

Composição e Estrutura da Atmosfera

O meio ambiente global possui 4 domínios: a atmosfera, predominantemente gasosa; a hidrosfera, que engloba a massa líquida planetária; a litosfera, constituída de sua parte sólida; e a biosfera, dos seres vivos. Mas esse meio ambiente não surgiu do nada, ao contrário, resulta de extraordinárias mudanças ocorridas ao longo do tempo, que a ciência procura desvendar e explicar.

David Eliot Brody e Arnold R. Brody, em "As Sete Maiores Descobertas Científicas da História", descrevendo o Big-Bang, que deu origem ao universo, afirmam:

"Há 15 bilhões de anos, houve uma titânica explosão cósmica que encheu o espaço de radiação eletromagnética, a qual se propagou por todos os cantos do universo. Essa radiação moveu-se pelo espectro e deixou seus fracos remanescentes, que hoje podem ser discernidos por radiotelescópios. De um ponto distante e minúsculo nesse 'vácuo imenso, frio, universal', somos tomados por espanto e humildade ao descobrir 'o brilho desaparecido da origem dos mundos'".

Uma tentativa de resumir a história do surgimento da atmosfera de nosso planeta, dentro do grande processo de transformação que se deu após a explosão do ovo cósmico na Criação do mundo, poderia resultar num quadro cronológico como o que se segue:

Período	Evento
5 bilhões de anos atrás	Formação da Terra
Primeiros 500 milhões de anos	Atmosfera densa emergiu do vapor e dos gases expelidos durante a desgaseificação do interior do planeta: o hidrogênio (H_2), o vapor d'água (H_2O), o metano (CH_4) e óxidos de carbono.
4 bilhões de anos atrás	Formação da hidrosfera, resultando em oceanos de água, nos quais ocorreu sedimentação.
Antes de 3,5 bilhões de anos atrás	Atmosfera provavelmente consistia de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor d'água (H_2O), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2)

Assim, a formação da Terra é recente em relação à origem do universo. E o surgimento da atmosfera resultou da emersão de vapores e gases provindos do interior do planeta, predominando inicialmente o hidrogênio (H_2), a água (H_2O), o metano (CH_4) e óxidos de carbono. Até o período delimitado pelos estudiosos em 3,5 bilhões de anos atrás, o dióxido e o monóxido de carbono (CO_2 e CO), a água (H_2O), o nitrogênio (N_2) e o hidrogênio (H_2) já constituíam a atmosfera terrestre. A hidrosfera, por sua vez, somente se formou há cerca de quatro bilhões de anos, com o surgimento dos oceanos.

Pode-se definir a atual atmosfera terrestre como o envoltório que cerca a Terra, composto de gases *permanentes*, dentre os quais se destacam o nitrogênio (N_2), com 78%, e o oxigênio (O_2) com 21%, e outros de concentrações variáveis, como o vapor d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2). A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) publica na Internet uma definição de atmosfera que se

assemelha bastante com a acima apresentada, mas que acrescenta algumas observações interessantes. Parece conveniente resumi-la, num quadro suficientemente didático, para comparação e análise.

A ATMOSFERA é uma mistura relativamente estável de várias centenas de tipos de gases de diferentes origens. Esse envoltório gasoso abraça o planeta e gira com ele. Tem a massa de cerca de $5,15 \times 10^{21}$ tons., ligadas à Terra pela atração gravitacional.
As proporções de gases, excluído o vapor d'água, são proximamente uniformes até cerca de 80 km acima da superfície da Terra. Os principais componentes dessa região, por volume, são o oxigênio (21 %), o nitrogênio (78%) e o argônio (0,93%).
Pequenas quantidades de outros gases também estão presentes. Esses traços restantes de gases (gases raros) existem em tão pequenas quantidades que são medidos em termos de razão de mistura, definida como o número de moléculas do gás dividido pelo número total de moléculas do volume.
O ₃ , CO ₂ e CFCs são medidos em partes por milhão por volume (ppmv), partes por bilhão por volume (ppbv) e partes por trilhão por volume (pptv).

As Camadas da Atmosfera

É conveniente estudar separadamente as regiões da atmosfera, podendo ser divididas segundo suas temperaturas.

A atmosfera se estende por centenas de quilômetros, da superfície do planeta até o ambiente interplanetário. Seu limite exterior, a *exosfera*, a 960/1000 km da superfície da Terra, é a zona de transição da atmosfera terrestre com o espaço interplanetário.

Seus extremos são, portanto, bastante complexos: os diversos materiais que formam os continentes; a extensa planície oceânica, sujeita a oscilações e transportes, em muitas escalas; e, no limite exterior, a aparente indefinição dos contornos.

A área gasosa que envolve o planeta está dividida em várias camadas esféricas concêntricas, separadas por estreitas zonas de transição. A parte inferior da atmosfera é a *troposfera*, que sofre constante redução da temperatura até o início da tropopausa, mais ou menos a 10 Km, onde as temperaturas chegam a cerca de -60°C. Na troposfera ocorre a maior parte dos fenômenos que definem o tempo meteorológico, até porque nela se situam três quartos do peso de toda a atmosfera: os movimentos das massas de ar, a formação de sistemas como as frentes frias e quentes, os centros de baixa e alta pressão.

Essa primeira camada, do ponto de vista químico, é homogênea. É a região mais baixa da atmosfera e, nela a temperatura geralmente diminui com a altitude. Entretanto, algumas vezes, nas camadas pouco espessas da troposfera, a temperatura aumenta com a altitude, e neste caso ocorre uma inversão térmica. Com exceção do vapor d'água, dos gases solúveis e das partículas sólidas e líquidas, seus principais componentes possuem concentrações estáveis. A heterogeneidade fica por conta de componentes secundários, devidos inteiramente ou em grande escala à ação humana. A *tropopausa*, limite superior da troposfera, é uma faixa isotérmica, de transição.

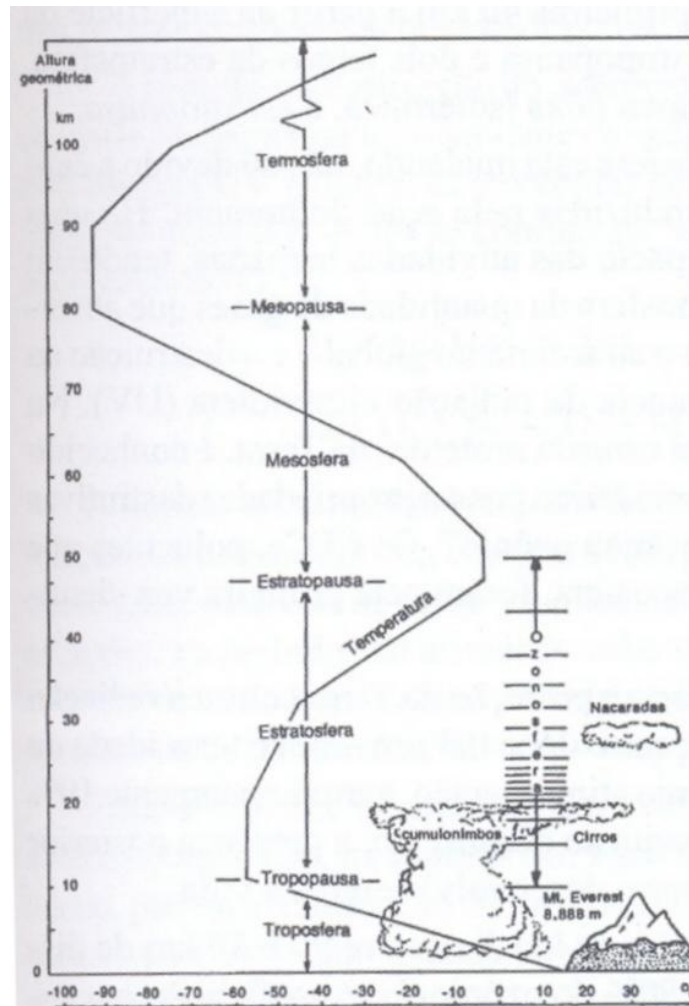


Fig. I-I – Estrutura vertical da atmosfera. [Fonte: Vianello & Alves (1991), p.30].

Camadas	Características
Troposfera	Instável, pesada, quimicamente homogênea. Até 10 Km (-60°C)
Tropopausa	Isotérmica
Estratosfera	Estável. De 20 até 50 Km (0°C). Ozonosfera
Estratopausa	Isotérmica
Mesosfera	Instável. Até 80 Km (-90°C). Ionosfera: de 70 a 80 Km
Mesopausa	Isotérmica
Termosfera	Aumento progressivo de temperatura e formação de plasma.
Exosfera	Região atmosférica mais distante da superfície da Terra.

A seguir vem, até cerca de 50 km, a *estratosfera*, cuja taxa de variação vertical de temperatura é positiva, isto é, a camada se aquece com a altitude, chegando a cerca

de 0°C; este fato a torna extremamente estável, praticamente sem movimentos ascendentes.

As temperaturas, nas partes altas da estratosfera, são tão elevadas assim próximo da superfície da terra. Deve-se isto ao fato de que, nestas camadas, o ozônio absorve a radiação ultravioleta do sol. Nestes níveis, a atmosfera é muito pouco densa e, portanto, a radiação solar se transfere a um número relativamente pequeno de moléculas, fazendo com que sua energia cinética aumente muito, e deste modo a temperatura do ar se eleva.

Logo, esta energia térmica é transportada para baixo pela radiação e subsidência. Por conseguinte, a estratosfera possui, em suas camadas superiores, uma fonte de calor, em contraste com a troposfera que é aquecida principalmente por baixo.

Os fenômenos meteorológicos observados na estratosfera são muito diferentes dos da troposfera. Há menos convecção na estratosfera, já que sua parte superior é quente, enquanto que a inferior é fria.

A presença da chamada *ozonoesfera* nesta segunda camada constitui um mecanismo térmico importante na configuração do perfil vertical de temperatura. Acrescenta-se, ainda, que mais de 99% do total da massa atmosférica estão concentrados nos primeiros 40 km a partir da superfície da Terra, o que envolve a troposfera, a tropopausa e dois terços da estratosfera. Ao final da estratosfera, surge uma nova faixa isotérmica, a *estratopausa*.

A composição química da atmosfera está mudando, não só devido a causas naturais mas também a outras, induzidas pela ação do homem. Há uma crescente preocupação quanto ao impacto das atividades humanas, tendo em vista dois aspectos: o aumento na atmosfera da quantidade de gases que absorvem calor - os quais contribuem para o aquecimento global - e a destruição da camada de ozônio, que protege o planeta da radiação ultravioleta (UV). A presença do ozônio na estratosfera é essencial ao nosso bem-estar, já que ao absorver este gás uma grande quantidade das mortíferas radiações ultravioletas emitidas pelo sol permite ao homem viver sobre a superfície da terra. Na estratosfera, o ozônio, que forma uma camada protetora da Terra, é conhecido como o "bom ozônio". Já o ozônio troposférico possui propriedades destrutivas e, por isso, recebe a denominação de "mau ozônio". Os CFCs, poluentes que destroem a camada de ozônio na estratosfera, foram pela primeira vez identificados em 1973.

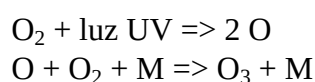
A quantidade de ozônio necessária à proteção da Terra contra a radiação letal UV - de comprimentos de onda entre 0,2 e 0,3 μm - deve ter a idade de 600 milhões de anos. O nível de oxigênio atingia, então, aproximadamente 10% da concentração atual e a vida era restrita ao oceano. Foi a presença posterior de ozônio que permitiu aos organismos o desenvolvimento e a vida.

A camada de ozônio estratosférico se localiza entre 20 e 30 km de distância da superfície e detém cerca de 90% do ozônio da atmosfera. A concentração de ozônio, aí, é da ordem de 10 partes por milhão por volume (ppmv), se comparada com os 0,04 ppmv do ozônio troposférico. O bom ozônio absorve o grosso da radiação UV na faixa de comprimento de onda entre 0,29 e 0,32 μm , evitando que tal radiação atinja o ácido nucleico das células. Além disso, o aumento da radiação UV na superfície da Terra provoca prejuízos à vida, vegetal e animal, podendo causar doenças ao homem.

Junto à superfície, no ar que respiramos, o ozônio é um poluente prejudicial, que

causa danos aos tecidos pulmonares e às plantas e é, como já se disse acima, considerado o "mau ozônio". Este é um poderoso oxidante fotoquímico, causando graves danos a borrachas e plásticos, bem como a toda vida vegetal: animal. Ele reage com hidrocarbonetos e gasolina evaporada por automóveis para formar poluentes orgânicos secundários tais como aldeídos e cetonas, produzindo elementos ofensivos para os olhos e a garganta. Elevada concentração de ozônio associa-se a sistemas de alta pressão quentes e lentos, contendo de 30 a 50 ppbv. Oxidantes fotoquímicos provocam grandes perdas agrícolas: danos à vegetação e às colheitas. Ozônio puro ou combinado a dióxido sulfúrico (SO₂) e dióxido de nitrogênio (NO₂) chega a ser responsável por 90% das perdas de colheitas devidas à poluição do ar.

A criação e a destruição do ozônio ocorre na estratosfera tropical superior, onde incide a maior quantidade de radiação UV. Quanto à criação, raios de alta energia UV atingem as moléculas de O₂ e as dividem em dois átomos de oxigênio livre (O). Estes se combinam com as moléculas de O₂ para formar moléculas de O₃:



A habilidade do ozônio para absorver radiação UV também causa sua destruição: a molécula de O₃ exposta à energia UV, pode voltar a ser O₂ + O. Por outro lado, os níveis de ozônio mudam devido aos ciclos naturais regulares: as estações, os períodos de atividade solar e as variações na direção do vento. A concentração do bom ozônio é também afetada por eventos isolados que injetam materiais na estratosfera como erupções vulcânicas.

Forma-se sobre a Antártica um vórtice estacionário de ar estratosférico extremamente frio, na noite polar. Esse ar, que permanece durante todo o inverno, provoca a formação de nuvens estratosféricas, as quais aceleram a destruição do ozônio, fornecendo ao processo as necessárias superfícies de cristal de gelo. Depois do inverno polar, o ozônio dentro do vórtice é muito vulnerável à luz do Sol e, por isso, as maiores perdas de ozônio ocorrem na primavera. No hemisfério sul, elas ocorrem acima da Antártica, criando o famoso "buraco do ozônio".

Sobre o Ártico, a perda de ozônio não é tão grande quanto na Antártica, uma vez que o vórtice desfaz-se e refaz-se por diversas vezes durante a estação de inverno. Várias massas de ar podem penetrar na noite polar e, assim, acabam por provocar também a perda de ozônio, tanto quanto o único vórtice no sul. Mas a química atmosférica das duas regiões é semelhante.

A instabilização provocada pelo aquecimento da baixa *mesosfera* orienta o perfil desta terceira camada, cuja temperatura diminui na direção vertical e chega a cerca de -90°C. Ao final desta, entre 70 e 80 Km, a concentração de íons constituirá a *ionosfera*, que favorece a comunicação em ondas-rádio na superfície da Terra. A ionização cria novo estado da matéria, conhecido como *plasma*. Nova faixa isotérmica, a *mesopausa*, e, em seguida, a *termosfera*, que se caracteriza pelo aumento progressivo de temperatura e estará cada vez mais desprovida de matéria. A composição da atmosfera na termosfera

é distinta, já que, devido aos efeitos dos raios ultravioleta e dos raios X emitidos pelo sol, as moléculas de um grande número de gases se separam, ficando, portanto, livres dos átomos que as constituíam.

Na termosfera, a ionização é de suma importância, pois os íons e os elétrons podem permanecer separados durante um período de tempo relativamente longo. Isto não se produz na mesosfera senão durante o dia. Sob ação de altas pressões da troposfera, a união de partículas com carga elétrica positiva é ainda mais fácil.

As regiões da termosfera e da mesosfera caracterizadas por ionização constituem a ionosfera. A importância da ionosfera está no fato de que os elétrons, em particular, refletem as ondas radioelétricas.

A seguir, vem a *exosfera*, cujos limites se situam entre 960 a 1000 km da superfície terrestre, como os da própria atmosfera, na região interplanetária.

A densidade da atmosfera diminui cada vez mais à medida que a altitude aumenta. A partir de 500 ou 600 km de altitude aproximadamente, a atmosfera é tão pouco densa que as colisões entre as partículas neutras são extremamente raras. Logo, na exosfera as moléculas e os átomos neutros podem ser considerados como projéteis balísticos em miniatura. Alguns sobem e depois caem, outros entram em órbita em volta da terra, e outros escapam da atmosfera e permanecem no espaço interplanetário. Já os movimentos das partículas que possuem uma carga elétrica (isto é: íons e elétrons) estão controlados pelo campo magnético terrestre.

As camadas atmosféricas se caracterizam por diferenças na composição química, as quais produzem variações de temperatura. O quadro abaixo especifica o controle que os gases raros, também conhecidos como gases nobres, exercem sobre a temperatura da atmosfera.

HÁ EVIDÊNCIAS de que gases raros ambientalmente importantes estão variando devido a fatores naturais e causados pelo homem.
Exemplos de gases produzidos pelo homem são os CFC-11 e CFC-12 e os halons.
Dióxido de carbono, óxido nitroso e metano são produzidos pela queima de combustíveis fósseis, expelidos pela biomassa viva ou morta e liberados por processos metabólicos de microorganismos, no solo, nas terras úmidas e no oceano de nosso planeta.

Grandes desvios da composição química da camada superficial ocorrem nas altitudes acima de cem quilômetros. Depois da mesopausa, o oxigênio atômico se torna rapidamente a mais importante partícula neutra da atmosfera. Em alturas ainda maiores, o oxigênio neutro é substituído pelo hélio e, finalmente, pelo hidrogênio, na região em que a atmosfera terrestre se confunde com o gás interplanetário [Holland (1978)].

Como um reservatório, a atmosfera guarda semelhanças com o oceano: ambos são razoavelmente homogêneos e o *tempo de residência* da maioria de seus constituintes é muito menor que a idade da Terra. Mas, enquanto os oceanos preservam essa característica em todo o conjunto, a atmosfera apresenta sensíveis heterogeneidades acima do nível de cem quilômetros. E, embora sua massa completa esteja virtualmente abaixo desse nível, os processos que ocorrem acima dele são importantes para a química do planeta como um todo, porque são críticos para o escape do hidrogênio e do hélio, os quais, como acima citado, constituem 99% do universo como um todo.

No mar, o desequilíbrio químico se deve, principalmente, à lentidão de reações

entre 0 e 30°C. Já na atmosfera, essa fonte de desequilíbrio é aumentada pelos distúrbios devidos à radiação solar. Na alta atmosfera, por exemplo, a presença de radicais livres e a geração de gases quimicamente instáveis mais importantes do ponto de vista biológico, como o ozônio, são devidas em grande parte ao fluxo *de fótons energéticos* provenientes do Sol [Holland (1978)]. A seguir apresentam-se os principais constituintes da atmosfera:

Constituintes não-variáveis do ar atmosférico (Fleagle e Businger, 1980)	
Constituinte	Conteúdo (% por volume)
Nitrogênio – N ₂	78,084
Oxigênio – O ₂	20,948
Argônio – Ar	0,934
Neônio – Ne	1,818 x 10 ⁻³
Hélio – He	5,24 x 10 ⁻⁴
Metano – CH ₄	2 X 10 ⁻⁴
Criptônio – Kr	1,14 X 10 ⁻⁴
Hidrogênio – H ₂	0,5 X 10 ⁻⁴
Xenônio - Xe	0,087 x 10 ⁻⁴

Constituintes variáveis do ar atmosférico (Fleagle e Businger, 1980)	
Constituinte	Conteúdo (% por volume)
Vapor d'água – H ₂ O	0 a 7
Dióxido de carbono – CO ₂	0 a 0,033
Ozônio – O ₃	0 a 0,01
Dióxido de enxofre – SO ₂	0 a 0,0001
Dióxido de nitrogênio – NO ₂	0 a 0,000002

Tab. I-I - Principais constituintes do ar. [Fonte: Vianello & Alves (/991), p. 25].

A massa da atmosfera chega a ser 10⁶ vezes menor que a parte sólida da Terra; além disso, sua densidade é cerca de 10³ vezes menor que a das rochas. Essa característica do ar que circunda a Terra é devida, principalmente, à natureza gasosa dos principais elementos que a constituem: gases raros ou nobres; compostos de carbono; oxigênio, hidrogênio e seus compostos; nitrogênio e seus compostos; além dos compostos sulfúricos.

Entre estes componentes, ressaltam os chamados *gases permanentes*, com tempo de residência maior do que 10⁶ anos, como o nitrogênio, o oxigênio, o argônio, o neônio, o hélio, o criptônio e o xenônio.

A água exerce, na Terra, importante papel termorregulador. Na atmosfera, a princípio como vapor d'água, mas também sob as formas líquida e sólida, como nuvem ou como precipitação, este elemento fundamental define um ciclo próprio, o *ciclo hidrológico*, com os oceanos e as vias continentais aquáticas.

Por último, vale lembrar, ainda, o papel desempenhado pela atmosfera como intermediária na produção da vida. A *fotossíntese*, fixando nitratos e fosfatos sobre a clorofila, dá partida ao *ciclo da vida*, que termina com a degradação da matéria orgânica. Tal matéria servirá para a reprodução dos componentes químicos originais, os quais possibilitarão a constante renovação do processo.