

# MODELOS ESTATÍSTICOS PARA ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR UV HORÁRIA EM BOTUCATU/SP/BRASIL

Érico Tadao Teramoto – ericoengineer@hotmail.com

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Dinival Martins – dinival@fca.unesp.br

Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Rural

**Resumo.** O objetivo deste trabalho foi ajustar modelos estatísticos para a estimativa da irradiação solar UV horária em Botucatu/SP/Brasil. Foram ajustados três modelos que permitem a estimativa a partir da correlação entre a transmissividade atmosférica da radiação solar UV ( $K_{TUV}$ ) e o índice de claridade  $K_T$ . Modelos deste tipo podem ser utilizados em qualquer cidade no globo terrestre que possua clima similar ao do local onde foram desenvolvidos. Os principais fatores que motivaram o presente estudo foram: a importância da radiação solar UV como um fator nocivo para a biosfera, polímeros sintéticos e fibras naturais e o número pequeno de cidades no Brasil que a monitoram. Em geral, os modelos ajustados apresentaram imprecisão inferior ao do sensor utilizado na medição da radiação solar UV, com tendência de superestimar os valores de irradiação solar UV horária em ~1%.

**Palavras-chave:** Transmissividade atmosférica, Índice de claridade  $K_T$ , Massa óptica relativa do ar, Coluna total de ozônio.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação ultravioleta (UV) representa uma parcela pequena da radiação global (~4%) (Rooba, 2004; Hu et al., 2010; Escobedo et al., 2011), porém ela possui notoriedade em relação às faixas espectrais visível (VIS) e infravermelho (IV) em função de seus efeitos nocivos sobre a biosfera (Boeger e Poulson et al., 2006; Nazari et al., 2010).

Desde a década de 90 do século passado houve uma grande expansão em escala mundial no número de estações meteorológicas monitorando a radiação solar UV (Leszczynski, 2002). A expansão foi resultado da preocupação em relação ao possível aumento na transmissão atmosférica da radiação solar UV, em função da redução na concentração do ozônio estratosférico registrado desde 1970 (Herman et al., 1999; Newchurch et al., 2003). Por outro lado, atualmente há evidências de que a urbanização e o desenvolvimento industrial têm gerado a redução na incidência da radiação solar UV em algumas cidades, com o aumento na concentração de aerossóis na atmosfera (Rooba, 2004). Os aerossóis são capazes de exercer influência sobre a radiação solar UV tanto de forma direta (absorção e espalhamento) quando indireta (alteração da nebulosidade) (Kaufman e Koren, 2006; Codato et al., 2008).

Diante da incerteza em relação à existência de tendências, tanto de aumento quanto de redução na incidência de radiação solar UV, torna-se necessário o monitoramento e estudo dela por um período contínuo e prolongado. No Brasil, ainda são poucas as cidades que monitoram a radiação solar UV e raras são as que fazem o monitoramento continuamente há mais de 10 anos. Quando não há o monitoramento e a disponibilidade de séries de dados climatológicos longas, para uso em análise da variação climática ou de tendências, a alternativa é a estimativa a partir de outras variáveis meteorológicas. No caso, a estimativa pode ser feita por meio de modelos de transmitância atmosférica, de modelos estatísticos desenvolvidos em locais de clima semelhante ou por meio de técnicas de aprendizado de máquinas (Escobedo et al., 2009; Villán et al., 2010; Leal et al., 2011; Huang et al., 2011). Dentre os três métodos de estimativa, o segundo é o mais aplicado devido a sua simplicidade na utilização associada à relativa precisão quando comparado aos demais (Chen et al., 2011; Leal et al., 2011).

A Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP está entre as poucas que monitoram a radiação solar UV no Brasil e possui série de dados climatológicos com mais de 10 anos. Um detalhe importante desta estação é a sua localização em uma região influenciada pela queima de cana-de-açúcar durante o período de colheita (maio-outubro), que gera o aumento na concentração de aerossóis na atmosfera. O uso da queima na colheita segue tendência de redução no Estado de São Paulo desde 2008 e deverá ser eliminada até 2017, em função do protocolo assinado entre o governo estadual e a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar). Tal cenário gera incertezas quanto às alterações em Botucatu nos níveis de incidência da radiação solar UV que ocorrerá até e após 2017.

O objetivo deste trabalho foi ajustar modelos estatísticos para a estimativa da radiação solar UV horária em função dos índices  $K_{TUV}$  e  $K_T$  em Botucatu/SP/Brasil. O índice  $K_{TUV}$  corresponde à razão entre a radiação solar UV incidente na superfície terrestre e a radiação solar UV extraterrestre e o índice  $K_T$  corresponde à razão entre a radiação solar global e a radiação solar extraterrestre. A utilização dos dois índices permite avaliar a variação na incidência da radiação solar sobre a superfície terrestre apenas em função do clima, eliminando a dependência astronômica e a geográfica. Assim, os

modelos ajustados neste trabalho serão passíveis de serem utilizados em locais onde há o monitoramento da radiação solar global e que possuem clima similar ao de Botucatu.

## 2. LOCAL DE ESTUDO

O município de Botucatu (22°51' S; 48°26' W; 742 m) possui área territorial de 1.482,87 km<sup>2</sup>, população de 127 mil habitantes e está 221 km distantes do Oceano Atlântico. O clima local é caracterizado pelo inverno frio e seco (junho-agosto) e verão quente e úmido (dezembro-fevereiro). O ciclo anual das chuvas é constituído de dois períodos bem distintos. Há um período chuvoso (outubro-março), onde ocorre de 75 a 90% do total anual de precipitação acumulada, e um período seco (abril-setembro), onde os valores mensais permanecem abaixo de 100 mm. Durante os meses do período seco é observado o aumento na concentração de aerossóis na atmosfera local. Tal fenômeno é causado principalmente pela queima de cana-de-açúcar em cidades adjacentes, pelos incêndios em florestas e pastagens na região centro-oeste do Brasil e pela baixa frequência de chuvas (Codato et al., 2008; Freitas et al., 2005; Evangelista et al., 2007). As maiores concentrações de aerossóis na atmosfera ocorrem nos meses de agosto e setembro. Em setembro são observados aumentos de até 140% na concentração de material particulado PM<sub>10</sub> (diâmetro de partículas > 10 µm) em suspensão na atmosfera em relação ao período chuvoso (Codato et al., 2008).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Obtenção dos dados

Os dados das irradiância solar global (0,29-2,8 µm) e solar UV (0,29-0,40 µm) utilizados foram medidos durante o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007 na Estação de Radiometria Solar da FCA/UNESP em Botucatu. Na medição foram utilizados, respectivamente, um radiômetro CUV3 da Kipp & Zonen e um piranômetro modelo PSP da Eppley. A imprecisão do CUV3 é de ~5% (Huang et al., 2011) e a do PSP é de ~2,5% (Ambrosetti et al., 1984). Os dois radiômetros utilizados foram calibrados periodicamente por meio do método comparativo, sugerido pela OMM (Fröhlich e London, 1986). Na aquisição dos dados foi utilizado um datalogger CR23X da Campbell operando na frequência de 1 Hz e armazenando média a cada 5 minutos. Os dados médios de 5 minutos passaram por um controle de qualidade no qual os valores espúrios foram eliminados e em seguida foram processados por programas desenvolvidos para o cálculo das irradiâncias horárias (Chaves e Escobedo, 2000).

Os valores de  $K_{TUV}$  e do índice de claridade  $K_T$  foram calculados a partir das Eq. (1) e (2), respectivamente (Iqbal, 1983; Huang et al., 2011):

$$K_{TUV} = UV / 0,057H_0 \quad (1)$$

$$K_T = G / H_0 \quad (2)$$

onde  $H_0$  é a irradiância solar extraterrestre diária ou horária, estimadas seguindo metodologia divulgada por Iqbal (1983).

Os dados diários de coluna total de ozônio (CTO) utilizados, expressos em Unidades Dobson (UD), foram os medidos pelo satélite Earth Probe nos anos de 2000 a 2004 e pelo satélite Aura nos anos de 2005 a 2007 (disponíveis em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>). O satélite Earth Probe mede o CTO por meio do sensor TOMS e o satélite Aura por meio do OMI, ambos com imprecisão de aproximadamente 2% (McPeters et al., 2008).

### 3.2 Ajuste e validação dos modelos estatísticos

O ajuste dos modelos foi realizado a partir dos dados do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005 (75% da base total) e o restante dos dados (25% da base total) foram utilizados para a validação. Com base nos disponíveis na literatura, foram ajustados os seguintes modelos estatísticos:

1) Modelo linear: equação do tipo  $K_{TUV} = bK_T$ , onde o coeficiente  $b$  é calculado a partir da correlação linear entre os dados horários de  $K_{TUV}$  e os de  $K_T$ .

2) Modelo exponencial divulgado por Foyo-Moreno et al. (1999): equação exponencial de decaimento de segunda ordem que considera o efeito do ar seco sobre a UV em condições de céu claro (Eq. (3)).

$$K_{TUV} = bK_T(UV_{claro} / UV_0) \quad (3)$$

onde  $UV_{claro}$  é a irradiância solar UV horária em condições de céu claro, expresso em MJ m<sup>-2</sup>, estimada a partir da Eq. (4):

$$UV_{\text{claro}} = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-m_r}{T_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-m_r}{T_2}\right)} \quad (4)$$

onde  $y_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $T_1$  e  $T_2$  são coeficientes estimados por meio de regressão;  $m_r$  é a massa óptica relativa do ar, adimensional, calculada por meio da Eq. (5) (Kasten e Young, 1989):

$$m_r = \frac{1}{[\cos(\theta_z) + 0,050572(96,0795 - \theta_z)^{-1,6364}]} \quad (5)$$

onde  $\theta_z$  é a ângulo zenital, expresso em graus.

3) Modelo exponencial divulgado por Huang et al. (2011): equação exponencial de decaimento de segunda ordem que considera o efeito do ar seco e do ozônio sobre a UV em condições de céu claro. Utiliza a Eq. (3) associada à Eq. (6) para estimativa da UV em condições de céu claro:

4)

$$1. \quad UV_{\text{claro}} = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-m_r}{T_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-m_r}{T_2}\right)} + A_3 e^{\left(\frac{-SOC}{T_3}\right)} + A_4 e^{\left(\frac{-SOC}{T_4}\right)} \quad (6)$$

onde SOC é a coluna total de ozônio oblíqua, expressa em UD, calculada a partir da coluta total de ozônio CTO, expressa em UD, e do  $\theta_z$ , expresso em graus, utilizando a Eq. (7) (Antón et al., 2008):

$$SOC = CTO / \cos(\theta_z) \quad (7)$$

Para a avaliação dos modelos estatísticos ajustados foram utilizados os índices estatísticos MBE (do inglês “*Mean Bias Error*”, expresso em %), RMSE (do inglês “*Root Mean Square Error*”, expresso em %) e d de Willmot. O uso do d de Willmott em conjunto com os índices MBE e RMSE na validação de modelos estatísticos de estimativa da radiação solar tem sido proposto por vários autores na literatura (Alados et al., 1999; Escobedo et al., 2009; Souza e Escobedo, 2013). O MBE indica a tendência do modelo em subestimar ( $MBE < 1$ ) ou superestimar ( $MBE > 1$ ) os valores previstos, porém não informa sobre o espalhamento dos dados, que é avaliado a partir do RMSE. O d de Willmott pode variar de 0 a 1 e serve como indicador da exatidão do modelo avaliado, onde valores próximos de 1 indicam maior exatidão. Os três índices foram calculados utilizando as Equações 8, 9 e 10, respectivamente (Stone et al., 1978; Willmott, 1981; Iqbal, 1983):

$$MBE = \left[ \sum_{m=1}^n (Y_c - Y_m) \right] / n \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[ \sum_{m=1}^n (Y_c - Y_m)^2 \right] / n} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (Y_c - Y_m)^2}{\sum_{m=1}^n (|Y_c - \bar{Y}| + |Y_m - \bar{Y}|)^2} \quad (10)$$

onde  $n$  é o número de observações realizadas;  $Y_c$  são valores de irradiação UV horária calculados;  $Y_m$  são valores de irradiação UV horária medidos;  $\bar{Y}$  é a média dos valores medidos no intervalo horário considerado;  $|Y_c - \bar{Y}|$  é o valor absoluto da diferença  $Y_c - \bar{Y}$ ;  $|Y_m - \bar{Y}|$  é o valor absoluto da diferença  $Y_m - \bar{Y}$ .

Os cálculos estatísticos, ajuste dos modelos e gráficos foram feitos utilizando o programa Microcal Origin 6.0®.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise estatística

As características do  $K_{TUV}$  horário (adimensional) foram analisadas utilizando os índices estatísticos: média aritmética (M), desvio padrão (DP), mediana (Med), valores mínimo (Min) e máximo (Max), intervalo inter-quartil (Q3 - Q1), assimetria (AS) e curtose (Kur). Na Tab. 1 são apresentados os valores horários anuais dos índices citados, período de 01/01/2000 a 31/12/2007.

Tabela 1 - Características do  $K_{TUV}$  horário (adimensional) em Botucatu, período de janeiro de 2000 a dezembro 2007.

Hora	M	DP	Med	Min	Max	Q3-Q1	AS	Kur	n
7	0,279	0,099	0,288	0,009	0,530	0,128	-0,355	4,476	2.718
8	0,344	0,114	0,281	0,013	0,565	0,369	-0,777	2,028	2.748
9	0,392	0,125	0,319	0,005	0,598	0,430	-1,002	-4,116	2.752
10	0,424	0,126	0,363	0,022	0,595	0,467	-1,127	-7,148	2.737
11	0,439	0,127	0,384	0,016	0,614	0,483	-1,219	-8,543	2.717
12	0,436	0,128	0,384	0,027	0,617	0,479	-1,217	-8,202	2.707
13	0,419	0,127	0,355	0,015	0,616	0,016	-1,103	-6,723	2.722
14	0,386	0,127	0,316	0,017	0,593	0,424	-0,974	-4,736	2.753
15	0,343	0,118	0,273	0,022	0,564	0,375	-0,834	2,758	2.746
16	0,287	0,101	0,234	0,011	0,519	0,306	-0,671	1,138	2.707
17	0,233	0,099	0,157	0,003	0,501	0,242	-0,297	-0,812	1.194

Em geral, os valores médios (M), foram maiores nos horários próximos ao meio dia solar e menores nos horários do início e final do fotoperíodo, variando de  $0,233 \pm 0,099$  (17 horas) a  $0,439 \pm 0,127$  (11 horas). O resultado observado está relacionado com o percurso óptico percorrido pela radiação UV na atmosfera (Foyo-Moreno et al., 2003; Villán et al., 2010). O percurso óptico tende a ser menor nos intervalos próximos ao meio dia solar e aumenta no sentido dos horários próximos ao nascer e ao pôr-do-sol. Quanto maior o percurso óptico, maior será a atenuação da radiação UV em função da maior interação com os constituintes atmosféricos. Somente em condições de céu nebuloso a atenuação da radiação UV pelas nuvens apresenta baixa dependência do percurso óptico atmosférico (Villán et al., 2010). Na condição de céu claro com ocorrência de atmosfera turbida, a variação do  $K_{TUV}$  com o aumento do percurso óptico é elevada (Teramoto e Escobedo, 2012).

O M em nenhum intervalo horário foi igual à mediana (Med) e a assimetria (AS) e a curtose (Kur) não foram iguais a zero, resultados que indicam a não normalidade da distribuição dos valores horários de  $K_{TUV}$ . No caso dos valores máximos e mínimos, o pico foi observado as 12 horas e o menor valor as 17 horas. E o menor intervalo interquartil foi observado as 13 horas (0,016) e o maior as 11 horas (0,483).

#### 4.2 Modelo linear ajustado

A Eq. (11) abaixo foi originada da correlação linear entre o  $K_{TUV}$  e o  $K_T$ , utilizando 25.650 dados horários do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005.

$$K_{TUV}=0,698K_T \quad (11)$$

Em Botucatu o valor do coeficiente angular b originado da correlação linear é de 0,70 eo coeficiente de correlação  $R^2 = 0,96$ . Estes valores estão próximos aos encontrados por Foyo-Moreno et al. (1998) em Granada na Espanha:  $b = 0,68$  e  $R^2 = 0,92$ . Em Ansai na China, Hu et al. (2010) encontrou  $b = 0,64$  e  $R^2 = 0,93$ . A diferença observada entre os valores de b ajustado sem cada uma das três cidades é gerada pelas diferenças climáticas entre elas em relação a nebulosidade, umidade do ar e concentração de aerossóis na atmosfera. Locais onde durante o ano há a predominância de condições atmosféricas de baixa umidade do ar e baixa nebulosidade tendem a apresentar valores menores de b em relação à locais de clima úmido e nebuloso. Quando há a predominância de condições atmosféricas de baixa nebulosidade e umidade do ar, locais com elevada concentração de aerossóis tendem a apresentar b menores do que em locais com atmosfera menos poluída.

O município de Botucatu apresenta clima úmido e nebuloso quando comparado à Granada e Ansai e, por isso, apresentou o maior valor de “b” dentre as três cidades. Granada ( $37^{\circ}10' N$ ;  $03^{\circ}34' W$ ; 660 m) é uma ilha caracterizada por apresentar uma atmosfera poluída, com umidade relativa média anual de 61%. Ansai ( $36^{\circ}51' N$ ;  $109^{\circ}19' W$ ; 1.189 m) apresenta atmosfera poluída e clima seco com baixa nebulosidade. Nela a média anual de profundidade ótica de aerossóis no comprimento de onda do visível (500 nm) é igual a 0,38 e a de umidade relativa do ar igual a 57% (Hu et al., 2010).

A estimativa da irradiação UV a partir do modelo linear pode ser feita por meio da equação  $UV=0,698K_TUV_0$ , onde  $UV_0$  é a irradiação UV extraterrestre horária, expressa em  $W m^{-2}$ .

#### 4.3 Modelo exponencial divulgado por Foyo-Moreno et al. (1999) ajustado

Abaixo é apresentada a Eq. (12) para estimativa da irradiação solar UV horária em condições de céu claro em função da massa óptica relativa do ar ( $m_r$ ), ajustada por meio de regressão exponencial de decaimento de segunda ordem. Foram utilizados 4.826 dados do período entre janeiro de 2000 a dezembro de 2005. Os índices estatísticos  $R^2$ , MBE, RMSE e d de Wilmott utilizados na validação da Eq. (12) são apresentados na Tab. 2. O critério utilizado para classificação das condições de céu como claro foi o  $K_T > 0,65$ , conforme proposto por Escobedo et al. (2009) para Botucatu.

$$UV_{\text{claro}} = 0,005 + 1,012 e^{\left(\frac{-m_r}{0,401}\right)} + 0,106 e^{\left(\frac{-m_r}{2,588}\right)} \quad (12)$$

Tabela 2 - R<sup>2</sup>, MBE, RMSE e d de Wilmott do modelo ajustado para estimativa da irradiação solar UV horária em função da m<sub>r</sub> em Botucatu.

R <sup>2</sup>	MBE (%)	RMSE (%)	d
0,959	0,579	7,686	0,982

Com base nos índices estatísticos apresentandos na Tab. 2, verifica-se que o modelo apresentou pequena tendência em superestimar os valores de irradiação UV em condições de céu claro (MBE = 0,579%). O desempenho foi melhor em relação às equações desenvolvidas por Huang et al. (2011), para duas localidades na China, em relação aos índices R<sup>2</sup> e RMSE.

A partir da Eq. (12) para estimativa da irradiação UV em condições de céu claro e seguindo a equação  $K_{TUV} = bK_T(UV_{\text{claro}}/UV_0)$ , a irradiação UV horária em qualquer condição de céu pode ser expressa por meio da Eq. (13). Nela, o coeficiente b foi obtido da regressão linear entre os dados medidos e o produto  $K_T UV_{\text{claro}}$ , 14.814 dados do período entre janeiro de 2000 a dezembro de 2005 onde  $K_T < 0,65$  (céu com nuvens).

$$UV = 1,497K_T \left[ 0,005 + 1,012 e^{\left(\frac{-m_r}{0,401}\right)} + 0,106 e^{\left(\frac{-m_r}{2,588}\right)} \right] \quad (13)$$

#### 4.4 Modelo exponencial divulgado por Huang et al. (2011) ajustado

Abaixo é apresentada a Eq. (14) para estimativa da irradiação solar UV horária em condições de céu claro em função da massa óptica relativa do ar (m<sub>r</sub>) e da coluna total de ozônio oblíqua (SOC), ajustada por meio de regressão exponencial de decaimento de segunda ordem. Foram utilizados 4.826 dados do período entre janeiro de 2000 a dezembro de 2005. Na Tab. 3 são apresentados os índices estatísticos R<sup>2</sup>, MBE, RMSE e d de Wilmott utilizados na validação da Eq. (14).

$$UV_{\text{claro}} = 0,024 + 2,000 e^{\left(\frac{-m_r}{0,236}\right)} + 0,239 e^{\left(\frac{-m_r}{0,975}\right)} + 0,407 e^{\left(\frac{-SOC}{78,174}\right)} + 0,0187 e^{\left(\frac{-SOC}{394,872}\right)} \quad (14)$$

Tabela 3 - R<sup>2</sup>, MBE, RMSE e d de Wilmott do modelo ajustado para estimativa da irradiação UV<sub>claro</sub> horária em função da m<sub>r</sub> e da SOC em Botucatu.

R <sup>2</sup>	MBE (%)	RMSE (%)	d
0,937	0,873	7,316	0,984

Com base nos índices estatísticos apresentandos na Tab. 3, verifica-se que o modelo apresentou pequena tendência em superestimar os valores de irradiação UV em condições de céu claro (MBE = 0,872%). O valor de RMBE (7,32%) foi inferior aos observados por Huang et al. (2011) para duas localidades na China (RMBE > 10%) e o MBE apresentou valor próximo (-1 > MBE > 1).

A partir da Eq. (14) e seguindo o modelo  $UV = b[K_T UV_{\text{claro}}]$ , a irradiação solar UV horária em qualquer condição de céu em função do  $K_T$ ,  $m_r$  e da SOC pode ser expressa por meio da Eq. (15). Nela, o coeficiente b foi obtido da regressão linear entre os dados medidos e o produto  $K_T UV_{\text{claro}}$ , 13.768 dados do período entre janeiro de 2000 a dezembro de 2005 onde  $K_T < 0,65$  (céu com nuvens)

$$UV = 1,492K_T \left[ 0,024 + 2,000 e^{\left(\frac{-m_r}{0,236}\right)} + 0,239 e^{\left(\frac{-m_r}{0,975}\right)} + 0,407 e^{\left(\frac{-SOC}{78,174}\right)} + 0,0187 e^{\left(\frac{-SOC}{394,872}\right)} \right] \quad (15)$$

#### 4.5 Validação dos modelos ajustados

Na Tab. 4 são apresentados os índices estatísticos R<sup>2</sup>, MBE, RMSE e d de Wilmott calculados para os três modelos ajustados para Botucatu. Na validação foram utilizados 7.001 dados do período de 2006 a 2007. Na Fig. 1 são apresentados gráficos da correlação entre os dados horários de irradiação UV medidos e os estimados por meio dos três modelos.

Tabela 4 - R<sup>2</sup>, MBE, RMSE e de Wilmott calculados para os modelos ajustados para estimativa da irradiação solar UV horária anual em Botucatu.

Modelo	R <sup>2</sup>	MBE (%)	RMSE (%)	d (%)
Modelo linear	0,984	-5,943	12,875	0,988
Foyo-Moreno et al. (1999) ajustado	0,973	0,829	12,231	0,991
Huang et al. (2011) ajustado	0,971	0,921	12,245	0,990

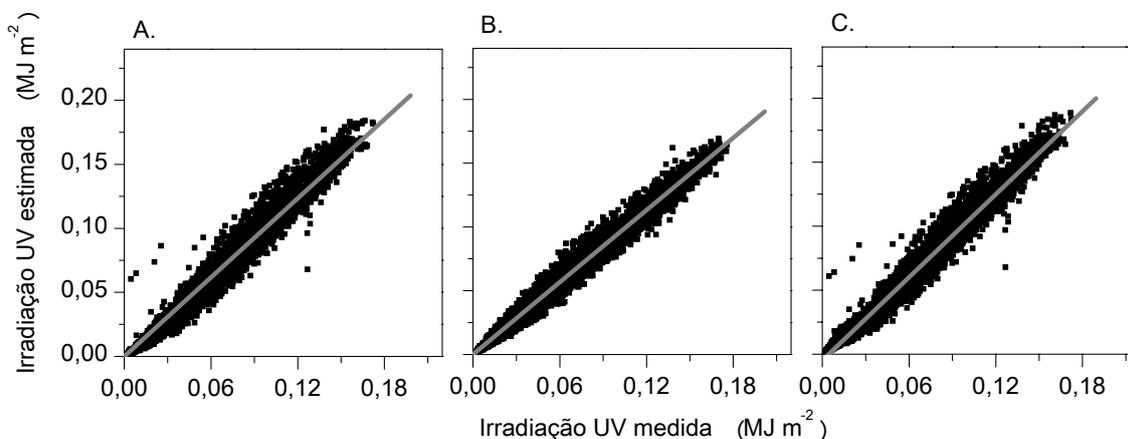


Figura 1 - Correlação entre a irradiação UV medida e a estimada a partir dos modelos linear (A), Foyo-Moreno et al. (1999) (B) e Huang et al. (2011) (C) ajustados para Botucatu.

Dentre os modelos ajustados, apenas o linear não apresentou imprecisão inferior ao do sensor utilizado na medição da irradiância UV, que é ~5% (Huang et al., 2011). Os dois outros modelos apresentaram tendência de superestimar os valores horários de irradiação solar UV em ~1% (1% > MBE > 0%). O resultado foi similar aos observados pelos dois autores utilizados como referência, que encontraram MBE ~1%. Nos três modelos o RMSE foi próximo de 12%, sendo maiores que os observados por Foyo-Moreno et al. (1999) em Granada e por Huang et al. (2011) nas duas localidades na China (RMSE < 10%). Em relação ao d de Wilmott, todos os modelos apresentaram valor superior a 0,98.

## 5. CONCLUSÕES

Todos os modelos ajustados apresentaram considerável precisão quando comparados ao radiômetro utilizado para medir a radiação solar UV, possuindo tendência de superestimar os valores horários de irradiação solar UV em até 6%. A seleção para utilização de um, dentre os três modelos ajustados, irá depender dos dados de variáveis meteorológicas disponíveis. O modelo ajustado em função da massa óptica relativa do ar e do índice de claridade  $K_T$  possui vantagem em relação aos demais, pois depende apenas da medição da radiação global e possui menor imprecisão.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro provido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nivel Superior (CAPES), e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Também é feito o agradecimento à *National Aeronautics and Space Administration's (NASA)* pelo fornecimento de dados de variáveis meteorológicas medidos pelos satélites Terra e Aura e utilizados no presente trabalho.

### REFERÊNCIAS

- Alados, I., Alados-Arboledas, L., 1999. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agriculture and Forest Meteorology*. New York, vol. 93, n.1, pp.27-38.
- Ambrosetti, P., Anderson, H. E. B., Liedquist, L., Frölich, C., Wehrll, C., Talarek, H. D., 1984. Results of an outdoor and indoor pyranometer comparison. Davos: International Energy Agency Solar Heating and Cooling Program Rep., 211 f.
- Antón, M., Cancillo, M. L., Serrano, A., García, A., 2005. A multiple regression analysis between UV radiation measurements at Badajoz and ozone, reflectivity and aerosols estimated by TOMS. *Physica Scripta*, vol. 118, pp.21-23.

- Bachelor, M. A., Bowden, G. T., 2004. UVA mediated activation of signalling pathways involved in skin tumour promotion and progression. *Seminars in Cancer Biology*, vol. 14, pp. 131-138.
- Boeger, M. R. T., Poulson, M., 2006. Efeitos da radiação ultravioleta-B sobre a morfologia foliar de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh (Brassicaceae). *Acta Botânica Brasileira*, vol. 20, n.2, pp.329-338.
- Chaves, M. A., Escobedo, J. F., 1999. Solar radiation data base management software. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 14, n. 2, pp. 91-98.
- Chen, J. L., Liu, H. B., Wu, W., Xie, D. T., 2011. Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines – a case study. *Renewable Energy*, vol. 36, pp.413-420.
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Paí, A. D., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 93, pp. 57-73.
- Escobedo, J., Gomes, E. N., Oliveira, A., Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, vol. 86, pp. 299-309.
- Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Oliveira, A. P., Soares, J. R., 2011. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, vol. 36, pp.169-178.
- Evangelista, H., Maldonado, J., Godói, R. H. M., Pereira, E. B., Koch, D., Fonseca, K. T., Grieken, R. V., Sampaio, M., Setzer, A., Alencar, A., Gonçalves, S. C., 2007. Sources and Transport of Urban and Biomass Burning Aerosol Black Carbon at the South–West Atlantic Coast. *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 56, pp. 225-238.
- Foyo-Moreno, I., Alados, I., Olmoa, F.J., Alados-Arboledas, L., 2003. The influence of cloudiness on UV global irradiance (295–385 nm). *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 120, pp.101-111.
- Foyo-Moreno, I., Vida, J., Alados-Arboledas, L., 1999. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290-385 nm). *Journal of Applied Meteorology*, Lawrence, vol. 38, pp. 1021-1026.
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Dias, M. A. F. S., Dias, P. L. S., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G. A., Recuero, F., 2005. Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 5, pp. 135-167.
- Fröhlich, C., London, J., 1986. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. Geneva: World Meteorological Organization, 140 f.
- Herman, J. R., Krotkov, N., Celarier, E., Larko, D., Labow, G., 1999. Distribution of UV radiation at the Earth's surface from TOMS-measured UV-backscattered radiances. *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, n.10, pp.12.059-12.076.
- Hu, B., Yuesi, W., 2010. Guangren, L. Properties of ultraviolet radiation and the relationship between ultraviolet radiation and aerosol optical depth in China. *Atmospheric Research*, vol. 98, pp.297-308.
- Huang, M., Jiang, H., Ju, W., Xiao, Z., 2011. Ultraviolet. Radiation over Two Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: An Innovative Model for UV Estimation. *Terr. Atmos. Ocean.Sci.*, vol. 22, n. 5, pp. 491-506.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 390 p.
- Kasten F., Young A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, vol. 28, n.22, pp.4735-4738.
- Kaufman, Y. J., Koren, I., 2006. Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. *Science*, vol. 313, pp.655-658.
- Leal, S. S., Tiba C., Piacentini, R., 2011. Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. *Renewable Energy*, vol. 36, pp.3337-3344.
- Leszczynsky, K., 2002. Advances in traceability of solar ultraviolet radiation measurements. Helsinki: Universidade de Helsinki, 84p. Dissertação Mestrado.
- Mcpeters, R., Kroon, M., Labow, G., Brinksma, E., Balis, D., Petropavlovskikh, I., Veeffkind, J. P., Bhartia, pp. K., Levelt, P. F., 2008. Validation of the Aura ozone monitoring instrument total column ozone product. *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, pp. 1-9.
- Nazari, E. M., Ammar, D., Bem, A. F., Latini, A., Müller, Y. M., Allodi, S., 2010. Effects of environmental and artificial UV-B radiation on freshwater prawn *Macrobrachium olfersi* embryos. *Aquat. Toxicol.*, vol. 98, pp.25-33.
- Newchurch, M. J., Yang, E. S., Cunnold, D. M., Reinsel, G. C., Zawodny, J. M., Russell, J. M., 2003. Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 108, n.4507, pp.1-13.
- Rooba, S. M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy*, vol. 77, pp.251-259, 2004.
- Souza, A. P., Escobedo, J. F., 2013. Estimates of hourly diffuse radiation on tilted surfaces in Southeast of Brazil. *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 3, pp.207-221.
- Stone, R. J., 1983. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy*, vol. 51, pp.289-291.
- Teramoto, E. T., Escobedo, J. F., 2012. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*. v.16, n.9, pp.985-992.
- Villán, M. D., Castrillo, A. M., Santos, J. B., 2010. Empirical models of UV total radiation and cloud effect study. *International Journal of Climatology*, vol. 30, pp.1407-1415.
- Willmott, C. J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, vol. 2, pp.184-194.

## STATISTICAL MODELS FOR ESTIMATING HOURLY SOLAR UV RADIATION IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

**Abstract.** *The aim of this study was to fit statistical models to estimate hourly solar UV irradiation in Botucatu/SP/Brazil. Three models that allow the estimation were fitted, from the correlation between atmospheric transmissivity of solar UV radiation ( $K_{TUV}$ ) and clearness index  $K_T$ . Models of this type can be used in any city on the globe that has a climate similar to the place where they were developed. The main factors that motivated the present study were: the importance of solar UV radiation as a factor harmful to the biosphere, synthetic polymers and natural fibers and the small number of cities in Brazil that measures it. In general, the models showed inaccuracy lower than the of the sensor used in the measurement of solar UV radiation, with a tendency to overestimate the values of hourly solar UV irradiation of ~ 1%.*

**Key words:** *Atmospherical transmissivity, Clearness Index  $K_T$ , Relative optical air mass, Total ozone column.*