

# EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DIÁRIA PARA AS RADIAÇÕES UV, PAR E IV EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL PARA COBERTURA ATMOSFÉRICA PARCIAL E TOTAL

João Francisco Escobedo – [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

Eduardo Nardini Gomes – [engomes@fca.unesp.br](mailto:engomes@fca.unesp.br)

Alexandre Dal Pai – [alexandredalpai@yahoo.com.br](mailto:alexandredalpai@yahoo.com.br)

Departamento de Recursos Naturais/ FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Amauri Pereira de Oliveira – [apdolive@usp.br](mailto:apdolive@usp.br)

Jacyra Soares – [jacyra@usp.br](mailto:jacyra@usp.br)

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

## 1.1 Radiação Solar

**Resumo.** O trabalho apresenta equações de estimativa diárias para a radiação ultravioleta (UV), fotossintética (PAR) e infravermelha (IV) em função da radiação global (G), para cobertura total do céu ( $0 < K_T < 1$ ) e em quatro intervalos definidos de  $K_T$ : céu nublado, parcialmente nublado com dominância de céu difuso, parcialmente nublado com dominância de céu claro e céu aberto. As medidas foram realizadas entre os anos de 2001 a 2005 em Botucatu, SP, Brasil. As radiações UV, PAR e IV foram relacionadas à radiação global, com alto valor para os coeficientes de determinação  $R^2$ . Os coeficientes angulares das equações de estimativa quantificaram as frações das radiações UV, PAR e IV no espectro global para cobertura de céu total como:  $UV/G = 4,2\%$ ;  $PAR/G = 49,0\%$  e  $IV/G = 46,8\%$ . Nos quatro tipos de cobertura de céu, as frações das radiações foram: para  $K_T \leq 0,35$ :  $UV/G = 4,9\%$ ;  $PAR/G = 51,0\%$  e  $IV/G = 44,0\%$ ; para  $0,35 < K_T \leq 0,55$ :  $UV/G = 4,4\%$ ;  $PAR/G = 49,4\%$  e  $IV/G = 46,0\%$ ; para  $0,55 < K_T \leq 0,65$ :  $UV/G = 4,2\%$ ;  $PAR/G = 49,0\%$  e  $IV/G = 46,8\%$  e para  $K_T > 0,65$ :  $UV/G = 4,0\%$ ;  $PAR/G = 48,9\%$  e  $IV/G = 47,0$ . Na validação foram obtidos os indicativos estatísticos: MBE inferior a 5,0% para UV; inferior a 2,0% para PAR e inferior a 3,0% para IV. O RMSE variou até um máximo de 10,63%. O coeficiente “d” de Willmott foi maior que 0,9879 e mostrou bom índice de ajustamento entre estimativa e medida das radiações. O desempenho das equações para as radiações foi melhor na seqüência PAR, IV e UV.

**Palavras-chave:** equações, estimativa, partição diária, radiação ultravioleta, infravermelha, fotossintética.

## 1. INTRODUÇÃO

São escassas as informações sobre series temporais e equações de estimativa para as radiações UV, PAR e IV, em função da radiação G para um único local e simultaneamente. A grande maioria das divulgações é para os pares das radiações G e PAR, G e UV, e ainda para locais diferentes e distantes. Com as radiações G e IV, as informações são ainda mais restritas, não são de rotina ou algumas são provenientes de situações específicas (Zhang et al., 2000). A Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil, monitora as radiações: G, UV, PAR e IV desde o ano 2001, com o propósito de estudar as equações de estimativa sob diversas condições de cobertura de céu.

Como as frações das radiações UV, PAR e IV da radiação global na superfície terrestre possuem forte dependência do tipo de cobertura do céu (nuvens) e de vários parâmetros atmosféricos como ângulo de elevação, perfil vertical de ozônio, concentração de aerossóis e vapor d'água (Foyo-Moreno et al. 2003). O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a validação de equações de estimativa diária, para as radiações UV, PAR e IV em função da radiação G, em duas condições de cobertura de céu. Na primeira condição, as radiações UV, PAR e IV em função da radiação G, foram relacionadas a todas as condições de cobertura de céu conjuntamente ou seja, pa-

ra  $0 < K_T^d < 1$ . Na segunda condição, as radiações UV, PAR e IV em função da radiação G, foram relacionadas a quatro condições de cobertura de céu: 1<sup>o</sup> - cobertura de céu nebuloso  $K_T \leq 0,35$ ; 2<sup>o</sup> - cobertura de céu parcialmente nublado com dominância de dia difuso  $0,35 < K_T \leq 0,55$ ; 3<sup>o</sup> - cobertura de céu parcialmente nublado com dominância de dia claro  $0,55 < K_T \leq 0,65$  e 4<sup>o</sup> - cobertura de céu sem nuvens ou aberto  $K_T > 0,65$ .

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Instrumentação

A Estação de Radiometria Solar está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m) e monitora desde o ano de 2001 as radiações: ultravioleta, fotossintética (método direto e indireto) e infravermelha de ondas curtas.

A irradiância global ( $I_G$ ) é monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a irradiância ultravioleta ( $I_{UV}$ ) por um radiômetro CUV-3 da Kipp-Zonen e a irradiância infravermelha ( $I_{IV}$ ) por um piranômetro Eppley PSP com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 0,7 a 3,0 $\mu$ m. Por sugestão do fabricante, o fator de calibração do piranômetro IV foi multiplicado pelo fator 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no elemento sensível do sensor. A irradiância PAR ( $I_{PAR}$ ) utilizada neste trabalho foi obtida pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância  $I_G$  e a soma das irradiâncias  $I_{UV}$  e  $I_{IV}$  medidas na mesma frequência, por meio da equação:  $I_{PAR} = I_G - (I_{UV} + I_{IV})$ .

As características dos detectores da radiação global, radiômetro ultravioleta e do piranômetro infravermelho estão apresentadas na Tab. 1.

**Tabela 1.** Características operacionais dos detectores da radiação G, UV, PAR e IV

	<b>Global</b>	<b>Ultravioleta</b>	<b>Infravermelho</b>
<b>Marca</b>	Eppley	Kipp & Zonen	Eppley
<b>Fator de Calibração</b>	7,45 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup>	312 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup>	8,12 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup>
<b>Range Espectral</b>	295-2800nm	290-400nm	695-2800nm
<b>Tempo de resposta</b>	1s	5ms	2s
<b>Linearidade</b>	$\pm 0,5\%$ (de 0 a 2800 W/m <sup>2</sup> )	< 1%	$\pm 1\%$ (de 0 a 700W/m <sup>2</sup> )
<b>Co-seno</b>	$\pm 1\%$ ( $0 < Z < 70^\circ$ ) $\pm 3\%$ ( $70^\circ \leq Z < 80^\circ$ )	< $\pm 10\%$	$\pm 5\%$
<b>Resposta a temperatura</b>	$\pm 1\%$ de -20°C a 40 °C	< $\pm 0,1/K$	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C

Para aquisição de dados, utilizou-se um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos.

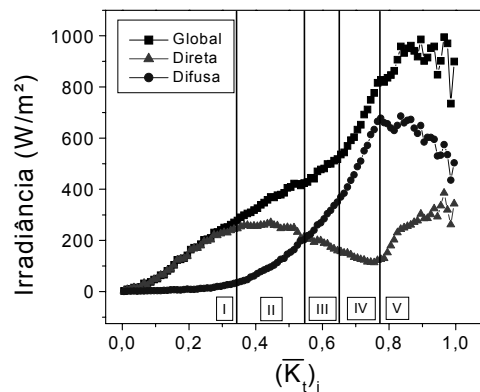
A base de dados das radiações utilizada na geração e validação das equações de estimativas das radiações UV, PAR e IV, compreendem os anos de 2001 a 2005. Os anos de 2001 a 2004 foram utilizados na modelagem e o último, o ano de 2005 na validação. Foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações de pelo menos um dos radiômetros devido a problemas elétricos. Eliminou-se 1 dia em 2001, 15 dias em 2002, 6 dias em 2003, 80 dias em 2004 e 37 dias em 2005.

### 3. Critério de classificação da cobertura do céu.

O critério utilizado para classificar as quatro coberturas do céu foi baseado na evolução das irradiâncias médias global, difusa e direta na horizontal em função de intervalos infinitesimais de

$(K_T)_i$ , cuja base de dados é do período de 1995 a 2003 em Botucatu. O intervalo total de  $K_T$  entre 0 e 1 foi sub-dividido em 100 intervalos, onde  $(K_T)_i$  representa o sub-intervalo  $i$  (de 0,01 em 0,01 unidades) de  $K_T$ . Para cada sub-intervalo de  $(K_T)_i$ , calculou-se as médias das irradiâncias global, direta na horizontal e difusa.

A Fig. 1 mostra as curvas médias das irradiâncias global, direta na horizontal e difusa, juntas em uma mesma escala, a qual permitiu a análise variacional das radiações em função de  $K_T$ . Para o intervalo(I):  $K_T \leq 0,35$  a radiação direta é praticamente igual a zero, e a radiação global é igual à radiação difusa: a cobertura do céu é nebulosa; no segundo intervalo(II):  $0,35 < K_T \leq 0,55$ , a radiação global é a soma de uma maior parcela da radiação difusa a qual é decrescente e uma menor da radiação direta a qual é crescente, que evolui lenta e gradativamente até a igualdade das duas radiações, próximo a 200W/m. Neste caso a cobertura do céu é denominada de parcialmente nublado com dominância para o céu difuso; o terceiro intervalo(III):  $0,55 < K_T \leq 0,65$  a radiação global é a soma de uma maior parcela da radiação direta que aumenta e uma menor da difusa que diminui.



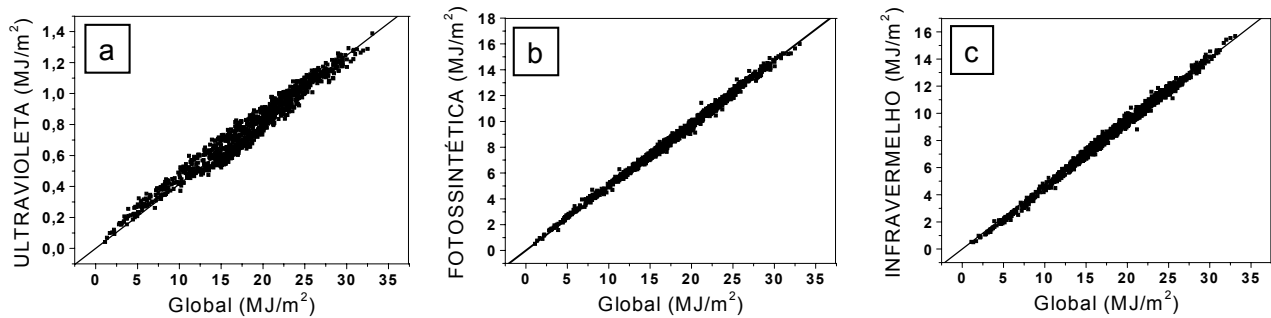
**Figura 1** - Evolução das radiações médias global, difusa e direta na horizontal, médias de 5 minutos em função de intervalos centesimais de  $K_t$ .

A cobertura do céu neste caso é denominada parcialmente nublado com dominância de céu claro; e no último intervalo(IV):  $K_T > 0,65$  a radiação global possui a maior parcela da radiação direta e mínima de difusa, portanto a cobertura de céu é denominada aberto. No intervalo V:  $K_T > 0,78$  as radiações médias global, direta na horizontal e difusa, não evoluem numa seqüência lógica em função da transmissividade atmosférica  $K_T$ , e por essa razão foram eliminadas da análise. Nesse intervalo, as radiações global e direta na horizontal diminuem e a difusa aumenta, devido às multireflexões causadas por nuvens adjacentes, principalmente em dias parcialmente nublados. A eliminação das radiações após o intervalo de  $K_T > 0,78$  é uma prática comum utilizada nos estudos das frações solares como mostram os trabalhos de Liu e Jordan,(1960), e Suehrcke e McCormick,(1988). A classificação da cobertura de céu utilizada neste trabalho difere das classificações utilizadas por (Pedrós et al. 2000, Lopez et al., 2000, Jacovindes et al., 1996 e Iqbal, 1983).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Equações de Estimativa Diária.

A Fig. 2 mostra as correlações no modelo-1, entre  $H_{UV}^d$ ,  $H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$ , com a  $H_G^d$ , para todas condições de cobertura de céu ( $0 < K_T^d < 1$ ). As equações de estimativa linear passando pela origem e os coeficientes de determinação  $R^2$  estão apresentados na Tab. 2.



**Figura 2** - Correlações das radiações diárias: a) UV, b) PAR e c) IV em função da radiação Global.

A dispersão das correlações foi maior na seqüência:  $H_{UV}^d$ ,  $H_{IV}^d$  e  $H_{PAR}^d$ , e conseqüentemente, o ajuste foi na seqüência inversa, melhor para  $H_{PAR}^d$ ,  $H_{IV}^d$  e  $H_{UV}^d$  respectivamente. Os coeficientes de determinação  $R_{par}^2=0,9904$ ;  $R_{iv}^2=0,9870$  e  $R_{uv}^2=0,9204$  próximos de 1 mostram que as  $H_{UV}^d$  e  $H_{PAR}^d$ , estão muito melhores relacionadas a  $H_G^d$  do que a  $H_{IV}^d$ . Os coeficientes angulares das equações de estimativa diária  $H_{UV}^d / H_G^d = 0,042$ ;  $H_{PAR}^d / H_G^d = 0,490$ ;  $H_{IV}^d / H_G^d = 0,468$  representam as frações médias diárias percentuais das radiações UV= 4,2%, PAR= 49,0% e IV= 46,8%.

**Tabela 2.** Equações de estimativa para a radiação diária UV, PAR e IV em função de G e coeficientes de determinação.

Intervalo	Equações de Estimativa	R <sup>2</sup>
$0 \leq K_T^d \leq 1,0$	$H_{UV}^d = 0,04155H_G^d$	0,9204
	$H_{PAR}^d = 0,48935H_G^d$	0,9904
	$H_{IV}^d = 0,46928H_G^d$	0,9870

Para a UV, a fração média de 4,2%, comparada a outros trabalhos, é maior que os 3,0% para Valencia ( Martinez-Lozano et al ., 1999), e na mesma ordem de grandeza das frações provenientes de outros locais como 3,4% para região Urbana do Cairo (Robba 2004); 5% para Potsdam na Alemanha (Feister & Grasnick 1992); 4,7% para Dhahran na Arábia Saudita (Elhadiy et al., 1990); 4,62% para o Kuwait (Al-Aruri et al ., 1988); 5,5% para Corvalis em Oregon (Rao et al ., 1984); 4,8% em Almería, 4,6% em Madrid e 3,98 para Córdoba (Ramirez Santioga et al., 2000).

Para a PAR, a fração média de 49,0%, é superior às frações de outros pesquisadores 45,7% (Rao et al ., 1984); 47% (Stanhill & Fuchs., 1977), 44,0% ( Howell et al., 1983), 47,0% (Blackburn & Proctor., 1983), 43,7% ( Ting & Giacomelli, 1987), 43,9% (Zhang et al ., 2000), 47,3% ( Papaioannou et al 1993) e 41,8% (Jacovides et al ., 2004), e menor que os 51,0% (Szeics, 1974).

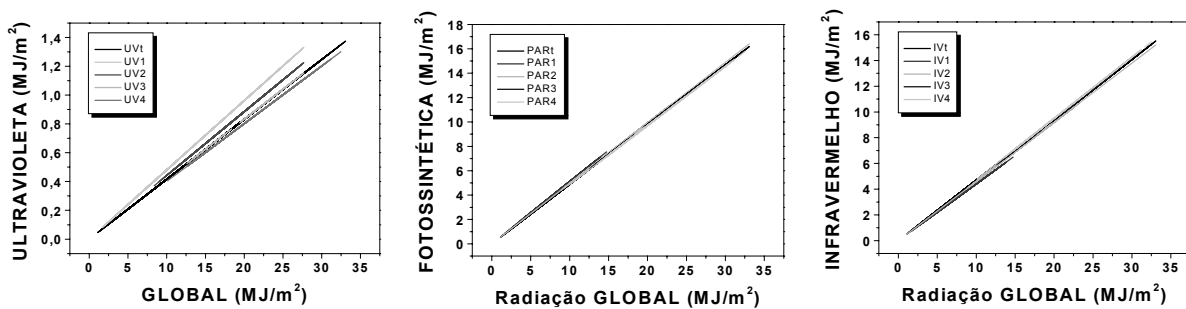
A Tab. 3 apresenta uma estatística para cada intervalo de  $K_T^d$ , referente à energia acumulada, energia média diária com desvios percentuais e intervalo de variações. A energia acumulada é proporcional à energia das radiações e ao número de radiações diárias, em cada intervalo de  $K_T^d$ . A energia acumulada das radiações é maior na seqüência G, PAR, IV e UV. Em função da cobertura, a energia das radiações acumulada é maior na de céu aberto ( $K_T^d > 0,65$ ), decrescendo sucessivamente nas duas coberturas parcialmente nublada, até a cobertura de céu nublado ( $K_T^d \leq 0,35$ ). A energia média diária, relação entre a energia total acumulada e número de radiações diárias, em cada intervalo de  $K_T^d$ , acompanhou a energia acumulada: é maior na seqüência G, PAR, IV e UV, e em função dos intervalos de  $K_T^d$ , a energia média é maior na cobertura de céu aberto, decrescendo sucessivamente nas coberturas parcialmente nublada, até a cobertura de céu nublado. O desvio da média em todos intervalos de  $K_T^d$  é maior na seqüência G, UV, PAR e IV, e em função da cobertura de

céu, é maior na de céu nublado, decrescendo sucessivamente nas coberturas parcialmente nublada, até a cobertura de céu aberto. O intervalo de variação em todos intervalos de  $K_T^d$  é maior na seqüência G, PAR, IV e UV, e em função da cobertura de céu, é maior na de céu aberto, decrescendo sucessivamente nas coberturas parcialmente nublada, até a cobertura de céu nublado.

**Tabela 3.** Estatística das radiações G, UV, PAR e IV nos 4 intervalos de  $K_T^d$ .

Fração	Intervalo	Média (MJ/m <sup>2</sup> )	Desvio(%)	Mínimo (MJ/m <sup>2</sup> )	Máximo (MJ/m <sup>2</sup> )	Variação (MJ/m <sup>2</sup> )	Somatório (MJ/m <sup>2</sup> )	Dias
Global	0<Kt<0,35	8,06	40,98	1,05	14,73	13,69	1748,9	217
UV		0,39	39,41	0,06	0,72	0,65	84,9	217
PAR		4,15	39,80	0,63	7,42	6,79	900,4	217
IV		3,52	42,97	0,35	6,69	6,34	763,6	217
Global	0,35<Kt<0,55	16,37	24,33	1,10	33,08	31,97	5156,0	315
UV		0,72	25,49	0,04	1,39	1,35	227,4	315
PAR		8,11	24,75	0,52	16,00	15,48	2555,9	315
IV		7,53	23,97	0,54	15,69	15,15	2373,1	315
Global	0,55<Kt<0,65	20,34	22,19	12,53	41,90	29,36	6855,1	337
UV		0,84	25,38	0,48	1,46	0,99	282,4	337
PAR		9,95	23,04	6,03	19,78	13,75	3352,5	337
IV		9,56	21,31	5,87	20,65	14,78	3220,3	337
Global	Kt>0,65	21,14	23,03	10,11	32,49	22,39	10356,7	490
UV		0,84	26,87	0,12	1,29	1,17	410,6	490
PAR		10,25	23,84	5,04	15,73	10,69	5021,1	490
IV		10,05	22,14	4,69	15,55	10,86	4925,9	490

A Fig. 3 mostra as correlações do número de dias entre as  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$ , com a  $H_G^d$  nos quatro intervalos de  $K_T^d$ : 217 dias nebuloso em  $K_T^d \leq 0,35$ ; 215 dias parcialmente nublado com dominância para a cobertura nublada em  $0,35 < K_T^d \leq 0,55$ ; 271 dias parcialmente nublado com dominância para a cobertura de céu aberto em  $0,55 < K_T^d \leq 0,65$  e 490 dias de céu aberto em  $K_T^d > 0,65$ .



**Figura 3** - Correlações das radiações diária: a)  $H_{UV}^h$ , b)  $H_{PAR}^h$  e c)  $H_{IV}^h$  em função de  $H_G^h$  para  $K_T^h$  total e nos quatro intervalos parciais de  $K_T^h$

A variação da energia para  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  em função da  $H_G^d$ , é diferente nos quatro intervalos de  $K_T^d$ . Em  $K_T^d \leq 0,35$  para uma variação de  $H_G^d$  de 1,3 MJ/m<sup>2</sup> a 14,7MJ/m<sup>2</sup>, a energia da  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  variaram de 0,06MJ/m<sup>2</sup> a 0,75MJ/m<sup>2</sup>, 0,68MJ/m<sup>2</sup> a 7,5MJ/m<sup>2</sup> e 0,6MJ/m<sup>2</sup> a 6,5MJ/m<sup>2</sup>, respectivamente. Em  $0,35 < K_T^d \leq 0,55$ , para uma variação de  $H_G^d$  de 8,4 MJ/m<sup>2</sup> a

23,2MJ/m<sup>2</sup>, a energia da  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  variou de 0,35MJ/m<sup>2</sup> a 1,2MJ/m<sup>2</sup>, 4,0MJ/m<sup>2</sup> a 11,75MJ/m<sup>2</sup> e 4,0MJ/m<sup>2</sup> a 11,0MJ/m<sup>2</sup>. Em  $0,55 < K_T^d \leq 0,65$ , para variação  $H_G^d$  de 12,6 MJ/m<sup>2</sup> a 28,0MJ/m<sup>2</sup>, a energia da  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  variou de 0,52MJ/m<sup>2</sup> a 1,15MJ/m<sup>2</sup>, 6,2MJ/m<sup>2</sup> a 13,6MJ/m<sup>2</sup> e 5,9MJ/m<sup>2</sup> a 12,90MJ/m<sup>2</sup>. No intervalo de  $K_T^d > 0,65$ , para uma variação de  $H_G^d$  de 13,5 MJ/m<sup>2</sup> a 32,5MJ/m<sup>2</sup>, a energia da  $H_{UV}^d, H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  variou de 0,40MJ/m<sup>2</sup> a 1,3MJ/m<sup>2</sup>, 7,0MJ/m<sup>2</sup> a 15,75MJ/m<sup>2</sup> e 6,0MJ/m<sup>2</sup> a 15,5MJ/m<sup>2</sup>.

A Tab. 4 apresenta as equações de estimativas com os coeficientes de determinação R<sup>2</sup>. Os coeficientes angulares das equações de estimativa  $b_{UV}^d, b_{PAR}^d$  e  $b_{IV}^d$  variaram com o tipo de cobertura atmosférica: Para as equações  $H_{UV}^d$  e  $H_{PAR}^d$  o coeficiente angular decresceu e para a equação  $H_{IV}^d$  aumentou no sentido em que  $K_T^d$  cresceu do primeiro (céu nebuloso) ao quarto intervalo (céu aberto).

A comparação das correlações do modelo-1, com as correlações do modelo-2 (Fig. 3) mostra que as equações de estimativa em função de  $K_T^d$  total para todas as coberturas de céu ( $0 < K_T^d < 1$ ) são iguais às equações de estimativa para a cobertura parcialmente nublado com dominância de céu claro ( $0,55 < K_T^d \leq 0,65$ ).

**Tabela 4.** Equações de estimativa diária para as radiações UV, PAR e IV, em função de G, para os quatro intervalos parciais de  $K_T^d$ , do modelo 2 e coeficientes de determinação.

Intervalo	Equações de Estimativa	R <sup>2</sup>
$K_T^d \leq 0,35$	$H_{UV}^d = 0,04807H_G^d$	0,9699
	$H_{PAR}^d = 0,51174H_G^d$	0,9925
	$H_{IV}^d = 0,4402H_G^d$	0,9899
$0,35 < K_T^d \leq 0,55$	$H_{UV}^d = 0,04422H_G^d$	0,9622
	$H_{PAR}^d = 0,49599H_G^d$	0,9938
	$H_{IV}^d = 0,45992H_G^d$	0,9907
$0,55 < K_T^d \leq 0,65$	$H_{UV}^d = 0,04163H_G^d$	0,9731
	$H_{PAR}^d = 0,4899H_G^d$	0,9923
	$H_{IV}^d = 0,46847H_G^d$	0,9882
$K_T^d > 0,65$	$H_{UV}^d = 0,04005H_G^d$	0,9846
	$H_{PAR}^d = 0,48507H_G^d$	0,9942
	$H_{IV}^d = 0,47518H_G^d$	0,9931

Os coeficientes angulares das equações de estimativa para  $H_{UV}^d$  são maiores no intervalo  $K_T^d \leq 0,35$  com  $b_{UV}^d = 4,8\%$ , decrescendo para  $b_{UV}^d = 4,4\%$  no intervalo  $0,35 < K_T^d \leq 0,55$ , a  $b_{UV}^d = 4,2\%$  em  $0,55 < K_T^d \leq 0,65$  e  $b_{UV}^d = 4,0\%$  no intervalo  $K_T^d > 0,65$ . A estimativa de  $H_{UV}^d$  em função de  $K_T^d$  total com todas as coberturas de céu ( $0 < K_T^d < 1$ ), subestima  $H_{UV}^d$  nos intervalos com coberturas de céu nublado e parcialmente nublado com dominância de cobertura nublado em -14,4% e -5,2% respectivamente, e superestima em 4,5%  $H_{UV}^d$  na cobertura de céu aberto no modelo-2.

A evolução dos coeficientes angulares para  $H_{PAR}^d$  é similar aos coeficientes angulares das  $H_{UV}^d$ . O coeficiente angular  $H_{PAR}^d$  é maior no intervalo  $K_T^d \leq 0,35$  com  $b_{PAR}^d = 51,2\%$ , decrescendo

para  $b_{PAR}^d = 49,6\%$  em  $0,35 < K_T^d \leq 0,55$ , em  $b_{PAR}^d = 49,0\%$  para  $0,55 < K_T^d \leq 0,65$  até a  $b_{PAR}^d = 48,5\%$  em  $K_T^d > 0,65$ . As frações  $H_{PAR}^d$  para coberturas nebuloso e céu aberto de 51,2% e 48,5% respectivamente, são superiores às frações 48,3% e 44,3% (Rao, 1984), 47,2% e 46,8% (Papaioannou et al 1993), 43,7% e 40,5% (Jacovides et al., 2004) para as mesmas coberturas e inferiores a 0,51% e 0,63% (Stigter & Musabilha, 1982), e 55,6% e 48,6% (Hansen, 1984). A estimativa de  $H_{PAR}^d$  em função de  $K_T^d$  total com todas as coberturas de céu ( $0 < K_T^d < 1$ ) do modelo-1, subestima  $H_{PAR}^d$  nas coberturas de céu nublado e parcialmente nublado com dominância para a cobertura difuso em -4,5% e -1,2% respectivamente, e superestima  $H_{PAR}^d$  na cobertura de céu aberto em 3,1% do modelo-2.

A variação dos coeficientes angulares das equações de estimativas para  $H_{IV}^d$ , é contrária às variações de  $H_{UV}^d$  e  $H_{PAR}^d$ : é menor no intervalo  $K_T^d \leq 0,35$  com  $b_{IV}^d = 44,0\%$ , crescendo para  $b_{IV}^d = 46,0\%$  em  $0,35 < K_T^d \leq 0,55$ , em  $b_{IV}^d = 46,9\%$  no intervalo  $0,55 < K_T^d \leq 0,65$  e para  $b_{IV}^d = 47,5\%$  em  $K_T^d > 0,65$ . A estimativa de  $H_{IV}^d$  em função de  $K_T^d$  total com todas as coberturas de céu ( $0 < K_T^d < 1$ ) no modelo-1, superestima  $H_{IV}^d$  nas coberturas de céu nublado e parcialmente nublado com dominância de cobertura difuso do modelo-2 em 4,5% e 1,2% respectivamente, e subestima  $H_{IV}^d$  na cobertura de céu aberto em -3,1% do modelo-2.

Os coeficientes de determinação  $R^2$  das equações de estimativas acima de 0,9600 são estatisticamente altos e mostram que  $H_{UV}^d$ ,  $H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  estão bem relacionadas à  $H_G^d$  em todos os intervalos de  $K_T^d$ . Entre as radiações e nos quatro intervalos de  $K_T^d$ , os coeficientes de determinação  $R^2$  foram melhores estatisticamente para  $H_{PAR}^d$ ,  $H_{IV}^d$  e  $H_{UV}^d$ . Entre os quatro intervalos de  $K_T^d$ , os coeficientes de determinação  $R^2$  foram maiores para  $K_T^d > 0,65$  e menores em  $K_T^d \leq 0,35$ . Nos dois intervalos de cobertura de céu parcialmente nublado, os coeficientes de determinação  $R^2$  situaram-se entre os coeficientes de determinação das coberturas de céu nebuloso e aberto.

Os coeficientes de determinação das equações de estimativa  $H_{UV}^d$ ,  $H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  para  $K_T^d$  total do modelo-1, são superiores aos coeficientes das equações de estimativa  $H_{UV}^d$ ,  $H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  dos intervalos parciais de  $K_T^d$  do modelo-2. Uma única exceção ocorreu para a estimativa  $H_{UV}^d$  no intervalo parcial  $K_T^d$  para céu aberto cujo  $R^2$ , foi maior que o da estimativa  $H_{UV}^d$  para  $K_T^d$  total do modelo-1.

## 4.2 Validação das Equações de Estimativa

Os indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e coeficiente “d” de ajustamento obtidos na validação das equações de estimativa diária, para os dois modelos estão apresentados na Tab. 5.

O indicativo estatístico *MBE*, nos dois modelos, variou de 1,15% a -4,8% para  $H_{UV}$ ; de 0,2 a -1,62% para  $H_{PAR}$  e de -0,2% a 2,45% para  $H_{IV}$ . O resultado foi considerado bom estatisticamente, pois mostra que as equações de estimativa sub-ou-superestima na mesma ordem de grandeza do erro experimental da medida, com exceção de duas estimativas para  $H_{UV}$ , uma horária ( $MBE = -3,18\%$ ) e outra diária ( $MBE = -4,8\%$ ), do modelo-2 que estão acima da média.

Na validação do modelo-1, sob todas as condições de cobertura do céu ( $0 < K_T < 1$ ), o indicativo *MBE* mostra por meio do sinal negativo, que as estimativas de  $H_{UV}$  e  $H_{PAR}$  subestimam a medida, enquanto o *MBE* com sinal positivo, indica que  $H_{IV}$  superestima a medida. A estimativa de  $H_{UV}^d$  e  $H_{PAR}^d$  subestima em -0,66% e -0,67% e  $H_{IV}^d$  superestima em 0,69%.

**Tabela 5.** Indicativos estatísticos MBE(%), RMSE(%), e d da validação das equações de estimativa das radiações diárias UV, PAR e IV, em função de  $G$ , nos modelos 1 e 2.

Modelo 1	Radiação	MBE(%)	RMSE(%)	D
$0 \leq K_T^d \leq 1,0$	UV	-0,66	8,39	0,9879
	PAR	-0,57	2,96	0,9986
	IV	0,69	3,73	0,9978
Modelo 2	Radiação	MBE(%)	RMSE(%)	D
$K_T^d \leq 0,35$	UV	-1,89	7,36	0,9897
	PAR	-1,62	2,95	0,9985
	IV	1,93	3,68	0,9979
$0,35 < K_T^d \leq 0,55$	UV	-4,80	6,82	0,9929
	PAR	-1,19	2,27	0,9993
	IV	1,80	3,00	0,9989
$0,55 < K_T^d \leq 0,65$	UV	-2,12	6,87	0,9872
	PAR	0,05	2,20	0,9989
	IV	0,13	2,68	0,9985
$K_T^d > 0,65$	UV	0,09	4,03	0,9942
	PAR	0,20	2,01	0,9986
	IV	-0,21	2,20	0,9985

Na validação do modelo-2, o indicativo estatístico *MBE* variou em cada intervalo parcial de  $K_T$ . No intervalo ( $K_T \leq 0,35$ ), houve subestimativa de  $H_{UV}^d$  em -1,89% e  $H_{PAR}^d$  em -1,62% e superestimativa de  $H_{IV}^d$  em 1,93%. No intervalo ( $0,35 < K_T \leq 0,55$ ) houve subestimativa  $H_{UV}^d$  em -4,8% e  $H_{PAR}^d$  em -1,19%, e superestimativa de  $H_{IV}^d$  em 1,8%. No intervalo ( $0,55 < K_T \leq 0,65$ ) houve subestimativa para  $H_{UV}^d$  em -2,12% , e superestimativa para  $H_{PAR}^d$  em 0,05% e  $H_{IV}^d$  em 0,13%. No intervalo ( $K_T > 0,65$ ) houve subestimativa para  $H_{IV}^d$  em -0,21% e superestimativa para  $H_{UV}^d$  em 0,09% e  $H_{PAR}^d$  em 0,20% .

O resultado para o indicativo estatístico *MBE* inferior a  $\pm 5,0\%$ , é considerado muito bom comparado ao *MBE* das validações de modelos estatísticos com outras radiações. O indicativo estatístico *RMSE* nas validações das equações de estimativa, variou até um máximo de 10,0% para os conjuntos de equações dos dois modelos. Entre os dois modelos, o melhor desempenho foi alcançado para as estimativas do modelo-1 cujos *RMSE* foram sempre inferiores aos do modelo-2 Em função das radiações, o melhor desempenho no modelo-1, foi da  $H_{PAR}^d$  com *RMSE* de 2,94% para  $H_{PAR}^d$ , enquanto que no modelo(2), os *RMSE* variaram de 2,01% a 2,95% para  $H_{PAR}^d$ , obtidas com as equações dos intervalos parciais ( $K_T^d > 0,65$  e  $K_T^d \leq 0,35$ ) . O segundo melhor resultado foi para  $H_{IV}^d$  no modelo-1, com *RMSE* de 3,73% para  $H_{IV}^d$ . No modelo(2), os *RMSE* variaram de 2,2% a 3,68% para  $H_{IV}^d$ , obtidos com as equações dos intervalos de ( $K_T^d > 0,65$  e  $K_T^d \leq 0,35$ ). O desempenho inferior foi da  $H_{UV}^d$  no modelo-1, com *RMSE* de 8,39% para  $H_{UV}^d$ . No modelo(2) os *RMSE* variaram de 4,03% a 7,36% para  $H_{UV}^d$ , obtidos com as equações dos intervalos de ( $K_T^d > 0,65$  e  $K_T^d \leq 0,35$ ).

Os coeficientes “d” de Willmott superiores a 0,9879 são elevados e mostram bom nível de ajustamento da estimativa em relação à medida da radiação nos dois modelos. Entre as radiações, o melhor desempenho do modelo 1 foi o da estimativa  $H_{PAR}^d$  com “d” = 0,9986, um pouco mais elevado que o das estimativas  $H_{UV}^d$  com “d” = 0,9879 ,  $H_{IV}^d$  com “d” = 0,9978, respectivamente. Para o modelo 2, o resultado foi similar ao do modelo-1, o melhor desempenho foi para a estimativa  $H_{PAR}^d$



que apresentou os coeficientes “d” um pouco mais elevado que os “d” de ajuste das estimativas  $H_{IV}^d$  e  $H_{UV}^d$ , nos quatro intervalos de  $K_T$ .

Uma análise geral dos resultados mostra que as equações de estimativa  $H_{UV}^d$ ,  $H_{PAR}^d$  e  $H_{IV}^d$  para  $K_T^d$  total do modelo-1, estão melhores correlacionadas a  $H_G^d$ , do que às equações de estimativa para  $K_T^d$  em intervalos parciais do modelo-2.

## 5. CONCLUSÕES

As correlações das radiações UV, PAR e IV e a radiação G diária, resultaram em equações de estimativa linear simples, com coeficientes de determinação próximo de 1 nos dois modelos. Para condições atmosféricas total, o coeficiente angular das equações quantificaram as frações percentuais das radiações UV, PAR e IV na global como sendo de 4,2%; 49,0% e 46,8%, respectivamente. Em condições parciais de cobertura do céu, as frações foram: nebuloso 4,9%; 51,0% e 44,0%; parcialmente nublado com dominância de céu difuso 4,4%; 49,4% e 46,0%; parcialmente nublado com dominância de céu claro 4,2%; 49,0% e 46,8% e céu aberto 4,0%; 48,9% e 47,0%, respectivamente. Os indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e “d”, mostraram no cômputo geral, que as equações do modelo-1, apresentaram melhor desempenho nas estimativas do que as equações do modelo-2.

## REFERÊNCIAS

- BLACKBURN, W.J., PROCTOR, J.T.A. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Sol. Energy*, v.31, p.233-4, 1983.
- ELHADIDY, M.A., ABDEL-NABI, D.Y. and KRUSS, P.D. Ultraviolet solar radiation at Dhahram (Saudi Arabia). *Solar Energy*, v.44, p.315-319, 1990.
- FIESTER, U. GRASNICK, K.H. Solar UV radiation measurements at Potsdam (55° 22'N, 13°5'E). *Solar Energy*, v. 49, n. 6, p. 541-548, 1992.
- FOYO-MORENO, I. ALADOS, I. OLMO, F.J. ALADOS-ARBOLEDAS, L. The influence of cloudiness on UV global irradiance (295-385nm). *Agricultural and Forest Meteorology*. V. 120, P. 101-111, 2003.
- HANSEN, V. Spectral distribution of solar radiation on clear days: A comparison between measurements and model estimates. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v.23, p.772-80, 1984.
- HOWELL, T.A., MEEK, D.W., HATFIELD, J.L. Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.*, v.28, p.157-75, 1983.
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. London, Academic Press. 390p., 1983.
- JACOVINDES, C.P., HADJIOANNOU, L., PASHIARDIS, S., STEFANO, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*. v.56, p.565-572, 1996.
- JACOVIDES, C.P., TIMVIOS, F.S., PAPAIOANNOU, G., ASIMAKOPOULOS, D.N., THEOFILOU, C.M. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, p.135-140, 2004.
- MARTINEZ-LOZANO, J.A. , TENA, F. and UTRILLAS, M.P. Ratio of uv to global broad band irradiation in valencia, spain, *Int. J. Climatol*. V.19, p. 903-911, 1999.
- PAPAIOANNOU, G., NIKOLIDAKIS, G., ASIMAKOPOULUS, D.N., RETALIS, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agric. For. Meteorol.*, v.81, p.287-98, 1996.
- PAPAIOANNOU, G., PAPANIKOLAOU, N., RETALIS, D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theor. Appl. Clim.*, v.48, p.23-7, 1993.
- RAO, C.R.N. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Arch. Meteorol., Geophys. Bioclimatol.*, v.34, p.353-64, 1984.

- ROBAA, S.M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy*, v.77, p.251-259, 2004.
- SANTIAGOSA, L.R. LÓPEZ, L.M. ORTÍN, S.C.M. GÁLVEZ, B.J. aplicación de técnicas de aprendizaje automático a la determinación de la radiación ultravioleta diaria (295-385nm) a partir de la radiación global. In IX Congreso Ibérico de Energia Solar, y III Jornadas Técnicas sobre Biomassa. Córdoba, 27 al 29 de marzo de 2000.
- STANHILL, G., FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J. of Appl. Ecol.*, v.14, p.317-22, 1977.
- STIGTER, C.J., MUSABILHA, M.M. The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *J. Appl. Ecol.*, v.19, p.853-8, 1982.
- SZEICZ, G. Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.*, v.11, p.617-36, 1974.
- TING, K.C., GIACOMELLI, G.A. Solar photosynthetically active radiation transmission through WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physic Geogr.* v.2, p.184-94, 1981.
- ZHANG, X., ZHANG, Y., ZHOUB, Y. Masuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during april-october. *Agric. Meteorol.*, v.102, p.207-12

**Agradecimento:** À FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## **DAILY ESTIMATIVE EQUATIONS FOR UV, PAR AND IV RADIATIONS AS A FUNCTION OF THE GLOBAL RADIATION FOR PARTIAL AND TOTAL ATMOSPHERIC COVERING**

**ABSTRACTS:** *This paper presents daily estimative equations for ultraviolet (UV), photosynthetic (PAR) and infrared (IV) solar radiations as a function of the global solar radiation (G) for total and four partial defined intervals of  $K_t$ . The measurements were taken from 2001 to 2005 in Botucatu, SP, Brazil. The UV, PAR and IV radiations were related to G with high value for the determination coefficients ( $r^2$ ). The equations quantified the UV, PAR and IV radiation fractions of the global spectrum as:  $UV/G = 4.2\%$ ;  $PAR/G = 49.0\%$  and  $IV/G = 46.8\%$ . In the 4 sky conditions, the radiation fractions were: for  $K_t \leq 0,35$ :  $UV/G = 4.9\%$ ;  $PAR/G = 51.0\%$  and  $IV/G = 44.0\%$ ; for  $0.35 < K_t \leq 0.55$ :  $UV/G = 4.4\%$ ;  $PAR/G = 49.4\%$  and  $IV/G = 46.0\%$ ; for  $0.55 < K_t \leq 0.65$ :  $UV/G = 4.2\%$ ;  $PAR/G = 49.0\%$  and  $IV/G = 46.8\%$ , for  $K_t > 0.65$ :  $UV/G = 4.0\%$ ;  $PAR/G = 48.9\%$  and  $IV/G = 47.0$ . The MBE, RMSE and "d" of Willmott statistical indicators of validation were: MBE lower than 5.0% for UV; lower than 2.0% for PAR and lower than 3.0% for IV. RMSE ranged up to 10.63%. The "d" of Willmott coefficient, higher than 0.9879, presented good adjustment index in relation to estimated and measured radiations. Better equation performance was found for the radiations according to the sequence: PAR, IV and UV.*

**Key words:** *equation, estimative, daily value, ultraviolet, infrared, photosynthetic radiation.*