

# CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Henrique de Melo Lisboa

## CAPÍTULO III

### EFEITOS CAUSADOS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA



#### SUMÁRIO:

3.1	INTRODUÇÃO .....	2
3.2	HISTÓRICO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	4
3.3	EFEITOS SOBRE A SAÚDE.....	6
3.4	EFEITOS SOBRE OS MATERIAIS .....	10
3.5	EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES DA ATMOSFERA .....	11
3.6	EFEITOS SOBRE A VEGETAÇÃO.....	31
3.7	REPERCUSSÕES ECONÔMICAS DA POLUIÇÃO DO AR.....	31
3.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

Montreal

Primeira versão - Agosto 2007

Florianópolis

Revisão do texto – Março 2014

### 3.1 INTRODUÇÃO

Para viver sã e confortavelmente é indispensável dispor de uma quantidade ilimitada de ar relativamente puro. O homem consome cerca de 15,0 Kg de ar por dia, em contraste com 2,0 Kg de água e 1,50 Kg de alimentos. Ele pode recusar água ou alimento suspeito, porém não consegue fazer o mesmo em relação ao ar poluído. Ele pode viver 5 ou mais semanas sem alimento, 5 dias sem água, não sobrevive a mais de 5 minutos sem ar.

#### **Efeitos da poluição do ar:**

- A - Efeitos tóxicos sobre o ser vivo e os animais;
- B - Efeitos desagradáveis dos maus odores;
- C - Efeitos sobre os materiais;
- D - Efeitos sobre as propriedades da ATM;
- E - Efeitos sobre a vegetação;
- F - Efeitos econômicos.

#### **O EFEITO CAUSADO PELO POLUENTE DEPENDE:**

- **Da concentração presente na ATM;**
- **Do tempo de exposição do indivíduo;**
- **Da sensibilidade de cada pessoa.**

O monóxido de carbono (CO) é o contaminante do ar mais abundante da camada inferior da atmosfera. Outros poluentes são óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, dióxidos de enxofre, hidrocarbonetos (especialmente em áreas urbanas), o ozônio (o mesmo que exerce um efeito benéfico na alta atmosfera, protegendo-nos dos raios ultravioleta), chumbo, aldeídos e material particulado. Estas substâncias atingem seres humanos, manifestando-se através de sintomas distintos: dores de cabeça; desconforto; cansaço; palpitações no coração; vertigens; diminuição dos reflexos (especialmente pela ação do monóxido de carbono, que em concentrações elevadas, pode conduzir à morte); irritação dos olhos, nariz, garganta e pulmões (óxidos de nitrogênio); infiltração de partículas nos pulmões, inclusive podendo formar ácido sulfúrico (óxido de enxofre); asma aguda e crônica; bronquite e enfisema (dióxido de enxofre); câncer (hidrocarbonetos); destruição de enzimas e proteínas (ozônio); degeneração do sistema nervoso central e doenças nos ossos, principalmente em crianças (chumbo); entre outros ...

O material particulado causa irritação e entupimento dos alvéolos pulmonares. O Brasil é um dos países com maior quantidade de aldeídos na atmosfera, originados pelos carros à álcool. Acredita-se que o aldeído fórmico provoque tumores em cobaias, mas sobre os efeitos no homem ainda não há informações. **A poluição do ar mata. Em geral mata lenta e discretamente e as mortes resultantes não chamam dramaticamente a atenção do público.**

O Quadro 3. 1 apresenta os efeitos causados pelos principais poluentes encontrados na atmosfera.

**Quadro 3. 1** - Efeitos causados pelos poluentes atmosféricos.

POLUENTES	EFEITOS
<p>ÓXIDOS DE ENXOFRE SO<sub>x</sub> (* )</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- irritações do aparelho respiratório e conjuntivas oculares(olhos;nariz e garganta)</li> <li>- estudos epidemiológicos usualmente relacionam o aumento da mortalidade e morbidade, quando a concentração de SO<sub>2</sub> e MP atinge valores determinados (morte de doentes sensíveis)</li> <li>- broncoconstrição ou aumento da resietência pulmonar à passagem do ar</li> <li>- tosse; rinite; queimadura dos olhos e pele</li> <li>- danos sobre a vegetação:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• redução da resistência às pragas</li> <li>• ressecamento dos tecidos das folhas e descoloramento destas</li> <li>• alteração do processo fotossintético</li> </ul> </li> <li>- danos sobre os materias:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• corrosão em metais</li> <li>• descoloração de pinturas</li> <li>• enfraquecimento e desintegração da superfície dos couros</li> <li>• torna o papel quebradiço</li> <li>• redução da resistência à tensão e formação de manchas em tecidos</li> <li>• desbotamento em corantes</li> </ul> </li> </ul>
<p>MATERIAL PARTICULADO - MP -</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- incômodo à população</li> <li>- diminuição da visibilidade</li> <li>- doenças pulmonares (asma; bronquites; morte de doentes sensíveis)</li> <li>- presença de alfa-benzopireno, carcinogênica potencial</li> <li>- corrosivo</li> <li>- interfere na fotossíntese das plantas</li> </ul>
<p>MONÓXIDO DE CARBONO - CO -</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento do nível de carboxiemoglobina no sangue levando a stress; deficiência na capacidade psicomotora; dor de cabeça; tontura; alucinação; depressão; angina; síncope; asfixia e morte</li> </ul>
<p>DIÓXIDO DE CARBONO -CO<sub>2</sub></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- influência a longo prazo no aumento da temperatura da terra e fenômenos relacionados</li> <li>- asfixia: morte</li> </ul>
<p>DIÓXIDO DE NITROGÊNIO -NO<sub>2</sub> -(gás marron)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tosse e catarro; dispnéia; dor no peito; edema pulmonar; irritação nos olhos; taquicardia</li> </ul>
<p>AMÔNIA - NH<sub>3</sub>. (gás incolor que em grande quantidade assemelha-se a fumaça branca)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- irritação nos olhos, nariz e garganta; dispnéia espasmos bronquios; dor no peito; edema pulmonar; queimadura na pele</li> </ul>
<p>GÁS SULFÍDRICO (cheiro de ovo)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- irritação do sistema respiratório; tontura; irritação da vista; convulsões; coma e morte</li> </ul>
<p>OZÔNIO</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- irritação dos olhos e mucosas; edema pulmonar; doença respiratória crônica</li> </ul>

## 3.2 HISTÓRICO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição do ar não é problema novo, existindo muitas provas de que já na pré-história era provocada por erupções vulcânicas, tempestades de poeira e incêndios nas florestas. Duas erupções vulcânicas, a do Monte Krakatoa, em 1883, e a do Monte Katmai, em 1902, produziram fumaça e poeira que obstruíram a luz solar durante vários anos - ver caso ainda mais recente do vulcão “El Chichon”(a inchação) ocorrido em 28/03/82 no México, que provocou uma nuvem de gás e pó na estratosfera, a qual cobria, por volta de agosto, um terço do globo, numa faixa que circundava o mundo a partir do equador até a latitude da Georgia<sup>1</sup>.

O problema da poluição do ar ficou registrado na história do séc. XIII, na Inglaterra. A fumaça resultante do emprego em larga escala de carvão betuminoso, tornou-se rapidamente incomoda, particularmente em Londres. Mais tarde, em 1303, promulgou-se um decreto, proibindo-lhe o uso. Apesar desta e de outras medidas restritivas, difundiu-se o uso de combustíveis fósseis, e a contaminação do ar tornou-se problema de crescente importância.

No fim do século XIX, foram feitos estudos sobre as causas da poluição por fumaça e sobre sua prevenção e controle, sob a responsabilidade de uma comissão inglesa, em 1881, e de comissões alemãs e francesas, em 1894.

Em 1890, foi fundada em Leeds a “Smoke Abatement Society”, com a finalidade de analisar a poluição causada pela fumaça de carvão, estudar o consumo deste combustível em caldeiras, fornalhas e lareiras e examinar os sistemas de controle empregados.

### PRINCIPAIS EPISÓDIOS<sup>2</sup>

#### a) Vale do Meuse, 1930 (Bélgica)

- Duração: 5 dias
- Grande número de pessoas adoeceu, com a seguinte sintomatologia: dores no peito, tosse, dificuldade de respiração, irritação nasal e dos olhos. A partir do 3º dia o problema acentuou-se.
- Ao final de 1 semana 60 pessoas morreram, principalmente pessoas idosas que já portadoras de doenças do coração e pulmões.
- Morte no gado.
- Presumiu-se que uma combinação de diversos poluentes esteve associada com o episódio; é destacada a presença de gotículas de ácido sulfúrico resultante de altas concentrações de dióxido de enxofre com presença de gotículas d’água.
- Acentuada inversão de temperatura.

#### b) Donora, 1948 (Pensilvania, E.U.A.) - outubro 1948

- Duração: 5 dias
- 43% da população (14.000 habitantes) adoeceu, cuja sintomatologia era de irritação do trato respiratório e dos olhos.
- 20 pessoas morreram, principalmente em pessoas que já eram portadoras de doenças cardíaca e do sistema respiratório.
- Presumiu-se que a presença de dióxido de enxofre e material particulado em suspensão no ar esteve associada com o episódio.

<sup>1</sup> “El chichon”- Revista Ciência Ilustrada, ano II, nº 14, pág. 42-50.

<sup>2</sup> NEFUSSI N. e GUIMARÃES, F.A. (1976)

- Inversão de temperatura e anticiclone estacionário na região Nordeste dos EUA, associado a intensa neblina.

- Uma fundição de zinco, 1 fundição de aço e numerosas metalúrgicas foram as fontes causadoras.

**c) Poza Rica, 1955 (México)**

- Duração: 25 minutos
- 320 pessoas foram hospitalizadas, das quais 22 morreram.
- Presença de gás sulfídrico na atmosfera, lançado acidentalmente por uma indústria de recuperação de enxofre de gás natural, foi responsável pelo episódio.

**d) Londres, 1952 (Inglaterra)**

- Duração: 5 dias
- Grande número de pessoas adoeceu, sendo que aumentaram o número de admissões em hospitais de portadores de doenças respiratórias.
- Cerca de 3.500 a 4.000 pessoas morreram a mais do esperado para este período.
- A mortalidade foi maior para o grupo de pessoas idosas, e naqueles que já eram portadores de bronquite, bronco-pneumonia e doenças do coração.
- A presença de poeira em suspensão ( $4,46 \text{ mg.m}^{-3}$ ) e de dióxido de enxofre ( $3,75 \text{ mg.m}^{-3}$ ) atribuiu-se o episódio.

**e) Bauru, Agosto de 1952 (São Paulo, Brasil)**

- Duração: 1 semana
- Foram registrados 150 casos de doenças respiratórias aguda e 9 óbitos.
- Bronquite e manifestações alérgicas do trato respiratório superior foram os principais efeitos.
- Comprovou-se que o episódio foi provocado pela emissão na atmosfera de pó de mamona, por uma indústria de extração de óleos vegetais.
- Suspensas as atividades da fábrica, cessaram os casos de doença.

**f) Nova Iorque, 1953 (Nova Iorque, E.U.A.)**

- Duração: 5 dias
- Excesso de mortes do esperado em todos grupos etários.
- Presença de dióxido de enxofre ( $2 \text{ mg/m}^3$ ) associada com o episódio.

**g) Nova Orleans, 1955 (Louisiana, E.U.A.)**

- Aumentada frequência de asma.
- Presumiu-se que o poluente deste episódio foi poeira de uma indústria de farinha.

**h) Mineápolis, 1956 (Minnesota, E.U.A.)**

- Epidemia de asma em população vizinha à indústria de cereais.

**i) Episódio espalhado pelo mundo inteiro no período novembro - dezembro, 1962.**

- Leste dos E.U.A., 27 nov. - 5 dez.
- Londres, 5 a 7 dez. (100 mortes em excesso)
- Roterdam, 2 a 7 dez.
- Hamburg, 3 a 7 dez.
- Osaka, 7 - 10 dez. (excesso de 60 mortes).

### **j) Seveso (Itália, julho de 1976)**

Uma nuvem tóxica de dioxina, substância 10.000 vezes mais tóxica do que o cianureto, escapa da indústria química Icmesa, localizada na cidade vizinha de Meda, e, levada pelo vento, atinge Seveso. Cerca de 500 moradores da região, em sua maioria crianças, foram atacados pela cloracne, uma doença que causa erupções na pele, e 113 mulheres que estavam grávidas ou engravidaram durante o período foram autorizadas a abortar porque seus bebês poderiam nascer defeituosos. Os responsáveis pela empresa não informaram à população o que havia acontecido na esperança de que a nuvem tóxica se dissipasse.

Descobriu-se que foram lançados na atmosfera 2 quilos de dioxina – quantidade enorme, já que ela é capaz de alterar os cromossomos humanos, mesmo à infinitesimal dose de 0,2 ppb. As armas químicas e desfolhantes usados pelos americanos na Guerra do Vietnã, como o “agente laranja”, tinham como componente a dioxina.

Foram registrados pelo menos trinta casos de mortes causadas por câncer de fígado e um número não calculado de pessoas com graves distúrbios gastrintestinais que estavam na região, nestes últimos anos.

Hoje não há mais vestígios da contaminação em Seveso. A Icmesa foi demolida e condenada a pagar uma indenização de 154 milhões de dólares à região atingida pela nuvem tóxica.

### **k) Lago da Paz (República dos Camarões) - 21 de agosto de 1986.**

Uma gigantesca nuvem de gases tóxicos sai do fundo de um lago vulcânico e mata mais de 1700 pessoas. Os sintomas e indícios descritos atestam que a nuvem era composta, entre outras substâncias de :

- Dióxido de carbono, que matam ao interferir no processo respiratório: provoca morte por asfixia

## **3.3 EFEITOS SOBRE A SAÚDE**

As três possíveis vias de penetração dos agentes poluentes no organismo são:

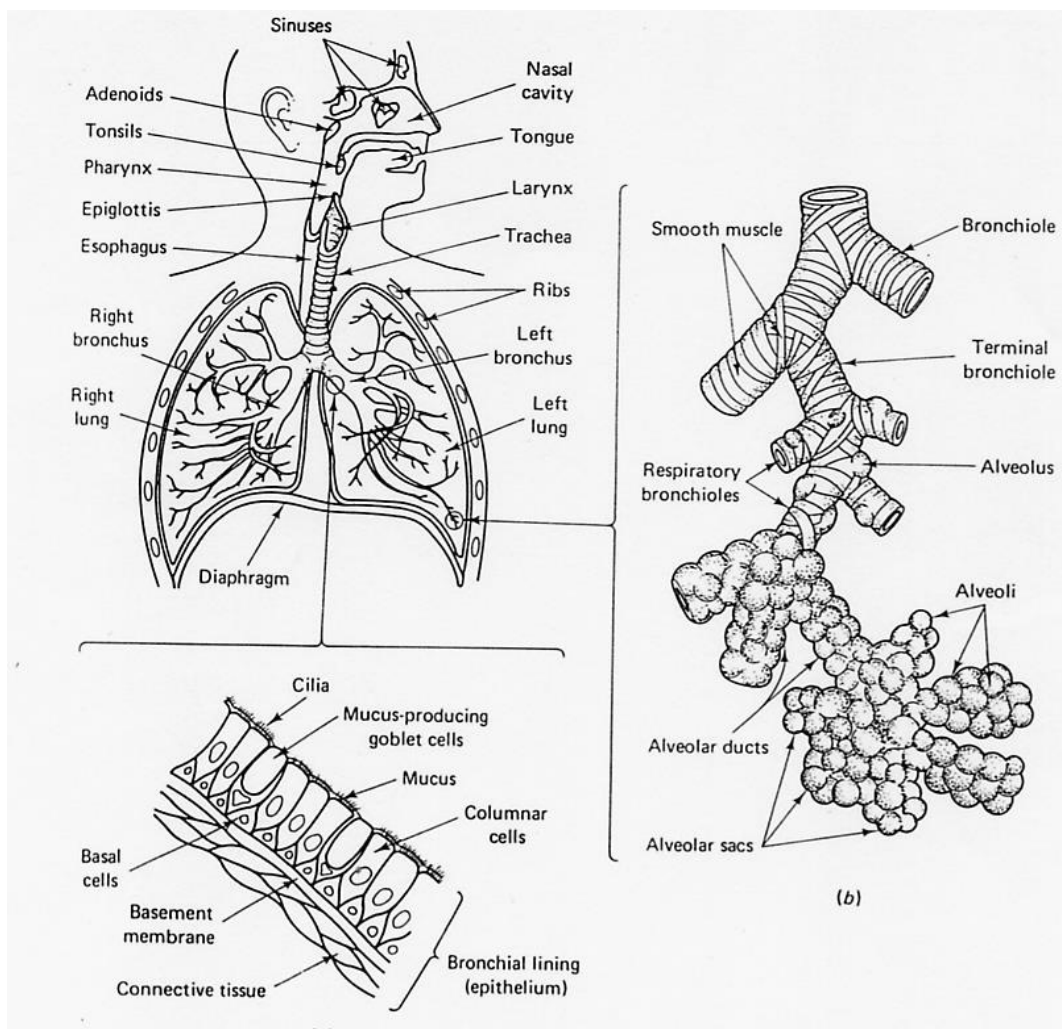
- via respiratória
- via cutânea
- via digestiva.

A maioria das vítimas da poluição do ar não morre durante um episódio crítico. Elas contraem uma doença respiratória ou outro sintoma associado com a poluição do ar. Elas enfraquecem gradativamente para depois morrer tipicamente de pneumonia, ataque do coração ou falha de algum órgão vital, ou ainda, desenvolvem doenças como o câncer e geram crianças com defeitos de nascença.

O trato respiratório (Figura 3.1) é afetado pela poluição do ar. A cília do nariz e das superfícies internas que levam até os pulmões pode coletar as partículas maiores dos poluentes. Entretanto, as partículas menores e os gases são capazes de entrar nos pulmões. Quando respiramos, os alvéolos transformam o oxigênio em dióxido de carbono. A poluição pode causar, em algum desses alvéolos, o aumento do seu volume, alterando sua resiliência de tal forma que a respiração fica mais difícil. Os poluentes do ar podem também diminuir ou até parar a ação das cílias, que

normalmente carregam muco e os poluentes coletados no trato respiratório. O muco pode engrossar ou aumentar, e as vias respiratórias podem ficar entupidas. Os problemas de respiração podem aparecer por causa de uma ou mais dessas reações.

**Figura 3.1** – O sistema respiratório humano: (a) o sistema como um todo e detalhe dos brônquios, com os cílios; (b) detalhes do sistema respiratório inferior, terminando nos alvéolos



Existe uma associação próxima entre o sistema respiratório e circulatório. Se o sistema respiratório é afetado por uma doença e não pode trocar gases no sangue completamente, o coração precisa trabalhar mais intensamente para bombear sangue suficiente para repor as perdas de oxigênio. Como resultado, o coração e os vasos sanguíneos estarão sob STRESS, e poderão surgir algumas mudanças, por exemplo, o aumento do tamanho do coração. Como o monóxido de carbono reduz o conteúdo de oxigênio no sangue, este poluente pode exigir uma carga de trabalho do coração maior para pessoas com anemia ou doenças cardio-respiratórias<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> **Cientistas identificam relação entre poluição e a incidência de infartos agudos**. O artigo *Ambient air pollution and acute myocardial infarction*, de J. Vermylen, A. Nemmar, B. Nemery e M. F. Hoylaerts, pode

Estimativas bem embasadas mostram que a poluição atmosférica mata 799 mil pessoas por ano no mundo. Os dados apresentados são de 2002, da Organização das Nações Unidas. As doenças cardiopulmonares são as principais causas dessas mortes. Do total, 712 mil são atribuídas aos problemas respiratórios ou de coração. A segunda causa, responsável por 62 mil óbitos, é o câncer de pulmão. O Sudeste Asiático, em primeiro lugar e a América Latina, em segundo, são os piores lugares para se viver, em termos de poluição urbana do ar<sup>4</sup>.

O fumo matou perto de 5 milhões de pessoas no mundo todo em 2000 - Figura 3.2, sendo que os homens têm uma probabilidade três vezes maior do que as mulheres de sofrerem morte prematura, de acordo com um estudo publicado na quarta-feira pelo jornal Tobacco Control (Controle do Tabaco). As principais causas de mortes relacionadas ao cigarro foram doenças cardiovasculares, que mataram mais de 1 milhão de pessoas no mundo industrializado e 670.000 nos países em desenvolvimento. Depois vieram o câncer do pulmão, em países industrializados e a obstrução crônica das vias respiratórias, que inclui doenças como bronquite, em países em desenvolvimento. Mais da metade das mortes foram registradas entre fumantes com idades entre 30 e 69 anos<sup>5</sup>.



**Figura 3.2** – Fumo e poluição do ar

#### **I - Classificação segundo a ação no organismo:**

→ **IRRITANTES** ⇒ produzem inflamação nos tecidos e irritam o sistema respiratório. Ex: amoníaco; poeira alcalina; cloro; ozona; iodo; escapamento de motores; ácido sulfídrico; alcoóis; éteres; etc.

→ **ASFIXIANTES** ⇒ asfixiam por reduzir a concentração de oxigênio no ar - nível mínimo 18% - (metano, nitrogênio, dióxido de carbono, hélio, etc), e asfixiam por interferirem no processo de absorção de oxigênio no sangue ou nos tecidos ( monóxido de carbono, gás sulfídrico, cianuretos, etc).

O metano (CH<sub>4</sub>) em concentrações maiores que 2% já é um asfixiante simples. Em concentrações variando de 6 a 14% torna-se um explosivo de potencial imediato. Por estas razões que no trabalho nas minas de carvão do sul de SC deve-se levá-lo em conta – é conhecido com grisú.

→ **NARCÓTICOS** ⇒ apresentam ação depressiva sobre sistema nervoso central - efeito anestésico ( éter etílico, acetona, éter isopropílico, Thinner, etc).

---

ser lido no site do *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, em [www.blackwellpublishing.com](http://www.blackwellpublishing.com). Fonte: Revista Eletrônica Ambiente Brasil - 16/10/2005.

<sup>4</sup> **Poluição atmosférica atinge mais regiões como a América Latina e a Ásia.** Agência FAPESP. 29/11/2005

<sup>5</sup> **Cinco milhões de fumantes morreram em 2000 no mundo, diz estudo.** Reuters - 24/11/2004.



→ **INTOXICANTES SISTÊMICOS** ⇒ causam intoxicação aguda ou crônica.

- causam lesões nos órgãos: hidrocarbonetos halogenados, clorofórmio, tetracloreto de carbono, cloreto de vinila, etc);
- causam lesões no sistema formador do sangue: benzeno, tolueno, xileno (podem produzir leucemia);
- afetam o sistema nervoso: alcóois metílico e etílico, dissulfeto de carbono, éteres de ácidos orgânicos;
- compostos tóxicos inorgânicos e metais tóxicos: sais de cianureto, fluoretos, arsênico, fósforo, enxofre, chumbo, mercúrio, cádmio, berilo, cromo, etc.
- **MATERIAL PARTICULADO** ⇒ poeiras, fumos, névoas, etc.

- poeiras produtoras de fibrose: causam endurecimento e perda de flexibilidade dos tecidos pulmonares. Ex: sílica, amianto, etc.

O pó inorgânico de maior importância do ponto de vista da Saúde Ocupacional é a sílica livre cristalizada, a qual acha-se em grandes quantidades na crosta terrestre (60% desta) formando parte de rochas, minérios, areias, tecidos vegetais, etc.

A forma cristalizada do quartzo é a de maior risco, causadora de uma pneumoconiose chamada silicose.

Entende-se por pneumoconiose a alteração produzida no tecido dos pulmões pela inalação de poeiras orgânicas e inorgânicas.

Esta alteração pode ser uma fibrose pulmonar ou um depósito de material inerte, que não altera a função pulmonar<sup>6</sup>. Entre estes dois estados, existe uma variedade de danos aos pulmões. Além da sílica, outros compostos de silício, alguns silicatos, podem atuar sobre os pulmões, produzindo uma pneumoconiose. Pode-se citar o asbesto, causador de uma fibrose pulmonar incapacitante e com evidências já bastante comprovadas de produção de câncer pulmonar.

---

**Jato de areia utilizado em retífica de motores está proibido no Brasil**<sup>7</sup>: Representantes do Ministério do Trabalho e Emprego assinaram, na manhã de 05 de novembro de 2004, portaria proibindo o jateamento de areia. O processo é utilizado para limpeza de peças metálicas, polimento de peças da indústria metalúrgica, fosqueamento de vidros e na construção e manutenção de embarcações. O ministério atendeu à proposta do **Programa Nacional de Eliminação da Silicose** e, de forma articulada com o Programa Global de Eliminação da Silicose, assinou a proibição.

Essa é a atividade que mais expõe os trabalhadores à sílica, uma poeira mineral, causadora da silicose, doença respiratória grave e progressiva. Essa portaria é o primeiro passo para eliminação da silicose até o ano de 2030. Os benefícios concedidos pela Previdência Social, no período de 1998 a 2003, aos portadores de silicose, teve um **custo médio de R\$ 293 mil por cada caso da doença**. Ações de políticas governamentais, divulgação de informação, pesquisa e treinamento profissionais na área de saúde vão ser os trabalhos realizados para remediar a doença.

---

- poeiras inertes: ficam retidas no pulmão mas não produzem alteração. Ex: carbonatos, complexos de alumínio, etc.

- **PARTÍCULAS ALERGIZANTES E IRRITANTES** ⇒ atuam sobre a pele e aparelho respiratório. Ex: poeiras das madeiras e óleos vegetais, partículas de ácidos, resinas, pólem, etc.

---

<sup>6</sup> ver TCD 98/02 sobre carvão

<sup>7</sup> 05.11.2004 - Bruno Spada | Agência Brasil Jato de areia utilizado em retífica de motores está sendo proibido

O nariz filtra tão bem o ar que dificilmente uma partícula de poeira maior que um glóbulo vermelho do sangue (apenas 8 microns de espessura) consegue atravessá-lo.

### 3.4 EFEITOS SOBRE OS MATERIAIS

Seguem os principais efeitos da poluição atmosférica sobre os materiais:

- abrasão: causada por partículas sólidas de tamanho suficiente e transportadas em alta velocidade;
- deposição e remoção: causada por partículas sólidas e líquidas que se depositam sobre a superfície;
- ataque químico direto: escurecimento da prata pelo gás sulfídrico; destruição de superfícies metálicas pela ação de névoas ácidas; destruição de monumentos e estátuas Figura 3.3.
- ataque químico indireto: caso do dióxido de enxofre absorvido pelo couro é convertido em ácido sulfídrico, que deteriora o couro;
- corrosão eletroquímica: é o mecanismo principal da degradação de metais ferrosos.

Deve-se ainda levar em consideração que a danificação depende da umidade relativa, temperatura, luz solar, velocidade do vento, etc. Ver Quadro 3.2: Dano da Poluição do Ar a vários Materiais.

**Figura 3.3** – Degradação de monumentos pela poluição atmosférica



**Quadro 3.2** - Dano da Poluição do Ar a vários Materiais

Tipo de Material	Manifestação Típica do Dano	Medida de Deterioração	Poluente Danificante	Outros Fatores Ambientais
Vidros e metais	Alteração da aparência da superfície	Refletância	Substâncias ácidas	Umidade
Metais	Danificação da superfície; perda de metal; embaçamento	Ganho de peso; redução da resistência; perda de peso; alteração da condutividade	Dióxido de Enxofre; substâncias ácidas	Umidade; Temperatura
Materiais de Construção	Descoloração; dissolução carbonato	Não medido usualmente, / quantitativamente	Dióxido de Enxofre; substâncias ácidas; partículas pegajosas	Umidade
Pintura	Descoloração	Não medido usualmente, / quantitativamente	Dióxido de Enxofre; gás sulfídrico; partículas pegajosas	Umidade; Fungos
Couro	Desintegração da superfície; enfraquecimento	Perda da resistência	Dióxido de Enxofre; substâncias ácidas	-
Papel	Torna-se quebradiço	Diminuição da resistência ao dobramento	Dióxido de Enxofre; substâncias ácidas	Luz Solar
Tecidos	Redução resistência tensão; formação de manchas	Perda da resistência à tensão	Dióxido de Enxofre; substâncias ácidas	Umidade; Luz Solar; Fungos
Corantes	Desbotamento	Reflectância	Dióxido de Nitrogênio; Oxidantes; Dióxido de Enxofre	Luz Solar; Umidade
Borracha	“Cracking”; enfraquecimento	Perda elasticidade	Oxidantes; Ozone	Luz Solar

### 3.5 EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES DA ATMOSFERA

→ sobre a visibilidade - Figura 3.4: os fatores meteorológicos que afetam a visibilidade são:

- altura de inversão e velocidade dos ventos: quanto maior a altura de inversão e quanto maior a velocidade dos ventos, melhor a visibilidade, entretanto em determinadas áreas, velocidades de vento excessivamente altas diminuem a visibilidade pelo levantamento de pó;
- partículas higroscópicas e umidade relativa: sob alta condição de umidade as partículas higroscópicas aumentam de tamanho e reduzem a visibilidade.

**Figura 3.4** – Efeitos da poluição atmosférica sobre a visibilidade.



**Figura 3.5 - Formação de neblinas.**

→ formação de neblinas - : sabe-se que as neblinas nas cidades são mais frequentes e mais persistentes que nas áreas circunvizinhas devido á poluição do ar. Estas neblinas em massas de ar poluídas estão compostas por gotículas d'água contendo vários produtos químicos dissolvidos, e que estas substâncias favorecem a permanência das gotículas líquidas em condições de sub-saturação.



→ sobre as condições de radiação urbana Figura 3. 6: a quantidade de radiação recebida por uma cidade com poluição é menor do que para uma área sem poluição, sendo que os comprimentos de onda mais curtos são mais seriamente afetados que os mais longos. Há uma excessiva perda de radiação ultravioleta de luz solar, que é o principal fator para a geração de vitamina D, natural no corpo humano.



**Figura 3. 6** - Efeitos da poluição atmosférica sobre as condições de radiação urbana

Cientistas acreditam que a Terra está recebendo uma quantidade cada vez menor de energia solar<sup>8</sup>. Os pesquisadores chegaram a esta conclusão após terem analisado medições da luz solar colhidas nos últimos 50 anos. Eles suspeitam que a redução do nível de luz solar se deva à poluição atmosférica. Partículas sólidas lançadas ao ar por atividades poluentes - como cinzas e fuligem - refletem a luz de volta para o espaço, impedindo com que ela chegue à terra. Além disso, a poluição também modifica as propriedades óticas das nuvens, aumentando a sua capacidade de refletir os raios de sol de volta para o espaço.

→ sobre os constituintes atmosféricos:

- o aumento da concentração de metano, dióxido de carbono e outros gases resulta em provável aumento da temperatura média da Terra, provocando alterações climáticas – Efeito Estufa (neste sentido existem atualmente diversas hipóteses contraditórias);
- aumento da concentração de aerossóis de chumbo;
- aumento da concentração de dióxido de enxofre (30% nos últimos 50 anos) e de monóxido de carbono – chuvas e névoas ácidas;
- destruição da camada de ozônio protetora dos ultra-violeta.

### **A Destruição da camada de Ozônio**

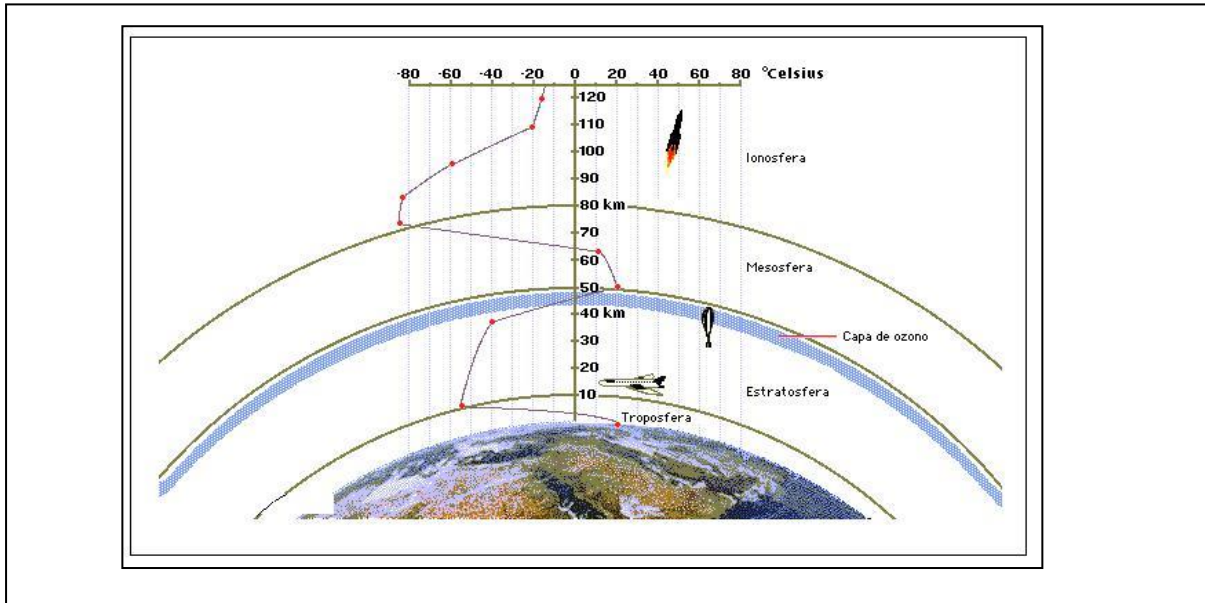
Na rarefeita estratosfera, na faixa dos 25 mil metros, logo acima da altitude do cruzeiro dos aviões supersônicos, paira ao redor da Terra uma tênue camada de um gás muito importante no equilíbrio ecológico do planeta : o Ozônio - Figura 3.7.

A quantidade deste gás é ínfima se for considerada a composição de toda a atmosfera e o tempo de vida de suas moléculas, em constante processo de formação e dissociação, extremamente curto. Paradoxalmente, é nessa existência efêmera que reside o papel fundamental do ozônio na manutenção da vida

---

<sup>8</sup> Quantidade de luz solar na Terra é cada vez menor, dizem cientistas. Jornal Ambiente Brasil – online - Edição N° 1445 - 15/01/2005

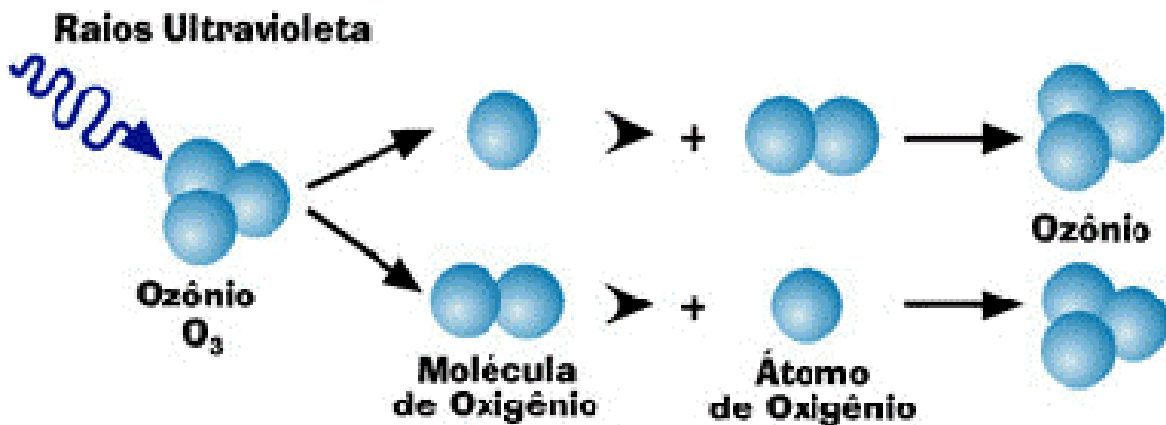
**Figura 3.7** - Camada de Ozônio. Esboço da distribuição do ozônio e da temperatura na atmosfera.



FONTE: Adaptado de Colbeck e Farman (1990).

Na estratosfera, a molécula de oxigênio atmosférico mais abundante “O<sub>2</sub>” absorve uma parte das radiações ultravioleta, UV, proveniente do sol, e se quebra em dois átomos livres “O”, que imediatamente se reagrupam com moléculas “O<sub>2</sub>” para formar ozônio “O<sub>3</sub>”. A instável molécula de ozônio, por sua vez, absorve outra parte das radiações UV e se quebra novamente em “O<sub>2</sub>” e “O”, reiniciando o ciclo. Nessas reações, a chamada Camada de Ozônio absorve a maior porção daquela faixa de invisíveis radiações, evitando assim que atinjam os seres vivos que habitam a superfícies - Figura 3.8.

**Figura 3.8** – Reações fotoquímicas da camada de ozônio.



Assim como o Efeito Estufa, também este é um fenômeno atmosférico natural, apropriado à sobrevivência das atuais formas de vida que, de outro modo só seria possível debaixo das rochas e

em águas profundas. Os seres vivos se encontram estreitamente condicionados a uma filtragem permanente daquela faixa de radiação solar.

### FOTOIONIZAÇÃO E FORMAÇÃO DE OZÔNIO<sup>9</sup>

Em 1930 Chapman propôs um modelo que poderia explicar a formação da camada de ozônio. De acordo com o ciclo proposto por Chapman, a formação do ozônio na estratosfera ocorre em níveis superiores a 30 km de altitude, onde a radiação solar ultravioleta de comprimento de onda menor que 243 nanômetros (nm) vagarosamente dissocia o oxigênio (COLBECK e FARMAN, 1990).

A Equação (1) apresenta a reação de dissociação do oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) em oxigênio atômico (O):



De acordo com Kirchhoff (1990) o  $hv$  representa a energia correspondente à luz ultravioleta (UV) necessária para a ocorrência da dissociação. O ozônio é produzido por absorvência da radiação ultravioleta pelo O<sub>2</sub> que é então fotodissociado para formar o O<sub>3</sub>, de acordo com o mostrado na Equação (2):



A Equação (2) é a única reação de formação do ozônio, seja na estratosfera ou na troposfera. O O<sub>3</sub> formado absorve intensamente radiação entre os comprimentos de onda de 240 e 320 nm, voltando a decompor-se em O<sub>2</sub> e O. A velocidade desta reação é proporcional a  $\rho^2 - \rho \ll 1$  – A molécula de oxigênio pode existir por longo tempo (25-50 km). Na estratosfera o oxigênio livre combina-se com O<sub>2</sub> para formar o O<sub>3</sub>. Sendo [M]: corpo catalizador.

#### ➔ Ação da camada de O<sub>3</sub>:

A Equação (3) representa a perda química por desemparelhamento do oxigênio (Harrison, 1991):



$\lambda > 243 \text{ nm}$  não vai dissociar O<sub>2</sub> - penetra mais na ATM encontrando O<sub>3</sub>. Não há mudança da estrutura química. Apenas absorção de energia (aumento da temperatura). A 50 km de altitude ocorre a maior parte da absorção - máximo de temperatura (estratopausa). Adicionalmente, o ozônio reage com o oxigênio atômico regenerando duas moléculas de O<sub>2</sub>. A Equação (4) apresenta a reação (KIRCHHOFF, 1990):



A reação representada na Equação (2) torna-se lenta com o aumento da altitude, enquanto que a reação da equação (3) torna-se rápida, o oxigênio atômico predomina a altas altitudes, e o O<sub>3</sub> é favorecido por baixas altitudes. Uma vez que um oxigênio atômico é gerado a partir da Reação (1), as reações (2) e (3) se processam rapidamente. No topo da estratosfera, onde a pressão e a

<sup>9</sup> Agradecimentos pela colaboração de ANA CRISTINA SILVA MUNIZ e PAULO CEZAR PICELLI. Disciplina Controle da Pol Atm do PPGEA – 2003.

concentração de [M] são menores, o tempo de reação é de aproximadamente 100 segundos. Em níveis inferiores a concentração de [M] tende a crescer e, conseqüentemente, esse tempo tende a diminuir. Na Reação (3) o tempo característico é igualmente pequeno, como na Reação (2). Como resultado dessa rapidez, estas duas reações interconvertem O e O<sub>3</sub> de maneira ágil. Assim é conveniente admitir a soma de O e O<sub>3</sub> como espécies únicas. Esta espécie é designada como “*odd oxygen*” e simbolizado como Ox. Assim, Ox é produzido somente na Reação (1) e perdido somente na Reação (4) (KIRCHOFF, 1987; COLBECK e FARMAN, 1990).

A camada estratosférica de ozônio absorve de 97 a 99% toda a radiação solar concentrada entre as bandas de 150 a 315 nm, transformando em calor a energia contida nesta radiação (WORREST *et al.*, 1990).

De acordo com Tanimoto e Soares (2000) toda energia emitida pelo Sol é, no conjunto, definida como radiação eletromagnética, ou luz. Os vários tipos de radiação diferem no seu comprimento de onda, frequência e conteúdo de energia. A radiação mais conhecida emitida pelo Sol é a visível, mas duas outras faixas também importantes são a do infravermelho e a do ultravioleta. Particularmente importante é a radiação ultravioleta (UV) com comprimento de onda entre 100 nm e 400 nm. Esta faixa de radiação ainda inclui três sub-faixas:

- UV-A de 320 nm a 400 nm;
- UV-B de 280 nm a 320 nm, e
- UV-C de 100 nm a 280 nm.

Pequenas alterações na camada de ozônio estratosférico podem conduzir a alterações significativas na radiação UV-B que atinge a superfície terrestre. Deste modo, uma redução na quantidade de ozônio estratosférico determina um aumento na quantidade de radiação UV-B que atinge a superfície e, conseqüentemente, seres humanos. Podendo provocar câncer de pele em indivíduos susceptíveis à doença. A grosso modo, uma diminuição de 1% na quantidade de ozônio estratosférico implica em um aumento de 2% na quantidade de radiação UV-B disponível à superfície. Existe, contudo, um outro tipo de radiação ainda mais temível: a UV-C. A radiação UV-C, a qual até o presente momento é completamente absorvida pelo ozônio estratosférico. Sabe-se que a UV-C é capaz de destruir o DNA (ácido desoxirribonucléico), a molécula básica da vida, que contém toda a informação genética dos seres vivos. Este tipo de radiação é nociva aos organismos unicelulares e às células da superfície da maioria das plantas e animais. Outro fator importante determinado pela alta concentração de ozônio é o aumento de temperatura a partir na estratosfera (WORREST *et al.*, 1989; BANDA e KIRCHOFF, 1999; TANIMOTO e SOARES, 2000).

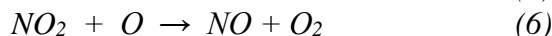
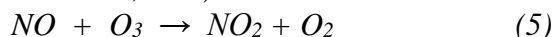
Na troposfera essa concentração de ozônio decresce a décimos de parte por bilhão (ppb) em razão de mistura (moléculas de O<sub>3</sub> com moléculas de ar) contra uma concentração de 10 ppb (10.000 ppb) na estratosfera. Como a concentração de moléculas por volume é proporcional a pressão e inversamente proporcional a temperatura, no nível em questão, uma diferença grande na razão de mistura de ozônio não implica que a diferença em concentração molecular tenham as mesmas proporções. Desta forma, pode-se constatar que cerca de 10 a 15% do ozônio atmosférico é encontrado na troposfera. Mesmo assim, a quantidade total de ozônio em toda atmosfera é muito pequena (HARRISON, 1991).

### ➔ **Processos de perda de ozônio:**

Ao processo de produção do ozônio seguem-se vários processos de perda. Sem a influência de fatores externos, a formação e a decomposição do ozônio atingem um equilíbrio que mantém a

camada de ozônio praticamente constante, embora sofrendo variações normais conforme a hora do dia, a estação do ano e até mesmo de ano a ano (KIRCHHOFF, 1990; LIPPMAN, 1991).

As equações (5) e (6) mostram os processos de perda mais importantes na estratosfera - ação dos compostos nitrogenados (KIRCHHOFF e PEREIRA, 1989):

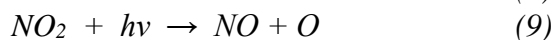
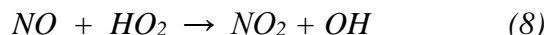


Sendo o resultado final apresentado na Equação (7):

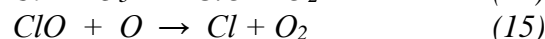
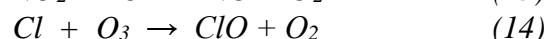
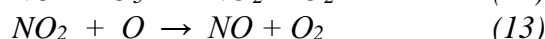
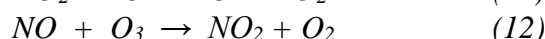
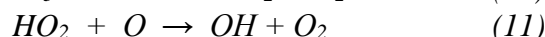
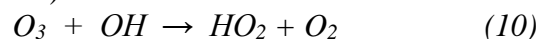


Do equilíbrio entre produção e perda resulta a concentração do ozônio em estado estacionário, isto é, aquela que deve ser observada através de medidas.

De acordo com Harrison (1991) uma grande diferença entre a química na estratosfera e na troposfera é que a radiação UV que chega a troposfera é insuficiente para gerar átomos de Oxigênio livres. A produção de  $O_3$  na troposfera é, portanto, dependente totalmente de outros processos capazes de gerar oxigênio atômico. O caminho mais eficiente neste sentido parece ser a interação dos óxidos de nitrogênio (NO) com os radicais hidrogenados de OH e  $HO_2$ , conforme mostrado nas equações (8) e (9):



As equações de (10) a (15) apresentam os processos de perda que são sempre do tipo catalítico com reação direta com os óxidos de hidrogênio (H), nitrogênio (N) e cloro (Cl) (COLBECK e FARMAN, 1990; HARRISON, 1991):



A ação é, portanto, catalítica para os óxidos, havendo sempre a destruição de um oxigenado ímpar,  $O_3$  e  $O$ , e a formação de oxigênio molecular, que é a forma mais estável do oxigênio (KIRCHHOFF e SILVA, 1989).

Na ausência da camada de ozônio não haveria a estratosfera. Isto poderia provocar grandes mudanças na distribuição térmica e na circulação da atmosfera. Na troposfera, também, a ausência ou diminuição do ozônio provocaria impactos consideráveis sobre toda a química da atmosfera. É necessário considerar que o ozônio é uma das moléculas mais reativas, que também participa na produção do radical mais ativo da baixa atmosfera, o oxidante mais poderoso da troposfera, o radical OH. A consequência disto seria um possível aumento nas concentrações de metano ( $CH_4$ ), e monóxido de carbono (CO), o que seria indesejável (HARRISON, 1991; LIPPMAN, 1991; LORA, 2000).

## ➔ Degradação da Camada de Ozônio

Segundo Lora (2000) o ozônio presente na atmosfera apresenta um paradoxo interessante:



- A sua presença é muito importante na estratosfera, executando a função de absorção da radiação ultravioleta;
- Na troposfera o ozônio é considerado um poluente. Aparece nesta região da atmosfera como produto principal das reações fotoquímicas entre os óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos. Provoca vários danos à saúde humana e as vegetações.

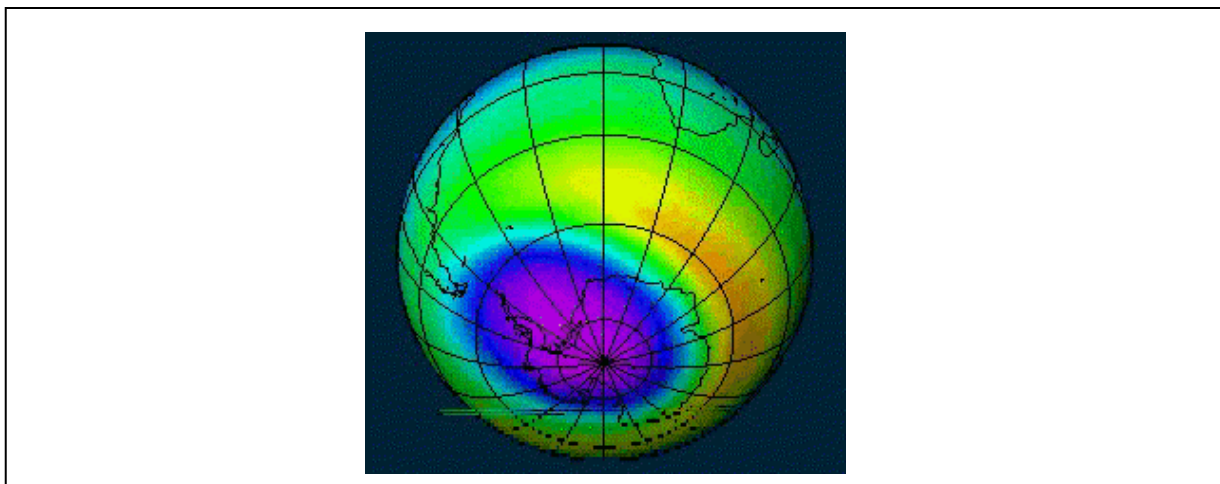
A situação tornou-se alarmante quando em outubro de 1984 um grupo de cientistas ingleses, trabalhando na Agência Antártica Britânica no Pólo Sul, publicaram na Revista *Nature* um artigo reportando que a quantidade total de ozônio na atmosfera sobre o local de observação na Antártica sofria perda de aproximadamente 40% durante a primavera austral. O anúncio causou espanto na comunidade científica (LORA, 2000).

Por razões climatológicas peculiares ao Polo Sul, a redução tem sido mais drástica sobre o continente antártico (o buraco de ozônio), mas atinge quase todo o planeta. As conseqüências do decréscimo do ozônio acima do Ártico são potencialmente grandes tanto quanto acima da Antártica. O Buraco da Camada de ozônio no Ártico afeta a maioria da população do globo terrestre, incluindo o Norte da Europa, América do Norte e os países que compõem a antiga União Soviética (TANIMOTO e SOARES, 2000).

O Buraco de Ozônio na Antártica reacendeu o interesse sobre a química da atmosfera e a preocupação de que a ação antropogênica irresponsável possa trazer danos irreparáveis ao nosso meio ambiente. Desde 1984 o Buraco de Ozônio aumentou 40% sobre a Antártica. De lá para cá, esse fato vem se agravando; hoje se calcula que esse buraco cobre cerca de 23 milhões de metros quadrados sobre a Antártica, o que equivale a dizer que já atinge as partes mais meridionais da América do Sul e Austrália (TANIMOTO e SOARES, 2000).

A Figura 3.9 mostra uma foto tirada pelo satélite Earth apresentado em azul a área crítica do buraco na camada de ozônio.

**Figura 3.9** - Mapa da região da Antártica entre 30 e 90° de latitude sul.



FONTE: Adaptado de Nasa (*apud* Rodrigues 2000).

Intensivas pesquisas teóricas e experimentais de ozônio estratosférico têm sido estudadas nos últimos anos. Estudos laboratoriais têm desenvolvido dados das reações e identificado espécies significantes e reações que têm sido omitidas pelos modelos numéricos. Muitos elementos traços

constituintes da atmosfera são agora medidos por satélites provendo o conhecimento de dados de vários traços de espécies atmosféricas e seu impacto no processo químico da atmosfera (LORA, 2000).

De acordo com Kirchoff (1990) várias teorias foram propostas para explicar as causas desse fenômeno. Entre as principais estão:

- **Teoria Dinâmica**, propondo que a circulação atmosférica sobre a Antártida mudou de tal modo que o ar da troposfera, onde há baixa concentração de ozônio, é levado para a baixa estratosfera e, conseqüentemente, reduções dos níveis de ozônio são observadas;
- **Teoria do Óxido de Nitrogênio** que refere-se ao aumento de  $\text{NO}_x$  produzido pelos efeitos fotoquímicos após um período crítico de aparecimento de manchas solares (1979). A presença excessiva de  $\text{NO}_x$  seria o responsável pela destruição excessiva de ozônio;
- **Teoria da Ação dos Gases CFC** em que esses gases sofrem ação da radiação solar e sofrem reações fotoquímicas com o ozônio, quebrando o ciclo de formação deste, contribuindo para a degradação da coluna de ozônio.

A primeira teoria tem origem natural, todavia, origens antropogênicas indubitavelmente no fundo contribuem para a concentração natural de muitos gases traços que têm um profundo efeito na camada de ozônio. Do conhecimento destas origens naturais é possível dizer como as atividades humanas perturbam a atmosfera (COLBECK e FARMAN, 1990).

A dinâmica é muito importante para estudos sobre o ozônio na estratosfera. A prova maior da importância de movimentos dinâmicos sobre a distribuição e variação do ozônio é a sua variação latitudinal. A maior produção fotoquímica do ozônio deve ocorrer no equador, onde a incidência de radiação UV é mais intensa. Por causa da circulação da atmosfera, no entanto, começando com a célula de *Hadley* na Região Equatorial, massas de ar são continuamente elevadas na vertical no equador e transportadas para as regiões polares. Em conseqüência, a concentração de ozônio não é máxima no equador, mas nas regiões de latitudes altas (KIRCHHOFF, 1990).

A circulação na estratosfera não é idêntica nos pólos norte e sul. O transporte de massas de ar do equador praticamente atinge o pólo norte, mas não o pólo sul; a circulação equatorial só atinge o paralelo 60. Acima desta latitude predomina uma circulação polar própria do hemisfério sul, em torno de um ponto comum que é o Vórtex Polar, e que domina o inverno Antártico (KIRCHHOFF e PEREIRA, 1989).

Óxido de nitrogênio é um precursor dominante do  $\text{NO}_x$  estratosférico. A maior origem natural do óxido de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$ ) é a nitrificação aeróbica em solos e águas. Solos em florestas tropicais emitem  $\text{N}_2\text{O}$ , em excesso para o meio ambiente. Esta origem de  $\text{N}_2\text{O}$  é provavelmente devido a mudanças nas florestas tropicais que são continuamente e rapidamente modificadas. Durante a noite polar, raios cósmicos contribuem para produzir óxido nitroso (NO) em altitudes de 10-30 km. Esta origem não é importante na escala global (COLBECK e FARMAN, 1990; HARRISON, 1991).

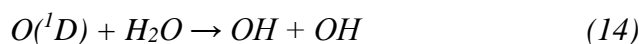
Há duas origens significantes de  $\text{N}_2\text{O}$  que resultam da atividade humana. Estas são a combustão e o uso de fertilizantes nitrogenados, que deveriam aumentar as emissões biogênicas de  $\text{N}_2\text{O}$ . A degradação varia com altitudes e são amplamente elevadas em latitudes elevadas. Em média, aumento de 20% em  $\text{N}_2\text{O}$  leva a um decréscimo de 1,1 para 2,6% da camada de ozônio (COLBECK e FARMAN, 1990).

A capacidade humana de produção de compostos de nitrogênio e cloro compõem-se de níveis iguais ou maiores que as origens naturais conduzindo inúmeras investigações concentradas na avaliação no impacto das atividades humanas na camada de ozônio (HARRISON, 1991; LORA, 2000).

Origens naturais de halogênios como o cloro ( $Cl_x$ ), têm pouca influência no ozônio atmosférico. O composto cloreto de metila ( $CH_3Cl$ ), é o principal representante das origens naturais. Origens industriais de  $CH_3Cl$  são excedidos por liberação dos oceanos e da queima de vegetais. Erupções vulcânicas podem também resultar em  $CH_3Cl$  e ácido clorídrico ( $HCl$ ) sendo realizados dentro da atmosfera global (COLBECK e FARMAN, 1990; WORREST *et al.*, 1990).

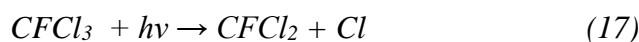
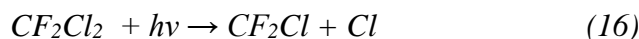
De acordo com Worrest *et al.* (1990) o metano é outro gás de origem natural que é envolvido em diversas reações importantes na atmosfera. Por meio do seu efeito o metano atinge o vapor de água na estratosfera, onde o metano pode levar a destruição do ozônio estratosférico. Gotas de água contendo metano agem na superfície com uma reação que destrói o ozônio. O aumento ou decréscimo da degradação do ozônio dependerá de onde o vapor de água é produzido. A degradação do ozônio aumentará se o vapor de água aumentar na estratosfera.

Para Harrison (1991) a mais importante origem natural dos radicais  $OH$  é a reação de  $O(^1D)$  com vapor d'água e metano, segundo as equações (14) e (15):



A concentração atmosférica de  $CH_4$  tem aumentado uma média anual de cerca de 1%. A maior origem natural são “*wetlands*”, plantações de arroz, cupins, e esterco de animais ruminantes. Origens humanas de metano incluem a produção por meio de combustíveis fósseis e gás natural. O processo natural contribui com cerca da metade do metano produzido no planeta (WORREST *et al.*, 1990).

A terceira teoria apontando os motivos do buraco na camada de ozônio é a mais plausível segundo estudiosos. Molina e Rowland, em 1974, sugeriram que o cloro livre na atmosfera como um resultado da dissociação dos gases clorofluorcarbonos (CFC) originam a destruição catalítica do ozônio, conforme apresentado nas equações de (16) a (20) (KIRCHOFF, 1990):



Radiações de pequeno comprimento de onda atingindo a estratosfera causam a quebra das moléculas de CFC liberando radicais de cloro. O cloro reage rapidamente com o ozônio, produzindo óxido de cloro e oxigênio molecular, e representa, portanto, um mecanismo de perda do ozônio. Como o cloro formado na última reação volta à reação anterior, forma-se um processo cíclico onde um único átomo de cloro é capaz de destruir cerca de 100 000 moléculas de ozônio, causado pela ação direta do homem moderno (KIRCHHOFF, 1990; HARRISON, 1991).

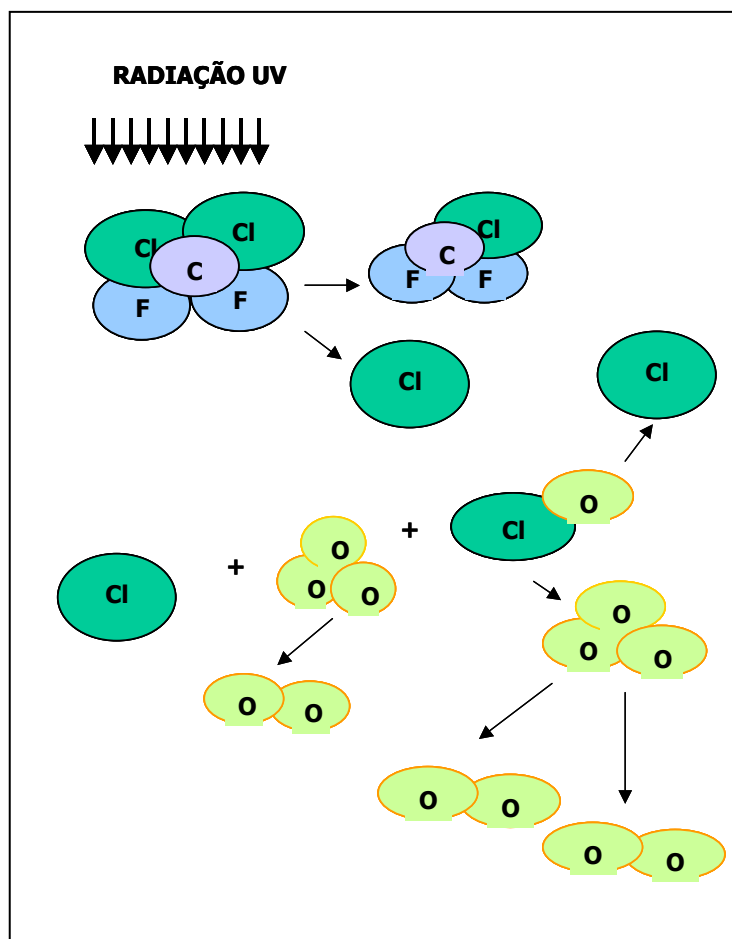
Os CFC são classificados como gases refrigerantes e fazem parte da família dos compostos orgânicos voláteis (COV). Os COV são hidrocarbonetos do tipo aldeídos, cetonas, solventes clorados e substâncias refrigerantes (LORA, 2000).

Perdas de ozônio na estratosfera resultará em uma grande transmissão de radiação ultravioleta para superfície da terra, causando efeitos prejudiciais.

A Figura 3.10 apresenta a ação da radiação solar sobre os gases CFC.

**Figura 3.10** - Ação da radiação solar sobre as partículas dos gases CFC e a interferência destes sobre o ciclo do ozônio.

FONTE: Worrest *et al.* (1990).



Nos frigoríficos, freezers, geladeiras, e frigobares, o CFC é o "gás de geladeira" (FREON ou FRIGEN) e sua função é absorver o calor na placa do congelador (onde se forma gelo) e liberá-lo pelo radiador atrás, do lado de fora do aparelho. Nos ar-condicionados de parede, centrais e de automóveis, o princípio de funcionamento é o mesmo, e é o CFC, também o agente que promove a troca de calor. Quando bem fabricados e corretamente utilizados, estes aparelhos mantêm o gás em circuito fechado, não havendo vazamento para a atmosfera. Quando vão para conserto ou são sucateados, a tubulação é aberta, o gás escapa, e sobe até atingir a camada de ozônio. A destruição que lá ocorre é muito grande. Cada molécula de CFC destrói centenas de milhares de moléculas de ozônio, até ser neutralizada, entre 75 e 110 anos mais tarde. Nos ar-condicionados de carros, sujeitos a condições adversas, as ocasiões em que ocorre a liberação de CFC são ainda mais frequentes pois, além dos casos de colisões, há vazamento contínuo de gás pelas mangueiras e conexões.

O Quadro 3.3 apresenta um sumário dos principais gases CFC e outros gases que contribuem para a degradação da camada de ozônio, incluindo seu uso primário e tempo de vida na atmosfera (WORREST *et al.*, 1990).

A troposfera é poluída, principalmente, por processos industriais de combustão que produzem os gases CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O e NO, entre outros. Além disso, processos de refrigeração e fabricação de plásticos utilizam os clorofluorcarbonos (CFC), entre os quais o CFCl<sub>3</sub> e o CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. A categoria dos CFC é especialmente perigosa, pois não reagem e podem continuar no estado original, insolúvel na água e de vida longa o que dá a esta categoria um tempo de resistência na atmosfera muito grande. Uma parte destas substâncias pode ser levada a médio e longo prazo para a estratosfera. Nesta região, ao contrário da troposfera, a incidência de UV é muito maior. Há desse modo, mais energia disponível para dissociar os átomos de cloro, e reações como as apresentadas nas equações (18) e (19) anteriormente acabam por acontecer (KIRCHHOFF e PEREIRA, 1989).

**Quadro 3.3 -** Esboço dos gases que afetam a concentração do ozônio e mudanças climáticas.

Tipos de Gases	Fórmula	Origem primária	Vida média na atmosfera	ODP*	GP**
CFC-11 triclorofluormetano	CFCl <sub>3</sub>	Refrigerantes, espumas plásticas, aerossóis	75 anos	1,0	0,40
CFC-12 diclorodifluormetano	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Refrigerantes, espumas plásticas,	110 anos	1,0	1,00
CFC-13 clorofluormetano	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	Solventes	90 anos	0,8	0,3-0,8
HALON 1211 bromoclorodifluormetano	CF <sub>2</sub> ClBr	Extintores	25 anos	3,0	7
HALON 1301 bromotrifluormetano	CF <sub>3</sub> Br	Extintores	110 anos	10,0	0,8
Tetracloro de carbono	CCl <sub>4</sub>	Processos industriais	67 anos	1,1	0,05
Metil clorofórmio	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	Processos industriais e naturais	8 anos	0,1	0,01
Oxido nitroso	N <sub>2</sub> O	Combustíveis fósseis	150 anos	-	0,016
Metano	CH <sub>4</sub>	Atividade biogênica, combustíveis fósseis	11 anos	-	0,001
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Combustíveis fósseis	7 anos	-	0,00005
Monóxido de carbono	CO	Motor de veículos	0,4 anos	-	-

\* potencial de degradação do ozônio (CFC-11 = 1,0)

\*\* potencial efeito estufa (CFC-12 = 1,0)

FONTE: Adaptado de Worrest *et al.* (1990)

Os CFC foram sintetizados em 1928 e desde então são usados pela sociedade moderna de consumo para uma série de aplicações, principalmente em aparelhos de refrigeração e ar condicionado, onde a substância química usada é o CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. A primeira vista, esses compostos são maravilhosos, pois não são inflamáveis, nem tóxicos, nem corrosivos, nem explosivos e se prestam muito bem como gases de refrigeração em substituição ao hidróxido de amônio (NH<sub>3</sub>), que é muito tóxico. Com o passar do tempo descobriu-se que os CFC eram também muito úteis como propelentes de aerossóis, em *sprays* de perfumes, desodorantes, tintas, na fabricação de espumas de plástico, e na limpeza dos microcircuitos de computador entre outros. Com isso, o consumo de CFC

foi aumentando. Por exemplo, só nos Estados Unidos da América, em 1976, foram fabricados cerca de 500 000 toneladas de  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  e  $\text{CCl}_3\text{F}$  (KIRCHHOFF, 1990; LIPPMAN, 1991). O CFC escapava junto com o produto cada vez que o spray é usado.

Mudanças de cálculos na coluna de ozônio, quando o cloro é elevado de 1 ppb para 8 ppb, variam de 3 para 9%, dependendo do modelo usado. Em todos os modelos, o maior decréscimo ocorre acima da estratosfera, perto de 40 km. Para o acréscimo de cloro para 15 ppb, os modelos então predisseram mudanças na coluna de ozônio de 9 – 22% (COLBECK e FARMAN, 1990).

Outra fonte de liberação de CFC na atmosfera são as espumas sintéticas flexíveis utilizadas em estofamentos de carros, poltronas, colchões, tapetes e isolamento térmico de paredes de refrigeradores, e as espumas sintéticas rígidas (geralmente brancas, como isopor) largamente empregadas em isolamento térmico na construção civil, em embalagens de equipamentos eletrônicos, bandejas, pratos e copos descartáveis, caixa de ovos e embalagens de comida pronta para levar. O CFC escapa durante a confecção destes produtos, quando é adicionado para conferir-lhes a consistência e porosidade características, e depois, quando vão para o lixo e começam a fragmentar-se.

Desde novembro de 1989 está proibida no Brasil a venda de sprays que contenham CFC e, desde então, é comum encontrar nas embalagens em selo padrão em que os fabricantes afirmam que seus produtos não agridem a camada de ozônio. Ao contrário dos CFC, outras substâncias propelentes tendem a reagir com o produto dentro da lata, alterando-o. Algumas são tóxicas e inflamáveis. Portanto, é difícil substituir o CFC em todas as aplicações.

Outras substâncias semelhantes aos CFC também contribuem para a destruição da camada de ozônio. Entre as principais estão o tetracloreto de carbono e o metilcloroformio, usados como solventes em lavagens a seco e no ramo farmacêutico, e os "halons", usados em alguns extintores de incêndio, que contêm bromo e são dez vezes mais destruidores de ozônio do que os CFC.

Wofsy *et al.* (1975 *apud* WORREST *et al.* 1990) sugeriram que amostras traços de bromo também são eficientes na destruição catalítica do ozônio. A origem antropogênica predominante é o brometo de metila ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) e bromofluormetila ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ). Estes gases são usados como retardantes de extintores de incêndio e aditivos de combustíveis. Um aumento de  $\text{CH}_3\text{Br}$  de 20 para 100 ppt resultaria no decréscimo do total de ozônio de 30%. A maior mudança relativa na camada de ozônio ocorre cerca de 15 km com um pico secundário de 40 km.

O aumento da incidência de radiação U.V. aumentaria a taxa de mutações nos seres vivos, atingindo especialmente o fitoplâncton, a fina camada vegetal sobre o oceano, responsável pela vida no mar. Para o homem, haveria aumento do índice de câncer (especialmente de pele) e de cataratas.

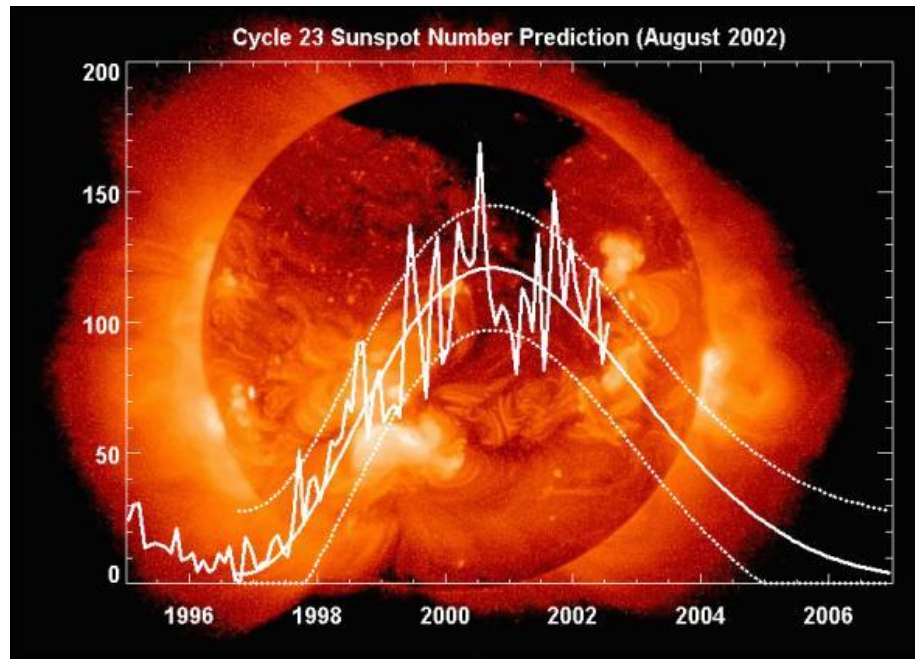
## OUTRAS TEORIAS ACERCA DO BURACO NA CAMADA DE OZÔNIO

Não muito divulgada, mas não menos importante, está a teoria defendida pelo cientista brasileiro Luiz Carlos Molion<sup>10</sup>. Segundo Molion (1992) o buraco da camada de ozônio não é causado pela atividade humana, mas devido as manchas solares de 11 anos e pela atividade vulcânica. De acordo com o autor o sol apresenta um ciclo de 11 anos, no qual há um máximo de produção, o máximo solar, e um mínimo solar, que acontece 5 a 6 anos após o máximo. O mínimo solar aconteceu em 1996, coincidindo com baixos níveis de ozônio na estratosfera. Em 2002 ocorreu ano do ciclo solar máximo e estranhamente o buraco da camada de ozônio na Antártica se

<sup>10</sup> O CFC E A CAMADA DE OZÔNIO - A FARSA? Luiz Carlos Baldicero Molion -Prof. Phd do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas.  
<http://br.geocities.com/zuritageo/cfc.htm> - acesso em 30/08/2007

fechou. Assim, a partir da Figura 3. 11 observa-se que as concentrações mínimas do ozônio estratosférico ocorrem coincidentemente com o mínimo solar no ano de 1996. Também se observa que em 2002 o ciclo solar foi máximo, ano em que igualmente a Nasa divulgou diminuição do buraco na camada de ozônio na Antártica.

**Figura 3. 11** - Esboço do ciclo solar de 1996 a setembro de 2003.



FONTE: Trigger (2003).

Molion aponta outros fatores a serem levados em conta na questão da diminuição do ozônio estratosférico, a exemplo da atividade vulcânica como outro fator que pode contribuir para a degradação da camada de ozônio. A Antártica possui 12 vulcões ativos, dentre os quais o Erebus com cerca de 4 mil metros de altitude, portanto quase na base da estratosfera Antártida. Esses vulcões lançam continuamente gases na atmosfera Antártida, que fica isolada do resto do planeta durante seu inverno e a intensidade do isolamento varia de ano para ano, dependendo das condições do clima global.

## Efeito Estufa

Um dos fatores abióticos imprescindíveis para a vida na Terra é a existência da atmosfera, mais especificamente sua capacidade de reter o calor do Sol. Sem esta característica, a Terra seria gelada — cerca de 33° C mais fria do que é hoje (LEGGETT, 1992). Este fenômeno é possível graças a alguns elementos químicos encontrados naturalmente na atmosfera, na forma de gases, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e o vapor d'água. Estes gases, entre outros, são conhecidos como gases de efeito estufa, essenciais à manutenção da vida na Terra como encontramos atualmente Figura 3.12.

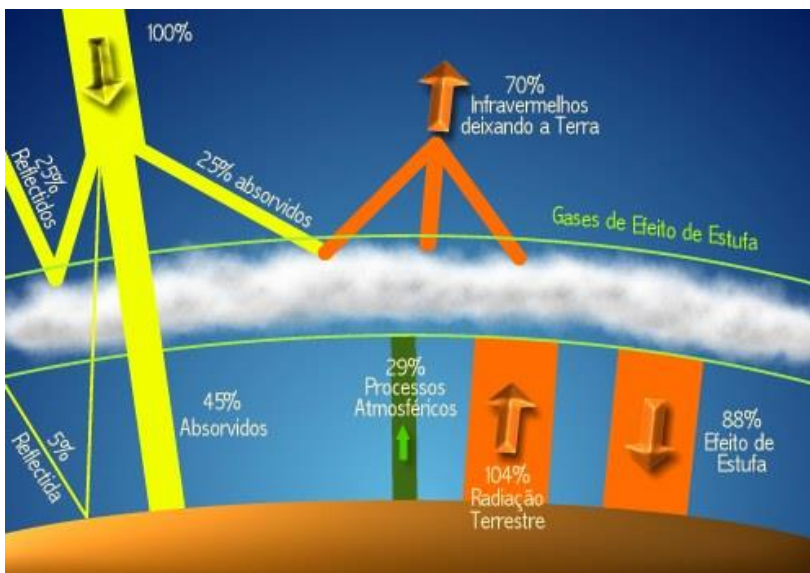
O envelope de ar que cobre a Terra contém basicamente nitrogênio (78%) e oxigênio (21%). Embora insignificante em quantidade, algo como 0,03% do total, o CO<sub>2</sub> é importante porque

absorve e retém calor, que de outra forma, escaparia para o espaço, mantendo constante a temperatura do planeta.

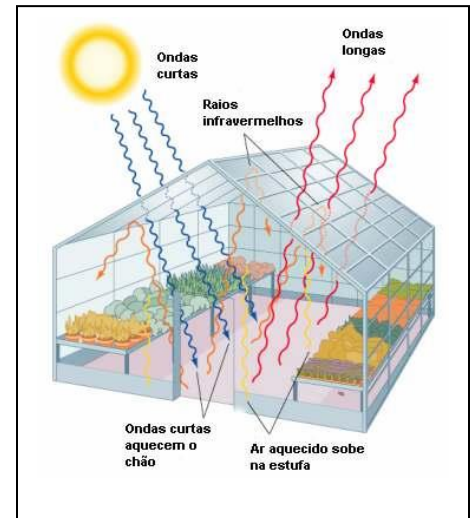
Entretanto, através de observações ao longo do tempo, foi detectado que as atividades humanas vêm emitindo uma imensa quantidade desses gases de efeito estufa, aumentando sua concentração na atmosfera (GOULD, apud KOEHTOPP, 2001). Por consequência, mais calor é retido entre a crosta terrestre e a atmosfera e menos calor é dissipado para o espaço sideral significando aumento da temperatura terrestre.

O gás carbônico e outros poluentes, quando em grande quantidade, acabam formando um filtro na atmosfera. Durante o dia, a Terra é aquecida pelo sol e à noite perde calor armazenado, tendo por consequência uma redução de temperatura. Entretanto, com a camada de poluentes presente, o calor fica retido na Terra, provocando um aumento na temperatura média. A este fenômeno dá-se o nome de **Efeito Estufa** - Figura 3.13 e Figura 3.14. Se nada for feito para modificar este quadro, na metade Do século XXI acredita-se que a temperatura média poderá ter um acréscimo da ordem de 1,5 a 4,5 graus centígrados, significando uma temperatura média mais elevada do que durante os últimos 100.000 anos. Como consequência, o regime de chuvas poderá alterar-se : fortes chuvas cairão em regiões que hoje são áridas e haverá seca em áreas úmidas e produtivas. O impacto poderá ser ainda maior nos pólos, onde a temperatura média poderá subir até 10 graus centígrados. Se a calota de gelo que cobre a região Antártica derreter, o nível dos oceanos poderá elevar-se lentamente, com acréscimo de 5 a 7 metros, inundando importantes cidades costeiras e áreas de produção agrícola.

**Figura 3.14** – Efeito estufa



**Figura 3.12** – Efeito estufa



**Figura 3.13** – Efeito estufa





A sociedade moderna, para sua manutenção, depende da produção de energia. Tal energia tem sido obtida sobretudo de combustíveis fósseis, como o gás natural, o petróleo e o carvão. Essa utilização intensa dos materiais energéticos fósseis, aliada à agricultura extensiva e outros fatores que alteram a biosfera, tem resultado num acréscimo mensurável da concentração de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera (aproximadamente 25% desde o início da primeira Revolução Industrial).

Embora automóveis e usinas produtoras de energia contribuam com aproximadamente 75 % do gás carbônico liberado em nações industrializadas (existem no mundo 400 milhões de veículos movidos à gasolina, diesel ou álcool e destes, 14 milhões no Brasil), a devastação e queima de florestas tropicais em países como o Brasil é outro grande contribuinte. Desde 1860, entre 90 e 180 bilhões de toneladas de carbono foram liberadas na atmosfera em decorrência de queimadas em desmatamentos acrescidos de 150 a 190 bilhões de toneladas devido à combustão de carvão, petróleo e gás natural. As árvores funcionam normalmente como um depósito para o gás carbônico: após absorvê-lo, devolvem à natureza os resíduos de oxigênio. Mas quando são derrubadas ou queimadas, o carbono que contem, assim como o do terreno subjacente é oxidado e liberado para a atmosfera.

As florestas são ecossistemas que em seu clímax, o consumo e a produção de CO<sub>2</sub> se equivalem. As queimadas, pela combustão de biomassa, podem elevar o lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A destruição de florestas tropicais pode acarretar graves alterações climáticas, já que o fenômeno de evapotranspiração regula o clima mundial.

Uma das principais mudanças causadas por esse aumento de temperatura é a mudança da flora característica de várias regiões do mundo (as plantas têm "preferências" climáticas). Existe uma vertente de biólogos que especula que a elevação do nível de CO<sub>2</sub> poderia aumentar a taxa de fotossíntese mundial, talvez, até, aumentando a produtividade agrícola.

## ACORDOS INTERNACIONAIS

O debate acerca do fenômeno climático de aquecimento global eclodiu na cena internacional em 1987, por ocasião da publicação do relatório da ex-primeira-ministra norueguesa Gro Harlem Brundtland para a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento das Nações Unidas. Neste relatório, pela primeira vez, a acumulação dos gases de efeito estufa na atmosfera era indicada, oficialmente, como um risco planetário — sua mais assombrosa consequência seria o aumento da temperatura média da Terra.

A despeito da gravidade da denúncia, não havia à época conhecimento científico apto à verificação da sua validade. Com este fim, em 1988, a Organização das Nações Unidas reagiu e criou a maior equipe de experts internacionais jamais mobilizada: o Grupo de Especialistas Intergovernamental sobre a Evolução do Clima. Os dois mil e quinhentos pesquisadores que o compunham publicaram um primeiro relatório em 1990 e um outro em 1995; no primeiro, o Grupo ofereceu como conclusão que um feixe de elementos sugere que existe uma influência perceptível do homem sobre o clima mundial. A influência do homem no clima se daria essencialmente pela introdução na atmosfera dos chamados gases de efeito estufa. Início da revolução industrial 280 ppm CO<sub>2</sub> - **Figura 3.15**. Em 1959 – 316 ppm (13% em dois séculos). Em 1998 – 367 ppm (17% em 39 anos).

## AS CONVENÇÕES DO CLIMA

Figura 3.15 – Variação do CO<sub>2</sub> na atmosfera

Adotada pela Assembléia Geral das Nações Unidas em Nova York em 9 de maio de 1992 e apresentada à assinatura no âmbito da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento ocorrida no Rio de Janeiro em junho do mesmo ano, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima entrou em vigor no dia 21 de março de 1994.

A Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima é o texto jurídico essencial, que serve de base para a luta contra os gases de efeito estufa, pois permite fixar uma série de parâmetros que formam o quadro jurídico do debate sobre o efeito estufa e as medidas a serem tomadas para o seu controle.



Anualmente, a Conferência das Partes, órgão supremo da Convenção, realiza reuniões, denominadas COP, para estabelecer políticas e medidas que visem à mitigação da mudança do clima, pela limitação de emissões antrópicas de gases de efeito estufa ou pela proteção e expansão de sumidouros e reservatórios de carbono.

O painel do IPCC não traz recomendações para os governos. Ele apenas fornece informações para a adoção de políticas mundiais.

O relatório divulgado em Bruxelas, em abril de 2007, foi o quarto produzido pelos especialistas desde 1990. O documento - que foi sendo lançado em quatro partes ao longo deste ano - traz informações detalhadas sobre diversas implicações das mudanças climáticas em todas as regiões do planeta.

Os estudos mais modernos desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, utilizaram uma série de modelos do ciclo de carbono, indicando que só se poderia atingir a estabilização das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se as emissões antrópicas globais caíssem para os níveis de 1990. A estabilização das concentrações de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) nos níveis atuais supõe reduções das emissões antrópicas de 50% e de 8% respectivamente.

## PROTOCOLO DE QUIOTO

O principal avanço que trouxe o Protocolo de Quioto para a efetivação dos objetivos estabelecidos e das obrigações erigidas em 1992, quando houve a elaboração da Convenção do Clima, foi a quantificação das limitações e reduções de emissões dos países do Anexo I (Protocolo de Quioto, 1997).

Obrigações dos países desenvolvidos:

Em primeiro lugar, os 39 países industrializados do Anexo I comprometem-se, em bases quantificadas, a um objetivo de redução e limitação de suas emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Os objetivos quantificados de redução e limitação estão fixados a cada país no Anexo B do Protocolo; os gases a serem controlados estão enumerados no Anexo A do mesmo:

I. Em média, comprometem-se a uma redução de 5,2% dos gases, no período de 2008 a 2012, em relação aos níveis verificados em 1990 - **Figura 3. 16**;

II. Nas emissões antrópicas de seis gases: CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e três substitutivos do CFC (clorofluorcarbonos): a saber, o hidrofluorcarbono (HFC), o perfluorcarbono (PFC) e o hexaflorito sulfuroso (SF<sub>6</sub>);

III. Em relação aos níveis de emissão desses gases em 1990, com a possibilidade de escolha do ano 1995 como ano-base para os substitutos dos CFC; e para os países da Europa Central, de escolher de maneira geral um outro ano-base.

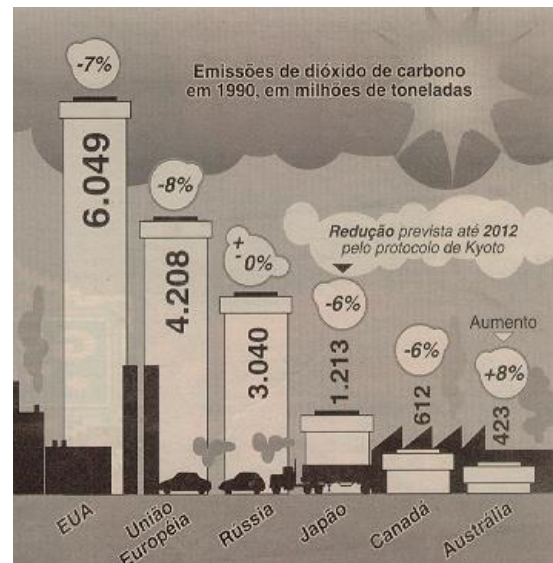
IV. A União Européia, especificamente, compromete-se a reduzir em 8% suas emissões de gases de efeito estufa (o mesmo para a maioria dos países da Europa Central); os Estados Unidos comprometem-se a reduzir em 7% suas emissões; Japão e Canadá: redução de 6%; Rússia e Ucrânia: 0% de aumento; Austrália: 8% de aumento.

**Figura 3. 16** – Protocolo de Kyoto

Para todas as Partes do Protocolo, são reafirmados alguns compromissos que já haviam sido enunciados na Convenção-Quadro e contém obrigações gerais relativas à elaboração de inventários de emissões; a programas contendo medidas destinadas a atenuar as mudanças climáticas; à cooperação em matéria tecnológica e em relação às pesquisas científicas e técnicas. Também há compromissos em relação à formação e à educação, assim como sobre a informação quanto aos programas e atividades realizados para a efetivação do Protocolo.

### Posições contrárias

Nem todos os cientistas são unânimes quanto a aceitação das hipótes colocadas pelo IPCC. Uma voz discordante, no Brasil é a do prof Molion, da UF Alagoas<sup>11</sup>.



<sup>11</sup> "Aquecimento Global é terrorismo climático" - Luiz Carlos Molion. Notícia publicada em 11/07/08 no site <http://clipping.planejamento.gov.br/Noticias.asp?NOTCod=366971>.

## CHUVAS E NÉVOAS ÁCIDAS

O conceito chuva ácida foi estabelecido no século passado, pelo químico inglês Robert Angus Smith, que observou as diferenças entre o ar dos campos, dos subúrbios e da cidade industrial de Manchester, na Inglaterra.

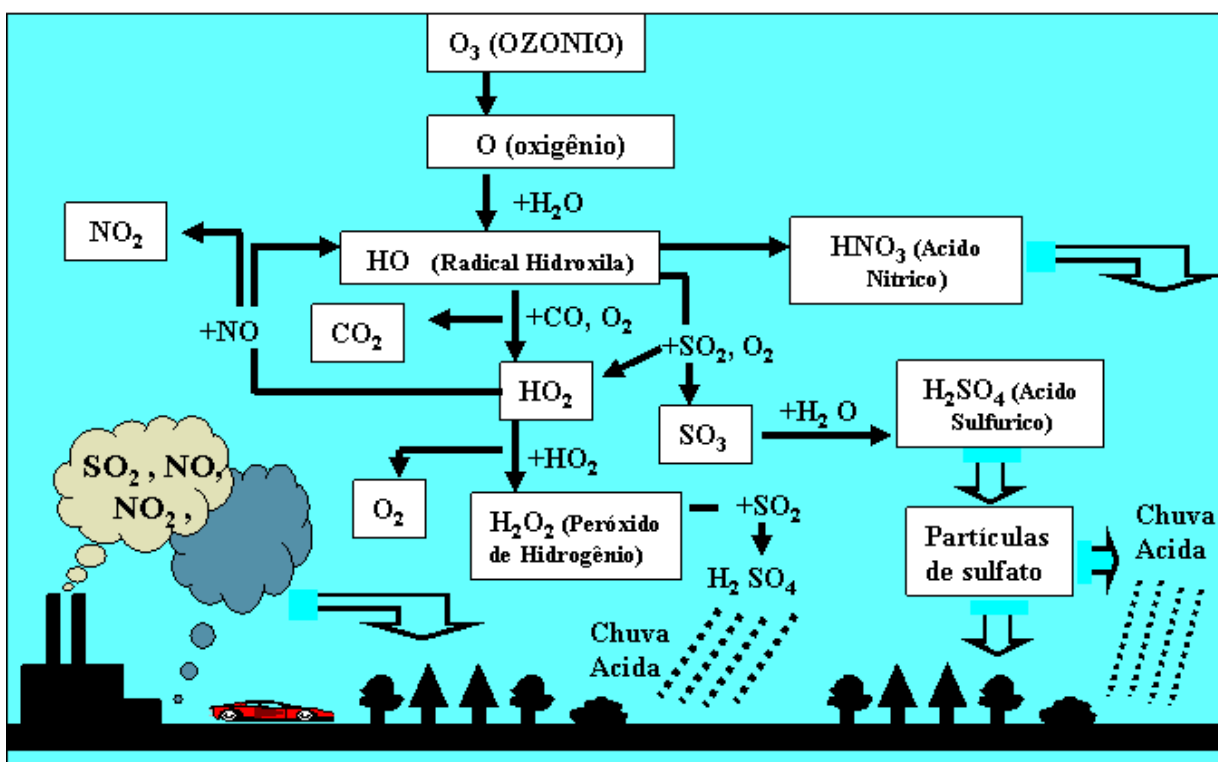
Smith publicou um trabalho em 1872, onde dizia que as precipitações químicas, sofriam influência da distância ao oceano, da velocidade e direção dos ventos, da decomposição da matéria orgânica, da combustão e emissão de origem industrial e da quantidade e frequência de chuva e neve (CETESB, 1984).

Ao contrário do que muitas vezes se imagina, a água da chuva não é completamente pura. De modo geral, as principais espécies químicas nela encontradas (em suas formas iônicas) são: Sódio (Na), Cálcio (Ca<sup>++</sup>), Magnésio (Mg), Potássio (K<sup>-</sup>), Cloreto (Cl<sup>-</sup>), Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>--</sup>), Amônia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), e Nitrato (NO<sub>3</sub>), sendo que, as seis primeiras tem como origem a água do mar (MELLO e MOTTA, 1987).

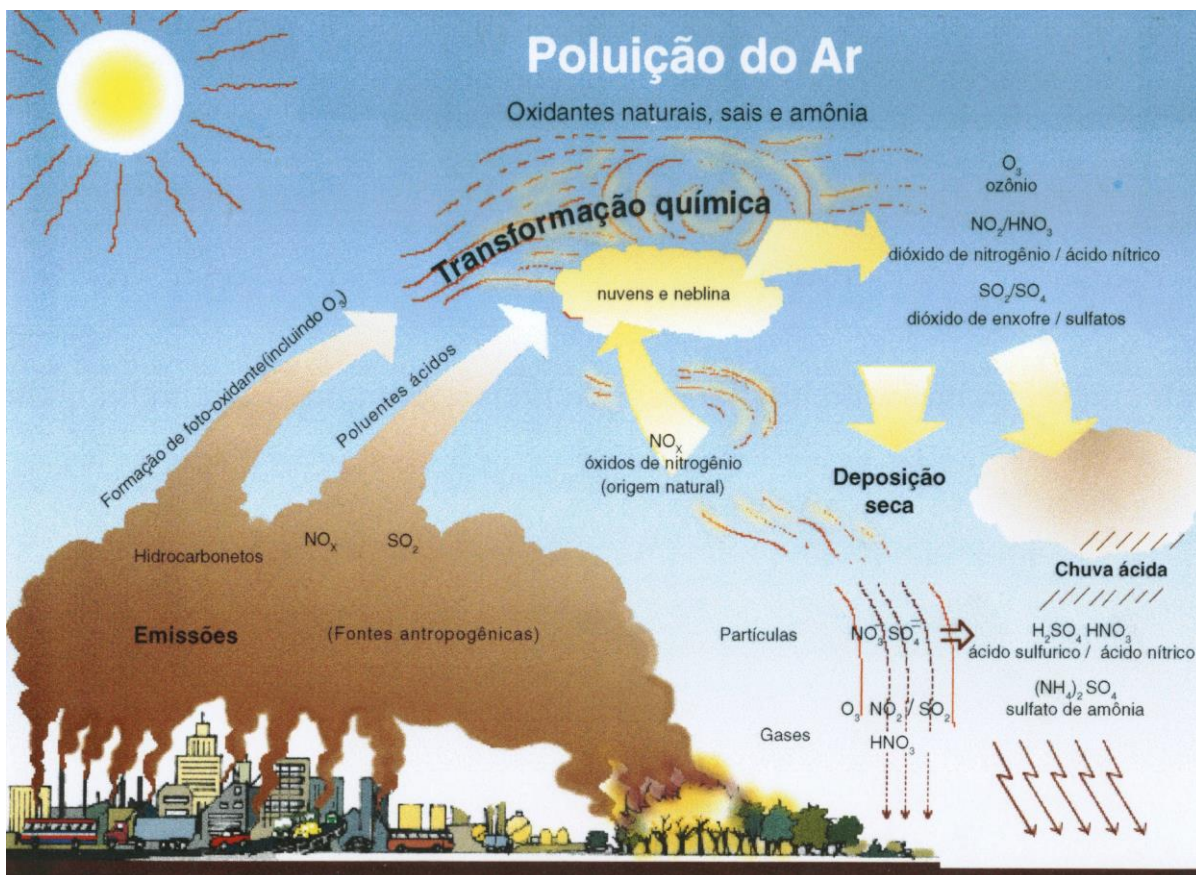
Quando o ar está desprovido de poluentes, o único ácido que influencia o pH das precipitações é o ácido carbônico. Este ácido dissolvido na água pura, mantém seu pH em torno de 5,65. Nestas condições, o fato do pH da água da chuva ser levemente ácido, é considerado normal (HAAG, 1985). Devido a isto, considera-se ácida, somente as águas de chuva que possuam pH menor que 5,65.

A queima de combustíveis fósseis para geração de energia está entre as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos, pois liberam resíduos gasosos, como óxidos de nitrogênio e de enxofre, que em contato com a água reagem formando ácido nítrico e ácido sulfúrico, presentes nas precipitações ácidas - Figura 3. 17. Os poluentes atmosféricos são carregados pelos ventos, podendo viajar milhares de quilômetros, possibilitando que as chuvas ácidas atinjam grandes distâncias das fontes poluidoras, conforme ilustrado na Figura 3. 18.

**Figura 3. 17 -** Química da chuva ácida.



**Figura 3. 18** – Esquema típico caracterizador da formação das chuvas ácidas.



### Situação do problema da chuva ácida no mundo

O interesse despertado no meio científico pelo problema da acidez das águas de chuva, é em grande parte devido às conseqüências que estas acarretariam em termos de modificações num determinado ecossistema e que seriam, entre outras (CETESB, 1984):

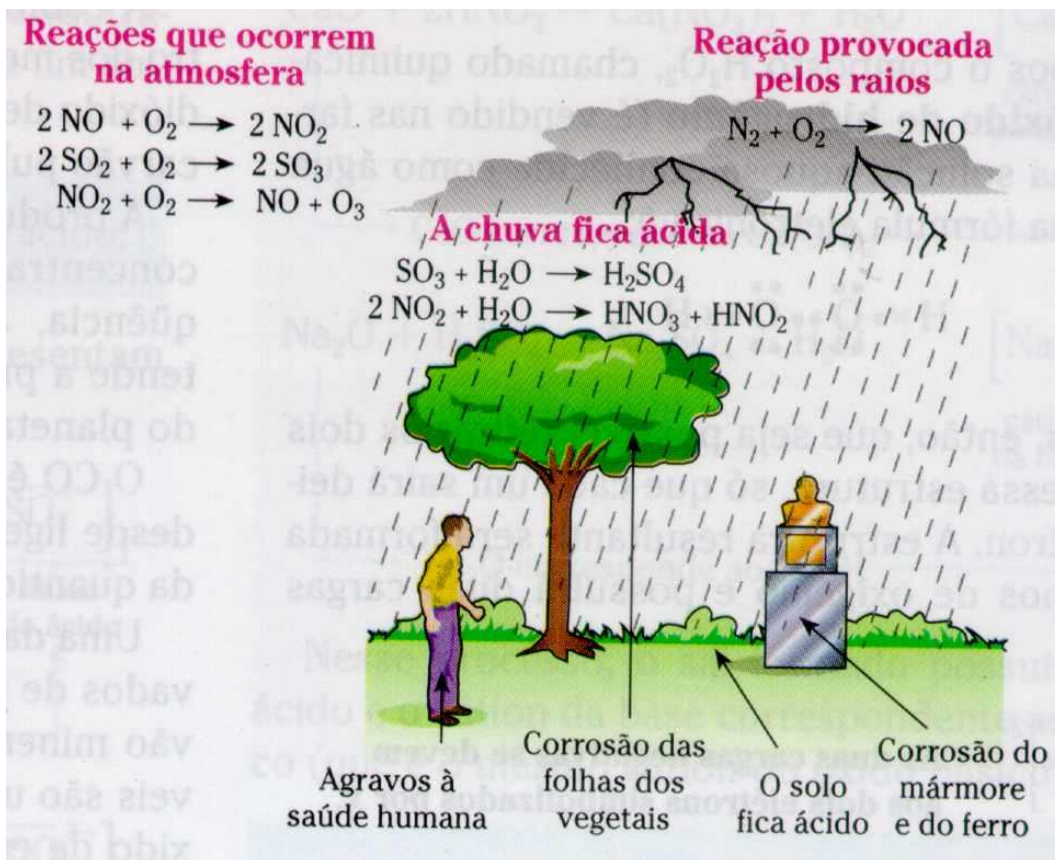
- diminuição do pH das águas de superfície;
- modificação da fauna e da flora - Figura 3. 19;
- solubilização de metais pesados;
- alteração na química dos solos- Figura 3. 19;
- efeitos nos processos biológicos de decomposição, nitrificação, redução, etc.;
- corrosão de monumentos - Figura 3. 19.

A ocorrência de chuvas ácidas tem sido uma das grandes preocupações da humanidade, relacionado à questão do meio ambiente e sua sobrevivência. Segundo o Fundo Mundial para a Natureza (WWF), cerca de 35% dos ecossistemas europeus já estão seriamente alterados e aproximadamente 50% das florestas da Alemanha e da Holanda foram destruídas pela acidez da chuva. Na costa Leste do Atlântico Norte, a água do mar está entre 10% e 30% mais ácida que nos últimos vinte anos

Segundo Andrade e Sarno (1990) nas últimas décadas as precipitações ácidas tem sido um problema ambiental sério nos Estados Unidos e na Europa. O aumento das emissões de  $\text{SO}_2$

proveniente da queima de combustíveis fósseis tem sido responsável pelo decréscimo do pH das precipitações, com valores entre 4,0 - 4,5.

**Figura 3. 19** – Efeitos da chuva ácida.



Segundo a UNESCO, a chuva ácida está prejudicando gravemente monumentos antigos, prédios históricos, esculturas, ornamentos e outros objetos culturais importantes. Alguns dos maiores tesouros culturais do mundo, como o Partenon (Atenas) e a Coluna de Trajano (Roma) estão sendo corroídos pelas chuvas ácidas.

No Brasil, vários trabalhos apontam para a gravidade da questão. Por exemplo, em Cubatão em São Paulo (MOREIRA-NORDEMANN et al., 1983). O trabalho de Milano et al. (1989) realizado na região de Candiota, situada no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, mostrou que existe predominância de precipitação levemente ácida, apresentando valores de pH entre 4,1 - 5,6.

Barron e Denning (1993) apresentaram em seu trabalho valores de pH relativamente ácidos entre 4,3 e 5,3 nas cidades de Niterói e do Rio de Janeiro.

No Rio Grande do Sul, na região metropolitana de Porto Alegre os valores mínimos encontrados na água de chuva ficaram em torno de 4,0, com máximos de 7,6 e médias gerais de 5,5 (SEINFELD, 1986).

Em Santa Catarina observa-se indicativos da ocorrência de chuvas ácidas, em Tubarão (DE MELO LISBOA e SANT'ANNA, 1990) e Florianópolis (DE MELO LISBOA, et al., 1992; DE MELO LISBOA, et al., 2007). Contudo, se desconhecem a extensão e a origem destas chuvas ácidas e também se as fontes poluidoras são locais ou remotas, e qual a contribuição natural do Oceano Atlântico.

### 3.6 EFEITOS SOBRE A VEGETAÇÃO

- ➔ redução da penetração da luz por sedimentação de partículas nas folhas ou por interferência de partículas em suspensão na ATM;
- ➔ deposição de poluentes no solo, por sedimentação (partículas grosseiras) ou por carreamento 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.

Qualquer que seja a forma pela qual uma planta tenha sido afetada o efeito poderá ser visível ou não. Os efeitos são:

- colapso do tecido foliar;
- alterações da cor normal;
- alterações do crescimento.

Ex: cloro; gás sulfídrico; clorídrico; amônia; etc.

Várias plantas são sensíveis aos poluentes do ar. Algumas são usadas como indicadores de poluição do ar porque elas demonstram um tipo característico de dano para cada poluente específico - Quadro 3. 4.

### 3.7 REPERCUSSÕES ECONÔMICAS DA POLUIÇÃO DO AR

- Custo das perdas econômicas devidas à poluição do ar: corrosão de metais; enfraquecimento de tecidos; suja roupas; desgasta edifícios; danifica a vegetação e a fauna; reduz visibilidade; nociva a saúde, etc.

Como exemplo, seja o caso das usinas termelétricas. A poluição provocada por elas será maior ou menor dependendo da qualidade do combustível a ser utilizado. No caso do carvão mineral importado, de melhor qualidade do que o nacional, os riscos de poluição podem ser reduzidos de 30 a 90%, dependendo dos equipamentos antipoluentes utilizados. O custo de produção de energia aumentaria 10% para uma redução da poluição em 30%, e em 60% para reduzir em 90%. O controle ambiental, neste caso, pode representar cerca de 30 a 35% do custo total de uma termelétrica, nos EUA. Na Alemanha, o controle ambiental acresce em 47% o custo de capital básico das usinas, sendo 19% atribuídos ao controle de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); 9% ao controle de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>); 6% ao controle de material particulado; 6% ao tratamento de efluentes e 7% ao controle de ruído, tratamento de rejeitos sólidos e outros controles. Hoje, apenas 5% da energia utilizada no Brasil é proveniente destas usinas<sup>12</sup> (BIO, maio/jun 1997).

---

<sup>12</sup> Apesar de ser considerada como uma fonte de “energia limpa” as hidrelétricas exigem o alagamento de extensas regiões, principalmente em áreas planas, como na Amazônia. Se for considerado um fator para medir a área alagada por potência (Watt) gerada, a relação é muito variável: Em Tucuruí, por exemplo, foi necessário alagar uma área de 2.430 km<sup>2</sup> para conseguir uma potência de 3.960 Mwatts (megawatts). Em outras palavras, foi preciso inundar uma área de 24,5 m<sup>2</sup> para acender uma lâmpada de 40 watts. Em Balbina, para conseguir acender uma lâmpada de 40 watts, foi necessário alagar uma área de 400 m<sup>2</sup>. Na construção de Itaipú os impactos foram menores: foi necessário alagar uma área de 4,5 m<sup>2</sup> para acender uma lâmpada de 40 watts.

**Quadro 3. 4 - Efeitos da poluição do ar sobre a vegetação**

POLUENTES	SINTOMAS CARACTERÍSTICOS	MÍNIMA CONCENTRAÇÃO PARA DANO		
		PPM (vol)	g/m <sup>3</sup>	Tempo de Exposição
Dióxido de Enxofre	Manchas esbranquiçadas, áreas descoloridas entre veias, clorose (amarelamento)	0,3	785	8 horas
Ozona	Marcas esbranquiçadas, pigmentação. As pontas das coníferas tornam-se amarronzadas e necróticas	0,03	59	4 horas
Nitrato de Peroxiacetila	Espelamento, prateamento ou bronzeamento na parte inferior das folhas	0,01	56	6 horas
Dióxido de Nitrogênio	Lesões irregulares, brancas ou marrons, no tecido intercostal e próximas à margem das folhas	2,5	4.700	4 horas
Fluoreto de Hidrogênio	Queimaduras nas pontas e nas margens, diminuição do crescimento, abcesso na folha, faixa estreita vermelha amarronzada separa áreas necrozadas do tecido verde.	0,1 ppb	0.08	5 semanas
Etileno	Necrose de parte do cálice em orquídeas, anormalidades nas folhas, queda de flores e falta de abertura das folhas: abcesso	0,05	58	6 horas
Cloro	Branqueamento entre veias das folhas, queimadura nas pontas e margens, abcesso nas folhas, danos similares ao da ozona	0,10	296	2 horas
Amônia	Aparência verde forte, tornando-se marron ou verde comum ao secar. Pode ocorrer escurecimento geral em algumas espécies	-20	-14000	4 horas
Ácido Clorídrico	Necrose tipo ácida, queimadura de pontas em algumas espécies, necrose da margem de folhas de plantas tipo folhas largas	-5 -10	-11200	2 horas
Gás Sulfídrico	Chamuscamento dorsal e marginal	20	28000	5 horas
Ácido Sulfúrico	Pontos necróticos na superfície superior da folha, similar as lesões de compostos ácidos ou básicos	-	-	-



### 3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. e SARNO, P.; Química Nova, 1990, 13, 213.

BANDA, F. C. Z.; KIRCHOFF, V. W. J. H. Observações da radiação UV-B em Punta Arenas – Chile e efeitos do buraco na camada de ozônio. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, mar. 1999.

BARRON, J. e DENNING, A. S.; Atmospheric Environment, 1993, 27 A, 2337.

BIO, maio/jun 1997

CETESB - Relatório chuvas de Cubatão - caracterização química e impacto ambiental. São Paulo, 1984.

COLBECK, I., FARMAN, J. C., Chemistry and Pollution of the Stratosphere. In. HARRISON, R. M., *Pollution – causes, effects, and control*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1990. p. 181-198.

DE MELO LISBOA, H. e SANT'ANNA, F. - Análise da qualidade das águas de chuva de Tubarão - SC. VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador, BA, 1990.

DE MELO LISBOA, H.; COSTA, R.H.R. e WALTORTT - "Análise da qualidade das águas de chuva no campus universitário da UFSC no período de maio de 1991 a janeiro de 1992", in anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Vol.1, São Paulo, de 28.09 a 02.10.92.

DE MELO LISBOA, H.; HAAS, R.; MARTINS, R.F. e MARQUEZI, C. - Diagnóstico da Origem e Extensão das Chuvas Ácidas no Sul de SC. Relatório final de pesquisa entregue a FAPESC, 2007.

HAAG, H.P. - Chuvas ácidas. Fundação Cargill. Campinas, 1985.

KIRCHOFF, V. W. J. H. Geoquímica de média e baixa atmosfera: impactos ambientais por deterioração da camada de ozônio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1, *Anais...*, Porto Alegre, v. 11., p.99 – 118, 1987.

KIRCHOFF, V. W. J. H.; PEREIRA, E. B., Medidas de ozônio na península Antártica. In: SEMINÁRIO SOBRE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS E ESPACIAIS DO PROGRAMA ANTÁRTICO BRASILEIRO, 1, *Anais...*, São José dos Campos, p.68 – 80, 1989.

KIRCHOFF, V. W. J. H. O buraco de ozônio na Antártica: resultados recentes. In. SEMINÁRIO SOBRE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS E ESPACIAIS DO PROGRAMA ANTÁRTICO BRASILEIRO, 3, *Anais...*, São José dos Campos, 1990.

KOEHNTOPP, P.I. - As incertezas sobre as mudanças climáticas globais. *Revista Saúde e Ambiente*, v. 3 n° 1-2, 48-56, 2001.

HARRISON, R. M. *Pollution – causes, effects, and control*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1991. 393p.

LIPPMAN, M. Process engineering and design for air pollution control. *Environmental Science and Technology*, v. 25, n. 12. p. 1954 – 1962. 1991.

LEGGETT, Jeremy - Aquecimento global: o relatório Greenpeace. Rio de Janeiro, Ed. Fundação Getúlio Vargas, 516 pgs., 1992.

LORA, E. S. *Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e do transporte*. Brasília: ANELL, 2000. 862p.

MELLO, W.Z. e MOTTA, J.S.T. - Acidez na chuva. *Revista Ciência Hoje*, vol.6, nº 34, pág.41-43, 1987.

MILANO, L.B.M., LUCA, S. J., ROAURO, N.M.L. e CASTRO, C. M.B.; *Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos* 1989; 7,39.

MOLION, L. C. B. O buraco de ozônio: o outro lado da história. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*. V.16. n.1. jan-mar. 1992.

MOREIRA-NORDEMANN, L.M., BERTOLI, J.L.R., CUNHA, R.C. e PALOMBO, C.R. - Análise química preliminar das águas de chuva em Cubatão, *Impactos Ambientais, INPE-RPE* 2857 PRE/396, 1983.

NEFUSSI N. e GUIMARÃES, F.A. - *Curso de poluição do Ar e da Água*. Instituto Brasileiro do Petróleo, 116 pgs., 1976.

RODRIGUES, M. *Química moderna*. Rio de Janeiro: Ática. 2000. 132p.

SEINFELD, J.H.; *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Willey: New York, 1986.

TANIMOTO, A. H.; SOARES, P. S. *Substâncias destruidoras da camada de ozônio e sua Legislação*. Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2000.

TRIGGER, M. *Global ozone index*. Disponível em URL.: <<http://freespace.virgin.net/mike.trigger/ozone.htm>>. Acesso em 15 setembro 2003.

WORREST, R. C.; SMYTHE, K. D.; TAIT, A. M. Linkages between climate change and stratospheric e ozone depletion. In: *Global climate change linkages acid rain, air quality and stratospheric ozone*. New York. p. 67 – 78. 1990.

## **AGRADECIMENTOS**

Este capítulo foi possível graças ao apoio do CNPQ na forma de bolsa pós-doutoral do autor principal.