

## ESTUDO DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA NA TRANSMISSÃO DO ESPECTRO SOLAR

Isadora Tairinne de Sena Bastos<sup>1</sup>, Germano Pinto Guedes<sup>2</sup>

1. Bolsista PROBIC-UEFS, Graduando em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: isadoratairinne@gmail.com;

2. Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: germano@uefs.br

**PALAVRAS-CHAVE:** Espectro solar, absorção atmosférica, funções de transmissão

### INTRODUÇÃO

A radiação solar ao atravessar atmosfera terrestre sofre inúmeras interações com as partículas e gases que a compõem sendo, assim, atenuada por múltiplos espalhamentos e/ou absorções que causam uma alteração no espectro solar extraterrestre dando-lhe a cada instante uma forma característica com linhas e bandas de absorção, como uma impressão digital, compatível com a concentração de cada um dos seus componentes opticamente ativos como ilustra a Figura 1.

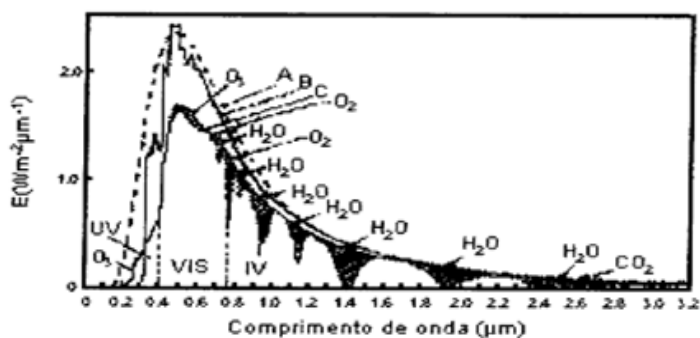


Figura 1: (A) Espectro de emissão de um corpo negro a 6.000K; (B) Irradiância solar no topo da atmosfera; (C) Irradiância solar ao nível do mar.

O espectro solar resultante dessas interações pode ser obtido de duas maneiras: ou através de medidas utilizando um espectrômetro na superfície terrestre ou pode ser calculado, por intermédio de modelos de transmissões atmosféricas a partir de um espectro extraterrestre e das concentrações de gases e partículas que produzam absorções e/ou espalhamentos. De uma maneira ou de outra, poderemos verificar na aparência final que o espectro medido/calculado sofre principalmente a influência de alguns componentes atmosféricos, como os gases de gás carbônico, ozônio e água ( $CO_2$ ,  $O_3$  e  $H_2O$ , respectivamente) e, obviamente, da variação da massa de ar ( $AM$ ) – caminho ótico que essa radiação atravessa na atmosfera – que concorrem com os processos de absorção e/ou espalhamento da radiação direta. Nosso objetivo principal é poder monitorar a variação de alguns componentes atmosféricos, tais como  $O_3$  e  $H_2O$ , através do efeito que estes elementos causaram no espectro extraterrestre, registrados nas suas respectivas linhas de absorção.

O modelo de transmissão atmosférica SPCTRAL2 (Bird, 1986) traz a expressão para o cálculo da radiação direta em função do comprimento de onda  $\lambda$ , como um aprimoramento da lei de Beer-Lambert, para cada um dos componentes opticamente ativos da atmosfera que atenuam a intensidade do espectro pois considera cada uma das suas funções de transmissão individualmente. Assim, a intensidade solar na superfície da terra  $I_{d\lambda}$  para o comprimento de onda  $\lambda$  é calculado pela expressão

$$I_{d\lambda} = H_{0\lambda} \cdot D \cdot T_{r\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot T_{W\lambda} \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \quad (1),$$

onde,  $H_{0\lambda}$  é o espectro da radiação extraterrestre,  $D$  é o fator para correção da distância Terra-Sol,  $T_{r\lambda}$ ,  $T_{a\lambda}$ ,  $T_{w\lambda}$ ,  $T_{o\lambda}$  e  $T_{u\lambda}$  são funções de transmitância da atmosfera no comprimento de onda  $\lambda$  para espalhamento Rayleigh, atenuação por aerossóis, absorção por vapor d'água, absorção por ozônio e absorção por gases uniformemente misturados, respectivamente.

Neste trabalho apresentaremos o comportamento dessas funções de transmissão com a massa de ar, com a concentração do gás ou particulado e com o comprimento de onda que está sendo analisado.

## METODOLOGIA

Estudamos os mecanismos básicos de absorção e de espalhamento da radiação, incluindo a Lei de Beer-Lambert que descreve a atenuação da radiação por mecanismos de espalhamento e absorção considerando os efeitos espectrais e é base de alguns modelos de transmissão atmosférica. Analisamos também como as coordenadas solares, em especial, o ângulo zenital, está diretamente ligado à quantidade de radiação que chega a superfície terrestre ao longo do dia. Posteriormente analisamos o modelo de transmissão atmosférica SPCTRAL2 e para entendê-lo criamos algoritmos para analisar o comportamento de cada uma das funções de transmissão.

Analisando parte da equação (1) dada pelo SPCTRAL2 temos que a massa de ar relativa é definida por Kasten (1966):

$$AM = M = [\cos Z + 0.15 \cdot (93.885 - Z)^{-1.253}]^{-1} \quad (2),$$

onde o termo no denominador adicional ao  $\cos Z$  dá conta da dimensão finita da massa de ar, eliminando a descontinuidade para  $Z=90^\circ$  (pôr do sol).

A expressão usada para a transmissão atmosférica do espalhamento Rayleigh é:

$$T_{r\lambda} = \exp \left\{ -M' / [\lambda^4 (115.6406 - 1.335/\lambda^2)] \right\} \quad (3),$$

onde  $M'$  é a massa de ar corrigida pela pressão  $M' = M \cdot (p/p_0)$ , onde  $p_0 = 1013$  mb e  $p$  é a pressão na superfície medida em milibar. E a expressão de transmissão por aerossóis é dada por:

$$T_{a\lambda} = \exp(-\tau_{a\lambda} \cdot M) = \exp(-\beta_n \cdot \lambda^{-\alpha} M) = \exp(-\tau_{0,5} (\lambda/0,5)^{-\alpha} \cdot M) \quad (4),$$

onde  $\tau_{a\lambda}$  é um fator de turbidez, ou seja, profundidade ótica dos aerossóis em um caminho vertical. Os coeficientes  $\beta_n$  e  $\alpha$  (adimensionais) dependem da saturação e do tamanho, respectivamente, dos aerossóis presentes no meio, estão relacionados às condições de visibilidade ( $km$ ). No resultado final da equação 4 ela é expressa em termos de profundidade ótica de aerossóis no comprimento de onda  $0,5 \mu m$ .

A expressão de transmissão para o vapor de água é dada por:

$$T_{w\lambda} = \exp \left[ (-0,2385 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M / (1 + 20,7 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M)^{0,45}) \right] \quad (5),$$

onde  $W$  é a coluna (comprimento) de vapor de água precipitável ( $cm$ ) em um caminho vertical e  $a_{w\lambda}$  é o coeficiente de absorção por vapor de água como uma função do comprimento de onda; e a expressão de transmissão para o ozônio é dada por:

$$T_{o\lambda} = \exp(-a_{o\lambda} \cdot O_3 \cdot M_o) \quad (6),$$

onde  $a_{o\lambda}$  é o coeficiente de absorção do ozônio,  $O_3$  é a concentração de ozônio ( $atm.cm$ ) e  $M_o$  é a massa de ar específica para o ozônio (Bird, 1986).

$$M_o = (1 + h_0/6370) / [\cos^2(Z) + \frac{2h_0}{6370}]^{0,5} \quad (7),$$

onde  $h_0$  é a altura máxima de concentração de ozônio, que é aproximadamente 22km.

A expressão para a transmissão dos gases uniformemente misturados utilizada é:

$$T_{u\lambda} = \exp \left[ -1.41 \cdot a_{u\lambda} \cdot M' / (1 + 118.93 \cdot a_{u\lambda} \cdot M')^{0,45} \right] \quad (8),$$

onde  $a_{u\lambda}$  é a combinação de um coeficiente de absorção e uma quantidade gasosa.

As expressões usadas para calcular os coeficientes nas Equações (5), (6), e (8) foram propostas por Leckner (1978). Maiores detalhes relativos às constantes utilizadas no modelo SPCTRAL2 podem ser encontrados na referência Bird (1986).

Este projeto pretende, utilizando o método de inversão, estabelecer uma rotina para determinar a concentração desses componentes atmosféricos opticamente ativos na atmosfera, similar ao usado por Soares (2010), que utilizando os espectros do sol medidos na superfície da terra e fora da atmosfera terrestre, analisa as linhas de absorção destas substâncias e inverte os processos propostos pelo modelo SPCTRAL2, utilizando um algoritmo computacional. Inicialmente, para os primeiros testes das rotinas, utilizaremos espectro solar padrão para *AM0* (Bird, 1986) e espectros solares medidos diariamente pela estação *Solar Radiation Reseahch Laboratory* (EUA) que apresentam claramente as bandas de absorção dos elementos em estudo.

## RESULTADOS

Na análise do modelo de transmissão atmosférica vemos que as funções de transmissão do espalhamento Rayleigh e dos gases uniformemente misturados variam somente com a *AM* percorrida e o comprimento de onda que está sendo analisado. A Figura 2.a apresenta a transmitância dos gases uniformemente misturados segundo a calculada usando a Equação 8. Podemos perceber claramente a forte absorção do oxigênio ( $O_2$ ) na faixa de 760nm, que é um dos gases uniformemente misturados.

Um dos gases analisados separadamente é o ozônio, cuja transmitância, calculada com a Equação 6, é apresentada na Figura 2.b para diferentes massas de ar. Pode-se observar que função de transmissão do ozônio para uma determinada concentração, varia com a massa de ar (*AM*, conseqüentemente com o ângulo zenital), e com o coeficiente de absorção do ozônio para cada comprimento de onda. Percebe-se também na Figura 2.b que a absorção do ozônio é muito forte no ultravioleta (~280nm) o que resulta na transmissão da radiação solar quase nula nesta região.

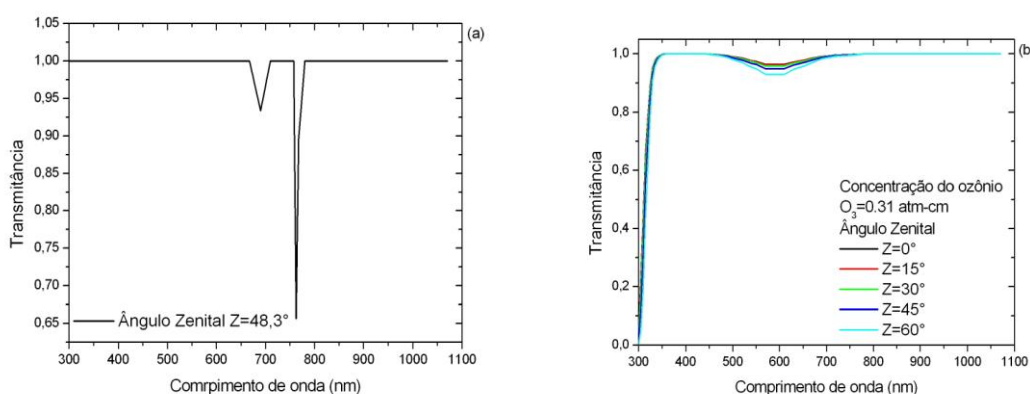


Figura 2 – (a) Transmitância dos gases uniformemente misturados na atmosfera terrestre e (b) Transmitância do ozônio na atmosfera terrestre para uma concentração de  $O_3=0,31\text{atm-cm}$  e variando a massa de ar com o ângulo zenital.

Ainda na Figura 2.b, percebe-se que a variação, ao longo do dia, da coordenada solar zenital (*Z*) altera a quantidade de radiação que chega à superfície terrestre. Por exemplo, variando-se o caminho ótico, de  $Z=0^\circ$  ( $AM=1$ ) até  $Z=60^\circ$  ( $AM=2$ ), na análise da transmissão do ozônio, observa-se um decréscimo na transmitância de aproximadamente 3,55% da região de 593nm. De maneira similar, quando analisamos a transmitância do vapor de água na região de 937nm, para os mesmos ângulos zenitais, ocorre uma queda de aproximadamente 28,38%, como mostrado na Figura 3.b.

A variação da concentração do vapor de água e da *AM* percorrida pela radiação ao longo do dia influencia fortemente na intensidade de radiação que é transmitida. Como mostrado na Figura 3.a: aumentando em 312,5% a concentração do vapor de água (de  $w=0.64$  para  $w=2.0$ ), temos um decréscimo de aproximadamente 31,76% na transmissão da radiação na faixa próxima a 937nm.

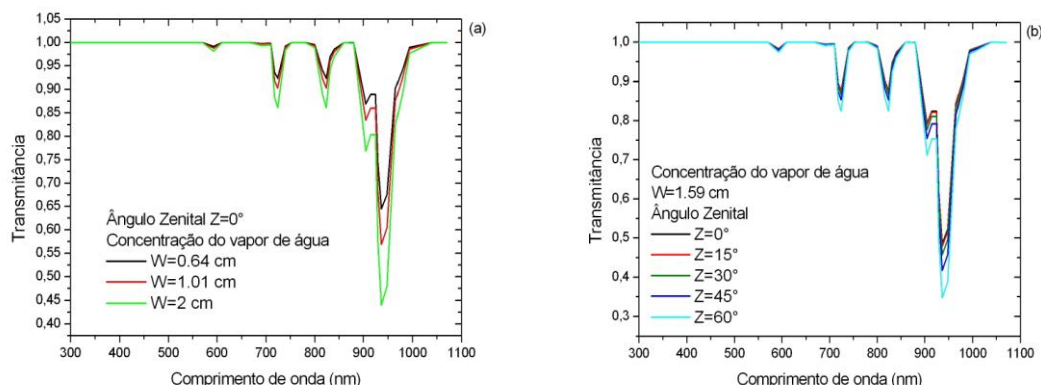


Figura 3- Transmitância do vapor de água na atmosfera terrestre: (a) para  $AM=1$  e diferentes concentrações do vapor de água e (b) para a concentração do vapor de água  $w=1,59\text{cm}$  e diferentes massas de ar ( $AM$ ) ou ângulo zenital.

Da mesma forma que as funções de transmissão apresentadas anteriormente, a função de transmissão por aerossóis e espalhamento Rayleigh (Equações 3 e 4, respectivamente) são analisadas e serão apresentadas.

## CONCLUSÃO

Cada molécula, por possuir diferentes ligações químicas e modos de vibração, pode apresentar diferentes espectros de absorção com linhas, bandas ou até mesmo um espectro contínuo. Cada molécula, no entanto, deixa a sua marca particular no espectro solar que atinge a superfície da terra.

O estudo dos mecanismos de espalhamento da radiação na atmosfera nos permitiu entender que o espalhamento *Rayleigh* depende fortemente do comprimento de onda da radiação incidente ( $\approx \lambda^4$ ), diferentemente do espalhamento por aerossóis que é proporcional ao tamanho e saturação das partículas em suspensão na atmosfera.

O efeito de todas as absorções e espalhamentos supracitados influenciam na radiação que chega a superfície terrestre, como mostrado na Figura 1. Podemos também observar que de acordo com a  $AM$  percorrida e a concentração de componentes opticamente ativos na atmosfera terrestre podemos analisar qual tipo de radiação chega a superfície terrestre e pode influenciar na qualidade de vida na terra.

## REFERÊNCIAS

- [1] BIRD, R. E., and Riordan, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, vol.25, 1986, pp. 87-97.
- [2] KASTEN, F., "A New Table and Approximate Formula for Relative Optical Air Mass," **Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol.**, Ser. B14, 1966, pp. 206-223.
- [3] LECKNER, B., "The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface-Elements of a Model," **Solar Energy**, Vol. 20, 1978, pp. 143-150.
- [4] SOARES, A, E, B, A., Método de inversão para determinação de concentrações de vapor d'água, ozônio e aerossóis na atmosfera, a partir de sinais de um radiômetro de leds, em tempo real. **Dissertação de mestrado**, 2010 UFBA.
- [5] *Solar Radiation Reseahch Laboratory*, disponível em: [http://www.nrel.gov/midc/srll\\_bms/](http://www.nrel.gov/midc/srll_bms/). Acesso em 20/09/2010.