

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA PARA AS FRAÇÕES SOLAR K_{UV} , K_{PAR} E K_{IV} EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE K_t , HORÁRIO, DIÁRIO E MENSAL

J.F. ESCOBEDO¹; E.N. GOMES¹; A. P. OLIVEIRA²; A. DAL PAI¹; J. SOARES²

¹FCA/Unesp Departamento de Recursos Naturais - Botucatu, SP, Brasil, e-mail: escobedo@fca.unesp.br

²IAG/USP, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, Brasil.

ABSTRACT: The objective of this work was to propose equations to estimate UV, PAR and IV fractions as function of the clearness index (K_t) in the hourly, daily and monthly partitions. The determination coefficients (R^2) showed high correlation among K_{UV} , K_{PAR} , K_{IV} and K_t . The MBE, RMSE, “d” of Willmott and “c” statistical indicators showed high precision in the validations.

RESUMO: Objetivou-se no trabalho o desenvolvimento de equações de estimativa horária, diária e mensal para as frações UV, PAR e IV da radiação global em função do índice de claridade. As equações de estimativa propostas apresentaram elevadas correlações nas partições diária e mensal, e satisfatória na horária. Na validação, os indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” de Willmott e índice de correlação “c”, mostraram bons resultados, podendo as equações ser utilizadas nas estimativas de UV, PAR e IV com boa precisão e exatidão.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade energética, 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), quer seja por meio de séries temporal e espacial, ou por modelos de estimativa, é importante em múltiplas áreas científicas e tecnológicas. A radiação UV vem sendo utilizada para provocar a decomposição de contaminantes industriais, fotodegradação de plásticos, e na saúde pública em problemas de formação de cataratas e câncer de pele. A PAR é essencial nos processos fotossintéticos, que são fundamentais nos estudos de fisiologia vegetal, caracterização e morfologia de plantas, documentação de variações temporais de plantas e produtividade de culturas. A radiação IV é a menos estudada, apesar da sua importância na interação com o vapor d’água na atmosfera. Na área biológica, o efeito da radiação IV nas plantas guarda importância tendo em vista que interfere no alongamento, floração, coloração dos frutos, e germinação das sementes.

As variações temporal e espacial das radiações UV, PAR e IV permitem à compreensão da sazonalidade durante o dia e ano, no entanto, os estudos das séries, 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. A segunda alternativa, o desenvolvimento de equações de estimativa para as radiações UV, PAR e IV em função da radiação solar global, também requer medidas temporais, porém é mais simples, tendo em vista que a radiação global é medida de rotina em uma rede meteorológica bastante significativa no Brasil. As equações de estimativa são de grande importância, pois podem ser utilizadas em outros locais de características climáticas similares nos programas de simulação de conversões térmica, fotovoltaica e biomassa. Esta técnica vem sendo empregada em muitos países, e tem como vantagem não necessitarem de radiômetros solares caros e de difícil aferição.

Com este propósito, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu monitora simultaneamente as radiações UV, PAR e IV e GLOBAL por meio de radiômetros solares de primeira classe e sistema de aquisição de dados automático desde o ano 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 cinco anos. No entanto, a amostragem é suficiente para geração de equações de estimativa em intervalos de tempo, que atenda as necessidades do uso da energia solar, específica da área e adequada a cada aplicação.

Assim, o objetivo do trabalho foi propor e validar equações de estimativa para as radiações UV, PAR e IV, em função da radiação solar global, nas partições horária, diária e mensal, através do modelo de Liu & Jordan (1960) que relaciona as frações das radiações UV, PAR e IV, da radiação global, representadas por K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} em função do índice de claridade K_t

MATERIAL E MÉTODOS:

A Estação de Radiometria Solar de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m), está inserida em ambiente rural e monitora rotineiramente desde 2000 as radiações UV, PAR e IV, e a GLOBAL desde 1996. De acordo com Cunha et al. (1999), o clima de Botucatu pode ser classificado de Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. O verão é úmido e o inverno é seco. A Figura 1 mostra a evolução anual dos acumulados mensais da precipitação e insolação medidos de 1971 a 2003.

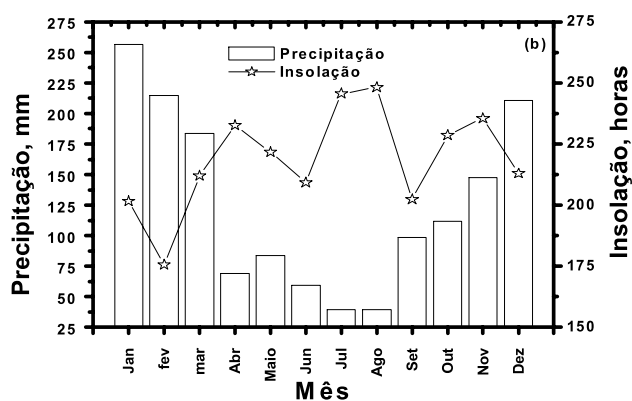


Figura 1. Evolução dos valores característicos do acumulado mensal da precipitação e da insolação para Botucatu, SP.

A irradiância GLOBAL (I_G) é 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 é 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}) é gerada por meio da diferença entre as irradiâncias 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 das equações temporais das evoluções diária e anual, bem como na geração das equações de estimativa em função da radiação global compreenderam os anos de 2001 a 2003, e a validação com os dados de 2004.

As validações das equações temporais diária e anual, das irradiações médias horárias e médias mensais diárias foram efetuadas e analisadas por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE de Iqbal (1983), “d” de Willmott (1982) e “t” de Stone (1993) são expressos:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|y_i - \bar{y}| + |x_i - \bar{x}|)^2}$$

$$t = \left[\frac{(N-1) * MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde y_i são os valores estimados, x_i os valores medidos, N o número de observações, $|y_i - \bar{y}|$ representa o valor absoluto da diferença $y_i - \bar{y}$, e $|x_i - \bar{x}|$ é o valor absoluto da diferença $x_i - \bar{x}$.

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. A raiz quadrada do desvio quadrático médio 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 2 mostra as relações entre as frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função da fração K_t^h na partição horária, e as equações de estimativa obtidas por meio de regressão linear, com seus respectivos índices de correlação (r) estão apresentadas no quadro 1. As frações foram obtidas através das relações $K_{UV}^h = H_{UV}^h / H_g^h$; $K_{PAR}^h = H_{PAR}^h / H_g^h$; $K_{IV}^h = H_{IV}^h / H_g^h$.

Os pequenos valores dos índices de correlação das equações de estimativa do quadro 1 mostram que as variações das frações horárias K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h estão pouco relacionadas com as variações da fração K_t^h dentro do intervalo de 0 a 1.

O resultado menos favorável foi para a radiação UV ($r=-0,38673$), onde a equação linear mostra que a estimativa depende fortemente do coeficiente linear ($a=0,051$) e pouco do coeficiente angular ($b=0,0134$).

A evolução entre as frações horárias K_{UV}^h e K_t^h é praticamente uma constante em toda intervalo de variação de K_t^h . A fração horária da irradiação UV não depende da transmissividade atmosférica (K_t^h), principalmente quando o intervalo dos dados das irradiações UV e global é anual com K_t^h variando continuamente sob todas as coberturas de céu ($0 \leq K_t^h \leq 1$).

Intervalos de tempo de dados menores, tais como estacionais, sazonais e mensais podem mostrar com mais precisão a dependência climática da fração K_{IV}^h em relação a K_t^h . Outra alternativa seria particionar o índice de claridade K_t^h em função do tipo de cobertura.

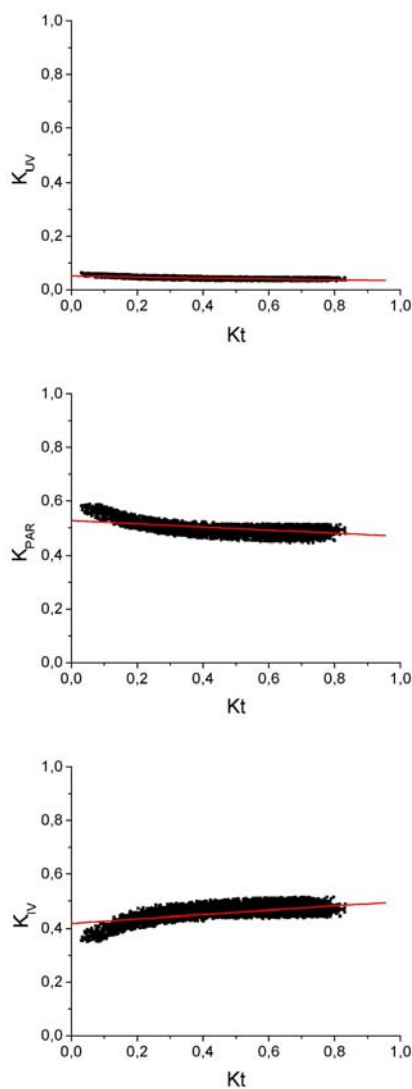


Figura 2: Relações horárias entre as frações horárias K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função de K_t^h .

Quadro 1: Equações de estimativa para K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h à partir de K_t^h , e seus respectivos índices de correlação (r).

Frações	Equações de Estimativa	r
K_{UV}^h	$K_{UV}^h = 0,051 - 0,0134K_t^h$	-0,38673
K_{PAR}^h	$K_{PAR}^h = 0,535 - 0,0662K_t^h$	0,51533
K_{IV}^h	$K_{IV}^h = 0,410 - 0,0861K_t^h$	0,52270

Para as frações K_{PAR}^h e K_{IV}^h os índices de correlação são medianos ($r=0,51533$ e $0,5227$, respectivamente), e as equações lineares de estimativa de K_{PAR}^h e K_{IV}^h expressam uma razoável dependência de K_t^h .

A equação de estimativa K_{PAR}^h apresenta um coeficiente angular negativo, e portanto a fração K_{PAR}^h é decrescente em todo o intervalo de K_t^h , no sentido da transmissividade máxima, e a

equação de estimativa de K_{IV}^h , que possui coeficiente angular positivo é crescente quando a fração K_t^h tende a transmissividade máxima. O fator responsável pela ocorrência dos coeficientes angulares das duas retas é atribuído a cobertura atmosférica nebulosa (com baixa transmissividade), caracterizada pelo intervalo de $K_t \leq 0,35$.

Os resultados dos índices de correlação para as três frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h sugerem outros tipo de correlação, que não a linear, tendo em vista que os efeitos verificados em função da cobertura do céu nebuloso, parcialmente nublado e aberto tendem a tornas as evoluções das frações do tipo parabólica.

A figura 3 mostra as relações entre as frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d à partir de K_t^d , obtidas por meio de regressão linear, com seus respectivos índices de correlação (r) apresentados no quadro 2.

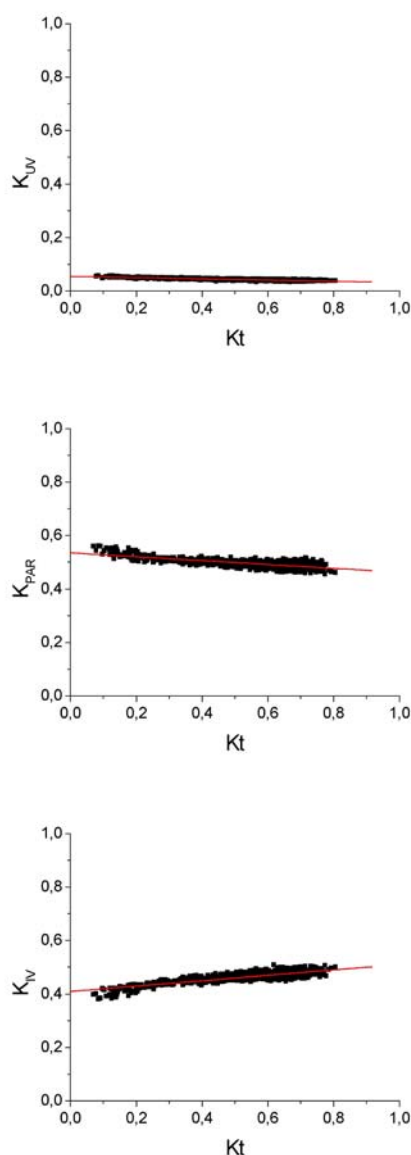


Figura 3: Relações horárias entre as frações horárias K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d .

Quadro 2: Equações de estimativa para K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d à partir de K_t^d , e seus respectivos índices de correlação (r).

Frações	Equações de Estimativa	r
K_{UV}^d	$K_{UV}^d = 0,0545 - 0,0223K_t^d$	-0,8677
K_{PAR}^d	$K_{PAR}^d = 0,5343 - 0,0725K_t^d$	0,7700
K_{IV}^d	$K_{IV}^d = 0,4100 - 0,0991K_t^d$	0,8441

Os índices de correlação das equações de estimativa mostram que as variações diárias das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d estão bem relacionadas com a variação da fração K_t^d , no intervalo de 0 a 1. Os resultados foram melhores na seqüência K_{UV}^d , K_{IV}^d e K_{PAR}^d , cujos valores evidenciam a dependência das frações K_{UV}^d , K_{IV}^d e K_{PAR}^d com a cobertura de céu. As frações K_{UV}^d e K_{PAR}^d são decrescentes quando K_t^d cresce no sentido da máxima transmissividade atmosférica, e a fração K_{IV}^d evolui contrariamente a K_{UV}^d e K_{PAR}^d , crescendo no sentido de K_t^d . Com base nos processos de interação de absorção e difusão da radiação com na atmosfera, as evoluções K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d estão coerentes, sendo que no intervalo de K_t^d inferior a 0,35, as radiações UV e PAR, por serem mais energéticas, são menos absorvidas pela atmosfera, constituída de nuvens e vapor de água, e mais difundidas pelos aerossóis, enquanto que a radiação IV, por ser de baixa energia é mais fortemente absorvida pelo vapor de água na atmosfera, reduzindo a fração K_{IV}^d na superfície terrestre. No intervalo de K_t^d superior a 0,65, a cobertura de céu é limpa, sem nuvens, e de baixa concentração de vapor de água. Com isso, a interação das radiações UV e PAR ocorrem por conta dos aerossóis, que são de elevada concentração, e difundem as radiações em outras direções, reduzindo a transmissão para a superfície terrestre, enquanto que a radiação IV aumenta proporcionalmente ao decréscimo de UV e PAR, devido a ausência do vapor de água, pois quanto mais seca e limpa a atmosfera, maior é a fração K_{IV}^d na superfície terrestre.

No quadro 3 são apresentados os indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” de Willmott e teste t da validação das equações de estimativa do quadro 1, onde comparou-se a estimativa e a medidas do ano de 2004.

Quadro 3: Validação das equações de estimativa para K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d .

	MBE	RMSE	d	t
K_{UV}^d	-0,126	5,12	0,9319	0,4021
K_{PAR}^d	0,102	2,16	0,8666	0,7715
K_{IV}^d	-0,086	2,62	0,8985	0,5322

O indicativo estatístico MBE inferior a 0,2% para todas as equações mostra o bom desempenho das equações de estimativa das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d : superestima a fração K_{PAR}^d e subestima as frações K_{UV}^d e K_{IV}^d . Os valores de RMSE, são melhores na seqüência crescente para as frações K_{PAR}^d e K_{IV}^d , sendo inferiores a 3%, e para a fração K_{UV}^d próximo de 5%, indicando um baixo nível de espalhamento entre o medido e o estimado. Os valores de “t”, inferiores a 1,75 (t-crítico) garantem que as estimativas das 3 frações, comparadas as medidas são bons estatisticamente ao nível de 5% de significância. O coeficiente “d” de Willmott acima de 0,86 expressou a exatidão dos modelos para as 3 equações de estimativa, sendo mais significativo para K_{UV}^d .

A figura 4 mostra a relação entre as frações mensais K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m à partir de K_t^m . No quadro 4 são apresentadas as equações de estimativa mensais de K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em função de K_t^m , com seus respectivos índices de correlação.

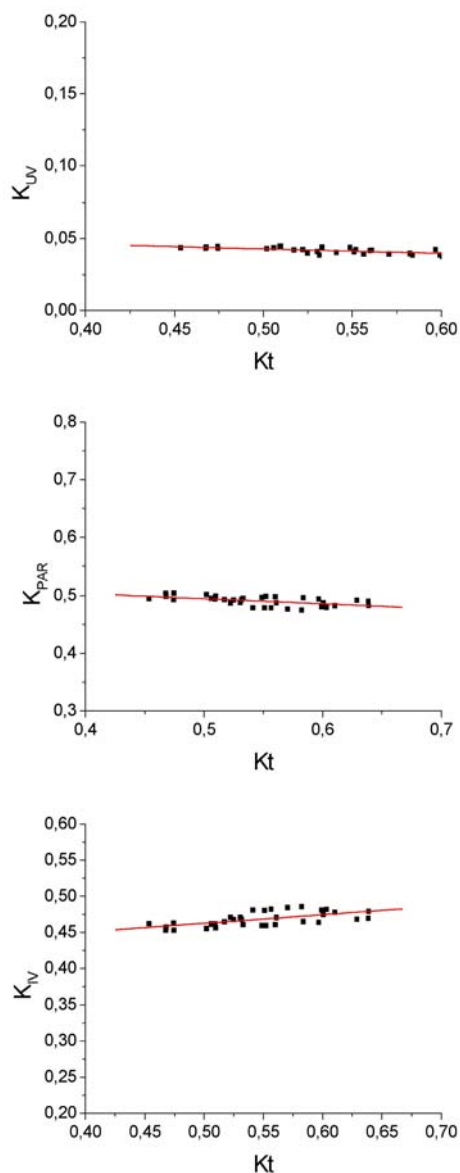


Figura 4: Relações horárias entre as frações mensais K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em função de K_t^m

Quadro 4: Equações de estimativa mensal para K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em função de K_t^m , e seus respectivos índices de correlação (r).

Frações	Equações de Estimativa	r
K_{UV}^m	$K_{UV}^m = 0,058 - 0,031K_t^m$	-0,73653
K_{PAR}^m	$K_{PAR}^m = 0,0539 - 0,088K_t^m$	0,55124
K_{IV}^m	$K_{IV}^m = 0,403 - 0,119K_t^m$	0,62560

Pode-se observar através da figura 4 que as relações K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em função de K_t^m na partição mensal são similares às relações das partições diária e horária. As frações mensais K_{UV}^m , K_{PAR}^m são decrescentes e a fração K_{IV}^m é crescente no sentido em que K_t^m tende ao máximo. A única diferença é que a variabilidade das frações mensais K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m ocorrem para um intervalo de variação menor da fração K_t^m : enquanto nas partições horária e diária as variações de K_t^h e K_t^d ocorreram entre 0,01 a 0,85 e 0,04 a 0,81, respectivamente, na mensal K_t^m variou em um intervalo menor, 0,45 a 0,65. Do ponto da cobertura de céu, nas partições horária e diária, as variações das frações K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} contemplaram todas as possíveis variações de K_t , enquanto que na partição mensal, as variações de K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m se restringiram as variações de K_t^m , apenas na cobertura parcialmente nublada.

A exemplo das equações de estimativa horária e diária, nas equações de estimativa mensal, as variações de K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m também foram pequenas, em função das variações de K_t^m , o que refletiu nos valores dos coeficientes lineares e angulares das equações de estimativa, bem nos coeficientes de correlação. Os coeficientes lineares são mais elevados para as frações K_{UV}^m , K_{PAR}^m , e menor para K_{IV}^m , enquanto que os coeficientes angulares são pequenos e crescentes na ordem K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m , onde os sinais negativos compensam a pequena dependência de K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em relação a K_t^m .

Os índices de correlação indicam haver baixa dependência das frações K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m na superfície terrestre com a variação da transmissividade atmosférica K_t^m . É possível que com uma base de dados superior a 3 anos que os coeficientes de correlação das equações de estimativa melhorem e atinjam os valores obtidos na partição diária, os quais foram significativos estatisticamente. Outra alternativa seria o ajuste de equações para as frações K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m em função de K_t^m particionado em função da cobertura de céu.

A validação por meio dos indicativos MBE, RMSE, e “d” de Willmott, onde comparou-se as frações K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m estimadas e medidas, está apresentada no quadro 5:

Quadro 5: Validação das equações de estimativa para K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m

	MBE	RMSE	d	t
K_{UV}^m	0,008	3,94	0,8319	0,0070
K_{PAR}^m	-0,103	4,04	0,2906	0,0850
K_{IV}^m	-1,280	5,00	0,4392	0,8662

O indicativo estatístico MBE, inferior a 2% mostrou-se bom para as três frações, na ordem decrescente K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m , sendo que o modelo superestima para K_{UV}^m e subestima nas frações K_{PAR}^m e K_{IV}^m . O indicativo estatístico RMSE inferior a 5% também mostrou-se bom para todas as equações, apresentando menores espalhamentos para na seqüência decrescente K_{UV}^m , K_{PAR}^m e K_{IV}^m . Os valores do teste t abaixo do valor crítico ($T_c=1,75$) mostram os modelos são significativos estatisticamente ao nível de 5% na estimativa das frações com base em K_t^m . O índice de exatidão (d de Willmott) entre as medidas e estimadas foi bom para a fração mensal K_{UV}^m , e pequena para as frações mensais K_{PAR}^m e K_{IV}^m .

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, concluímos que para a partição horária há necessidade de se buscar um novo tipo de correlação, como por exemplo, ajustar outros tipos de modelos estatísticos de regressão, relações em função de K_t utilizando intervalos discretos de cobertura de céu, ou particionar a base de dados em intervalos de tempo menores, como o sazonal e o mensal. Para as partições diária e horária, os resultados da validação mostraram que as equações podem ser utilizadas com elevada precisão na estimativa de UV, PAR e IV. No entanto, as correlações podem e devem ser melhoradas se as propostas de coberturas particionadas de céu forem levadas em consideração, bem como menores intervalos de dados.

BIBLIOGRAFIA

- ASSUNÇÃO, H.F. *Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP*. Piracicaba, 1995. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agrometeorologia)-Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- CUNHA, A.R., KLOSOWSKI, E.S., GALVANI, E., ESCOBEDO, J.F., MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppën. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1,1999, Botucatu. *Anais...* Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p.487-91.
- GOMES, E.N., ESCOBEDO, J.F., FRISINA, V.A., ANGELA, R. Modelo da radiação direta fotossintética horária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000. (Editado em CD-ROM).
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press, 1983. 390 p.
- LIU, B.Y., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Sol. Energy*, v.4, p.1-9, 1960.
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for evaluation of solar radiation estimation models. *Sol. Energy*, v.51, p.289-91, 1993.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physic Geogr.* v.2, p.184-94, 1981.