

RADIAÇÕES SOLARES ULTRAVIOLETA, FOTOSSINTÉTICA E INFRAVERMELHA: I – EVOLUÇÃO DIÁRIA DAS MÉDIAS HORÁRIAS ANUAIS

João F. Escobedo¹, Alexandre Dal Pai¹, Amauri P. Oliveira², Jacyra Soares², Eduardo N. Gomes¹

ABSTRACT – The work describes the daily evolution of the annual hourly UV, PAR and IV radiations for 3 years (2001-2003) in the city of Botucatu. Based on the analysis, the daily average annual hourly fractions $\langle \overline{K}_{UV}^h \rangle$, $\langle \overline{K}_{PAR}^h \rangle$ and $\langle \overline{K}_{IV}^h \rangle$ were determined and temporal equations were proposed with high R² determination coefficients values. By the MBE and RMSE statistical indicators, the validation showed that the temporal equations can be used with high precision to estimate the UV, PAR and IV radiations.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade energética, bem como das variações temporal e espacial das radiações solares Ultra-violeta-UV (0,29 a 0,385 μ m), fotossintética-PAR (0,385-0,700 μ m) e infravermelho-IV (0,700 - 3000 μ m) é importante em múltiplas áreas científicas e tecnológicas. Os estudos das variações temporal e espacial das radiações UV, PAR e IV impõem a realização de medidas em muitas localidades, privilégio este atualmente de poucos países da América do Norte e da Europa. No Brasil, não existe ainda uma rede de radiometria solar que permite cobrir estas condições, e o monitoramento das radiações UV, PAR e IV é restrito e efetuado separadamente em algumas Universidades (Assunção, 2003; Gomes, 2002), o que dificulta ainda mais o estudo em conjunto dessas radiações devido às diferenças climáticas locais. Com este propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu monitora simultaneamente as radiações UV, PAR e IV e GLOBAL com qualidade por meio de radiômetros solares de primeira classe e sistema de aquisição de dados automático desde 2000. A base de dados existente ainda não é grande o suficiente para obtenção das séries temporais, tendo em vista que estes tipos de estudos exigem intervalos de tempo acima de 5 anos. No entanto, a amostragem existente é suficiente para geração de médias que são capazes de mostrar as tendências, bem como permitir o desenvolvimento de modelos de estimativa em função da radiação global que podem ser utilizadas em outros locais de características climáticas similares. Assim, o objetivo do trabalho foi elaborar e analisar a evolução diária das irradiações UV, PAR e IV, bem como determinar os índices radiométricos $\langle \overline{K}_{UV}^h \rangle$, $\langle \overline{K}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{K}_{IV}^h \rangle$ por meio das médias horárias anuais.

MATERIAL E MÉTODOS

A Estação de Radiometria Solar de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m) monitora rotineiramente desde 2000 as radiações UV, PAR e IV, e a GLOBAL desde 1996. A irradiância GLOBAL (I_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a UV (I_{UV}) por um radiômetro CUV-3 da Kipp-

Zonen e IV (I_{IV}) através de um piranômetro PSP da Eppley com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 700 a 3000 μ m. A irradiância IV foi multiplicada por um fator de 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no fator de calibração do piranômetro. A irradiância PAR (I_{PAR}) foi gerada por meio da diferença entre as irradiância GLOBAL (I_G) e a soma das irradiâncias UV (I_{UV}) e IV (I_{IV}) na mesma frequência de aquisição das irradiâncias I_G , I_{UV} , I_{IV} . Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 300 leituras. A base de dados utilizadas na geração dos modelos temporais compreendeu os anos de 2001 a 2003.

As validações das equações temporais diárias foram efetuadas e analisadas por meio dos indicativos estatísticos MBE e RMSE, dado pelas equações:

$$MBE = \frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{N} \text{ e } RMSE = \left[\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{1/2}$$

onde y_i são os valores estimados, x_i os valores medidos e N o número de observações.

O desvio das médias MBE é um indicativo que fornece informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Quanto menor seu valor absoluto, melhor é sua performance. O RMSE fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a espalhamento dos dados em torno do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra a evolução diária das irradiações médias horárias: global, UV, PAR e IV na superfície terrestre e a irradiação média horária no topo da atmosfera em função de intervalo de tempo horário.

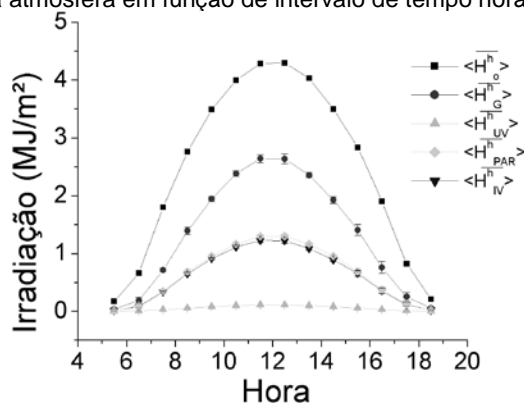


Figura 1. Evolução diária das irradiações extraterrestre, global, UV, PAR e IV médias horárias anuais.

Cada ponto da curva, plotado no intervalo médio das horas, representou a irradiação média de três anos $\langle \rangle$ das irradiações médias horárias anuais \overline{H}_i^h . A barra representa o desvio-padrão $\langle \delta \overline{H}_i^h \rangle$ da

¹ Depto. De Recursos Ambientais (Setor Ambientais), FCA, Univ. Estadual Paulista, Botucatu, Fazenda Experimental Lageado, CP 237, 18603-970, Botucatu, SP, Brazil. (escobedo@fca.unesp.br ; dalpai@fca.unesp.br ; engomes@fca.unesp.br)

² Depto de Ciências Atmosféricas – IAG/USP. (E-mail apdolive@usp.br ; jacyra@usp.br)

$\langle \overline{H}_i^h \rangle$. A evolução diária das irradiações $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle$, $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle$ é similar à evolução $\langle \overline{H}_G^h \rangle$. As variações temporais horárias das 4 irradiações foram bem comportadas, crescendo parabolicamente do início do dia até a passagem meridional, por onde passaram por um máximo, e decrescendo a seguir simetricamente nos mesmos níveis de energia antes do meio dia solar, até o por do sol. A evolução da $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle$ foi quase constante quando comparada às evoluções da $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle$. A aparência é devido à escala das irradiações que contempla com mais visibilidade os níveis de energia das irradiações GLOBAL, UV e IV que são consideravelmente mais elevadas que a irradiação UV.

Os níveis energéticos das três irradiações UV, PAR e IV contidas na irradiação global total foram maiores na ordem $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle$, $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle$ e $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle$. A diferença das energias horárias entre $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle$ é pequena na maioria dos intervalos horários e as duas são consideravelmente maiores que a $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle$. Para exemplificar, tomamos o intervalo horário das 11:30 h, onde ocorre os máximos das evoluções: $\langle \overline{H}_G^h \rangle = 2,637\text{MJ/m}^2$, $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle = 0,112\text{MJ/m}^2$, $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle = 1,297\text{MJ/m}^2$ e $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle = 1,228\text{MJ/m}^2$, com frações radiométricas de $\langle \overline{K}_{UV}^h \rangle = 4,25\%$, $\langle \overline{K}_{PAR}^h \rangle = 49,18\%$ e $\langle \overline{K}_{IV}^h \rangle = 46,57\%$. Na evolução total, nos intervalos horários das 7 às 16 h, as frações radiométricas se mantiveram-se aproximadamente constantes, conforme mostrados na figura 2.

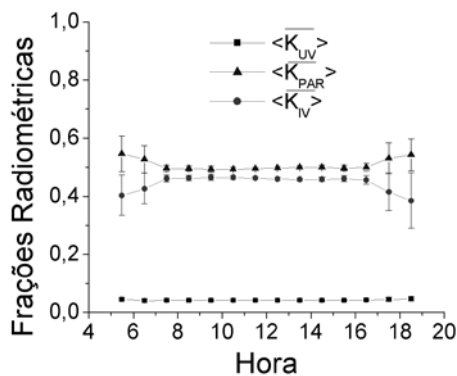


Figura 2. Evolução diária das frações radiométricas $\langle \overline{K}_{UV}^h \rangle$, $\langle \overline{K}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{K}_{IV}^h \rangle$.

Nos intervalos das 5 às 7h, as frações K_{PAR} e K_{UV} decresceram e K_{IV} cresce linearmente, enquanto que no intervalo horário das 16 às 19 h ocorre o inverso, as frações radiométricas K_{UV} e K_{PAR} crescem e K_{IV} decresce linearmente. Esses efeitos, verificados no início e final do dia com a radiação PAR, foram constatado por vários pesquisadores (Alados et al., 1996; Karalis, 1989) e devem-se à variação da massa ótica que quanto maior, aumenta a probabilidade de interação com o vapor d'água, que é mais acentuado nos horários extremos do dia.

Na integração diária das médias horárias da figura 1, obteve-se: $18,64\text{MJ/m}^2$ para GLOBAL; $0,78\text{MJ/m}^2$ para UV; $9,18\text{MJ/m}^2$ para PAR; e $8,68\text{MJ/m}^2$ para IV. As frações radiométricas obtidas a partir das

irradiações diárias foram: $\langle \overline{K}_{UV}^h \rangle = 4,18\%$, $\langle \overline{K}_{PAR}^h \rangle = 49,25\%$ e $\langle \overline{K}_{IV}^h \rangle = 46,57\%$, que somando, comprova a aditividade das irradiações UV+PAR+NIR, dando os 100% da GLOBAL.

As equações temporais $\langle \overline{H}_G^h \rangle$, $\langle \overline{H}_{UV}^h \rangle$, $\langle \overline{H}_{PAR}^h \rangle$ e $\langle \overline{H}_{IV}^h \rangle$, em função dos intervalos de tempo horário t, obtidos por meio de regressão polinomial, foram de 4ª ordem e estão apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Equações temporais diárias.

Equações Temporais Diárias (t em h)	R ²
$\langle \overline{H}_G^h \rangle = 16,047 - 7,500t + 1,190t^2 - 0,073t^3 + 0,0015t^4$	0,998
$\langle \overline{H}_{uv}^h \rangle = 0,715 - 0,331t + 0,052t^2 - 0,0032t^3 + 0,000067t^4$	0,999
$\langle \overline{H}_v^h \rangle = 7,970 - 3,713t + 0,588t^2 - 0,036t^3 + 0,00075t^4$	0,998
$\langle \overline{H}_{iv}^h \rangle = 7,350 - 3,451t + 0,550t^2 - 0,034t^3 + 0,00071t^4$	0,999

Os coeficientes de determinação R² próximos de 1 mostraram que as médias horárias das irradiações UV, PAR e IV foram bem correlacionadas com o intervalo tempo.

A validação foi efetuada a partir de uma base de dados do ano de 2004, independente dos dados utilizados na geração dos modelos temporais. Os indicativos MBE e RMSE obtidos a partir das medidas e as estimadas pelo modelo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Validação das Equações Temporais

	GLOBAL	UV	PAR	IV
MBE (%)	6,65	6,99	5,77	9,06
RMSE (%)	8,32	8,12	7,39	11,12

Os resultados positivos do indicativo MBE mostraram que os modelos temporais superestimam as medidas, sendo que os resultados foram melhores para a PAR, seguidos do IV, UV e Global. O nível de espalhamento da comparação entre medida e estimativa, mostrado pelo indicativo RMSE, foi na faixa dos 10%, considerado bons estatisticamente. As equações temporais diárias permitem a estimativa das irradiações GLOBAL, UV, PAR e IV com boa precisão.

REFERÊNCIAS

- Alados, I., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.78, p.121-31.
- Assunção, H. F. Modelo paramétrico para estimativa da radiação solar ultra-violeta. Tese de Doutorado, FCA, UNESP, 2003. 148p.
- Gomes, E. N. Medidas e modelos da Par global e direta na incidência horizontal. Dissertação de Mestrado, FCA, UNESP, 2002. 98p.
- Karalis, J. D., Characteristics of direct photosynthetically active radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.48, p.225-34.

Agradecimento: À FAPESP e CNPq.