

## CAPÍTULO 15

---

# POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE HUMANA

PAULO HILARIO NASCIMENTO SALDIVA

MICHELINE DE SOUSA ZANOTTI STAGLIORIO COÊLHO

---

*"Mal deixei o ar pesado de Roma para trás e o mau cheiro do fumo das chaminés (...) que derramam vapor pestilento e fuligem (...) senti uma alteração do meu humor"* (Lucius Annaeus Sêneca, 61 a.C.). Neste capítulo, abordamos a poluição do ar com enfoque nos impactos à saúde humana. As definições físicas dos poluentes e da atmosfera, bem como as fontes de emissão, padrões de qualidade do ar e métodos de controle, serão relatados no Capítulo 21. Veremos, no decorrer deste texto, como a poluição do ar e o clima (e a sinergia destes) impactam a saúde humana. Por fim, teremos uma visão geral sobre algumas metodologias para estudos, uma vez que, pela interdisciplinaridade do tema, o esclarecimento sobre metodologias e análises estatísticas adequadas se faz necessário. São textos simples, que têm o objetivo de direcionar os estudos e abrir a visão sobre o "complexo mundo da multidisciplinaridade". Sugerimos observar a bibliografia apresentada no final deste capítulo para um aprofundamento e direcionamento das questões relacionadas a este tema tão fascinante.

---

### 15.1 INTRODUÇÃO

O avanço do conhecimento científico em cada disciplina é inquestionável. Contudo, muitas vezes nos deparamos com algumas perguntas sobre como usar este conhecimento no setor da saúde. Esta preocupação é legítima, uma vez que a saúde e o bem-estar do homem deveriam nortear grande parte deste conhecimento gerado. Muitas vezes, estudos fantásticos excluem o homem e percebemos que, fora da disciplina das ciências médicas, a preocupação com a saúde humana parece não fazer parte do processo do conhecimento científico. Parte desse problema ocorre pela complexidade das disciplinas e pela falta de multidisciplinaridade nos grupos de pesquisa científica, hoje, imprescindível na produção do conhecimento. Quando pensamos em saúde humana, abre-se um leque de variáveis a serem analisadas, pois a saúde é influenciada por fatores sociais, nutricionais, genéticos, culturais e climáticos, entre outros.

Contudo, a preocupação com os impactos da poluição na saúde tem se tornado urgente e se impõe, pois, com o crescimento populacional e a migração da população das zonas rurais para grandes centros urbanos, a poluição (ar, água, solo, sonora e visual) gerada pelas atividades humanas causa impactos sobre o próprio homem e nos deixa em dúvida se somos vilões ou vítimas desta realidade.

No Brasil, podemos exemplificar este processo utilizando a cidade de São Paulo (SP) como um laboratório dos impactos dos aglomerados urbanos e as consequências da poluição sobre a saúde dos seus habitantes ou visitantes. Muito do que conhecemos sobre poluição do ar e os impactos na saúde no Brasil se deve aos trabalhos desenvolvidos pelo Laboratório de Poluição Atmosférica da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (USP). Por isso, muitos dos exemplos citados neste texto se referem à Região Metropolitana de São Paulo. Contudo, espera-se que, em breve, muitos estudos sejam feitos em outras localidades para que possamos ter um conhecimento maior dos efeitos nocivos dos poluentes atmosféricos no nosso país.

## 15.2 ASPECTOS GERAIS DA RELAÇÃO ENTRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE HUMANA

Considerando que o meio ambiente urbano é o **hábitat natural** mais característico de veículos motorizados, a exposição de grande número de indivíduos a poluentes atmosféricos é uma situação inevitável. Mesmo os mais ferrenhos admiradores de veículos concordam que a inalação de gases de emissão automotiva não faz bem à saúde. Apesar desse consenso, o fator saúde é raramente levado em conta quando da definição de políticas de combustível ou transporte. Por exemplo, o programa de etanol combustível foi implementado em nosso país devido aos seus aspectos econômicos e não propriamente pelos seus efeitos sobre a saúde. Na verdade, nunca houve um estudo de impacto ambiental que levasse em conta os efeitos da produção e das emissões veiculares para a implementação do novo combustível, bem como quando as suas proporções de adição à gasolina foram alteradas desde o início da produção de veículos movidos a etanol. Essa mesma despreocupação também ocorre quando da definição do uso e ocupação do solo no cenário urbano. Drásticas modificações de rotas de tráfego podem, por vezes, afetar regiões residenciais, sem que se leve em conta a exposição da população nas áreas de maior impacto. É até certo ponto interessante notar que este tipo de despreocupação não ocorreria caso houvesse a iniciativa da instalação de uma nova indústria ou de uma usina termoelétrica no espaço urbano. Essa situação parece indicar que não nos sentimos ameaçados pelos veículos, que são, em última análise, objetos de desejo e não de ameaça.

Uma vez reconhecido o íntimo compartilhamento de espaço entre veículos (e suas emissões tóxicas) e a população urbana, torna-se defensável argumentar a favor de que os efeitos à saúde humana façam parte das políticas de transportes, de combustíveis, de engenharia veicular, de ocupação do espaço urbano, enfim, de todos os aspectos que regulam o tráfego e as emissões de automotores no cenário urbano. Há que se reconhecer, todavia, que essa tarefa não é trivial.

Inicialmente, é necessário estabelecer os limites dos efeitos à saúde que se pretende avaliar. Os **efeitos à saúde da população** devido à exposição a poluentes ambientais são diversos, exibindo diferentes **intensidades** e manifestando-se com diferentes **tempos de latência**: efeitos comportamentais e cognitivos, inflamação pulmonar e sistêmica, alterações do calibre das vias aéreas, do tônus vascular e do controle do ritmo cardíaco, alterações reprodutivas, morbidade e mortalidade por doenças cardiorrespiratórias e aumento da incidência de neoplasias, entre outros. Dada a multiplicidade de desfechos possíveis, é necessária a definição, de forma objetiva, de **efeito adverso à saúde**. A partir desta definição, é possível

selecionar quais são os eventos úteis para determinar o impacto que alguma modificação ambiental terá sobre a população exposta.

Embora o conceito de efeito adverso ou prejudicial sobre a saúde humana seja amplamente utilizado para a definição de medidas de avaliação de risco ou de gestão ambiental, uma definição precisa sobre os limites existentes entre um achado com significância estatística e uma alteração que acarrete um prejuízo relevante para a saúde ainda carece de um melhor esclarecimento.

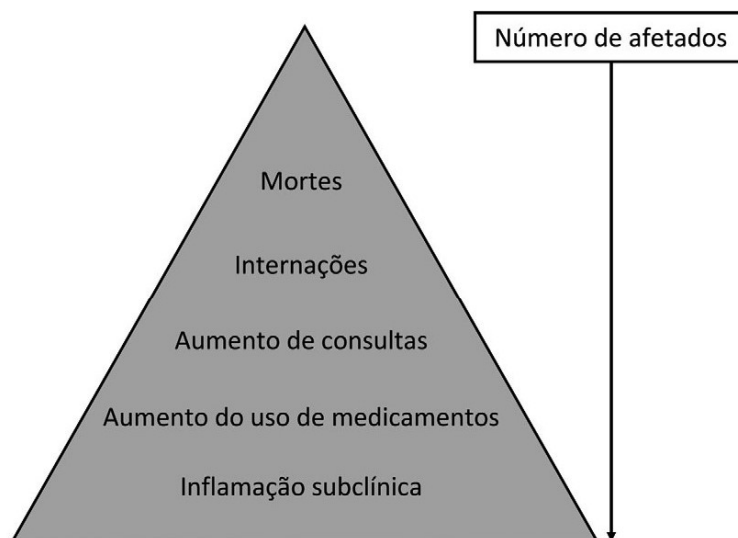
A definição mais amplamente adotada para caracterizar um efeito adverso à saúde tem sido aquela preconizada pela *American Thoracic Society* (2000), que define agravo à saúde “*como um evento médico significativo, caracterizado por um ou mais dos seguintes fatores: 1) interferência com a atividade normal dos indivíduos afetados; 2) doença respiratória episódica; 3) doença incapacitante; 4) doença respiratória permanente; 5) disfunção respiratória progressiva*”.

No ano de 2000, à luz dos novos conhecimentos científicos, a Sociedade Americana de Doenças Torácicas expandiu o escopo de sua definição anterior, incorporando os seguintes eventos: biomarcadores, qualidade de vida, alterações fisiológicas, sintomas, aumento de demanda por atendimento médico e, finalmente, mortalidade (*American Thoracic Society*, 2000). Mais recentemente, em 2004, a Sociedade Americana de Cardiologia publicou um documento reconhecendo a poluição atmosférica com um fator de risco para o agravamento de doenças cardiovasculares, notadamente infarto agudo do miocárdio, insuficiência cardíaca congestiva e desenvolvimento de arritmias.

Estudos realizados com dados da *American Cancer Society* (Pope et al., 2002) incluem neoplasias pulmonares como um indicador de efeitos da poluição atmosférica. Finalmente, alterações reprodutivas, tais como baixo peso ao nascer, abortamentos e alterações da relação de sexos ao nascimento também foram incorporados ao conjunto de indicadores de efeitos prejudiciais significantes oriundos da poluição do ar.

Do que foi anteriormente exposto, podem ser relacionados diferentes efeitos adversos da poluição do ar sobre a saúde humana, alguns deles manifestando-se de forma **aguda** – horas ou dias após a exposição – enquanto outros são evidenciados somente após longos períodos de exposição – os chamados efeitos **crônicos**. Tanto os efeitos agudos como os crônicos podem exibir diferentes níveis de gravidade, abrangendo uma gama de efeitos que oscilam do desconforto vago até (como desfecho de maior gravidade) a morte. Alguns exemplos talvez auxiliem a aclarar melhor estas ideias. Quando do aumento da poluição do ar, uma grande fração da população apresentará alterações cognitivas ou irritabilidade não específicas. Uma menor proporção dos indivíduos expostos apresentará um aumento de marcadores plasmáticos e pulmonares de inflamação, indicando a presença de inflamação subclínica. Em uma proporção ainda menor, esta inflamação poderá acarretar alterações funcionais, como aumento da pressão arterial, discreto distúrbio do controle autonômico do coração ou queda de indicadores de função pulmonar. Em um nível de gravidade maior, indivíduos que utilizam medicação cronicamente para o controle de doenças respiratórias e cardíacas (asma e hipertensão arterial, por exemplo) necessitarão de maior quantidade de medicamentos para controlar a doença. Haverá aqueles que, incapazes de controlar as alterações por si próprios, procurarão o médico para consultas ou, nos casos mais graves, serão internados em pronto-socorros ou hospitais. Finalmente, uma parte dos afetados morrerá no dia ou poucos dias após, em virtude dos efeitos da poluição a que foram expostos (Figura 15.1).

Como a maior parte dos estudos que avaliam os efeitos agudos da poluição utiliza desfechos graves como internações respiratórias e mortalidade, é provável que os coeficientes que relacionam prejuízo à saúde humana com poluição atmosférica estejam subestimando os efeitos reais, dado que eventos que comprometem a qualidade de vida, tais como comprometimento do controle de doenças crônicas, não são computados, em função da inexistência de notificação compulsória dos mesmos.



**Figura 15.1** Esquema representativo da relação entre gravidade dos efeitos da poluição e o número de pessoas afetadas pela poluição em uma dada comunidade. Fonte: Adaptado de *American Thoracic Society* (2000).

Estudos de longa duração, com acompanhamento de grupos populacionais por períodos prolongados, levaram ao reconhecimento de efeitos da poluição que se traduzem apenas após anos de exposição. Assim como o cigarro manifesta seus efeitos após anos de consumo tabágico, a poluição repete, em menor escala, alguns dos seus efeitos crônicos. A Tabela 15.1 apresenta a relação de alguns dos efeitos crônicos da poluição do ar.

**Tabela 15.1** Relação de alguns dos desfechos secundários à exposição crônica aos poluentes atmosféricos mais consistentemente relatados pela literatura médica

Aumento de sintomas respiratórios	Agravamento de arteriopatia aterosclerótica
Redução da função pulmonar	Perda de anos de vida e doenças cardiorrespiratórias
Maior incidência de doença pulmonar obstrutiva	Aumento da frequência de abortamentos
Maior incidência de neoplasias pulmonares	Redução do peso ao nascer

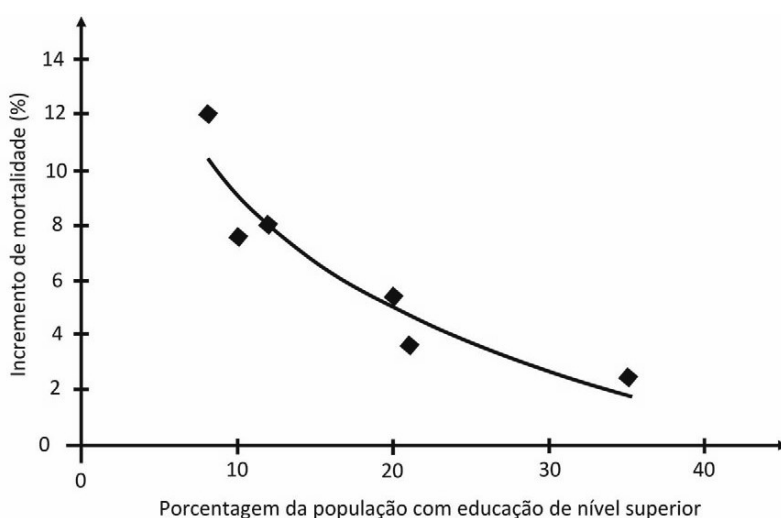
A definição de efeito adverso à saúde deve ser, necessariamente, acompanhada da caracterização dos grupos mais suscetíveis. O aumento da **suscetibilidade aos poluentes** é dependente de fatores individuais, de moradia e socioeconômicos. Entre os fatores de natureza individual, os mais importantes são idade, morbidades associadas e características genéticas. Os extremos da pirâmide etária têm sido consistentemente apontados como alvos preferenciais da ação adversa dos poluentes atmosféricos, especialmente nos segmentos abaixo dos 5 e acima dos 65 anos de idade. Morbidades associadas, tais como asma, bronquite crônica, doença aterosclerótica, diabetes mellitus, miocardiopatias e arritmias cardíacas estão entre as condições patológicas sabidamente predisponentes da suscetibilidade aos efeitos dos poluentes atmosféricos.

As condições de moradia afetam a dose de poluentes recebida e, conseqüentemente, a suscetibilidade. Nos grandes centros urbanos, existem áreas em que a geração e a dispersão de poluentes favorece que os níveis ambientais de poluição sejam significativamente maiores do que a média urbana. Áreas vizinhas aos grandes corredores de tráfego e regiões sujeitas a constantes congestionamentos são exemplos de pontos que condicionam maior risco aos seus habitantes. Por exemplo, medidas de material particulado de diâmetro inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ) realizadas sob o elevado Costa e Silva (o popular Minhocão), em São



Paulo (SP), revelam valores três vezes superiores à média da cidade. O tipo de construção também afeta o grau de penetração dos poluentes no interior das residências. Construções mais antigas e desprovidas de condicionamento de ar tendem a apresentar maior grau de penetração dos poluentes atmosféricos.

Condições socioeconômicas também interferem na suscetibilidade aos poluentes atmosféricos. Na cidade de São Paulo, foi demonstrado que, dada uma mesma variação de poluição ambiental (expressa em termos de  $MP_{10}$  – material particulado de diâmetro até  $10\ \mu\text{m}$ ), a mortalidade é maior nos bairros com piores indicadores socioeconômicos. A Figura 15.2 mostra um exemplo dessa situação, indicando o incremento porcentual de mortalidade para idosos com idade acima de 65 anos em diferentes regiões da cidade de São Paulo, em função de indicadores socioeconômicos (no caso, fração da população com educação de nível superior).



**Figura 15.2** Variação do incremento de mortalidade para uma variação inter-quartil de  $MP_{10}$  em diferentes regiões da cidade de São Paulo, diferenciadas por nível socioeconômico (no caso, porcentagem da população com educação de nível superior). Fonte: Martins et al. (2004).

Os fatores que determinam a maior vulnerabilidade da população menos favorecida frente aos poluentes atmosféricos podem ser divididos em dois grandes grupos: **eventos pertinentes às condições de saúde e acesso a cuidados e medicação**, e **condições que favorecem uma maior exposição aos poluentes**.

No primeiro grupo, é sabido que a população mais carente apresenta condição de saúde mais precária devido a problemas de saneamento, nutrição, acesso a serviços médicos e menor poder de compra de medicamentos quando da instalação de uma doença. O segundo grupo – maior exposição – tem sido reconhecido como um fator relevante na relação entre poluição do ar e saúde. A relação entre exclusão social e maior exposição a poluentes ocorre tanto em níveis continentais como dentro de cada comunidade. Processos industriais mais “sujos”, veículos com tecnologia menos desenvolvida, combustíveis com maiores teores de contaminantes, são eventos reconhecidamente mais frequentes nos países em desenvolvimento. Em menor escala, dentro de uma mesma comunidade, é comum o fato de as profissões que levam a uma maior exposição aos poluentes (trabalhadores de rua, por exemplo) serem exercidas pelos segmentos mais carentes da população. Da mesma forma, moradias nas bordas de vias com alto tráfego e a utilização de lenha ou resíduos para a preparação de alimentos são eventos mais comuns aos grupos menos favorecidos. Desse modo, a maior vulnerabilidade dos segmentos de menor poder econômico aos poluentes atmosféricos é determinada tanto pelas piores condições basais de saúde e acesso aos instrumentos de saúde, como também por uma maior exposição à poluição.

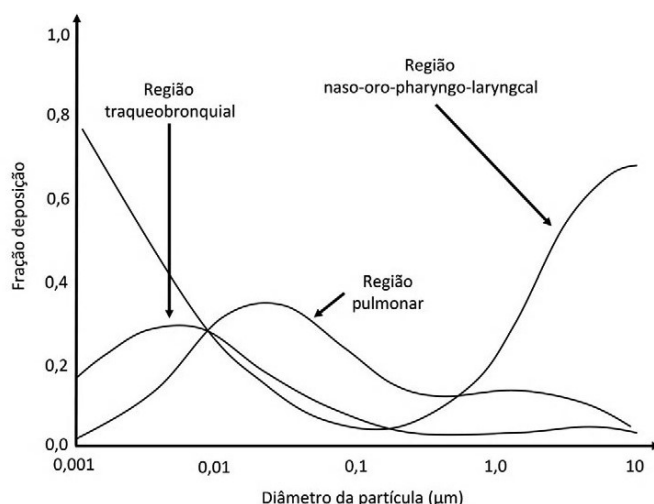
### 15.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS QUE AFETAM A SAÚDE HUMANA

O ar é indispensável à existência de vida em nosso planeta e é justamente esse elemento que mais vem sendo agredido pelo homem. Os primeiros sinais de poluição do ar ocorreram na era pré-cristã, quando o carvão mineral era usado como combustível e, nas cidades onde ocorriam essas práticas, o ar já apresentava sinais de poluição e muitos doentes eram levados para regiões “de ar mais puro”. Mesmo com indícios de poluição, a sociedade ainda não se preocupava com o controle da qualidade do ar, e foi a partir de três episódios de poluição excessiva, que causaram mortes em algumas cidades da Europa e dos Estados Unidos, que a comunidade científica começou a despertar para o controle da emissão de poluentes (Shy, 1979).

A *United States Environment Protection Agency* (EPA – <http://www.epa.gov>) elegeu os poluentes mais abundantes na atmosfera e que causam danos à saúde humana. São eles: o ozônio ( $O_3$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), material particulado inalável (diâmetro  $< 10 \mu m$ ) e monóxido de carbono (CO). Estão descritas, a seguir, as características de cada poluente, incluindo uma descrição geral de seus impactos sobre a saúde humana.

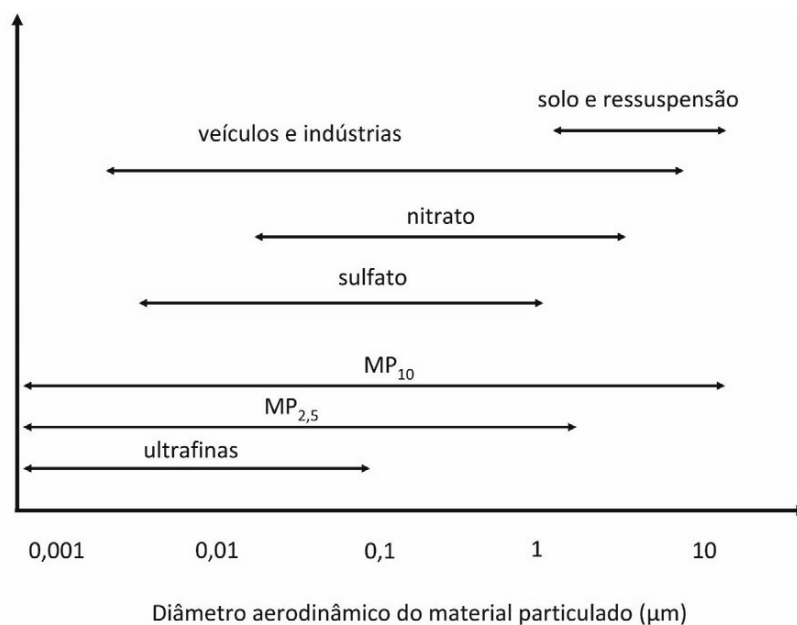
**Material Particulado (MP)** – O material particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão na atmosfera. A composição e o tamanho das partículas dependem das suas fontes de emissão. O tamanho das partículas é expresso geralmente pelo diâmetro aerodinâmico (Da), que pode variar desde as menores dimensões moleculares (cerca de 2 nm) até 150  $\mu m$  ou 200  $\mu m$ . Recorda-se, também, que se adota, com relação a essa propriedade, a classificação de **partículas finas** (tamanho  $< 2,0 \mu m$ ) e **partículas grossas** (tamanho  $> 2,0 \mu m$ ). Especificamente as partículas com  $Da < 10 \mu m$  passaram a ser chamadas de **partículas inaláveis**,  $MP_{10}$ . (Seinfeld & Pandis, 1998). O material particulado é um dos principais poluentes em termos de efeitos na saúde humana. Em especial, as partículas de menor dimensão, que são inaláveis, penetram no sistema respiratório e o danificam, o que tem sido relacionado ao aumento da incidência de doenças respiratórias (por exemplo, a asma).

Avanços nos estudos dos aerossóis atmosféricos estão associados com a melhoria das técnicas analíticas em termos de medidas de número e de massa das partículas. A classificação dos aerossóis está relacionada com os processos de formação e interação com o aparelho respiratório humano. A Figura 15.3 ilustra a eficiência de deposição de partículas no aparelho respiratório, considerando a parte superior e a inferior, e a soma referente ao pulmão.



**Figura 15.3** Deposição de um aerossol polidisperso (diâmetro geométrico médio  $\sigma_g = 2,5 \mu m$ ) no aparelho respiratório, calculada para várias regiões do pulmão. Fonte: Adaptado de Yeh et al. (1996).

O material particulado é o poluente atmosférico mais consistentemente associado a efeitos adversos à saúde humana. A toxicidade desse material depende de sua composição e do diâmetro aerodinâmico. Composição e diâmetro das partículas poluentes estão relacionados, como demonstrado na Figura 15.4.



**Figura 15.4** Representação dos diâmetros aerodinâmicos do material particulado e sua composição origem mais provável.

**Monóxido de carbono (CO).** Inibe a capacidade do sangue trocar oxigênio com os tecidos vitais e, em concentrações extremas, provoca morte por envenenamento. Afeta, principalmente, o sistema cardiovascular e o sistema nervoso. Concentrações mais baixas podem gerar problemas cardiovasculares, principalmente em pacientes cardiopatas. Concentrações elevadas podem provocar tonturas, dores de cabeça e fadiga.

**Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>).** É um poluente acidificante e, em elevadas concentrações, pode provocar problemas no trato respiratório, especialmente em grupos sensíveis, como os asmáticos. Este gás diminui os batimentos ciliares. O SO<sub>2</sub> é um gás amarelado, solúvel e irritante. Quando se une com a água, transforma-se em ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) e, ao oxidar-se, forma o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). O dióxido de enxofre age em menos de 24 h e, no ser humano, resulta em respiração ofegante e curta. Na sociedade, as pessoas asmáticas são o grupo mais sensível. O SO<sub>2</sub> combinado com material particulado em suspensão produz efeitos na saúde após mais de 24 h de exposição e, mesmo em baixos níveis, pode causar a morte e levar a doenças crônicas obstrutivas dos pulmões e doenças cardiovasculares. Quando ocorre intoxicação aguda, o SO<sub>2</sub> queima as vias respiratórias, desde a boca e o nariz até os alvéolos. A destruição é marcada por inflamação, hemorragia e necrose dos tecidos, levando à morte. Felizmente, o SO<sub>2</sub> ocorre em quantidades pequenas; mesmo assim, ao longo do tempo, lesa o aparelho mucociliar e favorece infecções respiratórias, broncopneumonias e edema pulmonar (Gina, 2006).

**Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>).** Elevadas concentrações podem provocar problemas respiratórios, especialmente em crianças. Doentes com asma podem também sofrer dificuldades respiratórias adicionais. Esse poluente é um dos precursores do ozônio troposférico, conforme as três equações apresentadas em seguida.

**Ozônio (O<sub>3</sub>).** É um poderoso oxidante e pode irritar o trato respiratório. Este poluente é uma variedade alotrópica do oxigênio, apresentando-se sob a forma de gás azul pálido, de odor picante. É um agente oxidante muito ativo, tóxico e considerado poluente em concentrações superiores a 120 μg/m<sup>3</sup>. Na

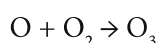
estratosfera, onde se forma a partir das radiações solares ultravioletas de ondas curtas, existe em níveis bem mais elevados. Apenas uma pequena fração do ozônio estratosférico escapa para a baixa atmosfera. O ozônio também se origina de descargas elétricas na atmosfera e de reações fotoquímicas de que participam os hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio (por exemplo, provenientes dos gases emitidos pelos canos de descarga dos automóveis com motores de combustão interna). O ozônio e outros oxidantes fotoquímicos são poluentes que não são emitidos diretamente pelas fontes, mas representam uma classe de espécies químicas que são formadas a partir de uma série de reações na atmosfera. Essas reações ocorrem graças à energia transferida a substâncias ditas **precursoras**, quando as mesmas absorvem fótons a partir da radiação solar. Os precursores mais caracteristicamente associados à formação de espécies oxidantes na atmosfera são o  $\text{NO}_2$  e os compostos orgânicos voláteis, ambos presentes nas emissões geradas pela queima de cana-de-açúcar.

As principais reações que regulam a fotoquímica atmosférica podem ser resumidas da seguinte forma:

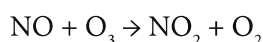
1.  $\text{NO}_2$  é dissociado de maneira a formar NO e oxigênio atômico



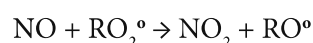
2. O oxigênio atômico combina-se com oxigênio molecular para formar ozônio



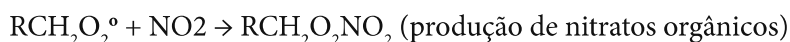
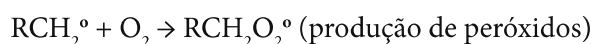
3. O ozônio é decomposto pela reação com o NO, formando  $\text{NO}_2$  e oxigênio molecular



Assim, o aumento das concentrações de oxidantes fotoquímicos é determinado por eventos que alterem o ciclo descrito nas equações anteriores, seja por consumo de NO, seja por aumento das concentrações de  $\text{NO}_2$ . A reação de NO com peróxidos atmosféricos é um dos principais eventos com potencial de alterar o equilíbrio fotoquímico, conforme a reação a seguir:



Os peróxidos atmosféricos são formados pela oxidação de compostos orgânicos voláteis, como demonstrado a seguir:



Na verdade, a última reação pode ser encarada como uma forma do  $\text{NO}_2$  ser estabilizado e transportado a longas distâncias (principalmente na forma de peroxiacetil nitrato), uma vez que o equilíbrio da reação pode ser revertido em áreas distantes da fonte primária de  $\text{NO}_2$ . Desta forma, as concentrações de ozônio tendem a ser substancialmente maiores nas regiões mais distantes dos pontos de emissão primária, a depender do transporte por ventos e da altura da camada de inversão, fazendo com que as áreas de atenção por ozônio possam ocorrer em locais desprovidos de monitoramento ambiental.

Os efeitos adversos do ozônio são superponíveis aos descritos para o MP, com associações significativas com morbidade e mortalidade e sem exibir um nível de segurança definido. Dessa forma, o ozônio foi selecionado como um poluente de interesse para o presente estudo.

## 15.4 INFLUÊNCIA DO CLIMA NA SAÚDE HUMANA

### 15.4.1 Evidências da Sinergia entre a Poluição e o Clima

Existe uma sinergia entre os episódios de poluição e as condições atmosféricas, pois, dependendo dos sistemas meteorológicos atuantes em determinada localidade, estes contribuem ou não para a dispersão dos poluentes. Tal sinergia é tão forte que, para estudar os impactos da poluição na saúde humana, precisamos controlar os efeitos meteorológicos utilizando, para isso, métodos estatísticos (maiores esclarecimentos dos métodos estão explicitados no item 15.5).

O primeiro episódio de danos provocados pela poluição foi registrado em 1930, no Vale de Meuse, localizado entre as cidades de Huy e Liège, Bélgica. Esse vale apresentava grandes concentrações de siderúrgicas, metalúrgicas, centrais de produção de energia e indústrias de cerâmica e vidro, as quais utilizavam fornos a carvão ou gasogênio, carvoarias, indústrias de cimento e de transformações químicas de minerais, fábricas de pólvora, ácido sulfúrico e adubos. Essas indústrias eram distribuídas em uma faixa de aproximadamente 20 km de comprimento. Nos cinco primeiros dias do mês de dezembro daquele ano, **a ausência de ventos e chuvas impediu a dispersão dos poluentes** na região. Imediatamente, foi registrado um aumento significativo no número de doenças respiratórias e um excesso de mortes (60 mortes) até dois dias após o episódio. Fato semelhante ocorreu em Donora (Pensilvânia, Estados Unidos). Durante os últimos seis dias do mês de outubro de 1948, uma **nuvem de poluentes ficou estacionada** sobre a cidade, provavelmente devido a um **episódio de inversão térmica**. Com isso, foram observadas 20 mortes, sendo que, naquele período, normalmente ocorriam, em média, apenas duas. Além disso, 10% da população foi internada com problemas cardíacos e respiratórios.

Porém, o mais clássico e grave episódio ocorreu em Londres, durante o inverno de 1952. Uma **inversão térmica impediu a dispersão dos poluentes** e uma nuvem composta principalmente por material particulado e enxofre permaneceu estacionada sobre a cidade durante, aproximadamente, três dias. Esses compostos apresentavam concentrações até nove vezes maiores que a média. O desfecho desse episódio foi a ocorrência de 4 mil mortes. Além disso, havia uma epidemia de *influenza* estabelecida sobre a cidade, agravando ainda mais a saúde da população (Martin & Bradley, 1960).

Nos Estados Unidos, a partir do final da década de 1940, vários esforços foram feitos no sentido de se estabelecer parâmetros para regulamentar a qualidade do ar, resultando em uma série de atos de controle da qualidade do ar, dentre eles a criação da EPA. Esta instituição escolheu, como referências para controle da poluição do ar, os poluentes mais abundantes na atmosfera e que causam danos à saúde humana (material particulado inalável (diâmetro < 10  $\mu\text{m}$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), cujos detalhes foram apresentados no item 15.3).

Neste texto, enfatizamos o clima do centro-sul do Brasil, onde as estações do ano são mais bem definidas (com verões chuvosos e invernos secos), e é justamente esta variabilidade climática que favorece épocas de maior poluição em algumas cidades. Nas outras regiões, devido ao fato de as temperaturas não variarem muito (a grosso modo), alguns fenômenos meteorológicos que favorecem eventos de poluição não são observados, por exemplo as inversões térmicas.

### 15.4.2 Aspectos Climáticos do Brasil

As regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil possuem particularidades em seu clima, com sistemas meteorológicos de características tropicais e extratropicais. Dentre os sistemas meteorológicos de várias escalas de tempo e espaço que atingem estas regiões, podemos citar as Frentes Frias (FF), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), Linhas de Instabilidades (LI), Zona de Convergência do Atlântico

Sul (ZCAS) e massas de ar frias e quentes, secas e úmidas. Deve-se salientar que alguns destes sistemas só atuam em determinadas estações do ano. Além disso, a topografia e a proximidade com o Oceano Atlântico determinam as peculiaridades climáticas do País.

A estação da primavera no Hemisfério Sul ocorre após a segunda quinzena do mês de setembro, geralmente no dia 22. Com a chegada dessa estação, a atmosfera começa a ficar mais úmida e aquecida e iniciam-se as primeiras chuvas que precederão o verão. Nessa estação, também começam ocorrer **altas temperaturas**. Com isso, é nessa época do ano que são medidos os **maiores índices de ozônio troposférico**. Com a chegada do verão, a atmosfera fica mais úmida e começa a **chover com regularidade**. Os **poluentes de forma geral são removidos** por deposição úmida (chuva). Já os **níveis de ozônio diminuem** por causa do excesso de **nebulosidade**. No início do outono, ainda se observam chuvas e calor. A partir de meados desta estação, a circulação atmosférica começa a mudar (para a chegada do inverno). No outono, as temperaturas começam a cair e a atmosfera fica com menor teor de umidade e, por isso, as chuvas diminuem. Nesta estação, ocorrem os primeiros dias de **inversão térmica** e os **índices de poluição começam a aumentar**, piorando no período de inverno, principalmente na RMSP<sup>1</sup>, onde este fenômeno ocorre com maior frequência. No inverno, predomina a Alta Subtropical da América do Sul (ASAS) e os sistemas frontais geralmente se deslocam pelo oceano e não conseguem chegar ao continente (para provocar chuva) por causa da configuração dos ventos influenciados pela ASAS. Com isso, os ventos de sul e sudeste diminuem sua frequência, o que favorece uma menor penetração da brisa marítima. Nota-se, nesta estação, a diminuição da intensidade dos ventos, propiciando um maior desenvolvimento de circulações locais, tais como as ilhas de calor urbanas e inversões térmicas.

### 15.4.3 Circulações Locais na RMSP

As circulações locais pertencem à classe de movimentos atmosféricos caracterizados por uma escala de tempo de até 24 h e de poucas centenas de quilômetros, podendo ser originadas por forçantes mecânicas ou térmicas. De forma geral, as circulações locais são padrões meteorológicos específicos de uma região que se desenvolvem a partir das particularidades deste lugar. As **brisas marítimas/lacustres/terrestres**, **circulações vale/montanha** e as **ilhas de calor urbanas** são alguns exemplos. Outro fenômeno bastante importante são as **inversões térmicas**, que também contribuem para as condições insalubres do ar paulistano, principalmente nos meses mais frios. Por apresentar características singulares, a cidade de São Paulo possui estas circulações locais que, por sua vez, interferem nas condições de tempo e na dispersão dos poluentes. Seguem algumas considerações sobre brisas, ilhas de calor urbanas e inversões térmicas.

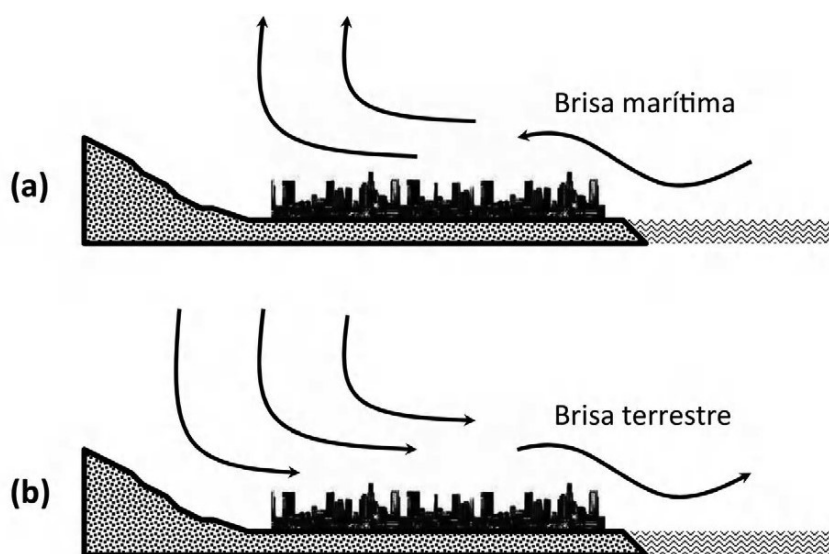
A causa fundamental do movimento do ar que causa a brisa é o aquecimento diferencial e a capacidade térmica entre as superfícies da terra e do mar. O efeito da **brisa marítima** (Figura 15.5a) pode ser percebido junto à costa e começa no fim da manhã. Trata-se de um vento vindo do mar, que atinge o máximo no princípio da tarde e desaparece ao anoitecer. Este vento é mais forte nos dias quentes, mas pode ser mais fraco quando o céu está nublado. A brisa marítima tem grande papel na **dispersão de poluentes**, podendo contribuir para o aumento da turbulência e transporte dos poluentes para áreas distantes das fontes ou mesmo prejudicar a dispersão, por apresentar circulações parcialmente fechadas, ocasionando o aprisionamento de ar poluído próximo às cidades. Oliveira & Silva Dias (1982) utilizaram dados de superfície da estação climatológica do IAG-USP e caracterizaram a variação diurna e sazonal dos ventos.

<sup>1</sup> Dentre todas as cidades do país, a Região Metropolitana de São Paulo parece ser a mais atingida, já que é a mais poluída e, por isso, vamos nos deter a explicar os impactos dos poluentes e/ou clima para esta região, uma vez que as medições e os estudos dos efeitos dos poluentes na saúde (em grande parte) foram feitos para a RMSP.

Segundo os autores, existem três padrões de entrada da brisa marítima em São Paulo: i) brisa padrão, na qual o vento passa de nordeste, no período da manhã, para sudeste à tarde; ii) vento noroeste no período da manhã passando a sudeste ou a calmaria no período da tarde ou início da noite; iii) intensificação do componente sudeste no período diurno. A penetração da brisa marítima em São Paulo, durante o período por eles analisado, ocorreu entre 13h e 14 h na maioria dos casos, podendo haver antecipação ou atraso, dependendo da situação sinótica atuante e da estação do ano.

O efeito da **brisa terrestre** (Figura 15.5b) é percebido à noite. Estas brisas sopram da terra para o mar, nas camadas inferiores, resultado de um arrefecimento, por irradiação, mais acentuado na superfície da terra do que nos oceanos adjacentes. As brisas de terra não são, em geral, tão fortes como as marítimas, pois as diferenças de aquecimento são menores, o que acaba criando um gradiente de pressão local mais fraco. Tais brisas atingem sua extensão máxima pouco antes do nascer do sol.

As brisas são um fenômeno de grande importância para a caracterização das condições de dispersão dos poluentes, considerando os efeitos de recirculação que estão associados a elas. Muitas vezes, as massas de ar marítimas transportadas para terra durante a tarde, pela brisa marítima, podem conter poluentes “envelhecidos” (principalmente hidrocarbonetos e  $\text{NO}_x$ ) de dias anteriores. A mistura desses poluentes primários com outros já existentes na atmosfera local favorece a produção de oxidantes fotoquímicos que, associados às condições de forte radiação solar, levam à produção de ozônio.



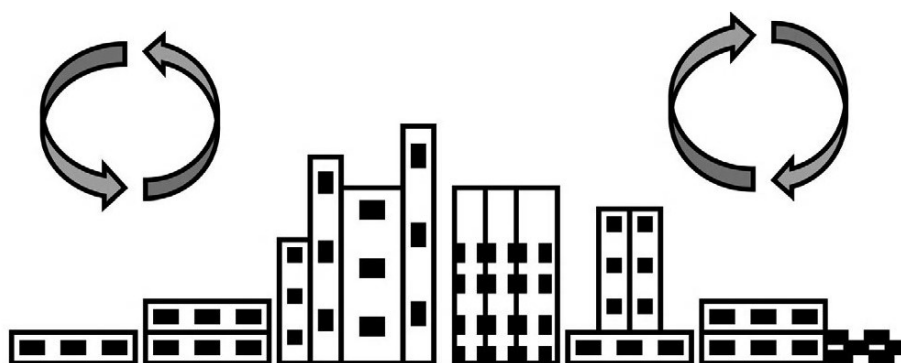
**Figura 15.5** Esquema da circulação de brisa: a) brisa marítima e b) brisa terrestre.

Fonte: Adaptado de *Living in the Environment*, Miller, 10<sup>th</sup> edition.

Outro efeito relacionado a contrastes de temperatura é a chamada **ilha de calor urbana** (Figura 15.6). A temperatura média anual em um centro urbano é tipicamente mais alta que a de suas redondezas. Em alguns dias, esse contraste pode atingir cerca de 10 °C ou mais. O contraste de temperatura forma uma circulação convectiva que contribui para a concentração de poluentes sobre as grandes cidades. Vários fatores contribuem para o desenvolvimento de uma ilha de calor urbana, um deles é a concentração relativamente elevada de fontes de calor nas cidades, que são fruto do excesso de asfaltos, prédios e outros. As propriedades térmicas dos materiais das construções urbanas também facilitam a condução de calor mais rapidamente que o solo das áreas rurais, contribuindo para um aumento no contraste de temperatura entre essas regiões. A perda de calor durante a noite, por radiação infravermelha para a atmosfera e para o

espaço, é parcialmente compensada nas cidades pela liberação de calor das fontes antropogênicas, tais como veículos, indústrias e construções em geral. Uma ilha de calor urbana se desenvolve, na maioria das vezes, quando os ventos de escala sinótica são fracos (fortes ventos misturariam o ar da cidade e das áreas rurais e diminuiriam o contraste de temperatura). Nessas condições, em algumas grandes áreas metropolitanas, o aquecimento relativo da cidade, comparado com seus arredores, pode provocar uma circulação convectiva do ar. Com isso, o ar relativamente quente sobe sobre o centro da cidade e é trocado por ares mais frios e mais densos, convergentes das zonas rurais. A coluna de ar ascendente acumula aerossóis sobre a cidade, formando uma nuvem de poluentes que podem se tornar muitas vezes mais concentrados sobre uma área urbana em comparação ao que ocorre nas áreas rurais.

Pereira & Xavier (2007) sugerem a relação entre ilha de calor e evolução na precipitação diária para a cidade de São Paulo. Segundo os autores, o aumento da temperatura mínima durante a noite reduz a possibilidade de saturação do vapor de água no ar. Em contrapartida, o aumento da poluição promove mais núcleos de condensação. O resultado é que o vapor que condensa se divide em um número maior de núcleos, com menor massa de água por núcleo, tendo uma probabilidade maior de ficar em suspensão e não precipitar. Por causa disso, a garoa típica de São Paulo, com lâminas inferiores a 2 mm, foi gradualmente desaparecendo. Com relação às chuvas fortes, pode haver uma sobreposição de efeitos locais e globais. Conforme trabalhos citados pelos autores para outras localidades, o efeito urbano pode tanto contribuir para um aumento da precipitação, pelo aumento das correntes convectivas sobre o centro urbano, como também servir de barreira, originando uma bifurcação do escoamento em volta da área urbana e causando um déficit de precipitação sobre a cidade. Algumas das características das ilhas de calor diferem entre dia e noite; por exemplo, a espessura da cobertura de poeira é muito maior durante o dia (quando os ventos estão fracos) do que à noite.



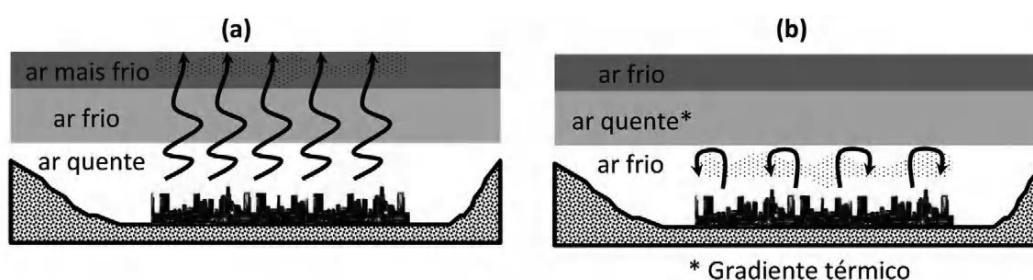
**Figura 15.6** Esquema ilustrativo da ilha de calor urbana. A diferença de temperatura entre periferia e centro faz com que o vento sopra para a região central, o que ocasiona acúmulo dos poluentes.

Fonte: *Living in the Environment*, Miller, 10<sup>th</sup> edition.

Outro fator que influencia a dispersão dos poluentes é a **inversão térmica**. Os processos atmosféricos e a circulação associada às altas pressões interferem no estado do tempo sobre os continentes e grandes oceanos do globo. Os anticiclones estão associados à estabilidade atmosférica com pouca mistura vertical e, portanto, fraca dispersão dos poluentes. Já os centros de baixa pressão (depressões) associam-se a condições de instabilidade e de grande turbulência, favorecendo a dispersão dos poluentes. Essas situações sinóticas, que influenciam as condições de turbulência e de estabilidade da atmosfera podem ter durações mais prolongadas, podendo, nas condições desfavoráveis à dispersão, levar a episódios de poluição aguda (*smog*, *smog* fotoquímico).



Nos primeiros 10 km da atmosfera, normalmente, o ar vai se resfriando com o aumento da altura. Assim, o ar mais próximo à superfície, que é mais quente (portanto, mais leve), pode ascender, favorecendo a dispersão dos poluentes emitidos pelas fontes (Figura 15.7a). A inversão térmica é uma condição meteorológica que ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que o ar abaixo dessa camada fica mais frio e, assim, mais denso (pesado). Dessa forma, os poluentes se mantêm próximos da superfície (Figura 15.7b). As inversões térmicas acontecem naturalmente durante o ano todo, porém no inverno esta camada de inversão é mais estreita e provoca transtornos quando ocorre em uma cidade poluída como São Paulo, pois os poluentes ficam aprisionados muito próximos da população e tornam o ar insalubre.



**Figura 15.7** Esquema ilustrativo do efeito de inversão térmica, a) situação normal de dispersão dos poluentes atmosféricos; b) situação de dispersão dos poluentes atmosféricos sob o efeito de inversão térmica.

Fonte: *Living in the Environment*, Miller, 10<sup>th</sup> edition.

Além de atingir diretamente a saúde humana, a poluição também interfere no microclima da cidade, alterando o aspecto físico da atmosfera por meio da quantidade de aerossóis injetados no ar. Dessa forma, ocorrem modificações na quantidade de nuvens e alterações no balanço de temperatura e de radiação na atmosfera. Com isso, são gerados desequilíbrios no regime de precipitação e mudanças na temperatura e em outros fenômenos meteorológicos, ocasionando, por exemplo, o já mencionado desaparecimento da garoa na “terra da garoa” (Pereira & Xavier, 2007).

Nos grandes centros urbanos e poluídos como São Paulo, a influência meteorológica somada à poluição do ar é ainda mais marcante, pois as condições atmosféricas interferem na dispersão dos poluentes. Muitas vezes, na presença de massas de ar frio, ocorre o aprisionamento dos poluentes nas camadas mais baixas da atmosfera, fenômeno conhecido como inversão térmica, como visto anteriormente. Como exemplo deste fenômeno, pode ser citado o *smog* fotoquímico (ocorrido em Londres no ano de 1952), que provocou a morte de 4 mil pessoas. Diante disso, quando se estuda a cidade de São Paulo, estes fatores precisam ser analisados em conjunto, levando em consideração a sinergia entre eles (Coelho-Zanotti, 2010).

## 15.5 MÉTODOS CIENTÍFICOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE POLUIÇÃO, CLIMA E SAÚDE HUMANA

Para situar os leitores sobre estes estudos, faremos uma breve descrição dos tipos de metodologias (desenhos de pesquisa) utilizados nos estudos em saúde humana, sejam estudos de caráter individual ou de populações (agregados). Observe que, a partir deste ponto, algumas palavras não familiares aos engenheiros farão parte deste texto.

Dentro desse contexto, algumas definições e explicações sobre Epidemiologia devem ser consideradas, pois é a ciência que estuda o processo saúde-doença em coletividades humanas. De maneira simplificada,

pode-se conceituar a Epidemiologia como: “*Ciência que estuda o processo saúde-doença em coletividades humanas, analisando a distribuição e os fatores determinantes das enfermidades, danos à saúde e eventos associados a saúde coletiva, propondo medidas específicas de prevenção, controle, ou erradicação de doenças, e fornecendo indicadores que sirvam de suporte ao planejamento, administração e avaliação das ações de saúde*”. Enquanto campo disciplinar específico, a Epidemiologia surge a partir da consolidação de uma trilogia de elementos conceituais, metodológicos e ideológicos: respectivamente a clínica médica, a estatística e a medicina social (Rouquayrol, 1994).

De forma didática, os estudos epidemiológicos podem ser classificados de acordo com dois alicerces principais: 1) **posicionamento do investigador**, 2) **dimensão temporal do estudo**.

- 1) O papel do investigador em sua relação com o objeto de estudo cobre dois tipos de posicionamento:
  - **Ativo.** Significa que o investigador interfere no processo em estudo, resultando no que conhecemos com “experimentação”.
  - **Passivo.** O investigador apenas observa o processo de produção de doenças na população.
- 2) A dimensão temporal do estudo, por sua vez, pode ser dividida em:
  - **Instantânea.** Ocorre quando a produção do dado é realizada em um momento singular do tempo, como um corte transversal no momento da observação.
  - **Serial.** Qualquer tipo de seguimento, em uma escala temporal, define o caráter serial de um dado estudo.

Os estudos epidemiológicos dividem-se em duas partes: os **descritivos** e os **analíticos**. Os descritivos são estudos nos quais não se investigam uma relação de causa e efeito, ou seja, o investigador não está interessado em investigar o que causa algum efeito ou o que influencia alguma coisa. Ele quer apenas “fotografar” uma situação. Para isso, usa a estatística mais simples para obter informações sobre médias, porcentuais, proporções e indicadores (como prevalência, incidência, taxas, entre outros). Neste estudo, não há necessidade de testar hipóteses. Em contrapartida, nos estudos analíticos, hipóteses deverão ser testadas e tenta-se investigar uma relação de causa e efeito. Neste caso, a estatística é mais elaborada e modelos estatísticos/estocásticos são testados com objetivo de investigar fatores de risco à saúde. Na Tabela 15.2, pode-se observar o resumo destes estudos epidemiológicos.

**Tabela 15.2** Tipologia dos desenhos de investigação epidemiológica

TIPO OPERATIVO	POSIÇÃO DO INVESTIGADOR	REFERÊNCIA TEMPORAL	DENOMINAÇÕES
Agregado (populacional)	Observacional	Transversal	Estudos ecológicos
		Longitudinal	Estudos de tendências ou séries temporais
	Intervenção	Longitudinal	Ensaio comunitários
“Individuado”	Observacional	Transversal	Inquéritos
		Longitudinal	Estudos prospectivos (cortes)
			Estudos retrospectivos (caso-controle)
	Intervenção	Longitudinal	Ensaio clínicos

Fonte: Rouquayrol (1994)

Ao estudar a saúde humana, muitos fatores estão associados, entre eles o meio ambiente. No entanto, quando estudamos os efeitos dos poluentes e do clima sobre a saúde humana, estamos restringindo nossa análise aos **estudos ecológicos de séries temporais** (veja Tabela 15.2), e essa limitação deve ser levada em consideração nos resultados obtidos, pois estamos ignorando informações individuais (nutrição, doenças pré-existentes, entre outras) das pessoas afetadas. Para mais informações sobre vantagens e desvantagens dos desenhos metodológicos, sugerimos a leitura da bibliografia Rouquayrol (1994), indicada no final do capítulo.

### 15.5.1 Estatística Utilizada nos Estudos de Poluição Atmosférica

Desde os três episódios dramáticos de poluição ocorridos no mundo (relatados no item 15.4.1), multiplicaram-se os estudos sobre os efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana e, a cada estudo, os métodos estatísticos empregados foram sendo aprimorados com o intuito de facilitar a compreensão desses efeitos. A seguir, é feita uma rápida descrição de como os modelos estatísticos/estocásticos foram aprimorados desde a década de 1960 até os dias de hoje.

#### *Década de 1960*

No início dos anos 1960, os pesquisadores Martin & Bradley (1960) publicaram um estudo relativo ao incidente de nevoeiro no inverno londrino de 1958-1959, avaliando o efeito da poluição sobre a saúde da população. Utilizaram **análises de correlação e regressão linear simples** entre as mortes diárias e as concentrações de poluentes. Neste estudo, os fatores meteorológicos foram discutidos, mas não foram considerados na análise. Na mesma década, Sterling (1966) investigou os possíveis efeitos da poluição atmosférica sobre a taxa de admissões hospitalares ocorridas em Los Angeles (Estados Unidos) para diferentes doenças. Este pesquisador descobriu a influência dos dias da semana no aumento do número de admissões hospitalares, demonstrando o **efeito calendário** e os **efeitos sazonais** devido às **condições meteorológicas** no fenômeno em estudo. Esses dois efeitos foram apontados como potenciais fatores de confusão na associação de interesse.

No mesmo ano, Greenburg et al. (1967) examinaram o padrão de mortalidade por todas as doenças durante um episódio de poluição elevada ocorrida em Nova York entre 29 de janeiro e 12 de fevereiro de 1963. Neste período, houve a suposição de que os óbitos seguiam uma **distribuição de Poisson** e a comparação entre o total do número de mortes por todas as doenças de 29 de janeiro a 12 de fevereiro de cada ano (1961-1965) foi realizada com um teste qui-quadrado de tendência.

#### *Década de 1970*

Na década de 1970, poucos estudos foram realizados devido a resultados de políticas públicas ambientais em países desenvolvidos. No entanto, muitas pesquisas continuaram sendo realizadas a partir das bases de dados disponíveis. Com isso, novas técnicas estatísticas foram utilizadas, favorecidas por melhorias computacionais. O resultado das inovações foi a utilização de **modelos múltiplos de regressão, análise com controle de fatores meteorológicos e flutuação de longo prazo** (tendência e sazonalidade). Esta década também foi marcada por constantes discussões metodológicas e diversos estudos que avaliaram a ausência e o tratamento inadequado das variáveis meteorológicas, a multicolinearidade entre as variáveis preditivas e os padrões espaço-temporais como alternativas para análise de regressão.

#### *Década de 1980*

Na década de 1980, os estudos prosseguiram na direção da **regressão múltipla**, incluindo o controle por potenciais fatores de confusão e a busca por modelos alternativos de **regressão não linear** para ajustar

variáveis não lineares. Nesta década, as publicações ficaram mais claras na representação dos modelos utilizados, dos ajustes e do controle dos fatores de confusão. Na Califórnia, Shumway et al. (1988) procuraram ajustar **modelos lineares e não lineares** para explicar as possíveis associações entre mortalidade, poluição e variáveis climáticas em Los Angeles, no período compreendido entre 1970 e 1979. Utilizaram técnicas de análise de séries temporais para 11 séries de dados diários: três séries de mortalidade (total, por doenças respiratórias e cardiovasculares), duas de clima (temperatura e umidade relativa), além de seis tipos de poluentes. Após suavizar os dados originais, transformando-os em médias semanais, os autores chegaram a um modelo em que  $Mt$  é a mortalidade suavizada para a semana  $t$ , expressa em mortes por dia. As variáveis independentes são a temperatura  $Tt$  e a poluição  $Pt$ . Os erros  $Xt$ , aditivos e correlacionados, satisfazem, supostamente, um **modelo autorregressivo** de ordem não especificada. O modelo de regressão múltipla ajustado permitiu concluir que havia uma associação positiva e significativa entre o  $SO_2$  e as mortalidades diárias, independentemente dos efeitos de temperatura, umidade, variações seculares, sazonalidade, variações mensais e anuais, além de possíveis interações entre os fatores meteorológicos e as estações do ano.

### *Década de 1990-2012*

Na segunda metade dos anos 1990 (1995-1999), destacou-se o modelo de regressão para séries temporais de contagem, proposto por Zeger (1988), que permitia ajustar adequadamente os dados quando estes apresentassem sobredispersão e/ou autocorrelação. Este modelo ficou conhecido como o Modelo de Poisson autorregressivo (modelo log-linear com erros de Poisson autorregressivos ou **modelo de regressão de séries temporais de Poisson**). As séries analisadas (desfecho) eram contagens diárias de mortalidade ou admissões hospitalares por causa específica, principalmente em cidades da Europa associadas ao projeto APHEA (*Air Pollution and Health: an European Approach*). Diversos estudos sobre o efeito da poluição atmosférica empregam este modelo nas análises (Saldiva et al., 1994; Ponce de Leon, 1996; Braga, 1998). Resalta-se ainda que, na segunda metade da década de 1990, os modelos aditivos generalizados (MAG) de Poisson, como os descritos por Hastie & Tibshirani (1990), foram adotados em alguns estudos, permitindo ajustar de forma não paramétrica tanto os fatores meteorológicos como a tendência e a sazonalidade. Este modelo forneceu maior flexibilidade na descrição da relação entre o desfecho e as covariáveis que não sejam lineares (Schwartz & Morris, 1995; Braga, 1998).

Ao longo dos anos 2000-2002, o MLG (modelo linear generalizado) e o MAG, aplicados à regressão de Poisson, foram bastante utilizados para estes tipos de estudos ecológicos. Em especial o MAG fornece maior flexibilidade na descrição de padrões complexos da associação a partir de funções suavizadas, como a média móvel ponderada, *locally-weighted scatterplot smoother (loess)* ou *cubic smoothing splines (splines)*, para controle dos fatores meteorológicos e da tendência e sazonalidade da série de desfecho. Contudo, os dois modelos mostraram associações entre a poluição e as internações (Simas, 2003).

A evolução das técnicas estatísticas de análise de séries temporais tem permitido captar os efeitos da poluição atmosférica na saúde, mesmo quando os níveis de poluição não estão tão acentuados, se comparados aos estudos pioneiros da década de 1950 nos Estados Unidos e na Inglaterra. Todos esses estudos feitos em vários países serviram de incentivo para que estudos no Brasil com este enfoque fossem iniciados, principalmente em São Paulo, onde o nível de poluição coloca a cidade no grupo das mais poluídas do mundo.

A Tabela 15.3 mostra um resumo dos métodos estatísticos utilizados nos estudos de poluição atmosférica. Apresentamos uma rápida descrição destes modelos. Para mais informações, o leitor deve consultar a bibliografia especializada (algumas relacionadas no final do capítulo).

**Tabela 15.3** Resumo das principais abordagens utilizadas nos estudos de poluição atmosférica

DADOS AGREGADOS		DADOS INDIVIDUAIS
Modelos de Regressão	Linear (simples e múltipla)	Case-crossover
	Poisson	Estudo de Painel
	Binomial	
	Aditivo Generalizado	
	Polinomial	
	Logístico (simples e múltiplo)	

### **Dados Agregados: Modelos de Regressão**

Os modelos de regressão são amplamente utilizados em várias situações e nas mais diversas disciplinas do conhecimento, inclusive nos estudos de saúde. Na prática, há diversas situações em que a análise de regressão é apropriada, por exemplo, quando queremos caracterizar a relação entre uma variável dependente ( $Y$ ) e uma ou mais variáveis independentes ( $X_i$ ), isto é, avaliar a extensão, a direção e a força da relação (associação). No nosso caso, a variável dependente é qualquer desfecho de saúde (por exemplo, mortes, internações) e as variáveis independentes são as atmosféricas (poluentes e variáveis meteorológicas) entre outras.

Quando usamos os modelos de regressão, queremos, na verdade, procurar uma função matemática ou equação para descrever a variável dependente ( $Y$ ) como função das variáveis independentes ( $X_i$ ), isto é, prever  $Y$  em função dos  $X_i$ , determinando o melhor modelo estatístico que descreva essa relação. Tal função depende do processo estudado, por exemplo, no caso dos estudos de poluição e saúde. Geralmente, a função de Poisson explica melhor o fenômeno.

Ao encontrar o modelo adequado, este deverá descrever quantitativa e/ou qualitativamente a relação entre os  $X_i$  e  $Y$ , controlando o efeito de outras variáveis ( $C_i$ ). Em alguns casos, pode-se também verificar o efeito interativo de duas ou mais variáveis independentes as quais se relacionam com a variável dependente.

### **Dados Individuais: Case-crossover e Estudos de Painel**

**Case-crossover:** O desenho de estudo *case-crossover* foi desenvolvido como uma variante do desenho caso-controle para estudar os efeitos de exposições curtas sobre eventos agudos. A diferença entre este estudo e o estudo de caso-controle é que no *case-crossover* são escolhidos apenas os casos e são comparados os níveis de poluição do dia do evento com períodos especificados antes e após o evento. A análise do estudo *case-crossover* é análoga a de um estudo caso-controle pareado, no qual regressões logísticas condicionais garantem que cada par caso-controle seja individualmente pareado por meio das variáveis especificadas para a análise. Desde que seja garantido um pareamento perfeito em todas as variáveis que não variam ao longo do tempo, não haverá confundimento induzido por estas características.

A escolha de dias de controle próximos aos dias do evento pode, ainda, controlar efeitos confundidores da exposição produzidos por padrões sazonais. Isto torna esta abordagem uma alternativa atraente para os modelos de regressão de Poisson. A escolha dos controles pode, também, ser estratificada por tempo, escolhendo os dias de controle do mesmo mês e do mesmo ano dos casos, evitando problemas de viés de seleção e resultando em uma adequada probabilidade logística condicional. Esta abordagem tem sido testada em estudos de simulação e produz estimativas não enviesadas, mesmo em situações em que a sazonalidade pode produzir um forte efeito confundidor.

Parear, simultaneamente, tanto pelo dia da semana como pela estação do ano pode controlar a possibilidade da variação do efeito do dia da semana de acordo com a estação do ano. As análises são realizadas,

separadamente, para cada desfecho, controlando para o dia da semana, no mesmo mês do caso, e para fatores meteorológicos. Os poluentes são modelados de forma linear. Como uma análise de sensibilidade, pode-se testar uma forma alternativa de seleção dos controles, pareando pela temperatura aparente e utilizando indicadores para dia da semana.

Análises do tipo *case-crossover* se prestam a análises de modificação de efeito. Fatores como gênero são controlados por pareamento no desenho do estudo, mas ainda é possível testar modificação de efeito com termos de interação ou com análises estratificadas. As análises deste estudo podem também ser estratificadas por faixas etárias.

### **Estudos de Painel**

Diferentemente dos estudos de base populacional, os estudos de painel visam a avaliar grupos de risco, tais como pacientes idosos ou crianças, e determinar se variações de poluição atmosférica estão relacionadas a alterações funcionais adversas. Os estudos de painel possuem, em geral, maior poder de detectar efeitos adversos dos poluentes atmosféricos e podem complementar os dados dos estudos epidemiológicos de base populacional. De forma resumida, o conceito básico dos estudos de painel é baseado na realização de medidas repetidas de alguns parâmetros de interesse, espaçadas por semanas ou meses. Em uma situação como esta, é provável que os níveis de poluição variem em diferentes dias de análise, permitindo que, para cada indivíduo, seja possível verificar a possível associação entre variações de poluição do ar e alterações funcionais.

Como o leitor pode perceber, existe uma infinidade de metodologias para se estudar os impactos dos poluentes na saúde humana. Contudo, estes estudos são dinâmicos e espera-se que muitas metodologias sejam utilizadas em conjunto.

## **REVISÃO DOS CONCEITOS APRESENTADOS**

Como explanado no texto, pode-se dizer que a poluição do ar não é assunto recente. Hipócrates em 400 a.C. e Sêneca em 61 a.C. já haviam se referido à influência do ambiente na saúde da população. Em 1558, a Rainha Isabel I de Inglaterra e Escócia proibiu a queima de carvão durante as Sessões do Parlamento por ser alérgica aos fumos liberados. No século seguinte, em 1661, John Evelyn escreve "*Fumifugium, or the Inconveniencie of the Aer and the Smoake of London Dissipated*", em que retrata o nível de poluição que afetava a capital inglesa e propõe medidas mitigadoras, como limitar o uso de carvão, relocalizar as indústrias, desenvolver novos combustíveis ou mesmo plantar corredores verdes ao longo da cidade. Contudo, após a Revolução Industrial, ficou mais perceptível a interação desastrosa do homem com a natureza, pois esta interação se fez sem planejamento e de forma predatória, gerando poluição e possivelmente alterando o clima planetário.

Dentre todos os tipos de poluição causada por nós, a poluição do ar tem sido a mais sentida pela população, uma vez que precisamos respirar para viver. A atmosfera terrestre tem sido constantemente contaminada por substâncias tóxicas emitidas por indústrias, automóveis, termoelétricas e outras fontes. Esta agressão é mais evidente nos grandes centros urbanos, por exemplo, a cidade de São Paulo, que é considerada uma das mais poluídas do mundo. Nesta metrópole, é consenso entre os pesquisadores que a poluição é um problema de saúde pública (Böhm et al., 1989; Saldiva et al., 1992). O ar poluído nesta cidade responde por um número significativo de internações, sendo responsável pelo agravamento de doenças pulmonares e do quadro clínico dos portadores de moléstias cardíacas, óbitos neonatais, problemas hematológicos, oftalmológicos, neurológicos, dermatológicos e cânceres.

O Brasil, tanto por suas dimensões continentais, como pelas suas características de desenvolvimento industrial e agrícola, apresenta situações em que o risco à saúde humana diante da contaminação ambiental deve ser avaliado. A poluição do ar, a contaminação dos recursos hídricos e a presença de resíduos tóxicos no solo podem, em alguns cenários, representar um risco significativo de agravo à saúde, o que demanda a avaliação responsável e a proposição de medidas corretivas e preventivas.

Mantido o atual padrão de consumo energético excessivo e insustentável, ocorrerão riscos importantes para a saúde humana. O acúmulo de poluentes primários emitidos a partir de termoeletricas e escapamentos de veículos aumentará a taxa de mortalidade por câncer e doenças dos sistemas cardiovascular e respiratório. O aumento do ozônio troposférico<sup>2</sup> causará danos aos pulmões. Maior dose de radiação ultravioleta, como resultado do buraco na camada de ozônio (estratosférico), elevará o risco para tumores de pele. A escassez de recursos hídricos e a desertificação de algumas áreas do planeta poderão levar à fome e a migrações de grande vulto. O consumo de água de pior qualidade levará a uma maior taxa de doenças de veiculação hídrica, como a diarreia ou a intoxicação por metais pesados. Os mosquitos transmissores de doenças infecciosas, como a malária e a dengue, proliferarão mais rapidamente e invadirão áreas hoje de clima temperado, aumentando o número de vítimas. Desastres naturais causados por eventos climáticos extremos, como inundações e furacões, cobrarão um pedágio doloroso. Evitar este conjunto de situações é um dever, e o momento de fazê-lo é agora, enquanto estamos vivenciando estes impactos, temos consciência de suas causas e nos resta tempo.

## SUGESTÕES DE LEITURA COMPLEMENTAR

- ▷ ANDRADE, M. F. *Identificação de fontes da matéria particulada do aerossol atmosférico de São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Física, Universidade de São Paulo (IF-USP), 1993.
- ▷ CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. São Paulo: Cetesb, 2003. Série Relatórios ISSN-0103-4103.
- ▷ CLIMANÁLISE ESPECIAL 10 ANOS. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/index1.html>>. Acesso: março de 2012.
- ▷ COELHO-ZANOTTI, M. S. S. *Uma análise estatística com vistas a previsibilidade de internação por doenças respiratórias em função das condições meteorológicas na cidade de São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (IAG-USP), 2007. 195 p.
- ▷ KLEINBAUM, D. G.; KUPPER, L. L.; MULLER, K. E.; NIZAM, A. *Applied regression analysis and other multivariable methods*. Boston: Brooks/Cole Pub Co., 1997. 816 p.
- ▷ MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. *Noções de Probabilidade e Estatística*. São Paulo: EDUSP, 2002. 432 p.
- ▷ MASSAD, E; MENEZES, R. X.; SILVEIRA, P. S. P.; ORTEGA, N. R. S. *Métodos Quantitativos em Medicina*. São Paulo: Manole, 2004. 570 p.
- ▷ MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Previsão de Séries Temporais*. São Paulo: Atual, 1987.

<sup>2</sup> Ozônio troposférico é o poluente formado próximo da superfície por reações fotoquímicas e que pode ser inalado pelas pessoas, prejudicando os pulmões. Já o ozônio estratosférico fica em torno de 30 km de altura e é benéfico, pois evita que a radiação nociva proveniente do sol prejudique a nossa pele.

- ▷ PEREIRA, A. J. F.; XAVIER, T. M. B. S. *Evolução do tempo e do clima na Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo: Linear B, IAG/USP, 2007. 282 p.
- ▷ ROUQUAYROL, M.Z. *Epidemiologia e saúde*. Rio de Janeiro: MEDSI, 1994. 540 p.
- ▷ SALDIVA, P. H.N.; KING, M.; DELMONTE, V. L.; MACCHIONE, M.; PARADA, M. A. ; DALIBERTO, M. L.; SAKAE, R. S.; CRIADO, P. M.; ZIN, W. A. ; BÖHM, G. M. Respiratory alterations due to urban air pollution: an experimental study in rats. *Environmental Research*, v. 57, n. 1, p. 19-33, 1992.
- ▷ SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change*. Nova York: Wiley, 1998. 1.326 p.

## REFERÊNCIAS

- American Thoracic Society. *What Constitutes an Adverse Health Effect of Air Pollution?* 2000. Disponível em: <<http://www.thoracic.org/statements/resources/eoh/airpollution1-9.pdf>>. Acesso: abril 2012.
- BÖHM, G. M.; SALDIVA, P. H. N.; PASQUALUCCI, C. A. ; MASSAD, E.; MARTINS, M. A. ; ZIN, W. A. ; CARDOSO, W. V.; CRIADO, P. M. P. KOMATSUZAKI, M.; SAKAE, R. S.; NEGRI, E. M.; LEMOS, M.; CAPELOZZI, V. M.; CRESTANA, C.; SILVA, R. Biological effects of air pollution in São Paulo and Cubatão. *Environmental Research*, v. 49, n. 2, p. 208-216, 1989.
- BRAGA, A. L.F. *Quantificação dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde da população pediátrica da cidade de S. Paulo e proposta de monitorização*. Tese de Doutorado. Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, FM-USP, 1998.
- COELHO-ZANOTTI, M. S. S.; GONÇALVES, F. L. T.; LATORRE M. R. Statistical analysis aiming at predicting respiratory tract disease hospital admissions from environmental variables in the city of São Paulo. *Journal of Environmental and Public Health*, v. 2010. 11 p, 2010.
- GINA – *Global Strategy for Asthma Management and Prevention – Asthma Management and prevention*. 2006. Disponível em: <<http://www.ginasthma.org>>. Acesso: abril 2012.
- GREENBURG, L.; JACOBS, M. B.; DROLETTI, B. N. Report of an air pollution incident in Nova York City, november 1953. *Public Health Reports*, v. 77, p. 7-16, 1962.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. *Generalized Additive Models*. Londres: Chapman & Hall, 1990. 335 p.
- MARTIN, A. E.; BRADLEY, W. H. Mortality, fog and atmospheric pollution: an investigation during the winter of 1958-1959. *Monthly Bulletin of the Ministry Health – Public Health Laboratory Services*, v. 19, p. 56-72, 1960.
- MARTINS, L. C.; LATORRE, M. R.; SALDIVA, P. H.; BRAGA, A. L. Air pollution and emergency room visits due to chronic lower respiratory diseases in the elderly: an ecological time-series study in São Paulo. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, v. 44, n. 7, p. 622-627, 2002.
- OLIVEIRA, A. P.; SILVA DIAS, P. L. *Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo*. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2, Pelotas, p. 129-145, 1982.
- PONCE DE LEON, A. Searching for Associations Between Counts of Health Events and Air Pollution. *Osterr. Zeitschrift Fur Statistik*, v. 25, p. 25-34, 1996.
- POPE, C. A. ; BURNETT, R. C.; THUN, M. J.; CALLE, E.E.; KREWSKI, D.; ITO, K.; THURSTON, G.D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, v. 287, n. 9, p. 1132-1141, 2002.
- SALDIVA, P. H.; LICHTENFELS, A. J.; PAIVA, P. S.; BARONE, I. A. ; MARTINS, M. A. ; MASSAD, E.; PEREIRA, J. C.; XAVIER, V. P.; SINGER, J. M.; BÖHM, G. M. Association between air pollution and