

FRAÇÃO SOLAR K_{UV} , K_{PAR} E K_{IV} : ANÁLISE VARIACIONAL E EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA EM FUNÇÃO DE K_T

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Eduardo Nardini Gomes – engomes@fca.unesp.br

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

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Jacyra Soares – jacyra@usp.br

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

1.1 Radiação Solar

RESUMO: O trabalho apresenta as equações de estimativa horária e diária para as frações médias K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} em função do índice de claridade centesimal K_T . As correlações das frações médias K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} em função do índice de claridade K_T resultaram em equações de estimativas de terceiro grau com alto coeficiente de determinação: horária ($R^2_{uv}=0,9918$; $R^2_{par}=0,9849$ e $R^2_{iv}=0,9876$) e diária ($R^2_{uv}=0,9648$; $R^2_{par}=0,9476$ e $R^2_{iv}=0,9599$). Os indicativos estatísticos da validação: MBE inferior a 5.0%; o RMSE inferior a 10.0% e o indicativo “d” de Willmott superior a 0,80 mostram que as frações médias K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} , horária e diária, podem ser estimadas em função do índice de claridade K_T com precisão.

Palavras-Chave: radiação solar global, UV, PAR e IV, estimativa da UV, PAR e IV.

1. INTRODUÇÃO

O método de se estimar radiações por meio de equação cuja variável de entrada é outra radiação medida na superfície terrestre, possui uma limitação singular: a validade da equação é restrita ao local de origem das medidas ou a regiões similares climaticamente. Dessa forma, a utilização de um modelo por meio de radiações, não pode ser estendida a outros locais, principalmente no Brasil, país de grande extensão continental e com diferenças climáticas bastante significativas entre as regiões.

O modelo proposto por Liu-Jordan em 1960, o qual substitui a radiação da equação de estimativa por fração, elimina grande parte da dependência do local. A mudança de variável de entrada, radiação por fração, tem a vantagem de eliminar a estacionalidade, porque a normalização por um fator que depende do dia e local elimina igualmente muitos dos efeitos locais. É uma alternativa técnica e economicamente viável, pois as equações poderão ser estendidas a outras regiões, onde a radiação global é medida de rotina e tem como vantagem não necessitar de radiômetros solares de custo elevado e de difícil aferição. Esse modelo vem sendo utilizado por muitos pesquisadores para as radiações: difusa, direta, fotossintética e ultravioleta (Liu & Jordan, 1960; Erbs et al., 1979; Iqbal, 1979a; Jacovides et al., 1996; Reindl et al., 1990; Tiris et al., 1995; Vignolia & McDaniel et al., 1986).

Assim, o trabalho teve como objetivo desenvolver por meio do modelo de Liu-Jordan, equações de estimativa horária e diária para as frações K_{UV} (H_{UV}/G), K_{PAR} (H_{PAR}/G) e K_{IV} (H_{IV}/G) em função de K_T (G/H_o), onde H_{UV} , H_{PAR} , H_{IV} e G são as radiações ultravioleta, fotossintética, infravermelha e global, integradas na hora e no dia.

2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RADIAÇÕES HORÁRIA E DIÁRIA.

A base de dados das radiações utilizada na obtenção e validação das equações de estimativa das radiações UV, PAR e IV compreende os anos de 2001 a 2005. Os anos 2001 a 2004 foram utiliza-

dos na modelagem e o último (2005) na validação. A Tab. 1 e 2 apresentam as estatísticas para cada radiação horária e diária por ano, quanto ao número de horas, energia acumulada, energia média horária e diária, com desvios percentuais. O número de horas refere-se as horas em que as quatro radiações foram medidas simultaneamente e sem problemas de visão dos radiômetros solares no campo experimental.

Foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações de pelo menos um dos radiômetros devido a problemas elétricos. No ano de 2001 foi eliminado 1 dia, 15 dias em 2002, 6 dias em 2003, 80 dias em 2004 e 37 dias em 2005. Foram eliminadas as horas do início do dia, das 5:30h às 7:30h e no final das 17:30h às 19:30h, devido ao horizonte, que é limitado por encostas e com presença de reservas florestais. No ano de 2001 foram eliminadas 1431horas, 1441horas em 2002, 1420 horas em 2003, 1771horas em 2004 e 1459 horas em 2005.

Tabela 1. Estatística das radiações G, UV, PAR e IV horária no período de 2001 a 2005

Ano	Radiação	Horária						
		Horas	Soma (MJ/m ²)	Média (MJ/m ²)	Desvio (%)	Mínimo (MJ/m ²)	Máximo (MJ/m ²)	Variação (MJ/m ²)
2001	G	3265	6263,8	1,92	51,32	0,02	4,13	4,12
	UV	3265	258,1	0,08	51,02	0,00	0,17	0,17
	PAR	3265	3081,5	0,94	50,95	0,00	2,05	2,05
	IV	3265	2924,1	0,90	51,94	0,00	1,97	1,97
2002	G	3153	5875,4	1,86	51,04	0,01	4,14	4,13
	UV	3153	244,8	0,08	50,74	0,00	0,18	0,18
	PAR	3153	2873,4	0,91	51,09	0,01	2,03	2,02
	IV	3153	2757,2	0,87	51,29	0,00	1,97	1,97
2003	G	3273	6107,9	1,87	51,27	0,02	4,05	4,03
	UV	3273	258,2	0,08	51,41	0,00	0,18	0,18
	PAR	3273	2993,2	0,91	51,57	0,01	2,04	2,02
	IV	3273	2856,5	0,87	51,32	0,00	1,88	1,88
2004	G	2878	5125,7	1,78	55,14	0,01	4,12	4,11
	UV	2878	216,3	0,08	54,64	0,00	0,17	0,17
	PAR	2878	2553,8	0,89	56,14	0,00	2,18	2,17
	IV	2878	2355,6	0,82	55,04	0,00	1,86	1,86
2005	G	3214	5785,2	1,80	51,83	0,02	4,00	3,98
	UV	3214	233,5	0,07	51,87	0,00	0,17	0,17
	PAR	3214	2894,9	0,90	53,31	0,01	2,27	2,26
	IV	3214	2656,9	0,83	50,93	0,00	1,79	1,79

A energia horária acumulada em cada ano é proporcional ao número de horas e foi maior seguindo a sequência dos anos 2001, 2003, 2002, 2005 e 2004. A energia média horária, relação entre energia acumulada e número de horas, foi maior na mesma sequência dos anos acima mencionados. A energia média horária da radiação global é igual à soma das radiações médias horárias UV + PAR + IV. O desvio da média horária em percentagem difere entre os anos e entre as radiações. Os desvios foram maiores na sequência dos anos 2004, 2005, 2003, 2001 e 2002. Entre as radiações, o maior desvio da média foi o da radiação PAR que variou 5,2%, seguido das radiações G com 4,1%, IV com 4,1%, e UV com 3,9%. O intervalo de variação, diferença entre a maior e menor energia horária, variou nos anos e entre as radiações, onde o maior intervalo foi o do ano de 2002. Entre as radiações, o maior intervalo foi o da radiação UV que variou 1,7%, seguido das radiações G com 3,6%, IV com 9,6%, e PAR com 10,6%.

A energia acumulada diária por ano é proporcional ao número de dias, e foi maior seguindo a sequência dos anos 2001, 2003, 2002, 2005 e 2004. A energia média diária foi maior na mesma sequência dos anos e é também igual à soma das radiações médias diárias UV + PAR + IV.

Tabela 2. Estatística das radiações G, UV, PAR e IV diária no período de 2001 a 2005

ano	Radiação	Diária						
		Dias	Soma MJ/m ²	Média MJ/m ²	Desvio (%)	Mínimo MJ/m ²	Máximo MJ/m ²	Variação MJ/m ²
2001	G	364	6727,3	18,48	34,67	1,34	41,90	40,56
	UV	364	275,6	0,76	33,99	0,07	1,46	1,39
	PAR	364	3308,2	9,09	34,13	0,77	19,78	19,01
	IV	364	3145,1	8,64	35,62	0,50	20,65	20,15
2002	G	350	6173,2	17,64	34,01	1,10	31,21	30,11
	UV	350	257,5	0,74	33,47	0,04	1,29	1,25
	PAR	350	3017,0	8,62	33,71	0,52	15,26	14,75
	IV	350	2898,8	8,28	34,65	0,54	14,66	14,12
2003	G	359	6398,3	17,82	34,93	2,17	30,82	28,65
	UV	359	270,7	0,75	34,21	0,11	1,28	1,17
	PAR	359	3131,5	8,72	34,51	1,17	14,98	13,81
	IV	359	2996,1	8,35	35,72	0,87	14,64	13,77
2004	G	286	4817,8	16,85	39,87	1,05	31,43	30,38
	UV	286	201,6	0,70	38,16	0,06	1,29	1,23
	PAR	286	2373,2	8,30	39,45	0,63	15,73	15,10
	IV	286	2243,1	7,84	40,82	0,35	14,43	14,08
2005	G	328	5598,9	17,07	33,01	2,92	29,75	26,83
	UV	328	226,2	0,69	32,47	0,15	1,22	1,07
	PAR	328	2788,7	8,50	32,99	1,56	15,11	13,55
	IV	328	2583,9	7,88	33,50	1,21	13,78	12,57

O desvio da radiação média em percentagem variou entre anos e radiações. Os maiores desvios foram na sequência dos anos 2004, 2003, 2001, 2002 e 2005. Entre as radiações, o maior desvio da média foi o da radiação IV que variou 7,3%, seguido das radiações G em 6,9%, PAR em 6,5%, e UV em 5,7%. O intervalo de variação da energia diária variou entre os anos e as radiações. O maior intervalo foi o do ano de 2001, seguido do dos anos 2004, 2002, 2003 e 2005. Entre as radiações, o maior intervalo foi o da radiação IV que variou 37,6% seguido do das radiações G com 33,85%, PAR com 28,7% e UV com 23,0%.

3. ANÁLISE DAS FRAÇÕES HORÁRIA E DIÁRIA.

3.1 Distribuição de frequência e estatística das frações horária K_T^h , K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h .

A Fig. 1 mostra a distribuição de frequência das frações K_T^h , K_{UV}^h , K_{PAR}^h , K_{IV}^h , para os anos de 2001 a 2004 para um total de 12365 horas. Realizou-se uma segunda eliminação de 204 frações na base das frações, as quais tiveram origem em dias chuvosos, cuja energia horária era muito baixa e produziu frações muito elevadas ou muito baixas em relação à média. O número de frações horárias diminuiu de 12569 para 12365 em relação ao número de horas das radiações.

A distribuição de frequência de K_T^h (Fig. 1a) é do tipo bimodal com intervalo de variação de 0,01(mínimo) a 0,90(máximo) e com maior número de frações, 1056 ou 8,5% da fração total de K_T^h em 0,73. Contabilizou-se o número de frações nos quatro tipos de cobertura de céu como: para $K_T^h \leq 0,35$, atmosfera nebulosa, totalizou 2414 frações ou 19,52% do total; para $0,35 < K_T^h \leq 0,55$, parcialmente nublada com dominância de céu difuso, 2508 frações ou 20,28% do total; para $0,55 < K_T^h \leq 0,65$, parcialmente nublado com dominância de céu claro 2106 frações ou 17,03% do total, e $K_T^h > 0,65$, céu aberto, 5337 frações ou 43,16% do total.

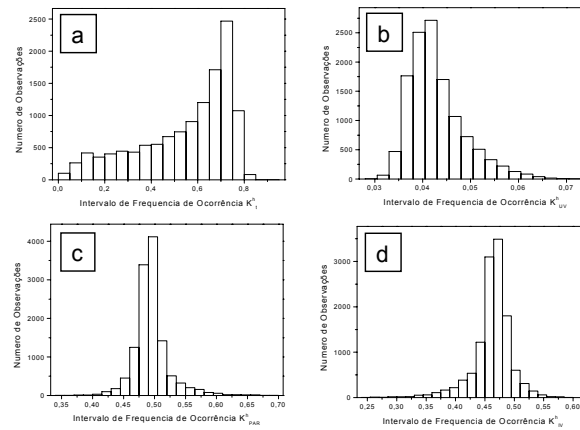


Figura 1 - Distribuição de frequência das frações horárias (a) K_T^h ; (b) K_{UV}^h ; (c) K_{PAR}^h e (d) K_{IV}^h

A distribuição de frequência das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h (Fig. 1 b,c,d) mostra que os intervalos de variação das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h são bastante extensos: a fração K_{UV}^h variou de 0,030 a 0,073 com 2508 frações, ou 20,3% do total em $K_T^h=0,041$; a fração K_{PAR}^h variou no intervalo de 0,35 a 0,69 com 4117 frações ou 33,3 % do total em $K_T^h=0,4975$; a fração K_{IV}^h variou de 0,24 a 0,60, com 4462 frações, ou 28,25% do total em $K_T^h=0,4725$.

A Tab. 3 apresenta a estatística das frações médias $\langle K_{UV}^h \rangle$, $\langle K_{PAR}^h \rangle$ e $\langle K_{IV}^h \rangle$ com os respectivos desvios em percentagem, frações mínimas e máximas, sobre o total de 12365 frações. Para intervalo total de K_T^h , a fração média obtida foi $\langle K_T^h \rangle = 0,5463$ e desvio de 37,1%, enquanto as frações médias foram: $\langle K_{UV}^h \rangle = 0,0429$ e desvio de 13,5%; $\langle K_{PAR}^h \rangle = 0,4947$ e desvio de 5,8% e $\langle K_{IV}^h \rangle = 0,4624$ e desvio de 7,2%.

Tabela 3. Estatística das frações médias $\langle K_{UV}^h \rangle$, $\langle K_{PAR}^h \rangle$ e $\langle K_{IV}^h \rangle$ com respectivos desvios em percentagem, frações mínimas e máximas sobre o total de 12365 frações

Fração	Horas	Média	Desvio (%)	Mínimo	Máximo	Variação
$\langle K_T^h \rangle$	12365	0,5464	37,10	0,01	0,90	0,89
$\langle K_{UV}^h \rangle$	12365	0,0429	13,55	0,03	0,07	0,04
$\langle K_{PAR}^h \rangle$	12365	0,4947	5,79	0,35	0,69	0,34
$\langle K_{IV}^h \rangle$	12365	0,4624	7,17	0,24	0,60	0,36

3.2 Distribuição de frequências e estatística das frações diárias K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d .

A Fig. 2 mostra a evolução das frações diárias K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d para os quatro anos. As evoluções mostram as características sazonais da transmissão da radiação global na atmosfera (K_T^d), e das frações (K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d) na superfície terrestre, bem como suas variações em função da nebulosidade. As frações K_T^d e K_{IV}^d evoluem sazonalmente, igualmente quanto à fase, ambas apresentam máximo no inverno e mínimo no verão, enquanto K_{UV}^d e K_{PAR}^d evoluem também similarmente quanto à fase, porém com máximo no verão e mínimo no inverno. Os dois pares de frações diárias evoluem periodicamente defasados de 180° .

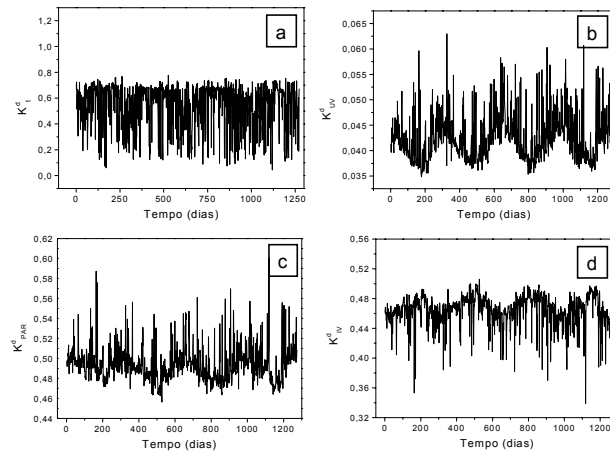


Figura 2- Evolução das frações (a) K_T^d ; (b) K_{UV}^d ; (c) K_{PAR}^d e (d) K_{IV}^d , diária para os anos de 2001 a 2005, usada para obtenção das equações de estimativa.

Em relação à cobertura do céu, nos dias nublados e parcialmente nublados com predominância de céu difuso, as variações de K_T^d e K_{IV}^d ocorrem devido à absorção pelas nuvens e vapor d'água da camada atmosférica. A variação é sempre do valor limite superior da fração ao valor limite inferior. As frações K_{PAR}^d e K_{UV}^d apresentam variações inversas a K_T^d e K_{IV}^d , e ocorrem devido à reflexão nas nuvens e difusão dos aerossóis na atmosfera, sempre do valor limite inferior ao limite superior das frações.

A Fig. 3 mostra a curva de distribuição de frequência de K_T^d , K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d diário dos quatro anos, usados na modelagem.

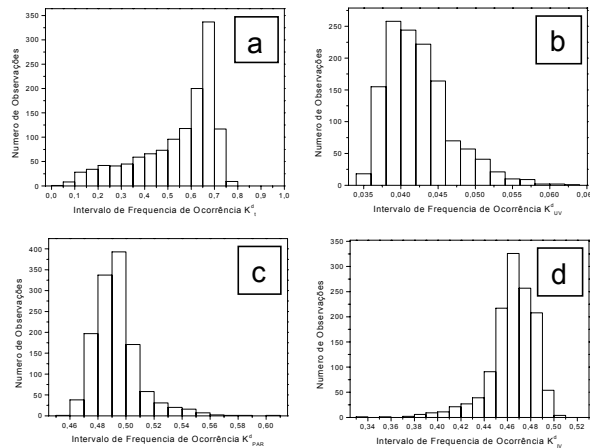


Figura 3 - Histograma de frequência das frações diárias: (a) K_T^d ; (b) K_{UV}^d ; (c) K_{PAR}^d e (d) K_{IV}^d .

A distribuição de frequência de K_T^d (Fig. 3a) permitiu quantificar o número de dias nas quatro coberturas do céu: 152 dias nebulosos; 255 dias parcialmente nublados com dominância de céu difuso, 271 dias parcialmente nublados com dominância de céu claro e 395 dias de céu aberto. A fração média sobre o total de dias é de 0,5433 com desvio de 30,6%.

A Tab. 4 mostra a estatística das frações médias diárias $\langle K_{UV}^d \rangle$, $\langle K_{PAR}^d \rangle$ e $\langle K_{IV}^d \rangle$ com os respectivos desvios em percentagem, as frações mínimas e máximas sobre o total de 1274 dias.

Tabela 4. Estatística das frações médias diárias $\langle K_{UV}^d \rangle$, $\langle K_{PAR}^d \rangle$ e $\langle K_{IV}^d \rangle$ com respectivos desvios em percentagem, as frações mínimas e máximas, sobre o total de 1274 dias.

Fração	Dias	Média	Desvio (%)	Mínimo	Máximo	Variação
$\langle K_T^d \rangle$	1274	0,5433	30,57	0,04	0,78	0,73
$\langle K_{UV}^d \rangle$	1274	0,0424	10,24	0,03	0,06	0,03
$\langle K_{PAR}^d \rangle$	1274	0,4934	3,31	0,46	0,60	0,14
$\langle K_{IV}^d \rangle$	1274	0,4642	4,33	0,34	0,51	0,17

Para o intervalo total de K_T^d , a fração média foi $\langle K_T^d \rangle = 0,5433$ com desvio de 31%, enquanto as frações médias foram $\langle K_{UV}^d \rangle = 0,0424$ com desvio 10,2%; $\langle K_{PAR}^d \rangle = 0,493$ com desvio de 3,3% e $\langle K_{IV}^d \rangle = 0,464$ com desvio de 4,3%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Equações de Estimativa das frações horárias

A Fig. 4 mostra que as correlações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h variam no sentido vertical e horizontal em função de K_T^h : na vertical, as frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h possuem um largo intervalo de variação para cada intervalo de K_T^h , enquanto que na horizontal as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h decrescem e K_{IV}^h cresce gradativamente, no sentido crescente de K_T^h tendendo ao equilíbrio.

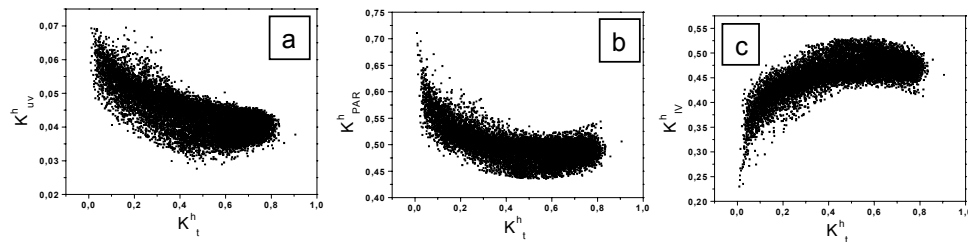


Figura 4 - Correlações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função de K_T^h .

A causa da dispersão vertical das frações está associada à variação da massa ótica. As frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h , são maiores no sentido decrescente da massa ótica ou seja, as frações são maiores nas massas óticas menores, enquanto que a evolução da fração K_{IV}^h é maior no sentido crescente da massa ótica, ou ainda, a fração é maior na massa ótica maior. Na variação horizontal, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h decrescem e K_{IV}^h cresce no sentido em que K_T^h aumenta, tendendo a um equilíbrio. As K_{UV}^h e K_{PAR}^h decrescem em função da mudança de cobertura do céu e ambas são maiores na cobertura de céu nublado ($K_T^h \leq 0,35$) e menores na cobertura de céu sem nuvens ($K_T^h \geq 0,65$). A K_{IV}^h evoluiu de forma inversa às frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h , ou seja, aumenta no sentido crescente de K_T^h , sendo menor na cobertura de céu nublado e maior em céu claro.

A variação das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h em função de K_T^h é justificável com base nos processos de interação das radiações UV, PAR e IV na atmosfera, que ocorrem devido à absorção do vapor d'água, espalhamento nas nuvens e dispersão pelos aerossóis.

No intervalo de $K_T^h \leq 0,35$, a camada atmosférica é nebulosa e com elevada concentração de nuvens e vapor d'água. As radiações UV e PAR são largamente refletidas pelas nuvens, e por isso, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h na superfície terrestre são maiores que nos demais intervalos de K_T^h . A radiação IV, comprimento de onda maior, é fortemente absorvida pelas nuvens e vapor d'água. Consequentemente, a fração K_{IV}^h na superfície terrestre nesse intervalo de K_T^h é menor que nos demais intervalos.

No intervalo de $K_T^h \geq 0,65$, a cobertura de céu é isenta de nuvens e possui concentrações de vapor d'água e aerossóis variáveis, dependentes da época do ano. No período das chuvas, meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, a atmosfera possui alta concentração de vapor d'água e baixa de aerossóis, as frações K_{UV}^h e K_{PAR}^h são maiores que no período da seca, meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, onde a atmosfera possui baixa concentração de vapor d'água e alta de aerossóis. A radiação IV interage muito pouco com aerossóis e a variação da fração K_{IV}^h ocorre basicamente devido à concentração do vapor d'água que é variável ao longo do ano. Quanto mais seca for a atmosfera, menor é a fração K_{IV}^h na evolução anual. Nos processos de interação das radiações UV, PAR e IV com o vapor d'água, nuvens e aerossóis em qualquer tipo de cobertura de céu, o crescimento da K_{IV}^h é proporcional ao decréscimo das K_{UV}^h e K_{PAR}^h e vice-versa.

A análise com regressão linear e do tipo stepwise mostraram que as variações das frações K_{UV}^h , K_{PAR}^h e K_{IV}^h , estão fracamente correlacionadas com as variações de K_T^h (Escobedo et al., 2005). Nesse trabalho, para ajustar uma função simples, optou-se por utilizar nas correlações, as frações médias $\bar{K}_{UV}^h$, $\bar{K}_{PAR}^h$ e $\bar{K}_{IV}^h$ para cada intervalo centesimal K_T^h . Essa técnica foi utilizada por diversos pesquisadores, para as frações difusa K_d^h e direta K_D^h , relacionadas com intervalos centesimais de K_T^h . (Orgill & Hollands, 1977; Erbs et al., 1982., Bartoli et al., 1982).

A Fig. 5 mostra as correlações das frações $\bar{K}_{UV}^h$, $\bar{K}_{PAR}^h$ e $\bar{K}_{IV}^h$ em função de K_T^h . As equações de estimativa horária com os coeficientes de determinação (R^2) estão apresentados na Tab. 5.

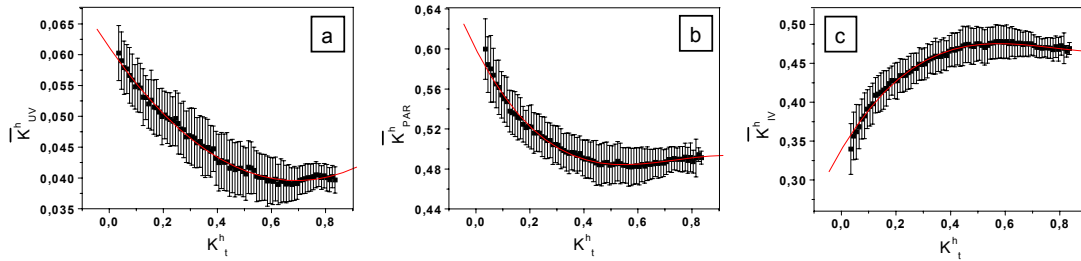


Figura 5 - Equações de Estimativa das Frações médias: (a) $\bar{K}_{UV}^h$; (b) $\bar{K}_{PAR}^h$ e (c) $\bar{K}_{IV}^h$, em função de intervalos de K_T^h .

Os elevados valores dos coeficientes de determinação: $R_{uv}^2=0,9918$; $R_{par}^2= 0,9849$ e $R_{iv}^2= 0,9976$ mostram que as variações das frações $\bar{K}_{UV}^h$, $\bar{K}_{PAR}^h$ e $\bar{K}_{IV}^h$ estão bem relacionadas às variações de K_T^h .

O resultado foi considerado bom para todas as frações e melhor na sequência para $\bar{K}_{UV}^h$, $\bar{K}_{PAR}^h$ e $\bar{K}_{IV}^h$. O ajuste da equação de terceiro grau é justificado pelo fato que as evoluções $\bar{K}_{UV}^h$ e $\bar{K}_{PAR}^h$ que decresciam ou a $\bar{K}_{IV}^h$ que crescia em função de K_T^h , tendendo ao equilíbrio em ($\bar{K}_{UV}^h=0,0395$; $\bar{K}_{PAR}^h=0,485$; $\bar{K}_{IV}^h=0,476$), começaram a crescer e a decrescer respectivamente na cobertura de céu aberto em $K_T^h \geq 0.65$.

Tabela 5. Equações de estimativa para as frações $\bar{K}_{UV}^h$, $\bar{K}_{PAR}^h$ e $\bar{K}_{IV}^h$ em função de K_t^h , e coeficiente de determinação.

Equações de Estimativa Horária	R ²
$\bar{K}_{UV}^h = 0,06119 - 0,06323(K_t^h) + 0,04727(K_t^h)^2 - 0,00151(K_t^h)^3$	0,9918
$\bar{K}_{PAR}^h = 0,59975 - 0,52412(K_t^h) + 0,76022(K_t^h)^2 - 0,34354(K_t^h)^3$	0,9849
$\bar{K}_{IV}^h = 0,33897 + 0,5881(K_t^h) - 0,80989(K_t^h)^2 + 0,34719(K_t^h)^3$	0,9876

A causa dessa singularidade pode ser entendida por meio das variações sazonais (verão e inverno) das frações nas condições de céu aberto. No verão, o espalhamento do vapor d'água aumenta o número de frações UV e PAR o qual é maior que as frações de equilíbrio $\bar{K}_{UV}^h = 0,0395$ e $\bar{K}_{PAR}^h = 0,485$. No inverno, o espalhamento do vapor d'água é baixo, tornando a grande maioria das frações UV e PAR menores que as frações de equilíbrio. A fração IV evoluiu sazonalmente com uma defasagem de 180° em relação às evoluções das frações UV e PAR, é mínima no verão e máxima no inverno. No verão, a grande maioria da fração IV possui valores inferiores à fração de equilíbrio $\bar{K}_{IV}^h = 0,476$ e no inverno, a grande maioria da fração IV possui valores superiores à fração de equilíbrio.

Contabilizadas as frações UV, PAR e IV maiores e menores que as frações de equilíbrio da Fig. 4 no intervalo $K_t^h > 0,65$, observamos que o crescimento das frações médias $\bar{K}_{UV}^h$ e $\bar{K}_{PAR}^h$ é devido a maior quantidade de frações UV e PAR superiores às frações de equilíbrio $\bar{K}_{UV}^h = 0,0395$ e $\bar{K}_{PAR}^h = 0,485$, que deslocou a curva para cima. O decréscimo da fração $\bar{K}_{IV}^h$ é devido a maior quantidade da fração IV inferior à fração de equilíbrio $\bar{K}_{IV}^h = 0,476$ a qual deslocou a curva para baixo.

4.2 Equações de Estimativas das frações Diárias.

A Fig. 6 mostra a correlação das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d . Para K_t^d variando de 0,01 a 0,85, as frações diárias UV, PAR e IV variaram nos seguintes intervalos: $0,035 \leq K_{UV}^d \leq 0,063$; $0,456 \leq K_{PAR}^d \leq 0,600$ e $0,339 \leq K_{IV}^d \leq 0,506$. Assim, para a modelagem da fração diária, optou-se também pelo ajuste através das frações médias em intervalo centesimal de K_t^d , mesmo levando-se em conta o menor número de pontos.

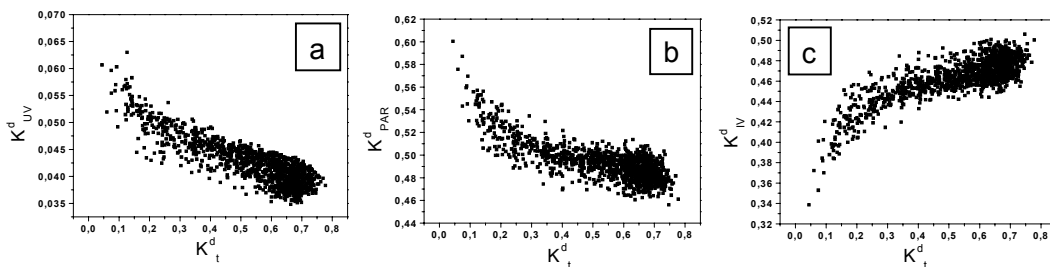


Figura 6 - Correlação das frações K_{UV}^d , K_{PAR}^d e K_{IV}^d em função de K_t^d

A Fig. 7 mostra as correlações da $\bar{K}_{UV}^d$, $\bar{K}_{PAR}^d$ e $\bar{K}_{IV}^d$ em função de K_T^d e a Tab. 6 apresenta as equações de estimativa e os coeficientes de determinação (R^2). As frações médias diárias $\bar{K}_{UV}^d$ e $\bar{K}_{PAR}^d$ decrescem e $\bar{K}_{IV}^d$ cresce no sentido crescente de K_t^d .

Tabela 6. Equações de estimativa diária para as frações UV, PAR e IV em função de K_t .

Equações de Estimativa	R^2
$\overline{K}_{UV}^d = 0,06006 - 0,05908(K_t^d) + 0,06743(K_t^d)^2 - 0,03478(K_t^d)^3$	0,9648
$\overline{K}_{PAR}^d = 0,58751 - 0,49564(K_t^d) + 0,92802(K_t^d)^2 - 0,62078(K_t^d)^3$	0,9476
$\overline{K}_{IV}^d = 0,35462 + 0,54052(K_t^d) - 0,96993(K_t^d)^2 + 0,64212(K_t^d)^3$	0,9599

Os coeficientes de determinação $R_{uv}^2 = 0,9648$; $R_{par}^2 = 0,9476$ e $R_{iv}^2 = 0,9599$ próximos a 1 mostram que as variações médias das $\overline{K}_{IV}^d$, $\overline{K}_{PAR}^d$ e $\overline{K}_{UV}^d$ estão altamente correlacionadas à variação de K_t^d . Os ajustes das equações diárias foram melhores na sequência para as frações IV, UV e PAR.

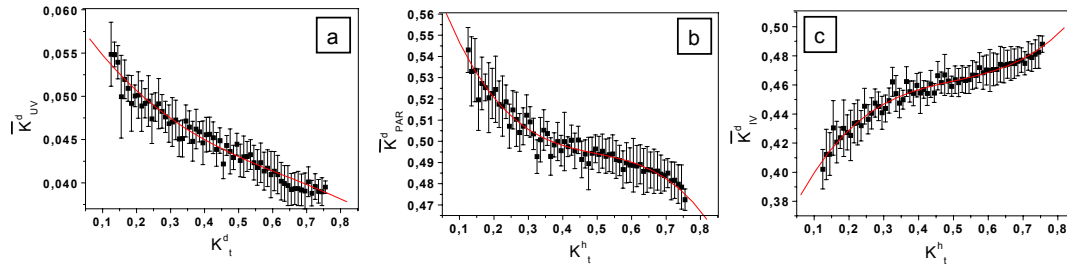


Figura 7 - Frações médias: (a) $\overline{K}_{UV}^d$; (b) $\overline{K}_{PAR}^d$ e (c) $\overline{K}_{IV}^d$ em função de intervalos de K_t^d .

4.3 Validação das Equações de Estimativa Horária e Diária.

A Tab. 7 apresenta os indicadores estatísticos MBE, RMSE, “d” de ajustamento na validação das equações das Tabs. 5 e 6. O sinal negativo do indicativo MBE mostra que a estimativa horária da fração PAR subestima, enquanto que o sinal positivo do MBE para UV e IV indica que superestima a medida.

Tabela 7. Indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” de ajustamento da validação.

	Modelo	MBE(%)	RMSE(%)	d
Horária	$\overline{K}_{UV}^h$	3,23	9,73	0,8736
	$\overline{K}_{PAR}^h$	-1,61	4,63	0,7860
	$\overline{K}_{IV}^h$	1,49	5,51	0,8276
Diária	$\overline{K}_{UV}^d$	4,79	7,50	0,8551
	$\overline{K}_{PAR}^d$	-1,14	2,47	0,8081
	$\overline{K}_{IV}^d$	0,81	2,84	0,8586

O indicativo estatístico MBE horário para PAR= - 1,6%, IV= 1,5%, e UV= 3,2%, foi considerado bom, pois mostra que a estimativa é da ordem do erro experimental. O indicativo estatístico MBE diário foi pouco melhor que o da horária. O indicativo RMSE inferior a 10,0% mostra que as equações estimam com baixa dispersão onde o desempenho foi melhor para a estimativa diária (PAR= 2,5%, IV= 2,8% e UV= 7,5%) o qual é pouco inferior ao RMSE horário (PAR= 4,6%%, IV= 5,5% e UV= 9,7%). O coeficiente “d” para estimativa horária e diária superior a 0,80 mostra que o ajuste é bom estatisticamente nas duas partições, com melhor desempenho para as frações UV, IV e PAR.

5. CONCLUSÕES

As frações das radiações UV, PAR e IV horária e diária na superfície terrestre dependem de fatores climáticos como nebulosidade, concentrações de vapor d'água e aerossóis da camada atmosférica. As correlações horária e diária produziram equações de estimativa polinomial de terceiro grau,

com coeficientes de determinação próximos a 1. O ajuste foi melhor na sequência das frações UV, IV e PAR. Na validação, os indicativos estatísticos MBE, RMSE, “d” obtidos pela comparação entre a medida e a estimada: MBE inferior a 5,0%, RMSE inferior a 10,0% e “d” superior a 0,80 mostram que as equações podem ser utilizadas na estimativa horária e diária, das frações UV, PAR e IV, a partir da radiação global com boa precisão e exatidão com vantagem para as equações diárias.

REFERÊNCIAS

- BARTOLI, B., CUOMO, V., AMATO, U. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-11, 1982.
- ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v.28, p.293-302, 1982.
- ESCOBEDO, J. F. GOMES, E. N. OLIVEIRA, A. P. DAL PAI, A. SOARES, J. 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. In: Congresso Argentino de Meteorologia, 2005, Buenos Aires. Anales do IX Congreso Argentino de Meteorologia. 2005.
- IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy*, v.1, p.81-86, 1979a.
- JACOVIDES, 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, n.6, p.565-72, 1996.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19, 1960.
- ORGILL, J. F., HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v.19, n.3, p.357-359, 1977.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v.45, n.1, p.1-7, 1990.
- TIRIS, M., TIRIS, Ç., TÜRE, I.E. Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey. *Energy Conversion* v.37, n. 9, p. 1417-1421, 1995.
- VIGNOLIA, F., McDANIELS, D. K. Beam-global correlations in the pacific northwest. *Solar Energy*, v.36, p.409-18, 1986.

K_{UV} , K_{PAR} E K_{IV} SOLAR FRACTIONS: SEASONAL ANALYSIS AND ESTIMATIVE EQUATIONS AS A FUNCTION OF K_t

ABSTRACT: This work presents equations to estimate hourly and daily ultraviolet (K_{UV}), photosynthetic active (K_{PAR}), and infrared (K_{IV}) solar radiation fractions as a function of the K_t centesimal clearness index. The correlations of the K_{UV} , K_{PAR} and K_{IV} fractions as a function of K_t led to third degree equations with high determination coefficients: hourly ($R^2_{UV}=0.9918$; $R^2_{PAR} = 0.9848$ and $R^2_{IV} = 0.9876$) and daily ($R^2_{UV} = 0.9648$; $R^2_{PAR} = 0.9476$ and $R^2_{IV} = 0.9599$). The statistical indicators of the validation were: MBE lower than 5.0%; RMSE lower than 10.0% and “d” of Willmott higher than 0.80. These results showed that the K_{UV} , K_{PAR} and K_{IV} hourly and daily fractions could be accurately estimated as function of K_t .

Keywords: global solar radiation, IV, PAR and UV solar radiation, Estimate of IV, PAR and UV radiation.

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