A poluição do ar pode ser definida como presença de matéria ou energia na atmosfera, de forma a torná-la imprópria, causar prejuízos aos usos

antrópicos, à saúde pública e ao ecossistema natural. A exposição à poluição atmosférica é tão antiga quanto a exposição do ser humano ao fogo. Há evidências arqueológicas de que a poluição do ar em ambientes internos gerou problemas para os humanos, os quais usavam fogo em espaços confinados (WHO, 1999). Estudos têm revelado problemas de poluição *indoor*, causados ou agravados pelo uso de fogão, à base de lenha, turfa, estrume de vaca, entre outros, com sistema de exaustão inadequado ou inexistente, para fins de cozimento e aquecimento. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que 2,8 milhões de pessoas morrem anualmente por exposição à alta concentração de material particulado em ambientes internos (WHO, 1999).

Há referências à poluição atmosférica e ao controle do uso de carvão, por exemplo, em vários períodos ao longo da história. Mas foi no período após a Revolução Industrial, que se deu início ao reconhecimento público de episódios agudos de poluição do ar. Conforme Guimarães (1992), no Vale do Meuse, Bélgica, em 1930, um grande número de pessoas adoeceram com dores no peito, tosse, dificuldade de respiração, irritação do nariz e dos olhos. Na ocasião, sessenta pessoas morreram, principalmente pessoas idosas que já eram portadoras de doenças do coração e pulmões. O evento durou cinco dias, presumindo-se que uma combinação de poluentes esteve associada ao episódio, entre os quais se destaca a presença de gotículas de ácido sulfúrico resultante de altas concentrações de dióxido de enxofre em presença de gotículas de água. Em Donora, nos Estados Unidos, em 1948, outro episódio também resultou em problemas críticos de saúde, com 14 mil habitantes apresentando irritação do trato respiratório e dos olhos. Vinte pessoas morreram, principalmente pessoas que já eram portadoras de doenças cardíacas e do sistema respiratório. O evento durou cinco dias, e acredita-se que está associado à presença de dióxido de enxofre e material particulado em suspensão no ar (Guimarães, 1992). Em Londres, em 1952, cerca de 3.500 a 4.000 pessoas morreram além do esperado para aquele período, principalmente pessoas idosas e aquelas que já eram portadoras de bronquite, broncopneumonia e doenças do coração. Acredita-se também que tal fato estava associado à presença de dióxido de enxofre e material particulado em suspensão no ar (Guimarães, 1992). No Brasil, em Bauru, 1952, foram registrados 150 casos de doença respiratória aguda e nove óbitos. Os pacientes apresentaram bronquite e manifestações alérgicas do trato respiratório. Verificou-se que o episódio ocorreu em razão da emissão na atmosfera de pó de mamona, por uma indústria de extração de óleos vegetais (Guimarães, 1992).

## **Emissões naturais**

As emissões naturais de poluentes na atmosfera incluem erupção de vulcões, suspensão de poeira pela ação dos ventos, incêndios florestais, odores provenientes de processos de decomposição de matéria orgânica, entre outros, cujas quantidades de poluentes emitidas podem ser significativas (WHO, 1999).

De forma geral, as emissões naturais representam menor risco de agravo à saúde pública, normalmente em função de características de menor grau de toxicidade e por ocorrerem em áreas não densamente povoadas, ou pelo fato de as emissões se dispersarem em grandes porções da atmosfera, causando concentrações muito pequenas; exceto no caso de vulcões, que podem inclusive alterar significativamente o clima da Terra.

## **Emissões antrópicas**

As emissões antrópicas de poluentes atmosféricos incluem resíduos gasosos da queima de combustíveis fósseis, incineração, inseticidas, efluentes gasosos de processos industriais e outros.

Quando considerados os efeitos da poluição do ar sobre a saúde, principalmente em áreas urbanas com alta densidade demográfica, as emissões antropogênicas são muito importantes e são aquelas para as quais a atenção é geralmente direcionada com vistas ao controle (WHO, 1999).

## **POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

São considerados poluentes atmosféricos quaisquer substâncias que, quando lançadas na atmosfera, podem resultar em concentrações que causem ou possam causar danos à saúde e ao meio ambiente (WHO, 1999).

## **Classificação de poluentes atmosféricos**

Conforme a OMS (WHO, 1999), os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com a forma de sua emissão e formação:

- a) Primários – aqueles poluentes emitidos diretamente pelas fontes. Por exemplo, emissões provenientes de veículos movidos a gasolina englobam o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), os hidrocarbonetos ( $\text{HC}$ ), entre outros, conforme a composição do combustível. Outros poluentes primários são: o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), as mercaptanas, entre outros.
- b) Secundários – aqueles poluentes não emitidos diretamente por fontes, porém, formados a partir de reações ocorridas na troposfera, como o ozônio ( $\text{O}_3$ ), o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), o peroxiacetil nitrato (PAN).

Há vários poluentes encontrados na atmosfera que são provenientes de reações ocorridas nela própria, ou seja, “a atmosfera, por vezes, funciona como um recipiente que provê condições satisfatórias para que ocorram reações entre poluentes emitidos, resultando em outras substâncias que, muitas vezes, sequer são emitidas por qualquer fonte de poluição do ar, formando dessa forma os poluentes secundários” (Guimarães, 1992, p. 164). Uma das reações que ocorre em uma atmosfera poluída é a reação fotoquímica, pela qual reagem óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos na presença da luz solar, resultando nos oxidantes fotoquímicos, que são tóxicos (Guimarães, 1992).

No caso da formação do ozônio, por exemplo, o  $\text{NO}_2$  é transformado fotoquimicamente, sob ação de raios ultravioletas, em  $\text{NO}$  e oxigênio atômico. Este último reage com o  $\text{O}_2$  para gerar o  $\text{O}_3$ . A presença de radicais de peróxidos, resultantes de reações dos  $\text{HC}$  e outros compostos orgânicos, favorece a retransformação de  $\text{NO}$  em  $\text{NO}_2$ , porém, sem destruir o ozônio formado. Assim, estabelece-se um processo de formação em série de ozônio, com pico de concentração do poluente por volta do meio-dia. Conforme a radiação solar diminui, também diminui a taxa de formação do  $\text{O}_3$ , uma vez que se trata de reação fotoquímica (WHO, 1999).

Uma das formas de classificação dos poluentes atmosféricos que considera o estado físico do poluente, conforme descrito no Quadro 2, separa os poluentes em material particulado e gases e odores. De acordo com WHO (1999), material particulado inclui partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI – partículas com diâmetro aerodinâmico médio menor do que  $10\ \mu\text{m}$ ) e partículas inaláveis finas ( $\text{PM}_{2,5}$  – partículas com diâmetro aerodinâmico médio menor que  $2,5\ \mu\text{m}$ ). As partículas ina-

láveis incluem: exaustão de diesel; poeira de carvão e poeiras minerais (por exemplo, asbestos, calcário, cimento); poeiras metálicas e fumos (por exemplo, zinco, cobre, ferro, chumbo); névoas ácidas (por exemplo, névoa de ácido sulfúrico, névoas de pesticidas, névoa de pintura, fumaça de óleo).

**Quadro 2** – Classificação dos poluentes atmosféricos conforme estado físico.

Classificação	Descrição	Exemplos
Material particulado	Partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar, ou formadas na atmosfera, com tamanho variando na faixa de 0,01 a 100 $\mu\text{m}$ (em diâmetro aerodinâmico equivalente)	Poeiras: partículas sólidas, geralmente formadas por processo de desintegração mecânica; poeira da rua, pó de pedra, poeira de cimento etc. Fumos: partículas sólidas formadas por condensação ou sublimação de substâncias gasosas; fumos de chumbo, de alumínio etc. Fumaça: partículas principalmente sólidas, provenientes da combustão de combustíveis fósseis ou madeira Névoas: partículas líquidas produzidas por condensação ou por dispersão de um líquido; névoas de ácido sulfúrico, névoas de óleo de operação de corte de material, névoa de pesticida etc.
Gases e vapores	Poluente na forma molecular	Monóxido de carbono, gás carbônico, dióxido de enxofre, ozônio, óxido de nitrogênio etc.

Fonte: WHO (1999).

As PTS provocam doenças respiratórias que podem causar câncer, provocam corrosão de materiais e destruição da flora. Além disso, podem causar incômodo, como, por exemplo, acúmulo de sujeira, interferência na luz solar, e também funcionam como superfície catalítica para reação de produtos químicos adsorvidos (WHO, 1999).

As partículas inaláveis finas (com diâmetro aerodinâmico médio menor que 2,5  $\mu\text{m}$ ) têm comportamento físico-químico diferenciado das partículas grossas (sejam as partículas inaláveis grossas com diâmetro aerodinâmico médio menor que 10  $\mu\text{m}$  e maior do que 2,5  $\mu\text{m}$  ou mesmo as partículas grossas com diâmetro aerodinâmico médio maior que 10  $\mu\text{m}$ ), resultando em riscos e impactos diferenciados na saúde pública e no meio ambiente, conforme detalhado no Quadro 3. Essas partículas geralmente são emitidas por atividades como: combustão industrial e residencial,

exaustão de veículos automotores etc. Essas partículas também se formam na atmosfera a partir de gases como o  $\text{SO}_2$  e os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), bem como compostos orgânicos voláteis, que são emitidos em atividades de combustão, transformando-se em partículas, como resultado de reações químicas no ar. As partículas inaláveis finas penetram mais profundamente no trato respiratório, enquanto as partículas menores do que  $0,5 \mu\text{m}$  podem depositar-se nos alvéolos (Cetesb, 2002, 2015; WHO, 1999).

**Quadro 3** – Comparação entre características de partículas finas e partículas grossas.

	Partículas finas <sup>1</sup>	Partículas grossas <sup>2</sup>
<b>Origem</b>	Gases	Sólidos e gotas grandes
<b>Formação</b>	Reação química; nucleação; condensação; coagulação; evaporação de gotas de <i>fog</i> e nuvens nas quais há gases que se dissolvem e reagem	Ruptura mecânica (impacto, abrasão de superfícies); evaporação de <i>sprays</i> ; ressuspensão de poeiras
<b>Composição</b>	Sulfato $\text{SO}_4^{2-}$ ; nitrato $\text{NO}_3^-$ ; amônia $\text{NH}_4^+$ ; íon de hidrogênio $\text{H}^+$ ; carbono elementar; compostos orgânicos; metais (Pb, Cd, Ni, Zn, Fe, Mn)	Poeira ressuspensa (poeira de solo, da rua); poeira de carvão, óxidos metálicos, carbonatos de cálcio, sal marinho, pólen, fragmentos de plantas e animais, e outros
<b>Solubilidade</b>	Muito solúvel, higroscópico	Muito insolúvel e não higroscópico
<b>Fontes principais</b>	Combustão de carvão, óleo, gasolina, diesel, madeira, produtos de transformação atmosférica de $\text{NO}_x$ , $\text{SO}_2$ e compostos orgânicos	Ressuspensão de poeira industrial e poeira das ruas; suspensão de poeira do solo, em ruas não pavimentadas, agricultura; fontes biológicas; construção e demolição; brisa marítima
<b>Tempo de vida na atmosfera</b>	Dias a semanas	Minutos a horas
<b>Distância que podem percorrer</b>	Centenas a milhares de quilômetros	Menos do que um quilômetro a dezenas de quilômetros

<sup>1</sup> Partículas finas: partículas com diâmetro aerodinâmico médio menor do que  $2,5 \mu\text{m}$ .

<sup>2</sup> Partículas grossas: partículas com diâmetro aerodinâmico médio maior do que  $2,5 \mu\text{m}$ .



As quantidades de poluentes na atmosfera podem resultar em concentrações de dezenas a milhares de microgramas por metro cúbico de ar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sendo essa uma das formas de expressar concentrações de poluentes na atmosfera. Outra unidade utilizada para gases e vapores são partes de poluente por milhão de partes de ar em volume (PPM) ou, ainda, partes por bilhão (PPB) (Guimarães, 1992). As concentrações de poluentes podem ser expressas como valores instantâneos ou valores ponderados em um período, dependendo da base estatística utilizada na apresentação dos dados e das características referentes aos impactos potenciais, na saúde pública e no meio ambiente, que o poluente pode causar (Guimarães, 1992).

## Principais poluentes

Determinados poluentes atmosféricos são frequentemente emitidos em maiores quantidades e por uma grande variedade ou um grande número de fontes, estando, dessa forma, presentes com maior frequência em áreas urbanas poluídas, resultando em concentrações que podem oferecer riscos significativos à saúde pública, à flora e à fauna. Entre eles podem ser citados as partículas em suspensão, o dióxido de enxofre, os óxidos de nitrogênio, os hidrocarbonetos, o monóxido de carbono e os oxidantes fotoquímicos (ozônio, peroxiacetil nitrato, aldeídos). São ainda considerados importantes aqueles poluentes que apresentam grande impacto agravante à saúde pública e ocupacional, como o cloro e seus compostos, o gás sulfídrico, os sulfatos, o flúor e seus compostos, as névoas ácidas em geral, os odores em geral, as fumaças em geral, o mercúrio, as partículas de chumbo, amianto, entre outros, as partículas radioativas, o alfa-benzopireno e similares, o ruído, o pólen etc. (Guimarães, 1992).

## Fontes de poluição do ar

São considerados fontes de poluição do ar qualquer empreendimento, processo, equipamento, atividade que possa liberar ou emitir matéria ou energia para a atmosfera, de forma a torná-la poluída.

As fontes de poluição do ar são classificadas quanto à sua forma (WHO, 2006; Usepa, 2015; Kojima e Lovei, 2001):

- Fontes pontuais: quando pode ser considerada um ponto em determinada área, por exemplo, chaminés industriais em geral, incineradores etc.
- Fontes tipo área: utilizada para englobar um conjunto de pequenas fontes individuais não significativas (no contexto individual) quando caracterizadas como fonte pontual, mas a emissão do conjunto todo é importante, como, por exemplo, lavanderias por processo a seco, uso de solventes em pequenas funilarias, emissões de fontes móveis que não circulam nas ruas e estradas, como equipamentos e máquinas utilizadas em indústrias, construção civil, entre outros.
- Fontes veiculares: tendo em vista a importância da contribuição das emissões veiculares nos estudos para controle da poluição atmosférica, diversos autores sugerem que essas fontes sejam tratadas em separado (World Bank, 1999b; Onursal e Gautam, 1997; WHO, 1999).

A escala do estudo a ser realizado interfere na forma de decisão sobre o tipo de fonte, como, por exemplo, em um estudo regional, o conjunto de emissões de uma indústria pode ser considerado como pontual; no entanto, em um estudo para avaliação dentro do sítio da indústria, poderão haver fontes tipo pontual e tipo área. A importância dessa classificação tem relação com os estudos de dispersão de poluentes e a forma de controle a ser adotada.

Outra forma de classificação utilizada separa as fontes em fixas e móveis. Uma fonte fixa pode ser definida como uma instalação, localizada em determinado local fixo, que tenha como finalidade desenvolver processos industriais, comerciais, de serviços ou atividades que emitam ou possam emitir poluentes atmosféricos (Cetesb, 2015). As fontes móveis incluem os equipamentos móveis, como veículos que circulam nas ruas, avenidas e estradas, veículos que circulam somente dentro de sítios de indústrias, canteiro de obras e outros equipamentos, como máquinas de cortar grama etc. Na terceira categoria estão as fontes interiores, as quais incluem: fumaça de cigarros; fontes biológicas (como pólen, ácaros, insetos, microrganismos etc.); emissões de combustão; emissões de materiais interiores ou substâncias, como compostos orgânicos voláteis, chumbo, amianto, vários produtos químicos sintéticos e outros (WHO, 1999, 2006).

A Tabela 2 ilustra as quantidades dos principais poluentes emitidos por fontes móveis e fixas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), conforme inventário da Cetesb (2014).

**Tabela 2** – Estimativa de emissão das fontes de poluição do ar na RMSP em 2000 e 2013, em 1.000 t/ano.

Fonte de emissão <sup>1</sup>	Emissão (1.000 T/ano)				
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP
Total (2001)	1681,2	395,0	389,4	39,4	65,3
Total (2013)	164,75	45,97	71,20	9,82	4,60

CO: monóxido de carbono; HC: hidrocarbonetos totais; NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub>: óxidos de enxofre; MP: material particulado.

<sup>1</sup> Inclui fontes fixas e fontes móveis, conforme inventário da Cetesb.

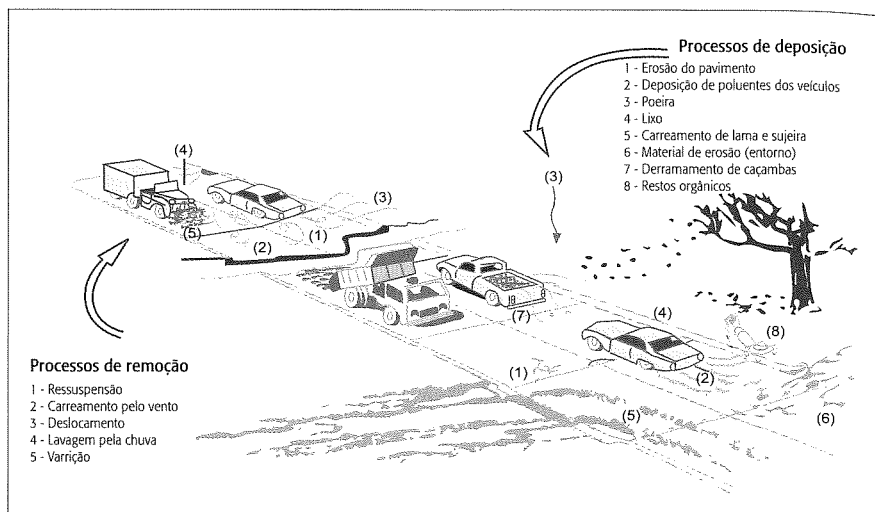
Fonte: Cetesb (2002, 2015).

É possível observar que atualmente, na RMSP, o total das emissões de fontes móveis é bem superior ao dos processos e operações industriais.

Os resultados de monitoramento e de inventários de fontes de emissão mostram a importância da contribuição da poluição veicular no agravamento da qualidade do ar na RMSP e em outras importantes aglomerações urbanas. De acordo com a Usepa (2000), as vias de tráfego constituem-se uma importante fonte de poluição por material particulado, na qual se observam níveis elevados de emissão. Em termos gerais, as emissões de material particulado das vias de tráfego são originadas de material solto presente na superfície da via. Conforme esse material – que foi denominado de carga de poeira na via – vai sendo movido ou removido, ocorre uma recarga contínua por diversas fontes, de modo que se estabelece um equilíbrio entre os processos de deposição e remoção dessa carga de poeira.

A Figura 1 (Usepa, 2000) ilustra os principais processos de deposição de material particulado que podem ocorrer nas vias de tráfego, que são: poeira proveniente de erosão do pavimento, deposição de poluentes dos veículos, deposição de poeira do entorno, derramamento de material de caçamba de caminhões, entre outros. Os principais processos de remoção do material são ressuspensão por veículos, carregamento pelo vento, lavagem pela chuva, serviços de limpeza, entre outros.

**Figura 1** – Principais processos de deposição e remoção de material particulado em uma via de tráfego.



Fonte: adaptada de Usepa (2000).

Com base em experiências e estudos em âmbito nacional e internacional sobre a questão da poluição atmosférica, deu-se origem à Resolução n. 18/86, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), estabelecendo o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) em âmbito nacional. O efeito do Proconve na redução das emissões médias de poluentes dos veículos é um fator importante no controle da qualidade do ar, conforme mostram os dados da Tabela 3, com relação à emissão de poluentes dos veículos leves após o lançamento do programa em questão. Destaca-se também a Resolução n. 297/2002 do Conama, que criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares, aproveitando a experiência e os resultados positivos alcançados pelo Proconve.

**Tabela 3** – Fatores médios de emissão de poluentes de veículos leves<sup>1,2</sup>.

Ano/modelo	Combustível	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)
1985	Gasolina	28,0	2,4	1,6
	Álcool	16,9	1,6	1,2

(continua)

**Tabela 3** – Fatores médios de emissão de poluentes de veículos leves<sup>1,2</sup>.  
(continuação)

Ano/modelo	Combustível	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)
1989	Gasool	15,2	1,6	1,6
	Álcool	12,8	1,6	1,1
1997	Gasool	1,2	0,2	0,3
	Álcool	0,9	0,3	0,3
2000	Gasool	0,73	0,13	0,21
	Álcool	0,63	0,18	0,21
2006	Gasool	0,33	0,08	0,08
	Etanol	0,67	0,12	0,05
	Flex-Gasool C	0,48	0,1	0,05
	Flex-Etanol	0,47	0,11	0,07
2013	Gasool	0,26	0,037	0,02
	Flex-Gasol C	0,22	0,029	0,03
	Flex-Etanol	0,42	0,081	0,02

Gasool: 78% gasolina + 22% álcool anidro (v/v).

<sup>1</sup> Médias ponderadas de cada ano-modelo pelo volume de produção. <sup>2</sup> A partir de 2008, valores obtidos a partir dos Relatórios de Valores de Emissão da Produção (RVEP) e ponderados pelos Relatórios de Vendas anuais.

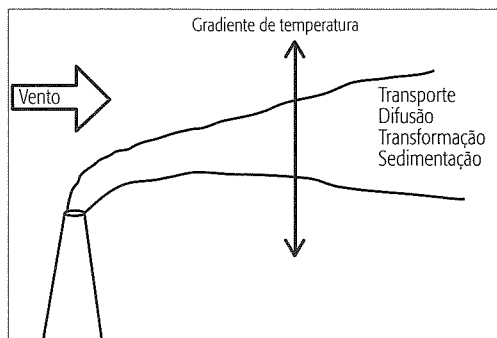
Fonte: Cetesb (2002, 2014, 2015).

## TRANSPORTE E DISPERSÃO DE POLUENTES

A dispersão dos poluentes, após serem emitidos por determinada fonte de poluição, ocorre por uma interação complexa entre as características físicas da fonte emissora, as características físico-químicas dos poluentes, as condições meteorológicas da região e sua topografia (World Bank, 1999b). No caso de uma chaminé, por exemplo, a pluma de poluentes, ao ser emitida, possui, muitas vezes, uma tendência ascensional, em função de parâmetros do próprio efluente, das dimensões da chaminé e da in-

fluência dos parâmetros meteorológicos no momento da emissão. Logo em seguida, a pluma adquirirá um movimento transversal, acompanhado de difusão em torno de sua linha central, que caracteriza o componente de difusão e transporte, conforme ilustra a Figura 2.

**Figura 2** – Dispersão esquemática da pluma.



Fonte: adaptada de Malheiros (2002).

Os movimentos verticais e horizontais das massas de ar e a turbulência da atmosfera são os responsáveis, a partir do momento da emissão, pelo transporte do poluente e pela sua dispersão. As diversas reações que ocorrem na atmosfera, juntamente à sedimentação gravitacional e difusa de partículas em suspensão, auxiliam no processo de remoção de poluentes da atmosfera, ou por sua retirada pura e simples, ou por reconstituição dos componentes normais da atmosfera.

De forma geral, partículas em suspensão são removidas da atmosfera por: remoção úmida pela precipitação; remoção seca pela sedimentação; remoção seca pela difusão ou impactação sobre a vegetação e as construções. Gases solúveis em água são removidos por remoção úmida pela precipitação; absorção ou reação na superfície terrestre; conversão em outros gases ou partículas; transporte para a atmosfera. (Guimarães, 1992, p. 165)

O Quadro 4 fornece o destino final de alguns poluentes da atmosfera.

**Quadro 4** – Destino de diferentes poluentes atmosféricos.

Poluente	Destino
Dióxido de enxofre	Lavagem pela chuva; oxidação nas fases sólidas e líquidas a sulfato; no solo, degradação microbiana ou reação química
Sulfato de hidrogênio	Oxidação e dióxido de enxofre
Ozona	Reação química com vegetação, solo e oceanos
Óxido nítrico	Na vegetação, absorção pelo estômato; reações químicas nas fases gasosa e líquida
Monóxido de carbono	Na estratosfera, reação com radical hidroxil; no solo, atividade microbiológica
Dióxido de carbono	Na vegetação, fotossíntese e absorção; nos oceanos, absorção
Metano	No solo, atividade microbiológica; na vegetação, reação química e ação bacteriana; na atmosfera, reação química
Hidrocarbonetos	Reações químicas a partículas; no solo, atividade microbiológica; na vegetação, absorção e entrada pelo estômato

Fonte: Guimarães (1992).

Os movimentos horizontais da massa de ar são basicamente causados pelas grandes diferenças de pressão, em virtude das diferenças de temperaturas nas várias partes do globo terrestre e da rotação da Terra.

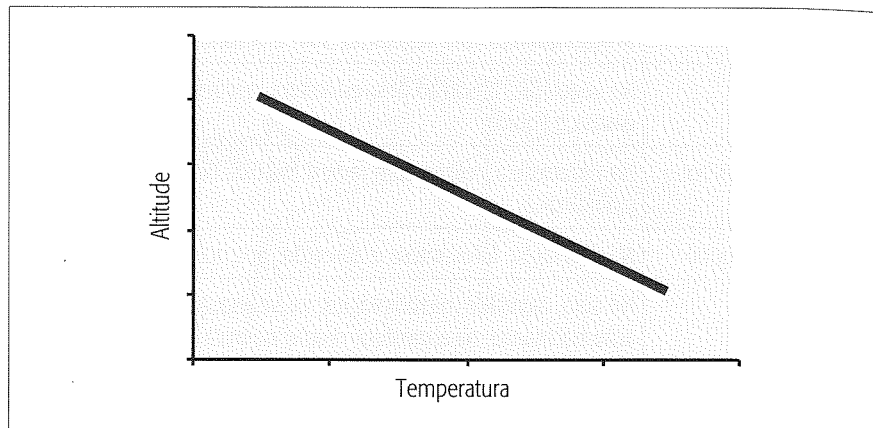
Os movimentos verticais da massa de ar ocorrem em função do perfil vertical de temperatura, que é a variação da temperatura com a altura. O ar seco resfria-se com a altitude à razão de 1°C a cada 100 m, e o ar úmido à razão, em média, de 0,65°C a cada 100 m, conforme ilustrado na Figura 3 (Turco, 1997).

Quando a temperatura do ar não varia com a altitude, o que pode ocorrer naturalmente, a essa condição dá-se o nome de isoterma. No caso de a temperatura do ar aumentar com a altitude, a situação é chamada de inversão térmica. Nessas duas últimas condições, os movimentos verticais de massas de ar são reduzidos, e a dispersão dos poluentes na vertical praticamente inexistente. Tais condições associadas à falta de ventos horizontais (calmaria) criam condições de total estagnação com consequente aumento dos níveis de poluição do ar (Guimarães, 1992). A ausência de chuvas associada às condições meteorológicas de estagnação condiciona situação de

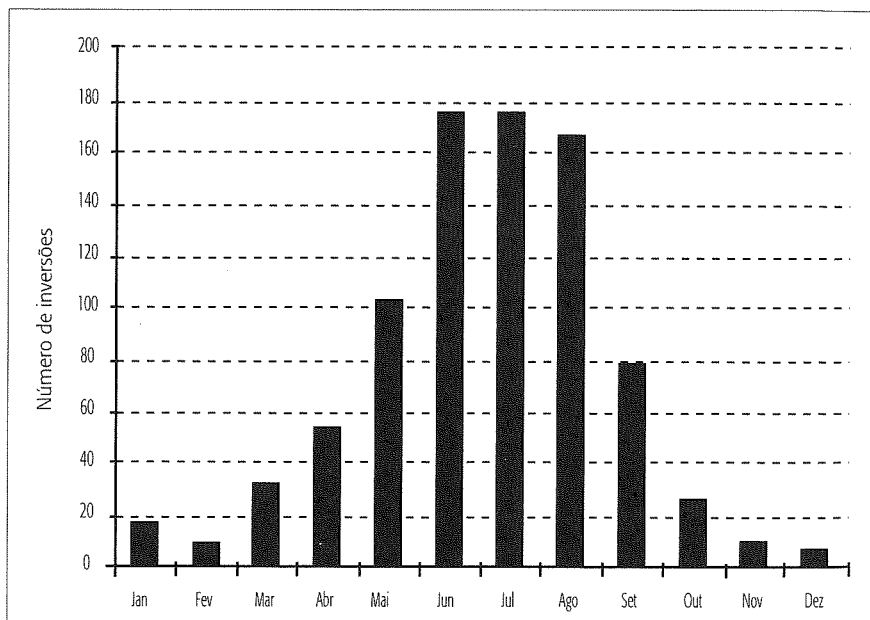
maior risco de concentração de poluentes, piorando assim as condições de qualidade do ar.

A Figura 4 apresenta o número de dias desfavoráveis à dispersão de poluentes na RMSP.

**Figura 3** – Perfil adiabático da troposfera.



**Figura 4** – Número de dias desfavoráveis à dispersão de poluentes.





Conforme Calvert e Englund (1984), a equação básica proposta, com base na teoria gaussiana, para modelagem da dispersão de gases e pequenas partículas mostra que a concentração do poluente em determinado ponto ocorre em função da vazão de emissão do poluente, da altura da chaminé, das dispersões horizontal e vertical e da velocidade média do vento. Guimarães (1992, p. 168) declara que a concentração de determinado poluente na direção do vento é:

- Diretamente proporcional à taxa de emissão da fonte.
- Inversamente proporcional à velocidade média do vento.
- Inversamente proporcional aos níveis de dispersão horizontal e vertical.
- Inversamente proporcional à altura efetiva da chaminé.
- Inversamente proporcional à distância entre a fonte e o receptor.

O modelo gaussiano não possibilita simular a ocorrência de reações químicas, como, por exemplo, para a formação de poluentes secundários, como no caso do ozônio.

Um modelo de dispersão é um conjunto de relações matemáticas, com base em princípios científicos, que relaciona as emissões de determinada(s) fonte(s) com as concentrações atmosféricas resultantes. Os principais tipos de modelos para a avaliação da qualidade do ar podem ser divididos em quatro categorias: Gaussiano, numérico, estatístico (ou empírico) e físico (Usepa, 2001). Os modelos Gaussianos são os de uso mais geral para o estudo da dispersão atmosférica de poluentes não reativos. Os modelos numéricos são mais apropriados que os modelos Gaussianos para a modelagem de poluentes que envolvem poluentes reativos, como, por exemplo, o ozônio (Usepa, 2001). Os modelos estatísticos são mais frequentemente empregados nos casos em que há uma compreensão científica incompleta, no que se refere aos processos físico-químicos, ou quando a indisponibilidade de certos dados torna impraticável o uso dos modelos Gaussianos ou numéricos. Finalmente, os modelos físicos requerem o uso de túnel de vento ou outras instalações para modelagem de fluidos (Usepa, 2001). A escolha do modelo mais adequado, entre os modelos existentes para estudo da dispersão de um poluente, deve considerar a complexidade meteorológica e topográfica do local de análise, o nível de detalhe e precisão dos dados das fontes de emissão e os recursos disponíveis, em termos de equipamento e pessoal (World Bank, 1999b).

## IMPACTOS DA POLUIÇÃO DO AR NA SAÚDE PÚBLICA E NO MEIO AMBIENTE

A poluição do ar exerce um conjunto de mecanismos de danificação a materiais expostos a determinados níveis de concentração de poluentes conforme ilustrado no Quadro 5. O processo de abrasão é causado por partículas sólidas transportadas em altas velocidades; a deposição e remoção é causada por partículas sólidas e líquidas que se depositam sobre superfícies; o ataque químico pode causar, por exemplo, a destruição de superfícies metálicas pela ação de névoas ácidas; a corrosão eletroquímica consiste no principal mecanismo de deterioração de metais ferrosos (Guimarães, 1992). Diversos fatores influenciam na deterioração de materiais em atmosferas poluídas, como a umidade relativa, que pode causar aumento na velocidade de corrosão, e a temperatura, que influencia na velocidade da reação química.

**Quadro 5** – Dano da poluição do ar a vários materiais.

Tipo de material	Manifestação típica do dano	Poluente danificante	Outros fatores ambientais
Vidros e animais	Alteração da aparência da superfície	Gases ácidos; oxidantes fotoquímicos	Umidade
Metais	Danificação da superfície; perda de metal	Dióxido de enxofre; substâncias ácidas; material particulado	Umidade; salinidade
Materiais de construção	Descoloração; dissolução do carbonato; sujeira	Dióxido de enxofre; substâncias ácidas; material particulado	Umidade; temperatura; CO <sub>2</sub> ; fungos
Pintura	Danificação da superfície; descoloração, impacto na vida útil do produto	Dióxido de enxofre; gás sulfídrico; material particulado	Umidade; radiação solar; fungos
Couro	Desintegração da superfície; enfraquecimento	Dióxido de enxofre	Atrito físico
Papel	Torna-se quebradiço	Dióxido de enxofre	Umidade; atrito físico

(continua)

**Quadro 5** – Dano da poluição do ar a vários materiais. (*continuação*)

Tipo de material	Manifestação típica do dano	Poluente danificante	Outros fatores ambientais
Tecidos	Redução da resistência à tensão; formação de manchas	Dióxido de enxofre; óxidos de nitrogênio; material particulado	Umidade; radiação solar; fungo
Corantes	Desbotamento; mudança de coloração	Dióxido de nitrogênio; oxidantes fotoquímicos	Radiação solar
Borracha	Enfraquecimento	Oxidante fotoquímico	Radiação solar

Fonte: adaptado de Calvert e Englund (1984) e Guimarães (1992).

Uma das alterações causadas ou agravadas pela poluição atmosférica, a ser observada pela comunidade, é a deterioração da visibilidade<sup>1</sup>. A redução da visibilidade tem impacto no bem-estar das pessoas, aumentando o risco de acidentes em rodovias e também transporte aéreo, dificultando a visualização de paisagens e podendo produzir incômodo à população. Essa redução de visibilidade ocorre em razão da presença de partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera, que absorvem e dispersam a luz, e está relacionada com o tamanho, a concentração e as características físicas das partículas poluentes presentes (Guimarães, 1992). Este mesmo autor complementa que fatores meteorológicos associados à emissão de poluentes afetam a visibilidade urbana, podendo ressaltar a redução da altura da dispersão atmosférica e a diminuição da velocidade dos ventos. Em determinadas áreas, as velocidades de vento excessivamente altas diminuem a visibilidade pelo levantamento de poeira. Em condições de alta umidade relativa, partículas higroscópicas presentes na atmosfera aumentam de tamanho, tornando-se mais efetivas para reduzir a visibilidade.

O efeito de poluentes atmosféricos sobre a vegetação pode ocorrer por meio de mecanismos como redução da penetração da luz (redução da capacidade fotossintetizante) por sedimentação de partículas nas folhas ou por interferência de partículas em suspensão na atmosfera; deposição de poluentes no solo, por sedimentação (partículas grosseiras) ou por carre-

<sup>1</sup> Visibilidade é a capacidade de se enxergar através da atmosfera, medida por meio da habilidade de se discernir um objeto preto em um fundo branco, colocados a certa distância.

gamento provocado pelas chuvas (gases dissolvidos e partículas finas), permitindo a penetração dos poluentes pelas raízes e alterando as condições do solo; penetração dos poluentes pelos estômatos das plantas, podendo interferir na troca de gases ( $O_2 - CO_2$ ) promovida pelas plantas (Calvert e Englund, 1984). Os efeitos resultantes são destruição do tecido foliar, clorose ou outras alterações na cor normal das folhas, interferindo na capacidade fotossintética, com alterações no crescimento e na produção das plantas, causando impactos para a agricultura, o setor de floricultura, as áreas de proteção ambiental, entre outros. O fluoreto e o dióxido de enxofre podem, por exemplo, em determinadas concentrações e períodos de exposição, causar danos às plantas, cujos impactos variam conforme a sensibilidade de cada espécie, podendo provocar decréscimo na taxa de fotossíntese (Calvert e Englund, 1984; Guimarães, 1992).

Estudos revelam que o ozônio pode causar danos à biota, em particular, à clorofila. Os principais componentes do *smog* fotoquímico que merecem destaque em função dos danos potenciais à biota são o ozônio, o peroxiacetil nitrato (PAN) e os óxidos de nitrogênio.

Os efeitos da poluição atmosférica na saúde pública podem ser divididos em dois grupos: efeitos agudos e efeitos crônicos. Em ambos os casos, os efeitos podem variar o grau de severidade, desde aspectos de conforto térmico e morbidade até aspectos de mortalidade. Determinados poluentes, como o chumbo, podem causar os dois tipos de efeito, dependendo da dosagem e exposição. Também é importante lembrar que as pessoas não são afetadas igualmente pelos poluentes, devendo ser considerados em conjunto os aspectos biológicos, físicos e sociais no contexto do indivíduo e da população expostos (Briggs et al., 1996).

No que se refere aos impactos na saúde pública, estudos realizados encontraram uma associação estatística positiva entre a concentração média de determinados poluentes, como partículas inaláveis,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , e CO, e indicadores de mortalidade e morbidade. Por exemplo, os impactos do material particulado na saúde dependem do tamanho da partícula e de sua concentração, podendo variar durante o dia conforme as flutuações nos níveis de PI e  $PM_{2,5}$ , e incluem efeitos agudos, como aumento da mortalidade diária e aumento nos atendimentos dos centros de serviços de saúde. Os efeitos em longo prazo também incluem aumento da mortalidade e morbidade respiratória (WHO, 1999).

Estudos desenvolvidos a respeito dos efeitos sobre a saúde, referentes ao material particulado  $MP_{2,5}$ , sugerem tendência maior para o monitoramento de partículas de fração mais fina em relação às mais grossas. Estudos sugerem que os efeitos deletérios do material particulado  $MP_{10}$  à saúde estão mais associados às partículas finas, ou seja, a fração de material particulado menor do que  $2,5 \mu g$ , e menos associados às partículas de tamanho entre  $2,5$  e  $10 \mu g$  (diâmetro aerodinâmico equivalente) (WHO, 1999, p. 42 e 44; WHO, 2006).

De acordo com Miranda et al. (1994, p. 11), estudos nacionais de morbidade têm mostrado as doenças respiratórias com uma participação importante no conjunto de manifestações apresentadas. Em estudo abrangendo todos os hospitais do Vale do Paraíba a participação das doenças respiratórias alcançou 11,4%. Segundo Romieu (1992), variações na média diária (24 horas) do poluente PTS têm sido associadas ao aumento da morbidade, mortalidade e redução nas funções pulmonares; e em seus estudos observou-se que um aumento de  $100 \mu g/m^3$  na concentração média de PTS está associado a 4% de aumento na mortalidade no dia seguinte. Em alguns estudos, mudanças nos níveis de funções pulmonares em crianças têm sido associadas às flutuações de curto período para o poluente material particulado. De acordo com Romieu (1992), estudos sugerem o valor de  $180 \mu g/m^3$  de PTS (24 horas) como valor mínimo, a partir do qual essas alterações podem ser observadas em crianças.

Em estudos realizados por Saldiva et al. (1995) para a RMSP, no período de maio de 1990 até abril de 1991, foi demonstrada uma associação estatisticamente significativa entre mortalidade diária de idosos e poluição por PI, na qual um aumento de  $100 \mu g/m^3$  na concentração de PI está associado estatisticamente a 13% do aumento da taxa de mortalidade diária de idosos. Foi observado também que a associação é maior nos meses de verão. Segundo Saldiva et al. (1995, p. 162), isso pode acontecer pelo fato de a ocorrência de doenças infecciosas ser menos comum no verão, possibilitando que os efeitos da poluição sejam de mais fácil observação; pelo fato de haver um maior número de atividades externas, que resultam em maior exposição à poluição atmosférica ou pode ser simplesmente resultado de imprecisão estatística. O Quadro 6 apresenta um resumo dos impactos de poluentes atmosféricos na saúde pública e no meio ambiente.

**Quadro 6** – Poluentes atmosféricos, características, fontes e efeitos na saúde pública e no meio ambiente.

Poluentes	Características	Fontes principais	Efeitos gerais sobre a saúde	Efeitos gerais ao meio ambiente
<b>Partículas totais em suspensão (PTS)</b>	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho < 100 µm	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira ressuspensão de rua, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo	Quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo
<b>PI e fumaça com faixa de tamanho &lt; 10 µm</b>	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina aerossol, fumaça, fuligem etc.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera)	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo
<b>Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforo. Pode ser transformado em SO <sub>3</sub> , que na presença de vapor de água passa rapidamente a H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . É importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, polpa e papel	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO <sub>2</sub>	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação, como folhas e colheitas

(continua)

**Quadro 6** – Poluentes atmosféricos, características, fontes e efeitos na saúde pública e no meio ambiente. *(continuação)*

Poluentes	Características	Fontes principais	Efeitos gerais sobre a saúde	Efeitos gerais ao meio ambiente
<b>Dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)</b>	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o que contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, diminuição da resistência às infecções respiratórias	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	Gás incolor, inodoro e insípido	Combustão incompleta de veículos automotores	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo nos reflexos, na capacidade de estimar intervalos de tempo, no aprendizado, no trabalho e na parte visual	—
<b>Ozônio (O<sub>3</sub>)</b>	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica	Não é emitido diretamente à atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis	Irritação dos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensação de aperto no peito, tosse e chiado na respiração. Tem sido associado ao aumento de internações hospitalares	Danos à colheita, à vegetação natural, às plantações agrícolas e às plantas ornamentais

Fonte: Cetesb (2002); WHO (1999).

Com referência aos impactos econômicos da poluição do ar, podem-se destacar os custos significativos na saúde pública e na gestão dos espaços antrópicos, em função da contribuição no aumento de mortalidade e morbidade, bem como de maiores custos de manutenção de equipamentos urbanos, patrimônios históricos etc. O cálculo do custo desses efeitos é complexo, devendo incluir, por exemplo, o seguinte conjunto de aspectos a serem contabilizados:

- Perda de eficiência nas diversas atividades geradoras de bem-estar e renda em determinada região, em função dos impactos da poluição atmosférica.
- Perda de oportunidades de novos investimentos em determinadas regiões com capacidade de suporte, no que se refere à poluição atmosférica, exaurida, podendo, dessa forma, aumentar as dificuldades econômicas e sociais da região.
- Custos governamentais para pesquisas, prevenção e controle da poluição do ar são mais facilmente contabilizados.
- Gastos diretos das indústrias para prevenir e controlar a poluição do ar, que, em geral, são mais difíceis de serem identificados, em função, principalmente, da dificuldade de distinguir-se entre os fundos gastos para controle de poluição do ar e aqueles para melhoria da planta industrial.
- Gastos do sistema de saúde, em função do aumento de internações, provimento de remédios, entre outros.
- Impactos resultantes da diminuição da expectativa de vida da população, da redução da capacidade produtiva da região, em função do aumento da abstenção nos locais de trabalho.

O estudo simplificado do custo-benefício, que relaciona gastos em controle de poluição do ar e redução dos danos da poluição do ar, depende do estabelecimento dos níveis de qualidade do ar a serem atingidos ou mantidos, ou seja, definição de riscos e exposição. Estudos mostram que o custo do controle da poluição aumenta exponencialmente, e o custo de efeitos da poluição é nulo quando se tende ao controle completo. Dessa forma, como será abordado mais adiante, o enfoque na gestão da qualidade do ar deverá priorizar ações preventivas de planejamento territorial, licenciamento ambiental, e investimentos em capacitação e educação am-

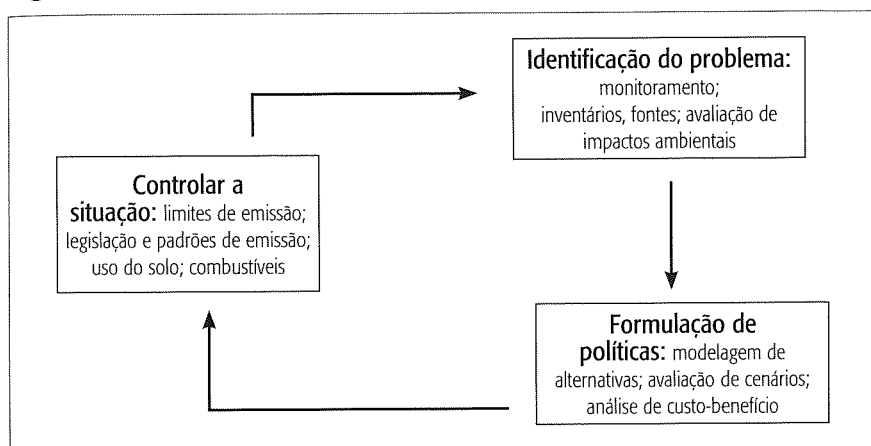


biental, de modo a reduzir ou evitar a necessidade de investimentos em equipamentos de controle da poluição.

## GESTÃO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

A gestão da qualidade do ar tem papel importante no processo de gestão urbana, integrando conjunto de ações que visem à promoção da saúde pública e à proteção ambiental. A gestão da qualidade do ar inclui o processo de avaliação da qualidade do ar, o planejamento estratégico na formulação de políticas e tomada de decisões, o desenvolvimento de conjunto de ações de caráter preventivo e de medidas de controle da poluição, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** – Conjunto de atividades de gestão da qualidade.



Fonte: WHO (1999).

Já o processo de avaliação da qualidade do ar pode ser feito por meio da realização de monitoramento da qualidade do ar, inventários de fontes de poluição e medição das fontes de emissão. Embora o monitoramento de poluentes tenha um papel importante no processo de gestão urbana, a sua realização isolada para o acompanhamento da qualidade do ar pode ser insuficiente ou impraticável para avaliar e definir por completo o nível de exposição de uma população em uma cidade. É necessário que esse moni-

toramento seja desenvolvido em conjunto com outras ferramentas, como modelagem, medição de emissões, inventários, interpolação e mapeamento. O uso de modelagem matemática para estudo de dispersão de poluentes, quando executada sozinha, é limitada, principalmente para aplicações no planejamento de uma cidade, onde há uma infinidade de fontes e pouca disponibilidade de dados confiáveis.

Assim, um plano de monitoramento, para que possa atingir seus objetivos, deve considerar o seguinte: coleta de dados (com controle e garantia da qualidade); análise dos dados coletados; comunicação a todos os atores da cidade, de modo a criar conscientização, demanda e respostas necessárias por meio de políticas públicas. Para tanto, são necessários recursos financeiros, pessoal capacitado e um período mínimo de coleta de dados.

A determinação sistemática da qualidade do ar em geral é limitada a um número restrito de poluentes, inclusive por problemas de ordem prática, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis. De forma geral, a escolha recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, consagrados universalmente, como:  $\text{SO}_2$ , poeira em suspensão,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$  e  $\text{NO}_2$ . A razão da escolha desses parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente (WHO, 1999; Cetesb, 2002).

Os principais objetivos de um monitoramento da qualidade do ar são (WHO, 1999; Cetesb, 2002; Martinez e Romieu, 1997):

- Fornecer dados para ativar ações de emergência durante períodos de estagnação atmosférica quando os níveis de poluentes na atmosfera podem representar risco à saúde pública.
- Avaliar a qualidade do ar à luz de limites estabelecidos para proteger a saúde e o bem-estar das pessoas.
- Acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do ar ocasionadas pelas emissões de poluentes.

A frequência de coleta de informações sobre os poluentes deve ser planejada em função dos objetivos do programa de monitoramento, da validação estatística dos dados coletados, das características ambientais e sociais

da região monitorada e, finalmente, de uma avaliação econômica do programa. Para as estações manuais de monitoramento, que exigem a visita do técnico para calibrar equipamentos, trocar os filtros, acionar os equipamentos etc., essa coleta de informações resulta em elevado custo operacional do sistema. Em regiões com altas concentrações de poluentes e população exposta, o que resulta em maior risco de saúde pública, as estações automáticas podem representar melhor custo-benefício. Como alternativa, é comum o monitoramento ser realizado com intervalo de seis dias, o que possibilita uma varredura em todos os dias da semana a cada sete semanas de monitoramento. Dessa forma seria possível inclusive planejar a utilização da mesma estação de monitoramento em mais de um ponto.

Conforme Martinez e Romieu (1997), a escolha do local de monitoramento depende de aspectos como:

- Objetivos da amostragem.
- Características de distribuição dos poluentes a serem avaliados.
- Representatividade.
- Proteção dos equipamentos contra intempéries, aspectos de segurança e disponibilidade de facilidades, como, por exemplo, energia elétrica, e a questão do incômodo ocasionado pelos equipamentos, como, por exemplo, o ruído do amostrador de grandes volumes (Hivol).

Como recomendação para a localização e implantação de estações de amostragem de poluentes, Guimarães (1992) sugere:

- Priorizar áreas poluídas e mais densamente ocupadas (loais de maior potencial de exposição).
- Instalar estações nos locais de entrada de ar para a região, considerando a direção predominante dos ventos.
- Instalar estações em locais planejados para desenvolvimento futuro, a fim de avaliar previamente efeitos da expansão na qualidade do ar e do aumento de risco.
- Evitar proximidade de obstáculos, tais como edificações, árvores etc.
- Evitar proximidade de grandes fontes de poluição, como chaminés, quando o objetivo é buscar representatividade para uma determinada região.

- Instalar os equipamentos entre 3 e 6 metros de altura, para reduzir a influência de reentrada de partículas e efeito de veículos.

Conforme Guimarães (1992), para estimar-se a concentração de poluentes na atmosfera, são utilizadas as determinações de médias horárias, médias de oito horas, médias diárias, médias mensais e médias anuais, conforme determinado pela legislação específica. A escolha de uma ou mais dessas medidas de tendência central depende de fatores como o tipo de efeito causado pelo poluente, o tipo de padrão de qualidade do ar utilizado, a variação das concentrações com os parâmetros meteorológicos e outros. Os equipamentos e métodos utilizados são contínuos ou intermitentes, sendo as médias obtidas dos valores fornecidos por eles, tendo em vista os propósitos da amostragem realizada e dos fatores já mencionados. A duração das amostragens é definida em função da sensibilidade e da faixa de medição do equipamento ou método utilizado, além das concentrações do poluente existente na atmosfera e de aspectos epidemiológicos.

A Tabela 4 apresenta os padrões nacionais de qualidade do ar e os respectivos tempos de amostragem e métodos de medição conforme tipo de poluente. O Quadro 7 destaca os avanços da legislação do Estado de São Paulo.

**Tabela 4** – Padrões nacionais de qualidade do ar.

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 h <sup>1</sup>	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA <sup>2</sup>	80	60	
Partículas inaláveis (PI)	24 h <sup>1</sup>	150	150	Separação inercial/filtração
	MMA <sup>3</sup>	50	50	
Fumaça	24 h <sup>1</sup>	150	150	Refletância
	MAA <sup>3</sup>	60	40	
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	24 h <sup>1</sup>	365	100	Pararosanilina
	MAA <sup>3</sup>	80	40	

(continua)

**Tabela 4** – Padrões nacionais de qualidade do ar. (continuação)

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Padrão secundário $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Método de medição
Dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ )	1 h <sup>1</sup>	320	190	Quimiluminescência
	MAA <sup>3</sup>	100	100	
Monóxido de carbono (CO)	1 h <sup>1</sup>	40.000 35 ppm	40.000 35 ppm	Infravermelho não dispersivo
	8 h <sup>1</sup>	10.000 9 ppm	10.000 9 ppm	
Ozônio ( $\text{O}_3$ )	1 h <sup>1</sup>	160	160	Quimiluminescência

<sup>1</sup> Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. <sup>2</sup> Média geométrica anual. <sup>3</sup> Média aritmética anual.

Fonte: Resolução Conama n. 3 (Conama, 1990).

### **Quadro 7** – Inovação nos padrões de qualidade do ar na Legislação do Estado de São Paulo.

No âmbito do estado de São Paulo, os novos padrões de qualidade do ar, mais restritivos, foram estabelecidos pelo Decreto estadual n. 59.113/2013. O Decreto estadual estabelece os padrões associados a um conjunto de metas intermediárias e padrões finais. As metas intermediárias (MI) foram estabelecidas como valores temporários a fim de orientar o processo de melhoria gradativa da qualidade do ar no estado de São Paulo. Os padrões finais visam ao máximo de preservação da saúde da população em relação aos danos causados pela poluição atmosférica. Para apoiar o monitoramento da qualidade do ar, o estado de São Paulo conta com uma rede composta de 51 estações automáticas e 29 manuais. Os parâmetros acompanhados em cada estação variam conforme as características de uso e ocupação do solo, bem como potencializam subsídios às políticas de melhoria de qualidade ambiental em cada região monitorada. Os indicadores de qualidade do ar divulgados pela Cetesb (2014) foram selecionados a partir dos parâmetros contidos nos padrões estaduais de qualidade do ar. Conta também com um índice de qualidade do ar, construído para facilitar o processo de divulgação, e que varia em uma escala de boa/moderada/ruim/muito ruim e péssima.

## Formulação de políticas de controle da qualidade do ar

A gestão da qualidade do ar inicia-se, em geral, com o atendimento a reclamações de incômodos causados pela poluição do ar, levando posteriormente ao estudo de poluentes atmosféricos e seus efeitos. Um aumento excessivo na taxa de morbidade e mortalidade, durante o período de expansão econômica do pós-guerra, teve como resultado o início efetivo de um processo de controle da poluição em diversos países. Os altos índices de poluição atmosférica nos Estados Unidos e na Europa resultaram em um número excessivo de mortes, como, por exemplo, em Londres, mais de 4 mil mortes além do número normal ocorreram por causa de uma situação atmosférica de baixa dispersão, *fog* – fumaça e excesso de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) –, durante cinco dias consecutivos em dezembro de 1952 (WHO, 1999). Como consequência desse e de outros desastres, as populações urbanas de diversas cidades, principalmente em países desenvolvidos, pressionaram o governo para a tomada de ações a fim de melhorar a qualidade do ar.

Dessa forma, foram estabelecidos Padrões de Qualidade Ambiental, nos quais se buscam níveis de qualidade que atendam determinadas funções ou objetivos e que sejam aceitos pela sociedade. Um padrão de qualidade do ar define legalmente o limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada (WHO, 1999; Cetesb, 2002).

A Resolução Conama n. 03/90, no âmbito federal, estabelece os Padrões de Qualidade do Ar para a proteção da saúde pública e do meio ambiente. Existem dois tipos de padrões de qualidade do ar, os primários e os secundários, cujos padrões, para o estado de São Paulo, aparecem na Tabela 5. Os padrões primários de qualidade do ar representam as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo (Conama, 1990). São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre

**Tabela 5** – Padrões estaduais de qualidade do ar para o estado de São Paulo.

Poluente	Tempo de amostragem	MI 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	MI 2	MI 3	PF
Partículas inaláveis ( $\text{MP}_{10}$ )	24 h	120***	100	75	50
	MAA <sup>1</sup>	40***	35	30	20
Partículas inaláveis finas ( $\text{MP}_{2,5}$ )	24 h	60***	50	37	25
	MAA <sup>1</sup>	20***	17	15	10
Dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ )	24 h	60***	40	30	20
	MAA <sup>1</sup>	40***	30	20	-
Dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ )	1 h	260***	240	220	200
	MAA <sup>1</sup>	60***	50	45	40
Ozônio ( $\text{O}_3$ )	8 h	140***	130	120	100
Monóxido de carbono (CO)	8 h	-	-	-	9 ppm***
Fumaça* (FMC)	24 h	120***	100	75	50
	MAA <sup>1</sup>	40***	35	30	20
Partículas totais em suspensão* (PTS)	24 h	-	-	-	240***
	MGA <sup>2</sup>	-	-	-	80***
Chumbo** (Pb)	MAA <sup>1</sup>	-	-	-	0,5***

<sup>1</sup> Média aritmética anual. <sup>2</sup> Média geométrica anual.

\* Fumaça e partículas totais em suspensão – parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da Cetesb. \*\* Chumbo – a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da Cetesb. \*\*\* Padrões anteriores que estavam vigentes pelo Decreto n. 8.468/76.

Fonte: Cetesb (2015)

o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo (Conama, 1990). O objetivo do estabelecimento de padrões secundários é criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar. Eles devem ser aplicados às áreas de preservação (por exemplo, parques nacionais, áreas de proteção ambiental, estâncias turísticas etc.)

Para atingir patamares de desenvolvimento sustentável nos centros urbanos, é necessário priorizar a gestão para a melhoria da qualidade do

ar, que inclui a implantação de um plano de prevenção e controle da poluição do ar.

Deverão ser privilegiadas as medidas de prevenção que têm como objetivo evitar ou reduzir a geração do poluente, enquanto as medidas de controle referem-se ao tratamento da emissão de poluentes. Ações preventivas incluem, por exemplo, a redução do uso dos veículos particulares, com preferência pelo transporte coletivo, o qual deve ser do tipo menos poluente e ser oferecido em quantidade e qualidade adequadas, para que atenda a população. As medidas de desenvolvimento tecnológico também são importantes, como o desenvolvimento de combustíveis mais limpos e veículos mais econômicos e menos poluentes, embora ainda não se tenha conseguido resolver efetivamente o problema da poluição por veículos, principalmente nos grandes centros urbanos, onde a quantidade de veículos tem aumentado continuamente (Medina et al., 1996).

## **Medidas de caráter preventivo**

As medidas de caráter preventivo referem-se à utilização de recursos e ações que visam evitar e reduzir os poluentes para padrões previamente aceitos como adequados ou afastar esses poluentes para locais com menor potencial de exposição e menor risco à saúde pública e ao meio ambiente. Medidas preventivas devem ser utilizadas sempre que possível, uma vez que, em geral, são de implantação mais simples e barata. Entretanto, podem depender de ações de educação ambiental.

## ***Planejamento territorial e zoneamento***

É uma das mais importantes medidas preventivas de controle da poluição do ar. A falta de planejamento, principalmente no que diz respeito ao zoneamento do uso do solo, pode resultar em conflitos de incompatibilidade em uma mesma área, onde se misturam fontes emissoras de poluentes e receptores, gerando, conseqüentemente, sérios problemas de saúde pública. O planejamento territorial deve objetivar a localização adequada de fontes diretas de poluição do ar, como indústrias, e fontes que indiretamente representam polos de atração para fontes de poluição, como aeroportos, shopping centers etc., no que se refere à escolha de áreas com características adequadas de dispersão de poluentes, bem como a uma melhor distribuição de viagens



diárias para o trabalho, o lazer, o estudo, as compras etc., reduzindo espaços de conflito de uso entre as diversas atividades urbanas.

Portanto, o planejamento territorial deve priorizar o afastamento entre fontes significativas de poluição e receptores potenciais, de tal forma que forneça tempo e espaço para que os parâmetros meteorológicos se incumbam de diluir as emissões a baixas concentrações na atmosfera. De acordo com Guimarães (1992, p. 181), entre as várias aplicações do zoneamento no controle da poluição do ar, ressalta-se:

- Proibição de certos tipos de fontes em algumas áreas.
- Fixação de faixas de proteção ambiental e sanitária.
- Limitação do número de fontes de poluição por unidade de superfície territorial.
- Uso de condições meteorológicas apropriadas para dispersão de poluentes, a fim de fixar o horário em que certas operações e atividades são permitidas.
- Regulamentação restritiva sobre o uso de matérias-primas, combustíveis, operações e processos industriais.
- Restrição à localização de polos de atração de fontes, tais como aeroportos, shopping centers etc.
- Planejamento, construção e operação de sistemas viários de tráfego urbano para reduzir a emissão de veículos, inclusive com bloqueio de determinadas áreas.

## *Eliminação e minimização de emissões*

O uso de fontes de energia menos poluidoras, tais como energia elétrica, combustíveis gasosos ou combustíveis líquidos de baixo teor de enxofre, podem resultar na redução ou eliminação da emissão de determinados poluentes provenientes da queima de combustíveis. O estudo de alternativas, obrigatório em processos de licenciamento ambiental, deverá considerar o conjunto de impactos que possam advir das diversas fontes de energia, como, por exemplo, a substituição do óleo pesado em caldeiras, cuja queima produz partículas inaláveis, pelo gás natural, que pode representar diminuição na emissão de partículas suspensas, mas aumentar a emissão de óxidos de nitrogênio, que contribuem para a formação do ozônio. Isso também se

aplica à substituição de certas matérias-primas por outras, ou mesmo à troca de processos e operações industriais, objetivando eliminação ou redução das emissões. A implantação de normas de operação e manutenção adequadas dos equipamentos industriais e de *layouts* das fontes pode resultar em uma diminuição substancial da poluição do ar. Em vários casos, a aplicação de uma ou mais dessas medidas pode levar a uma redução na emissão de poluentes, sem impacto significativo negativo na qualidade e quantidade dos produtos fabricados ou no aumento de seu custo de produção.

### *Diluição em chaminés*

A diluição de poluentes atmosféricos por meio de chaminés altas é uma técnica recomendável como medida adicional para a melhoria das condições de dispersão dos poluentes residuais na atmosfera, ou seja, após a tomada de outras medidas, conforme os itens anteriores.

## **Medidas diretas: equipamentos antipoluição**

As medidas de caráter corretivo referem-se à instalação de equipamentos adicionais com a finalidade específica de coletar os poluentes, evitando que eles sejam lançados na atmosfera. As medidas de caráter mais corretivo implicam a instalação de equipamentos, alguns deles de alta complexidade, com custo de investimento elevado e necessidade de operação e manutenção adequadas. Para determinadas fontes de poluição, a utilização das medidas indiretas pode apresentar-se inviável, dentro dos atuais padrões de produção e de características econômicas globais, quando, nesse caso, a instalação de equipamentos antipoluição torna-se uma alternativa mais viável.

Os mecanismos a serem aplicados no controle da poluição atmosférica dependerão do tipo e da natureza dos poluentes e do tipo de equipamento de controle utilizado. Há um conjunto de equipamentos de controle da poluição, cujo princípio de funcionamento é mais adequado ao controle de material particulado, e outro grupo mais adequado ao controle de gases e vapores. Especificamente no caso dos equipamentos tipo lavadores, esses são utilizados para controle dos dois tipos de poluentes. O projeto desses equipamentos depende então das características e propriedades do poluente e também da eficiência requerida. Segundo Calvert

(1984), os equipamentos utilizados para coleta de poluentes atmosféricos podem ser classificados da seguinte forma:

- Controle de material particulado:
  - Sistemas secos:
    - Coletores gravitacionais.
    - Coletores inerciais.
    - Coletores centrífugos (ciclones).
    - Filtros de tecidos (mangas).
    - Precipitadores eletrostáticos.
  - Sistemas úmidos:
    - Lavador com pré-atomização (tipo torre de *spray*).
    - Lavador com atomização pelo gás (tipo venturi).
    - Torre de enchimento.
    - Lavador de disco.
    - Filtro eletrostático úmido.
    - Lavador ciclônico.
  - Controle de gases e vapores:
    - Torres de absorção (torres de enchimento; torres de prato).
    - Leitos de adsorção.
    - Incineradores de gases (catalíticos e de chama).
    - Condensadores.

De acordo com Guimarães (1992), os parâmetros intervenientes no dimensionamento dos equipamentos são:

- Estado físico do poluente: composição química; temperatura; viscosidade; umidade do gás carreador; combustibilidade; reatividade; propriedades elétricas do carreador; carga de poluente; solubilidade; capacidade absorviva; combustibilidade; reatividade química; propriedades elétricas; higroscopicidade.
- Eficiência de remoção requerida.
- Consideração dos aspectos econômicos, que incluem custo de capital e custo de operações.

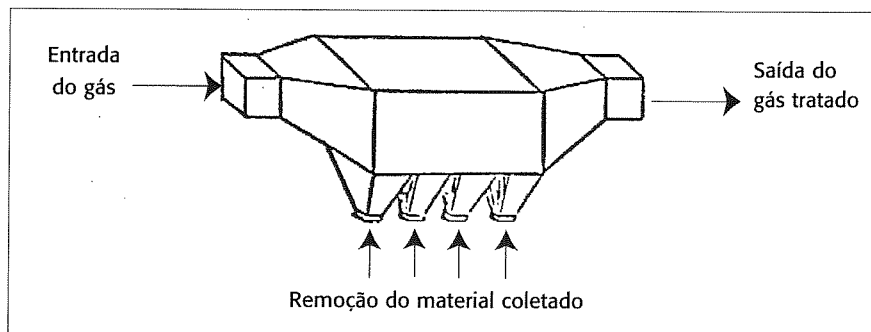
- Consideração dos aspectos de manutenção, no que se refere à disponibilidade de recursos humanos e logística.
- Consideração de aspectos de risco, pois, conforme o tipo de poluente e população potencialmente exposta, a tecnologia escolhida deve possibilitar o alcance de níveis aceitáveis de segurança operacional.

## *Equipamentos de controle de material particulado*

### *Coletores gravitacionais*

O princípio de funcionamento desse tipo de equipamento de controle é por processo de deposição gravitacional das partículas carregadas pelo fluxo gasoso. O dimensionamento é feito de modo que a velocidade do gás possibilite a deposição das partículas dentro da câmara. Na Figura 6, pode-se observar uma ilustração de uma chamada câmara gravitacional. As câmaras gravitacionais são utilizadas principalmente como pré-coletores em operações de refino de metais (para partículas grossas), em indústrias alimentícias (cascas e películas), em caldeiras alimentadas a carvão (para coletar as cinzas carreadas) etc. (Guimarães, 1992; Korc, 2003). Apresentam como vantagens principais baixo custo de implantação e operação, pouco desgaste, baixo consumo de energia, simplicidade de projeto, construção e instalação, além de que podem ser utilizadas com efluentes gasosos e altas temperaturas (Korc, 2003). Elas também apresentam baixa eficiência para remoção de partículas pequenas, como também requerem grande espaço para sua instalação.

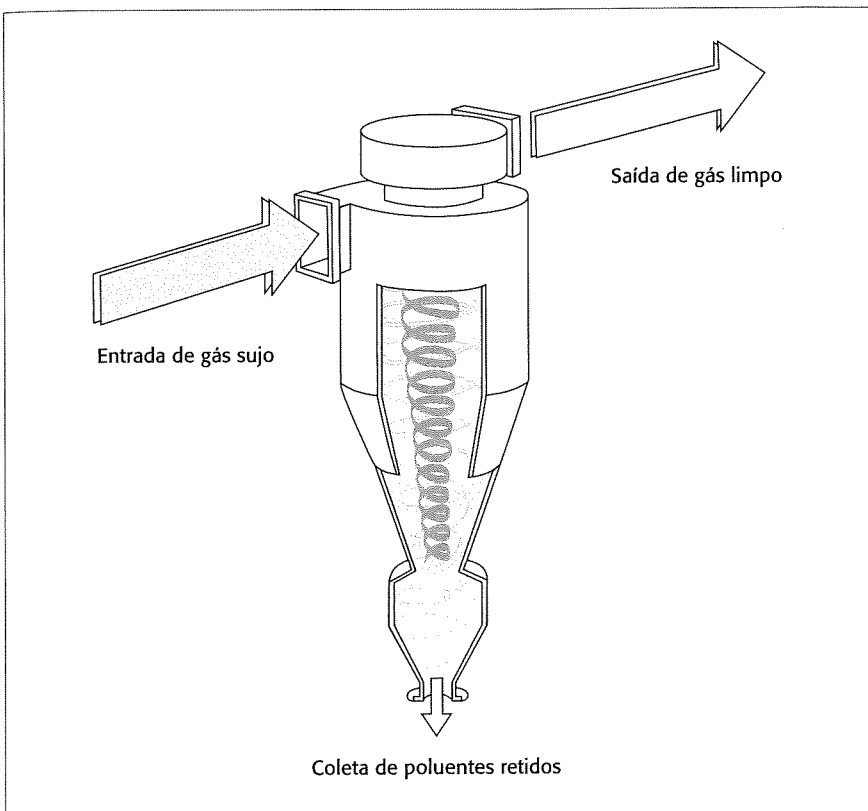
**Figura 6** – Câmara de sedimentação.



## Coletores centrífugos (ciclones)

Têm como princípio de funcionamento o uso da força centrífuga sobre as partículas para possibilitar sua coleta. A força centrífuga aplicada sobre as partículas é significativamente mais intensa do que a força da gravidade, deslocando a partícula na direção das paredes do ciclone, retirando-a do fluxo gasoso (Calvert, 1984). O gás entra tangencialmente no topo do ciclone, criando um fluxo espiral descendente entre a parede e o duto da saída. Esta espiral principal se estende até a base do cone e retorna em movimento espiral ascendente interno, chamada de espiral interna, a qual se estende até o duto de saída, por onde saem os gases tratados, conforme ilustrado na Figura 7 (Guimarães, 1992). Os

**Figura 7** – Coletor tipo ciclone.



coletores centrífugos são aplicados na indústria para coleta de material particulado, como equipamento de controle de poluentes e também como equipamento do próprio processamento industrial. Eles apresentam como principais vantagens baixo custo aquisitivo e operacional, baixo consumo de energia e simplicidade de projeto, manutenção e construção, bem como a possibilidade de operar com gases em qualquer temperatura.

Como desvantagens, possuem baixa eficiência para partículas inferiores a 5  $\mu\text{m}$ , sofrem processo de abrasão excessiva e possível entupimento quando operado com altas concentrações de poeiras, principalmente as de menor diâmetro, mais higroscópicas e pegajosas (Mesquita et al., 1988; Guimarães, 1992).

## *Coletores úmidos*

Nesse tipo de equipamento, o gás que carrega material particulado é forçado por meio de uma aspersão de gotas, com as quais as partículas se chocam e são depositadas por difusão, agindo como núcleo de condensação de água, conseqüentemente, aumentando de tamanho e possibilitando a sua coleta (Guimarães, 1992). Em um coletor úmido, os quatro mecanismos de coleta principais são a impactação, a interceptação, a difusão e a condensação. Eles apresentam como vantagens o fato de poderem coletar partículas e gases ao mesmo tempo; dissolver partículas solúveis; realizar o processo de resfriamento dos gases; coletar e neutralizar os gases e névoas corrosivas; de evitarem riscos de explosão pela presença de gases e poeiras combustíveis; de apresentarem, em geral, tamanho pequeno e custo inicial relativamente baixo. Como desvantagens ocorrem processos de recristalização de materiais solúveis; têm necessidade de leito de sedimentação para partículas insolúveis; geram resíduos líquidos; partículas submicrométricas são coletadas com baixa eficiência; partículas que não podem ser molhadas são difíceis de serem coletadas; gotículas podem sair pelo efluente gasoso do coletor; efluente tem alta umidade relativa e baixo ponto de orvalho; possuem alta taxa de corrosão; possibilidade de congelamento do líquido em regiões frias; excessiva evaporação do líquido para gases quentes, portanto, aumento do consumo de água no empreendimento; e podem apresentar significativo consumo energético (Mesquita et al., 1988; Guimarães, 1992).

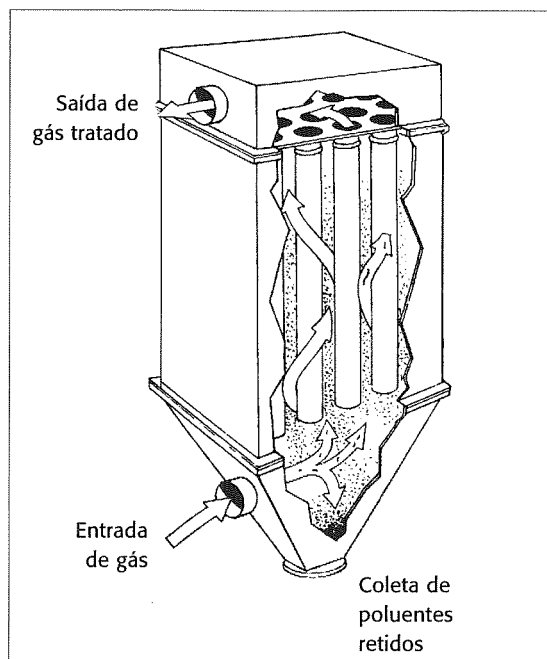
## *Filtros*

Trata-se de um dos mais antigos métodos de remoção de partículas de um fluxo gasoso. Apresentam alta eficiência para uma ampla faixa de tamanhos de partículas. O fluxo de gás carregado de partículas é forçado por um meio poroso, que é o filtro de tecido. Os filtros de tecido têm sido utilizados como equipamento de controle da poluição do ar em indústrias de minerais não metálicos, fornos elétricos de aço, fornos de recuperação de chumbo, dióxido de titânio, cereais, madeira, fertilizantes, entre outras (Calvert e Englund, 1984; Guimarães, 1992). Eles têm como vantagens alta eficiência de remoção de poluentes, perda de carga não excessiva e resistência à corrosão.

Como desvantagens, quantidade de espaço requerido para instalação do equipamento; alto custo; problemas de empastamento, em virtude de poluentes condensáveis e pegajosos. A Figura 8 apresenta um desenho esquemático de um equipamento coletor tipo filtro manga.

## *Precipitadores eletrostáticos*

Têm como princípio de funcionamento a ionização do fluxo de ar, por meio da aplicação de alta diferença de potencial elétrico. O fluxo de ar poluído passa por uma alta diferença de potencial, o gás ioniza-se, e os íons chocam-se ou depositam-se nas partículas, carregando-as eletricamente e fazendo com que elas migrem em direção ao polo de carga contrária, possibilitando sua posterior coleta e adequada disposição final (Calvert e Englund, 1984). As principais vantagens no uso de precipitadores eletrostáticos são a possibilidade de tratarem grandes vazões de gás e altas temperaturas; a pequena perda de carga; a alta eficiência de coleta em uma faixa de determinado tamanho de partículas; os baixos custos de operação e de manutenção; e a possibilidade de serem implantados em módulos (Guimarães, 1992; Korc, 2003). As desvantagens são que apresentam alto custo inicial; requerem grande espaço; apresentam perigos causados pela alta tensão; e servem somente para material particulado. Precipitadores eletrostáticos têm sido utilizados em usinas termoeletricas, fábricas de cimento, aciarias, fundição de metais não ferrosos, fábricas de celulose e incineradores de resíduos sólidos (Guimarães, 1992).

**Figura 8** – Equipamento coletor tipo filtro manga.

Fonte: CONAMSA, s.d.

## ***Controle de gases e vapores***

Os processos de absorção, adsorção, condensação e incineração consistem em opções para separar e coletar poluentes gasosos de seus meios de solução.

### **Equipamentos de absorção de gases e vapores**

Conforme Guimarães (1992), o princípio de funcionamento é fazer com que um gás ou vapor em solução gasosa seja posto em contato com um líquido, no qual ele é solúvel, ocorrendo dessa forma transferência de massa do gás para o líquido, proporcionalmente à solubilidade do gás no líquido e ao diferencial de concentração. Além da ação física, o gás pode reagir com o líquido (ou com alguma substância nela dissolvida), ocorrendo a chamada absorção com reação química, fato que, geralmente, aumen-



ta a eficiência da coleta. Dessa forma, a transferência de massa acontece em equipamento onde o soluto (gás ou vapor poluente) é posto em contato com o solvente (líquido), sendo que os tipos principais são as torres de enchimento, as torres de prato, as torres de *spray* e os lavadores tipo Venturi. A absorção é provocada pelo grau de difusão molecular e turbulenta entre as fases (gasosa e líquida). Guimarães (1992, p. 188) reforça que a escolha do solvente é importante para que altas eficiências sejam obtidas. Algumas características a serem consideradas são:

Alta solubilidade do gás no líquido, baixa volatilidade do solvente, baixa corrosividade, baixa viscosidade, baixa toxicidade, baixa inflamabilidade, alta estabilidade química, baixo custo e grande disponibilidade comercial. A recuperação do solvente e do soluto é, algumas vezes, economicamente interessante; o resíduo deve ser adequadamente tratado para evitar problemas de poluição das águas.

## Adsorção

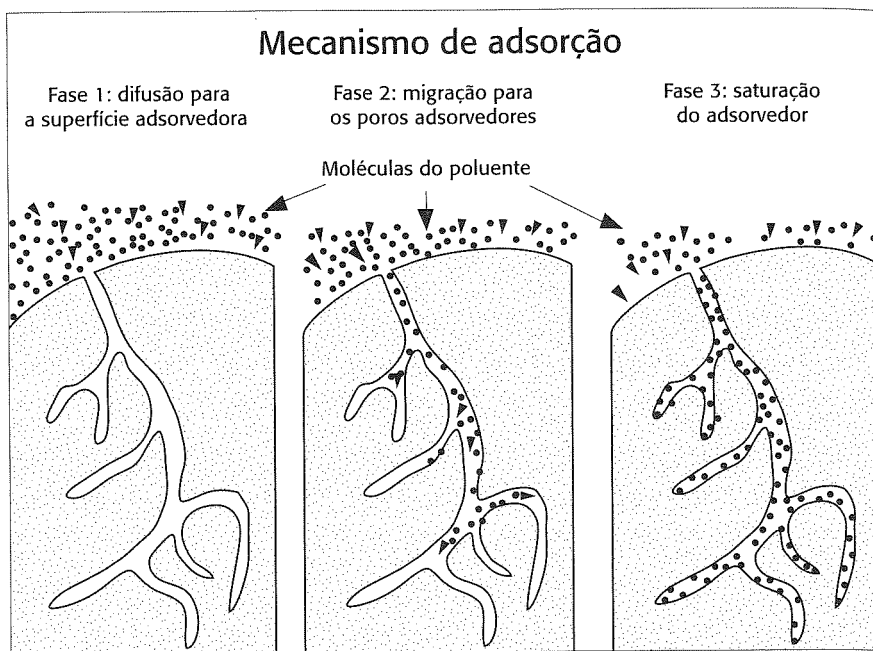
O uso do processo de adsorção (Figura 9) no controle da poluição refere-se à capacidade de determinado poluente atmosférico por meio das forças de Van der Waals e de forças eletrostáticas. Os leitos de adsorção de carvão ativado são bastante utilizados (Korc, 2003), nos quais os poluentes são extraídos e se aderem a uma superfície porosa de carvão ativado. O produto adsorvido pode ser recuperado, como no caso do percloroetileno, utilizado em tinturaria com processo a seco.

Conforme Guimarães (1992), as aplicações mais usuais dos equipamentos de controle de poluição tipo leito de adsorção de carvão ativado são para os processos de tinturaria a seco, pintura, banhos de tratamento de superfície, fabricação de tintas e vernizes, entre outros. A adsorção é um método de controle eficiente e de custo acessível para os casos citados, quando as concentrações não ultrapassam 500 ppm.

## Incineração de resíduos gasosos

Conforme Dempsey e Oppelt (1999), a utilização do fogo em processos de limpeza/purificação é bastante antiga; no entanto, o seu emprego para fins de controle de poluentes gasosos ocorreu a partir do século passado.

De acordo com Guimarães (1992, p. 189), “o papel desempenhado pelos processos de combustão no problema da manutenção ou poluição

**Figura 9** – Processo de adsorção.

Fonte: University of Florida (2003).

dos recursos do meio ambiente é ambíguo e paradoxal”. Refere-se neste caso à combustão de produtos tóxicos, evitando que sejam lançados inadequadamente nos recursos hídricos, ar e solo, mas, no entanto, a incineração sem critérios adequados pode representar risco significativo de agravo à saúde.

A incineração é um processo de oxidação térmica, produto da combinação do oxigênio com um material combustível, na presença de calor, que pode ser utilizado para destruição da fração orgânica de resíduos.

A combustão completa de compostos orgânicos poluentes tem como produtos finais água e dióxido de carbono. A qualidade da incineração depende basicamente dos processos de mistura das partes da reação (turbulência), da temperatura de combustão e do tempo de residência na temperatura da reação. Em alguns casos, incinerando-se substâncias com a presença de determinados poluentes contendo, por exemplo, enxofre, cloro, bromo, iodo, metais pesados, entre outros produtos, pode ser necessário um tratamento posterior, como torre de enchimento.

Gases, em especial vapores orgânicos e substâncias odoríferas, como as mercaptanas em indústrias de celulose e papel, são geralmente controlados pelo processo de incineração, sendo que os principais métodos de incineração empregados para resíduos gasosos são os *flares*, incineradores de chama direta e incineradores catalíticos.

## Catalisador veicular

O Proconve, de âmbito nacional, criado em 1986, tem como objetivo a redução dos níveis de emissão de poluentes nos veículos automotores. A instalação de catalisadores para controle da poluição veicular ocorreu a partir de 1997, em conformidade com os limites estabelecidos pelo Proconve.

Os conversores catalíticos, que começaram a ser utilizados nos Estados Unidos em 1975, possibilitam o tratamento dos gases de escape do motor, existindo atualmente dois tipos principais: o conversor catalítico oxidante, que oxida os hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e não atuam sobre as emissões de  $\text{NO}_x$  e o conversor catalítico de três vias, que oxida os hidrocarbonetos e monóxido de carbono a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , e reduz os óxidos de nitrogênio a  $\text{N}_2$  (Feam, 2003). A utilização dos catalisadores, em conjunto com outras tecnologias, como a injeção eletrônica, permitiu reduzir significativamente a emissão desses poluentes citados, contribuindo, portanto, na redução dos riscos da poluição veicular em áreas urbanas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade do ar e a proteção à saúde pública são direitos da sociedade, garantidos pela Constituição Federal Brasileira de 1988, cabendo aos diferentes atores, nos âmbitos local e global, atuação no sentido de eliminar ou reduzir os efeitos negativos à saúde agravados pela poluição do ar.

Nesse sentido, a capacitação de recursos humanos para a atuação na gestão da qualidade do ar e os investimentos em pesquisa e estruturação do sistema de monitoramento da qualidade do ar tornam-se ações de caráter prioritário nessa estratégia. O estabelecimento de políticas públicas integradas, nos planos horizontais e verticais, deve incluir diretrizes e estratégias de promoção, prevenção e controle da qualidade do ar. A mudança dos padrões de consumo e de produção deve ser alcançada por meio de maior

eficiência no sistema de produção, pela otimização do uso dos recursos naturais e pela minimização da geração de rejeitos. O resultado será a diminuição no consumo de combustíveis fósseis e de recursos naturais, e consequentemente, a redução na quantidade de poluentes lançados na atmosfera.

A inclusão da dimensão social tem como objetivo a melhoria da qualidade de vida da população, o envolvimento pleno da comunidade na tomada de decisões, a promoção de assentamentos sustentáveis, entre outros. Assim, um processo transparente e participativo no sistema de gestão da qualidade do ar possibilita o envolvimento real da comunidade no sistema de gestão do seu meio ambiente. Ações integradas dos setores de gestão dos espaços humanos, como, por exemplo, melhoria do sistema de limpeza urbana, contribuirão para evitar a queima irregular de resíduos; os investimentos em transporte coletivo, o planejamento e a manutenção do sistema viário resultarão em menor quantidade de material emitidos pelos veículos.

O planejamento ambiental adequado pode resultar no uso mais eficiente da energia, em um sistema de transporte urbano que estimule a redução da quantidade de viagens diárias, na concepção de um transporte de cargas menos poluente, reduzindo assim a quantidade de poluentes lançados na atmosfera. É preciso que o cidadão, ao ligar o seu veículo para ir ao trabalho, saiba que está contribuindo para o aumento do efeito estufa global, ou que ao trafegar pelas ruas de sua cidade contribui para aumentar a poluição por material particulado, e um maior consumo de recursos naturais não renováveis.

Também é necessário repensar os modelos de desenvolvimento, para uma revisão das questões de consumo sustentável, bem como dos estilos e das prioridades a serem enfocadas. É preciso que a sociedade saiba e busque alternativas para que suas atividades sejam menos impactantes, como, por exemplo, a disponibilização de transporte coletivo eficiente ou veículos que poluam menos. A conscientização da comunidade para a importância da questão da poluição do ar resultará na tomada de decisões que consideram as questões de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

## DEDICATÓRIA

Os autores pretendem prestar uma homenagem ao professor Dr. Fernando de Araújo Guimarães, *in memoriam*, ressaltando o alcance de seu entendimento e visão, à época da 1ª edição do livro *Saneamento do*

meio, editado pela Fundacentro, em 1982. No capítulo 6 (“Poluição do Ar”), de sua autoria, o professor Guimarães alertava, a título de exemplo, para a questão da poluição por ozônio (oxidante fotoquímico), entre muitos outros fatores, fazendo com que seus conhecimentos científicos, aliados à sua visão avançada de mundo e à capacidade gerencial destacada, tenham contribuído para a formação e capacitação de profissionais competentes para o Estado de São Paulo e para o país.

Hoje os relatórios de qualidade do ar emitidos pela agência ambiental do estado de São Paulo, a Cetesb, demonstram o crescimento significativo deste poluente nos centros urbanos, confirmando o rol de suas preocupações à época.

## REFERÊNCIAS

BRAGA, B. et al. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

BRIGGS, D.; CORVALÁN, C.; NURMINEN, M. (Eds.). *Linkage methods for environmental and health analysis: general guidelines*. Genebra: WHO, 1996.

CALVERT, S.; ENGLUND, H.M. (Eds.). *Handbook of air pollution technology*. Nova York: John Wiley & Sons, 1984.

[CETESB] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2001*. São Paulo: Cetesb; 2002. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov>. Acessado em: 19 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2013. São Paulo: Cetesb, 2014.

\_\_\_\_\_. Qualidade do ar no estado de São Paulo 2014. São Paulo: Cetesb, 2015.

CITY POPULATION. *Population Statistics for Countries, Administrative Areas, Cities and Agglomerations – Interactive Maps and Charts*. Disponível em: <http://www.citypopulation.de>. Acesso em: 1 set. 2015.

[CONAMA] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 003, de 28 de junho de 1990. *Dispõe sobre a ampliação do monitoramento e controle dos poluentes atmosféricos. Legislação federal sobre o meio ambiente*. Taubaté: Vana, 1999.

[CONAMSA] SISTEMAS DE CONTROLE AMBIENTAL S.A. Catálogo de Filtro de Mangas – Gema. s.d. [Grupo Kepler Weber].

DEMPSEY, C.R.; OPPELT, E.T. *Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica*. Trad. Milton Norio Sogabe. São Paulo: a&wma Seção Brasil, 1999.

[EPA] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Air Resources Board. Particulate matter – overview*. Disponível em: <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/caaqs/pm/pm.htm>. Acessado em: 1 set. 2015.

[EU] EUROPEAN COMMISSION. *Air quality standards*. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>. Acessado em: 1 set. 2015.

[FEAM] FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. Disponível em: [http://www.feam.br/Qualidade\\_Ambiental/Qualidade\\_do\\_Ar/veicular.htm](http://www.feam.br/Qualidade_Ambiental/Qualidade_do_Ar/veicular.htm). Acesso em: 2 maio 2003.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. *Hidrologia*. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

GUIMARÃES, F.A. Poluição do ar. In: PHILIPPI JR, A. *Saneamento do meio*. São Paulo: Fundacentro, 1992, p.155-93.

[HUT] HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Disponível em: <http://www.hut.fi/~rzevenho/partiOH1.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2003.

KOJIMA, M.; LOVEI, M. *Urban air quality management: coordinating transport, environment and energy policies in developing countries*. Washington (DC): The World Bank, 2001. Disponível em: [http://www.worldbank.org/cleanair/cailac/arlimpo/learningactivities/edu\\_distancia](http://www.worldbank.org/cleanair/cailac/arlimpo/learningactivities/edu_distancia). Acesso em: 7 ago. 2003. [World Bank Technical Paper 508].

KORC, M.E. Manual de auto-instrucción. Peru: [Cepis] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitária. Disponível em: <http://www.cepis.ops-oms.org>. Acesso em: 7 abr. 2003. [Curso de orientación para el control de la contaminación del aire].

MALHEIROS, T.F. Indicadores ambientais de desenvolvimento sustentável local um estudo de caso do uso de indicadores da qualidade do ar. 2002. Tese (Doutorado) – Faculdade de Saúde Pública da USP.

MARTINEZ, A.P.; ROMIEU, I. Introducción al monitoreo atmosférico. Lima: Organización Panamericana de la Salud/Agencia de Cooperación Técnica de Alemania, 1997. Disponível em: <http://www.lamolina.edu.pe>. Acesso em: 19 jun. 2017.

MEDINA, S. et al. La contaminación atmosférica sigue constituyendo un problema de salud pública en París. *Foro Mundial de la Salud*. v. 17, p. 169-203, 1996.

MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. *Engenharia de ventilação industrial*. São Paulo: Cetesb, 1988.

MIRANDA, E.E.; DORADO, A.J.; ASSUNÇÃO, J.V. *Doenças respiratórias crônicas em quatro municípios paulistas*. Campinas: Ecoforça, 1994.

ONURSAL, B.; GAUTAM, S.P. Contaminación atmosférica por vehículos automotores: experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina. Washington (DC): Banco Mundial, 1997. Disponível em: <http://www.worldbank.org>. Acesso em: 7 ago. 2003.

- OSTRO, B. *Outdoor air pollution? assessing the environmental burden of disease at national and local levels*. Genebra: WHO, 2004. [WHO Environmental Burden of Disease Series, n. 5].
- ROMIEU, I. Epidemiological studies of the health effects of air pollution due to motor vehicles. In: MAGE, D.; ZALI, O. (Eds.). *Motor vehicle air pollution: public health impact and control measures*. Genebra: WHO, 1992.
- SALDIVA, P.H.N. et al. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in São Paulo, Brazil. *Arch Environ Health*, v. 50, p. 159-63, 1995.
- TURCO, R.P. *Earth under siege: from air pollution to global change*. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- UNIVERSITY OF FLORIDA. Aerosol & Particulate Research Laboratory. Course on Air Pollution Control Design. Disponível em: <http://www.ees.ufl.edu/homepp/cywu/>. Acesso em: 10 dez. 2003.
- \_\_\_\_\_. *Air quality planning and standards*. Disponível em: <http://www3.epa.gov/airquality/>. Acessado em: 1 set. 2015.
- [WHO] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air quality guidelines*. Genebra, 1999. Disponível em: <http://www.who.int/peh/air/airindex.htm>. Acessado em: 4 ago. 2001.
- \_\_\_\_\_. *Air quality guidelines. Global update 2005*. Dinamarca, 2006. Disponível em: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/outdoorair\\_aqg/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/). Acesso em: 1 set. 2015.
- \_\_\_\_\_. Global Health Observatory Data. Ambient air pollution. Exposure City level. 2011. Disponível em: <http://www.who.int/gho/database/en/>. Acesso em: 1 set. 2015.
- \_\_\_\_\_. *7 million premature deaths annually linked to air pollution*. Genebra, 25 mar. 2014. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>. Acesso em: 1 out. 2015.
- WORLD BANK. *Greening industry: new roles for communities, markets, and governments*. Washington (DC): Oxford University Press, 1999a. Disponível em: <http://www.worldbank.org>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- \_\_\_\_\_. *Pollution prevention and abatement: handbook 1998 toward cleaner production*. Washington (DC): Oxford University Press, 1999b. Disponível em: <http://www.worldbank.org>. Acesso em: 19 jun. 2017.