

# RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – ESTIMATIVAS DETERMINADAS ATRAVÉS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E OZÔNIO ATMOSFÉRICO

*Pes, M. P.<sup>1,2</sup>; Guedes, M.<sup>1,2</sup>; Bertagnolli, R. F.<sup>1,2</sup>; Fiorin, D. V.<sup>1,2</sup>; Guarnieri, R. A.<sup>3</sup>; Martins, F.R.<sup>3</sup>; Pereira, E. B.<sup>3</sup>; Schuch, N. J.<sup>1</sup>.*

**RESUMO:** O Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o Setor de Energia (SONDA) é um projeto coordenado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE – MCT), e foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a base de dados ambientais, necessária para o levantamento de recursos renováveis e o planejamento do uso das energias solar e eólica no território brasileiro. O SONDA conta com estações em diferentes regiões do país, equipadas com medidores de radiação solar, vento e dados meteorológicos. Os equipamentos da estação SONDA de São Martinho da Serra (RS) operam juntamente com os sensores de radiação ultravioleta e ozônio do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA – UFSM/INPE) no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT; Lat.: 29,44°S, Lon.: 53.82°O). Esse trabalho consiste na determinação de modelos lineares simples para estimativa de radiação UV-B (radiação ultravioleta do tipo B), com base em dados de radiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa e medidas de coluna total de ozônio atmosférico efetuadas pelo satélite TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*). A radiação ultravioleta é responsável por diversos danos biológicos, dentre eles câncer de pele e problemas oculares. Os modelos foram determinados por método de regressão linear múltipla.

**ABSTRACT:** The National Organization System of Environmental Data for the Energy Sector (SONDA) is a project coordinated by the Brazilian Center of Weather Forecast and Climate Studies (CPTEC/INPE - MCT). This project was created aiming to improve the environmental database, required for the assessment of renewable resources and for the exploration of solar and aeolic energy resources in the Brazilian territory. The SONDA project is composed by a network of stations equipped with sensors for measurement of solar radiation, wind and meteorological data. A SONDA station installed at São Martinho da Serra – RS (south Brazil) has its equipments installed with the ultraviolet radiation and ozone meters of the Atmospheric Ozone Monitoring Program (PMOA – UFSM/INPE), on a platform located in the Southern Space Observatory (OES/CRSPE/INPE - MCT; Lat.: 29,44°S, Lon.: 53,82°O). This study comprises the fitting of simple linear models to be used for the solar UV-B radiation estimation, based on data of global solar radiation, photosynthetically activate radiation (PAR) and measurements of total atmospheric ozone column accomplished by the TOMS satellite (Total Ozone Mapping Spectrometer). Ultraviolet radiation causes several biological damages, including skin cancer and ocular problems. The models were fitted by the multiple linear regression method.

**Palavras-chave:** radiação solar, radiação ultravioleta, ozônio.

---

<sup>1</sup> Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT - Caixa Postal 5021 - CEP 97110-970 – Santa Maria (RS), Brasil, (55)3220-8021, (marcelo, guedes, rafaelb, danielfiorin, njschuch)@lacesm.ufsm.br.

<sup>2</sup> Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT –UFSM , cooperação INPE – UFSM.

<sup>3</sup> CPTEC/INPE, Av. Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos (SP), (12)3945-6738, (ricardog, eniobp)@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br.

## INTRODUÇÃO

O comprimento de onda de uma radiação eletromagnética é inversamente proporcional à quantidade de energia de seus fótons, ou seja, quanto maior o comprimento de onda maior a quantidade de energia contida na radiação. Essa informação é expressa pela seguinte equação:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

em que  $E$  é a energia de um fóton,  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência de radiação, que corresponde ao quociente da velocidade da luz  $c$  pelo comprimento de onda  $\lambda$ . O espectro eletromagnético é dividido em faixas de comprimentos de onda que recebem nomes específicos. O Sol emite energia em várias dessas “faixas”, principalmente radiação ultravioleta (10-400 nm), radiação visível (400-700 nm) e infravermelho próximo (700-3000 nm) [1,2,3].

A radiação ultravioleta (UV) compreende os comprimentos de onda entre 10 e 400 nm e é comumente subdividida em radiação UV-C (100 a 280 nm), UV-B (280 a 320 nm) e UV-A (320 a 400 nm). A radiação UV-C é totalmente absorvida na interação com a atmosfera terrestre, sendo responsável pela formação do ozônio estratosférico ( $O_3$ ). A radiação UV-B sofre absorção pelo ozônio atmosférico, e a intensidade com que atinge a superfície terrestre é dependente principalmente da quantidade de ozônio na atmosfera. Por fim, a radiação UV-A sofre pouca atenuação e atinge a superfície em maior abundância [4]. A importância da radiação solar ultravioleta (UV) e seus impactos em seres humanos foram discutidos extensivamente durante as últimas duas décadas. Embora a radiação UV represente uma porção pequena do espectro solar, sua disponibilidade espacial e temporal é de grande importância, devido aos danos causados em muitos sistemas biológicos, como por exemplo: rompimento de proteínas (em especial o DNA), queimaduras solares, câncer de pele e catarata em humanos, perdas de produtividade e outros efeitos destrutivos em plantas, dentre outros [4].

A redução do ozônio na atmosfera causada por várias substâncias químicas elevou o monitoramento da radiação UV a um novo nível de importância em pesquisa ambiental. Não obstante, os níveis de radiação UV dependem de vários outros parâmetros atmosféricos e de superfície, além da quantidade de ozônio: a massa de ar atravessada pela radiação solar direta (que depende do ângulo zenital solar e da altitude de local de observação), processos de atenuação atmosférica (aerossóis, por exemplo), e condições meteorológicas, em especial a nebulosidade [4]. Embora esses fatores afetem diferentemente a radiação solar ultravioleta e visível, ambas as formas de radiação dependem fortemente da ocorrência de nuvens, e apresentam um comportamento temporal bastante semelhante, responsável por fortes correlações entre as integrais diárias de energia dessas duas formas de radiação. Este trabalho consiste em determinar modelos lineares simples que

relacionem a quantidade de radiação UV-B incidente na superfície terrestre com medidas de radiação solar total e radiação PAR (*photosynthetically active radiation*, ou, radiação fotossinteticamente ativa) disponibilizadas pelos sensores do projeto SONDA, bem como medidas de coluna total de ozônio realizadas por satélite.

## **METODOLOGIA**

Os dados de radiação solar total e radiação PAR utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir da estação de referência SONDA situada no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT), em São Martinho da Serra - RS (Lat. 29,44°S, Lon. 53,82°O). A radiação global (direta + difusa) incidente à superfície, abrangendo aproximadamente todo o espectro solar (radiação solar total), é medida por um piranômetro *Kipp & Zonen CM 21*, sensível a uma faixa de comprimentos de onda entre 200 a 3600 nm. A radiação PAR, que corresponde à porção da radiação visível efetivamente empregada pelas plantas na realização da fotossíntese, é medida por um sensor *PAR Lite Kipp & Zonen*. Ambos os equipamentos efetuam medidas a cada 1 segundo e armazenam médias dos dados a cada 60 segundos, totalizando 1440 medidas diárias.

Os dados de radiação UV-B empregados nos ajustes dos modelos (e na avaliação dos mesmos) foram coletados por um radiômetro *Eko Instruments MS-212W* que opera junto aos sensores do SONDA, na mesma plataforma de equipamentos, no OES. Este equipamento pertence ao PMOA – Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico – da cooperação UFSM/INPE. O sensor realiza médias a cada 5 segundos. Para as análises deste trabalho, todos os dados de radiação foram integrados e expressos em valores de energia total diária, em Joules por metro quadrado ( $Jm^{-2}$ ). O período de dados utilizados corresponde a 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2005.

Os dados da coluna total de ozônio atmosférico foram medidos pelo espectrômetro TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*), a bordo de satélite de sondagem da Terra pertencente ao *Goddard Space Flight Center – GFSC/NASA* (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov>). Os dados do TOMS são fornecidos em Unidades Dobson (UD), que correspondem à espessura, medida em unidades de centésimos de milímetros, que a coluna de ozônio ocuparia se submetida à temperatura e pressão padrões (273 K e 1 atm). Sobre a Terra, a coluna média de ozônio varia entre 290 e 310 DU [5].

Os modelos que relacionam os valores diários de UV-B com os valores diários dos demais dados, foram obtidos pelo método de regressão linear múltipla. Assim, as integrais diárias de UV-B foram tomadas como a variável dependente, enquanto radiação global, radiação PAR e ozônio são as variáveis independentes do modelo, ou, os preditores. O modelo geral de regressão linear múltipla é dado por:

$$Y = A + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + \dots + B_n \cdot X_n + \varepsilon \quad (2)$$

onde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são as variáveis independentes, e  $A, B_1, B_2, \dots, B_n$  são os parâmetros do modelo, sendo que os valores  $B_i$  são os coeficientes de cada preditor. O parâmetro  $A$  é o valor esperado para a variável dependente quando as variáveis independentes são iguais a zero, sendo considerada uma constante da equação. Assim, para este trabalho, a equação 2 pode ser expressa da seguinte forma:

$$UV-B = A + B_1 \cdot Global + B_2 \cdot PAR + B_3 \cdot Ozônio \quad (3)$$

Com base no conjunto de dados da variável dependente e das variáveis independentes, o modelo foi ajustado através do cálculo dos coeficientes da equação 3. Finalmente, com o uso desses coeficientes, a radiação UV-B pode ser calculada de forma simples a partir de um conjunto de observações de radiação global, PAR e ozônio. Além do modelo da equação 3, envolvendo todas as variáveis independentes disponíveis (Modelo 1), dois outros modelos foram ajustados excluindo-se variáveis independentes.

## RESULTADOS

Como mencionado anteriormente, a radiação UV-B é a variável dependente das regressões. Inicialmente, foi realizada a regressão linear múltipla com três variáveis independentes: radiação global, radiação PAR e ozônio. Em seguida, uma nova regressão foi realizada, excluindo-se a variável ozônio. Finalmente, uma regressão linear simples, utilizando como variável independente apenas a radiação global foi ajustada. Dessa forma foram obtidos três modelos diferentes em função do número de variáveis independentes usadas. Os parâmetros obtidos para cada modelo são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para as regressões lineares ( $UV-B = A + B_1 \cdot Global + B_2 \cdot PAR + B_3 \cdot Ozônio$ ) ajustadas para o Observatório Espacial do Sul. Todos os parâmetros ajustados são significativos a um nível de confiança de 95%.

Modelo	Constante (A)	Global ( $B_1$ )	PAR ( $B_2$ )	Ozônio ( $B_3$ )	Coef. Correlação (R)
1	5910,7074	-0,0034	0,0096	-29,7246	0,9822
2	-2374,5796	-0,0039	0,0108	–	0,9821
3	-1414,7442	0,0010	–	–	0,9587

Aplicando o modelo 1 ao conjunto de dados disponível, foram obtidas estimativas de radiação UV-B. A fim de verificar a validade do modelo 1, as estimativas de radiação UV-B foram comparadas com as medidas no diagrama de dispersão da Figura 3.1 ( $R = 0,9822$ ). O diagrama de dispersão da Figura 3.2 é resultado do modelo 2 ( $R = 0,9821$ ), ou seja, muito semelhante ao modelo 1, indicando a pequena influência da variável ozônio. Nas figuras 3.1 e 3.2, bem como na Figura 3.3 apresentada a seguir, a reta diagonal representa a previsão perfeita, isto é, o comportamento ideal para a distribuição dos pontos, quando as estimativas seriam iguais às medidas. Verifica-se para todos os modelos uma distribuição de pontos muito próxima da reta de previsão perfeita.

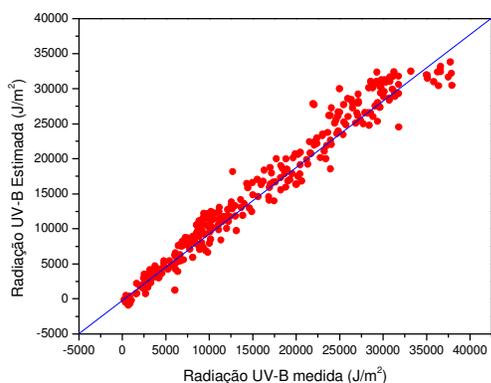


Fig. 3.1 – Correlação entre radiação UV-B medida e estimada pelo modelo 1.

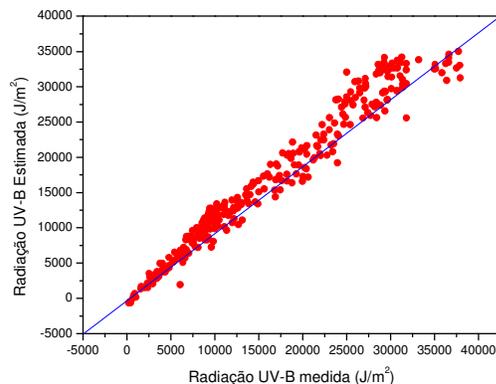


Fig. 3.2 – Correlação entre radiação UV-B medida e estimada pelo modelo 2.

Ao utilizarmos o modelo 3, o qual não possui as variáveis preditivas ozônio e PAR, o valor do coeficiente de correlação foi de 0,9587 (Figura 3.3).

A Figura 3.4 apresenta um gráfico de correlação entre medidas de radiação UV-B e ozônio, onde se verifica haver pouca correlação entre estas variáveis, muito embora a quantidade de ozônio influencie a radiação UV-B incidente. Esta baixa correlação explica porque a remoção da variável ozônio do modelo 1 para o modelo 2, não altera significativamente o coeficiente de correlação. Vale lembrar que a incidência de UV-B é muito mais dependente de outros fatores, como a nebulosidade, e, por esta razão, existe maior correlação entre UV-B e radiação global, do que entre UV-B e ozônio.

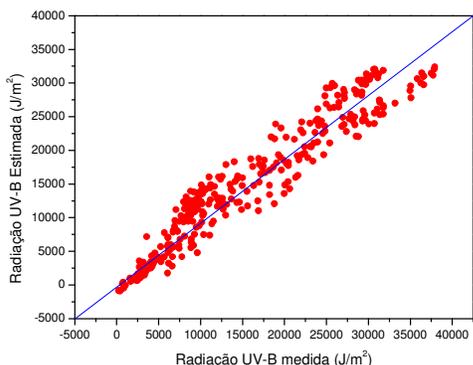


Fig. 3.3 - Correlação entre radiação UV-B medida e estimada pelo modelo 3.

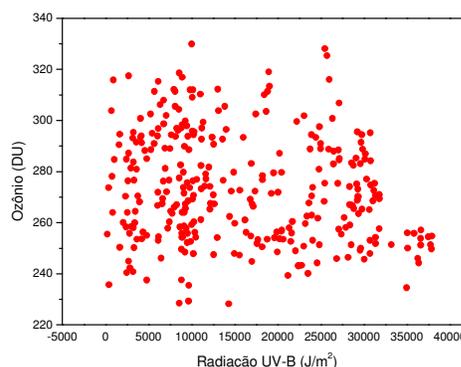


Fig. 3.4 – Comparação entre radiação UV-B medida e Ozônio.

## CONCLUSÃO

Com este trabalho, pode-se obter modelos simples para estimativa de radiação UV-B usando outras formas de radiação disponível, no caso radiação solar global, PAR, e dados da coluna total de ozônio atmosférico. Embora a espessura da camada de ozônio atmosférico influencie diretamente na intensidade de radiação UV-B de superfície, observamos que a correlação direta entre as duas

variáveis é fraca, em virtude de a radiação UV ser fortemente influenciada por outros fatores, como nebulosidade. Como a nebulosidade também influencia fortemente a radiação solar global, forte correlação foi observada entre radiação global e UV-B, de forma que uma pode ser empregada na estimativa da outra através de um modelo linear simples. Qualquer dos 3 modelos ajustados apresentaram coeficientes de correlação maiores do que 0,95, e observou-se que a inserção da coluna total de ozônio nos modelos pouco modificou o desempenho das regressões.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer a FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos - (projeto SONDA - 22.01.0569.00) através do Fundo Setorial de Energia – CT – ENERGEN pelo financiamento do Projeto SONDA. Ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT pelo estágio de M.P.P., e ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela concessão de bolsas de Iniciação Científica a M.G., R.F.B. e D.V.F.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Iqbal, M., **An Introduction to Solar Radiation**, Academic Press Canadá , Toronto, 1983, 390p.
2. Coulson, K. L.. **Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements**, New York, Academic Press, 1975, 322 p.
3. Hudson Jr., R. D. **Infrared System Engineering**, New York, John Wiley & Sons Inc., 1969, 642p.
4. C.P. Jacovides; V.D. Assimakopoulos; F.S. Tymvios; K. Theophilou. *Solar global UV (280-380 nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus*. Elsevier, **Energy** 31, 2006, 10p.
5. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC: **O Ozônio.**:  
<http://satelite.cptec.inpe.br/uv/Ozonio.html#Dobson>.