

# Espalhamento de Luz na Atmosfera

*Para o Curso de Física da Poluição do Ar FAP346, 2º Semestre/2006*

*Prof. Américo Sansigolo Kerr*

*Monitora: Maria Emília Rehder Xavier*

## 1. Propriedades Ópticas dos Aerossóis - introdução

A luz pode ser absorvida ou espalhada por partículas. O espalhamento pode ter diferentes abordagens teóricas, segundo o tamanho das partículas. O espalhamento Rayleigh equaciona o problema para partículas  $\ll 0,05 \mu\text{m}$ . O espalhamento Mie é solução genérica das equações de Maxwell para partículas esféricas, sendo útil para a faixa de tamanho entre  $0,05$  e  $100 \mu\text{m}$ . Para partículas acima de  $100 \mu\text{m}$ , a abordagem mais conveniente é da óptica geométrica, utilizando-se as teorias da reflexão, refração e difração de luz.

Partículas negras absorvem a luz. As cores das partículas expressam os comprimentos de onda da luz que elas refletem. Já as nuvens espalham a luz de forma difusa. Quando são pouco carregadas elas têm um brilho claro. No entanto, nuvens carregadas podem assumir cores enegrecidas, não porque absorvam significativamente a luz, mas porque o espalhamento que provocam é tão grande que retiram a luminosidade de nossa linha de visão.

A luz visível apresenta comprimentos de onda na faixa entre  $0,4$  a  $0,7 \mu\text{m}$ , correspondendo às luzes violeta e vermelho, respectivamente. A relação entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ), com a frequência ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), é  $c = \lambda f$ . O índice de refração ( $m$ ) é dado pela relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio em questão ( $v_p$ ), ou seja,  $m = c/v_p$ . Quando o índice de refração incorpora a absorção da luz, ele assume forma complexa:  $m = m'(1 - a.i)$ .

O estudo das propriedades ópticas dos aerossóis, dentre outras coisas, tem permitido o desenvolvimento de uma série de instrumentos de medida de tamanho e concentração de partículas na atmosfera. Oferecem a vantagem de serem sensíveis, permitirem medidas em tempo real e sem contacto físico com as partícula.

## 2. Alguns fenômenos de espalhamento tratados por óptica geométrica

Há alguns fenômenos de espalhamento de luz na atmosfera relacionados com a interação da luz com partículas grandes ( $\gg 100 \mu\text{m}$ ). Boa parte deles pode ser explicada com base na óptica geométrica. Indicaremos brevemente alguns deles.

- 1) **Arco Iris.** É o efeito de luz mais conhecido. Pode ser equacionado considerando a refração e a reflexão múltiplas de luz em uma gota de água de chuva. A figura-2.1 mostra uma foto de um arco-iris bem definido, onde pode-se, inclusive, observar o arco de segunda ordem, no canto superior esquerdo da figura. A figura 2.2 mostra as posições relativas entre o sol, a chuva,



Figura 2.1 Arco iris 1ª e 2ª ordens (Lynch and Livingston, 1995).

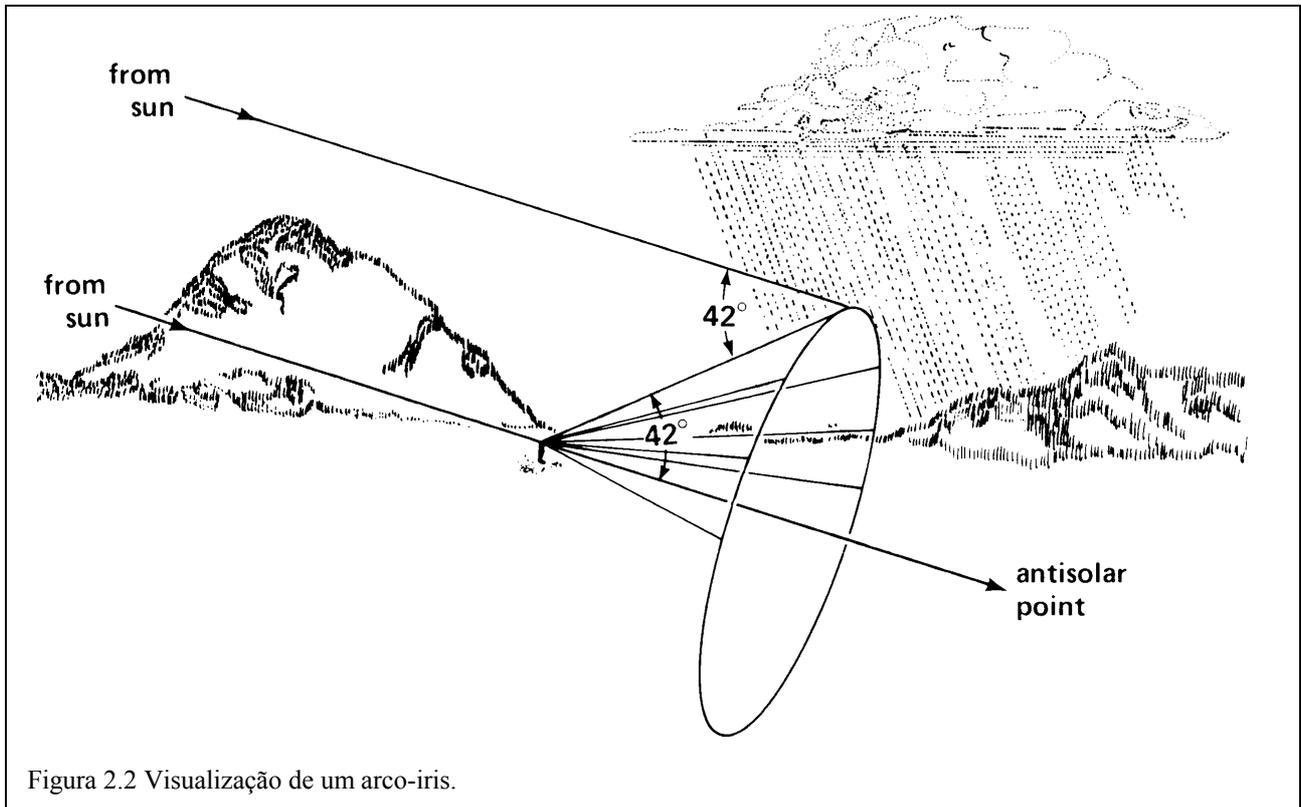


Figura 2.2 Visualização de um arco-iris.

o observador (no vértice do cone) e o arco-iris (base do cone). Já a figura 2.3 ilustra a refração e reflexão de um raio luminoso (P) que origina a imagem de primeira ordem e outro (S) que origina a imagem de segunda ordem (O- observador; H – horizonte; ASP – ponto anti-solar; ⊕ - posição do sol). Note-se que a ordenação das cores na primeira e segunda ordem têm sentido opostos. Ao mesmo tempo a intensidade da segunda ordem é mais fraca porque envolve uma reflexão adicional e, conseqüentemente, um ponto a mais por onde ocorre evasão de luz.

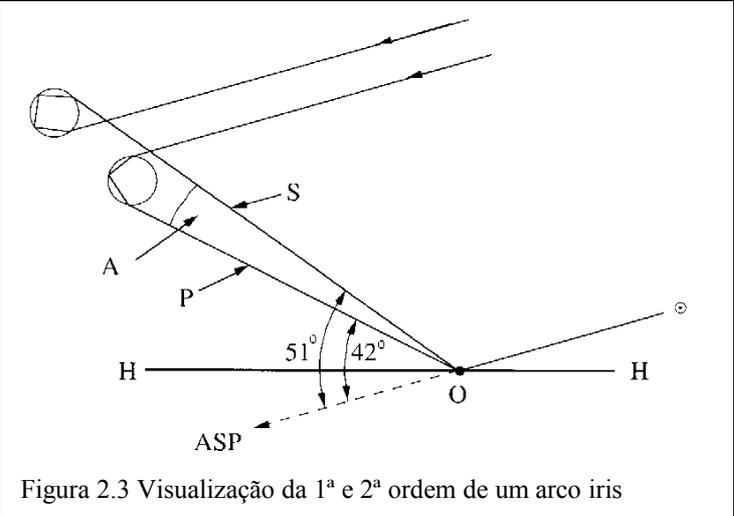


Figura 2.3 Visualização da 1ª e 2ª ordem de um arco iris

- 2) **Corona.** Separação de cores mais fraca e difusa que no arco-iris, em torno da imagem do sol ou da lua, e que ocorre por difração da luz destes astros por gotículas de nuvens finas ou de garoas.
- 3) **Glória.** Imagem similar à Corona, mas que se forma no ponto anti-solar, em torno da sombra de um corpo projetada sobre nuvem ou névoa. Observada raramente ao nível da superfície terrestre, é possível ser vista com relativa freqüência por passageiros de avião, quando a sombra da aeronave é projetada sobre uma nuvem. Pode ser explicada por interferência da luz retro-espalhada pelas bordas das gotículas de água. Sua explicação teórica envolve equacionamento sofisticado, como o espalhamento Mie (Bryant and Cox, 1966; Bryant and Jarmie, 1974). Nuzenswein (1979) também desenvolveu uma teoria para explicar este fenômeno.

- 4) **Halo.** Forma-se em torno da imagem do sol ou da lua por reflexão e refração da luz em cristais hexagonais de gelo em nuvens cirrus (altas). O mais comum são halos de 22° (ângulo do cone com o observador no vértice, observando o sol ou a lua frontalmente – atenção para não olhar diretamente para o sol sem proteção adequada).

### 3. Extinção

A absorção ou espalhamento da luz provoca, genericamente, o que chamamos de extinção da luz. Perceba-se que isso se processa de forma análoga aos diversos processos de absorção de radiação na natureza, ou seja, a taxa de redução da radiação com a espessura do material é proporcional à intensidade atual da radiação ( $I$ ):

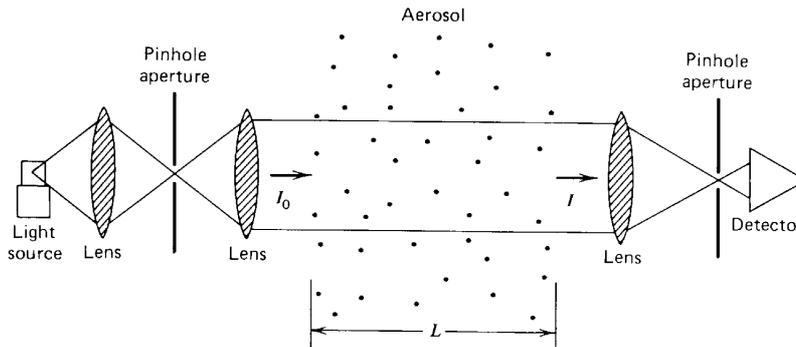


Figura 3.1 Esquema para medida do coeficiente de extinção.

$$\frac{dI}{dx} = -\sigma_e I \quad \text{E. 3-1}$$

Separando as variáveis distintas em cada lado da equação, tem-se

$$\frac{dI}{I} = -\sigma_e dx \quad \text{E. 3-2}$$

A integral da esquerda é  $\ln I$  e a da direita é simplesmente  $x$ . Considerando o intervalo de integração de 0 a  $x$  e exponenciando ambos os lados, temos:

$$I = I_0 \exp[-\sigma_e x] \quad \text{E. 3-3}$$

onde  $I_0$  é a intensidade no referencial inicial (no ponto 0), e  $\sigma_e$  é chamado de coeficiente de extinção. Esta expressão é chamada de Lei de Lambert-Beer ou Lei de Bourger.

A figura 3.1 apresenta um esquema para a medida da extinção.

O coeficiente de extinção tem duas componentes. Uma associada à absorção ( $\sigma_a$ ) e outra ao espalhamento ( $\sigma_s$ ) de luz:

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s \quad \text{E. 3-4}$$

Perceba-se que os  $\sigma$  dependem da composição e tamanho das partículas. Cada uma destas parcelas de  $\sigma$  são subdivididas em outras duas componentes ligadas a gases e a partículas:

$\sigma_{ag}$  - extinção por absorção de gases

$\sigma_{ap}$  - extinção por absorção em partículas

$\sigma_{sg}$  - extinção por espalhamento de gases

$\sigma_{sp}$  - extinção por espalhamento em partículas

Observe na tabela 3.1, como estes parâmetros podem variar quando se tem um dia limpo ou um dia carregado de poluentes. Neste caso observa-se a cidade de Los Angeles.

Tabela 3.1  $\sigma$  em  $m^{-1}$

$\lambda = 0,55 \mu m$	07/abril/83 ( $\times 10^{-4}$ )	25/agosto/83 ( $\times 10^{-4}$ )
$\sigma_{sp}$	0,259	4,08
$\sigma_{sg}$ (Rayleigh)	0,111	0,107
$\sigma_{sg}$ ( $NO_2$ )	0,012	0,030
$\sigma_{sp}$ (Carbono)	0,093	0,787
$\sigma_c$	0,475	5,00

Esta tabela é ilustrativa de uma série de conclusões que se tem acumulado sobre a extinção de luz na atmosfera.

1. As partículas contribuem com 60 a 95% da redução de visibilidade.
2. Partículas de sulfato geralmente representam o “espalhador” mais importante, seguido por C orgânico.
3. O carbono elementar contribui com 5 a 40% da redução de visibilidade (absorção e espalhamento)
4. O  $NO_2$  é pouco importante no contexto global, ainda que seja o gás que apresente maior absorção.
5. O carbono elementar é cerca de 3 vezes mais eficiente, na redução de visibilidade, que os sulfatos ou outros componentes.

### 3.1. Visibilidade

Ela indica a capacidade de um indivíduo conseguir distinguir um objeto contra um fundo. Neste caso é necessário definirmos primeiro o contraste entre o objeto e o fundo e depois verificar como ele se extingue na medida em que nos afastamos da posição inicial onde o objeto se encontra.

O contraste inicial (posição  $x = 0$ ) é definido como:

$$C_0 = \frac{B_0 - B'}{B'}$$

E. 3-5

Properties of Aerosols

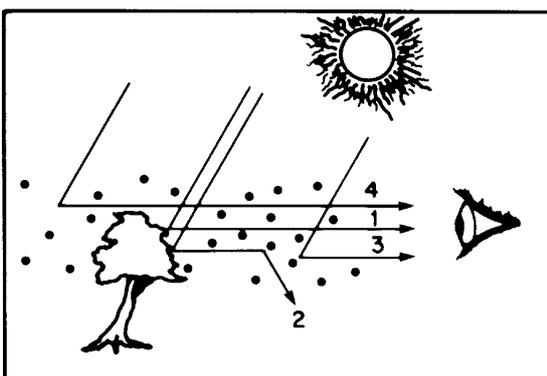


Figura 3.1.1

sendo os  $B_0$  a luminosidade do corpo e  $B'$  a luminosidade do fundo.

A figura 3.1.1, permite observar o que ocorre a medida em que nos afastamos do corpo. A luz do objeto sofrerá absorção e espalhamento, saindo da nossa linha de visão. Ao mesmo tempo, a luz do fundo também sofre espalhamento nas partículas que estão no percurso e entram na nossa linha de visão, introduzindo um brilho que ofusca a visão do objeto. A figura 3.1.1 permite observar um exemplo prático do que estamos falando.

Desta forma, na posição  $x$ , teremos duas componentes que nos fornecem a variação do contraste. Uma associada à extinção da luz do corpo e outro com a entrada da luz de fundo:

$$\frac{dB}{dx} = -\sigma_e B + \sigma_e B'$$

E. 3-6

Considerando que  $B'$  é um parâmetro uniforme em toda atmosfera, podemos tratá-lo como constante. Pode-se, então, fazer uma troca de variáveis [ $C=(B-B')/B'$  e, portanto,  $dC=dB/B'$ ] e fazer, como no caso anterior, a integração entre 0 e  $x$ , por separação de variáveis (termos em  $C$  de um lado e em  $x$  do outro). Obviamente resultado é similar ao da extinção, pois o que temos é, também, uma extinção do contraste ao longo do trajeto da luz na atmosfera. Assim,

$$C = C_0 \exp(-\sigma_e x)$$

E. 3-7

O limite de visibilidade que se pode obter na atmosfera, depende dos parâmetros que determinam o espalhamento da luz mas, também, vai depender da acuidade visual de cada indivíduo. Em média considera-se que a capacidade humana de discernimento entre fundo e objeto encontra-se na razão 0,02 entre  $C$  e  $C_0$ . A Fig. 3.1.2 ilustra a perda de visibilidade em uma paisagem.



Figura 3.1.2 Extinção de luz observada pela perda de intensidade das imagens de duas ilhas (a esquerda e a direita mais ao fundo) e uma sucessão de montanhas, cada vez mais distantes (Lago Maggiore, Belgirat, IT)

#### 4. Espalhamento Rayleigh

Esta modelagem para o espalhamento vale para partículas menores que  $0,05 \mu\text{m}$  (essencialmente gases). Entre  $0,05$  e  $100 \mu\text{m}$  usa-se o espalhamento Mie, que é um desenvolvimento geral para o espalhamento de luz em partículas esféricas, resolvendo-se o problema a partir da solução das equações de Maxwell (eg Liou, 1980). Acima de  $100 \mu\text{m}$ , costuma-se trabalhar com óptica geométrica, que é mais simples (item 2).

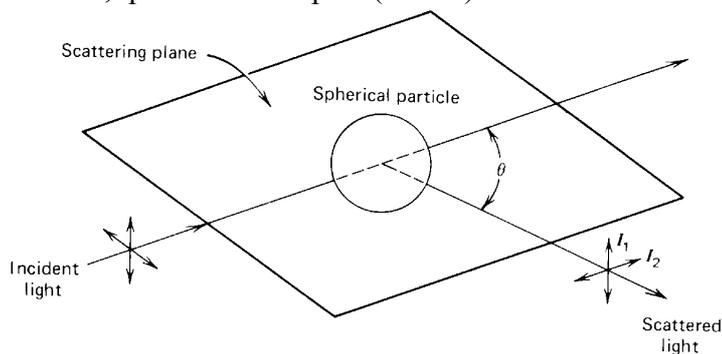


Figura 4.1

O espalhamento Rayleigh considera a partícula como um dipolo elétrico que é excitado pela incidência da luz (radiação eletromagnética) e que irradia, então, a luz segundo o padrão de excitação de um dipolo. A figura 4.1 permite observar o espalhamento de uma luz com um

componente polarizado paralelamente e outro perpendicularmente ao plano onde se estuda o espalhamento. A intensidade total  $I$ , da luz espalhada é dada por:

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) (1 + \cos^2 \theta) \quad \text{E. 4-8}$$

$d$  - diâmetro da partícula

$\lambda$  - comprimento de onda da radiação

$R$  distância da partícula ao ponto de observação

O termo  $\cos^2$  na parcela entre parêntesis dá conta da intensidade  $I_2$ , enquanto o termo 1 corresponde à intensidade  $I_1$ . Portanto, a polarização perpendicular ao plano ( $I_1$ ) é isotrópica, enquanto a paralela ao plano ( $I_2$ ) depende do ângulo  $\theta$ . A figura 4.2 ilustra graficamente cada uma das polarizações e a soma das duas (resultante).

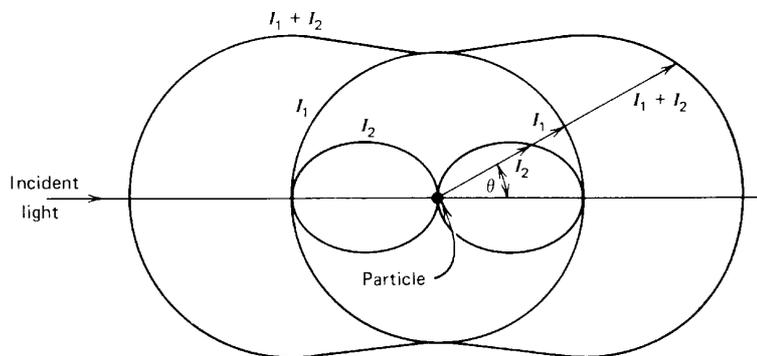


Figura 4.2

Note que a luz espalhada, tanto para frente quanto para trás tem a mesma característica da luz incidente. Todavia, a medida em que visualizamos a luz espalhada nos deslocando em direção à perpendicular ao eixo de incidência, há uma redução da intensidade  $I_2$  e a luz espalhada vai se polarizando progressivamente. Na perpendicular temos apenas  $I_1$ , ou seja, a luz espalhada tem polarização máxima nesta direção. Com os pressupostos teóricos sobre os quais deduz-se o espalhamento Rayleigh (partículas esféricas e com polarizabilidade isotrópica) a polarização é total. Mas com partículas (moléculas) reais, a taxa de polarização é de cerca de 0,94.

O espalhamento Rayleigh explica o azul do céu e o avermelhado do por do sol. Os raios de luz que observamos no céu são aqueles que sofreram um leve desvio em relação àqueles que vêm diretamente do sol. Note que se sairmos da atmosfera terrestre, por exemplo em um foguete, enxergaremos tudo negro em volta da imagem do sol, porque no vácuo não observamos espalhamento da luz. É a atmosfera terrestre quem espalha lateralmente a luz solar. Segundo E.4-8, este espalhamento depende de  $\lambda^{-4}$ . Como o  $\lambda$  do azul é menor que o do vermelho, ele é mais espalhado que este, chegando aos nossos olhos com maior intensidade. Já no por do sol, a camada de ar que fica entre nós e o sol é muito mais espessa. Neste caso o azul é tão espalhado que termina caindo fora de nossa linha de visão, que passa a receber maior intensidade de vermelho. Estas cores que observamos ainda são o resultado da intensidade de cada linha no espectro solar que chega à terra e da sensibilidade de nossos olhos para cada cor. De outro modo enxergaríamos o céu violeta, pois esta cor é ainda mais espalhada que o azul.

## 5. Bibliografia

---

- Bryabt H. C. and Cox A. J. (1966). Mie Theory an the nuvens, Journal of the Optical Society of America, 56, 1529.
- Bryabt H. C. and Jarmie, N. (1974). The glory, Atmospheirc Phenomena: readings from Scientific American, W.H. Freeman and Company (1980), pp 72-80.
- Hidy, G. M. (1975). Summary of the California Aerosol characteirzation experiment, Journal of Air Pollution Control Associatio, **25**, 1106-1114.
- Hinds, Willian C., (1982) Aerosol Technology, properties behavior, and measurement of airborne particles, John Wiley & Sons.
- Larson, S.; Cass, G.; Hussey, K.; Luce, F.; (1984). Visibility Model Verification by Image Processing Techniques, final reporte to Stato of California Air Resources Board under Agreemente A2-077-32.
- Linch, David K. and Livingston, William (1995). Color and Light in Nature, Cambridge University Press.
- Liou, Kuo-Nan (1980). An introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, inc.
- Nussenzveig, H. M. (1979). Complex Angular Momentum Theory of the Rainbow and the Glory, Journal of the Optical Society of America, 69, 776.
- Seinfeld, John H.; Pandis, Spyros N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons.
- Willekc, K. and Whitby, K.T., (1975). Atmospheric Aerosols: size distribution interpretation, Journal of Air Pollution Control Association, **25**, 529-534.