

**ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA FINS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO**Ricardo Boscaini<sup>1</sup>, Adroaldo Dias Robaina<sup>2</sup>, Marcia Xavier Peiter<sup>3</sup>, Pablo Eanes Cocco Rodrigues<sup>4</sup> & Miguel Chaiben Neto<sup>5</sup>1 - Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Santa Maria/RS, e-mail [ricardoboscaini75@gmail.com](mailto:ricardoboscaini75@gmail.com).2 - Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Civil, Professor Titular da UFSM-Santa Maria/RS, e-mail [diasrobaina@gmail.com](mailto:diasrobaina@gmail.com).3 - Engenheira Agrônoma, Doutora em Engenharia Civil, Professora Associada da UFSM-Santa Maria/RS, e-mail [mpeiter@gmail.com](mailto:mpeiter@gmail.com).4 - Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Santa Maria/RS, e-mail [pablo.cocco.r@gmail.com](mailto:pablo.cocco.r@gmail.com).5 - Engenheiro Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Santa Maria/RS, e-mail [miguelchaiben@gmail.com](mailto:miguelchaiben@gmail.com).**Palavras-chave:**modelo de Ball  
evapotranspiração  
temperatura do ar  
agrometeorologia**RESUMO**

Uma forma de estimar a radiação solar global na ausência de dados observados é possível mediante a utilização de modelos matemáticos. Em geral, os modelos variam em grau de complexidade e nos coeficientes de ajuste, e esses devem ser calibrados para o local de interesse para obtenção do melhor desempenho. O objetivo do estudo foi avaliar e calibrar diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em escala diária, a partir de dados de temperatura do ar, para o município de Santa Maria – RS. Para esse fim, foram utilizados dados do período de 01/01/2002 a 31/12/2017 de uma estação meteorológica automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Santa Maria – RS. Os modelos com os coeficientes calibrados apresentaram índice de desempenho acima de 0,78, indicando “ótimo” desempenho. Para os modelos sem calibração dos coeficientes, exceto o modelo de Donatelli e Campbell (DC), que obteve um desempenho “bom”, os demais modelos apresentaram índice de desempenho “muito bom”. Conclui-se que os modelos com calibração dos seus coeficientes, são recomendados quando não houver disponibilidade de dados de radiação observados no local de estudo.

**Keywords:**Ball model  
evapotranspiration  
air temperature  
agrometeorology**ESTIMATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION FOR IRRIGATION MANAGEMENT PURPOSES****ABSTRACT**

One way of estimating global solar radiation in the absence of observed data is possible through the use of mathematical models. In general, the models vary in degree of complexity as well as in the adjustment coefficients and, these must be calibrated to the place of interest to obtain the best performance. The objective of this study was to evaluate and calibrate different models of estimation of global solar radiation on a daily scale, based on air temperature data for the municipality of Santa Maria – Rio Grande do Sul. For this purpose, data from 01/01/2002 to 12/31/2017 of an automatic meteorological station (EMA) of the National Meteorological Institute (INMET), located in the city of Santa Maria – Rio Grande do Sul, were used. The models with the calibrated coefficients showed performance index above 0.78, indicating “optimal” performance. For the models without calibration of the coefficients, except for the Donatelli and Campbell (DC) model, which obtained a “good” performance, the other models presented a “very good” performance index. It was concluded that the models with coefficient calibration are recommended when there is no availability of radiation data observed on the study site.

## INTRODUÇÃO

A radiação solar global ( $R_s$ ) é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos, sendo uma variável de entrada indispensável para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e cálculo da lâmina de irrigação. Sua utilização é de suma importância em estudos relacionados a modelagem do crescimento de culturas, produção vegetal e manejo da irrigação (VH QUEJ *et al.*, 2016; B. JAMIL; N. AKHTAR, 2017). No entanto, ao contrário de outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, precipitação e umidade relativa do ar, as medições de radiação solar global ( $R_s$ ) não estão prontamente disponíveis para diversos locais do mundo, especialmente nos países em desenvolvimento (B. JAHANI *et al.*, 2017).

Entretanto, a quantificação da radiação solar global é medida por meio de instrumentos como radiômetros, actinógrafos e piranômetros (B. FARIBA *et al.*, 2013). Porém, a obtenção direta dos dados de radiação solar global nem sempre está disponível na maioria dos locais, principalmente, pelo fato de que poucas estações meteorológicas possuem registros de radiação solar global, devido ao alto custo de manutenção e calibração por que os aparelhos utilizados precisam passar (SILVA *et al.*, 2012; BURIOL *et al.*, 2012).

Como opção para os locais onde não existe o registro de dados de radiação solar, os valores estimados podem ser obtidos com o uso de modelos matemáticos alternativos para quantificação precisa da radiação solar (K. MOHAMMADI *et al.*, 2016). Estes modelos diferem entre si pelo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada (AIR *et al.*, 2014). Porém, é importante ressaltar que os modelos são, em geral, restritos às condições para as quais foram desenvolvidos, sendo pouco eficientes se não forem devidamente calibrados e testados para as condições climáticas do novo

local (BORGES *et al.*, 2010; BENGHANEM & MELLIT, 2014). No entanto, quando devidamente calibrados, têm como vantagem o uso de elementos meteorológicos registrados no local de estudo, representando, portanto, as condições meteorológicas locais (CARVALHO *et al.*, 2011).

Modelos que estimam  $R_s$  a partir da insolação são mais precisos do que aqueles que a estimam a partir da temperatura do ar e precipitação, porém, os dados de insolação são pouco comuns de serem encontrados nas estações meteorológicas (ALMOROX, 2011), enquanto que os dados de temperatura do ar são registrados em praticamente todas as estações meteorológicas. Além disso, os equipamentos de medição desses elementos são de baixo custo e de simples operação (ABRAHA & SAVAGE, 2008).

Nesse contexto, ressalta-se a importância de estudos da radiação solar global, sendo imprescindível a definição de modelos adequados para sua estimativa, que demandem um número menor de fatores atmosféricos. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar e calibrar diferentes modelos de estimativa da radiação solar global, baseados na temperatura do ar para Santa Maria-RS.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo, foram utilizados dados médios diários dos elementos meteorológicos: temperatura máxima e mínima do ar (°C) e radiação solar ( $\text{MJ}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), da rede de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), localizada no município de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul (Tabela 1). O clima da região é caracterizado, segundo Koppen, como sendo subtropical úmido (Cfa), sem estação seca, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e precipitação pluviométrica média anual de

**Tabela 1.** Coordenadas geográficas da estação meteorológica e período estudado

Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Santa Maria	-29,42	-53,48	95	2002 - 2017

1616 mm (ALVARES *et al.*, 2013).

Os dados horários de temperatura do ar obtidos na estação foram transformados em dados diários e a radiação solar considerada neste estudo foi a total acumulada durante o dia. Foram observadas algumas falhas de dados na série histórica. As correções dessas falhas foram preenchidas com o auxílio do *software* Clima, desenvolvido pelo Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR (FARIA *et al.*, 2003).

Para a estimativa da radiação solar global, foram utilizados dez modelos de estimativa baseados na temperatura do ar (Tabela 2). Todos os modelos utilizados necessitam de dados de radiação solar no topo da atmosfera (Ra). Ela foi calculada conforme os procedimentos sugeridos por ALLEN *et al.* (1998), por meio das seguintes equações 1, 2, 3 e 4;

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} \cdot d_r (\omega_s \cdot \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \delta + \text{cos} \varphi \cdot \text{cos} \delta \cdot \text{sen} \omega_s) \quad (1)$$

$$d_r = 1 + 0.003 \cdot \text{cos} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} \right) \quad (2)$$

$$\omega_s = \text{cos}^{-1}(-\text{tan} \varphi \cdot \text{tan} \delta) \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \text{sen} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} - 1,39 \right) \quad (4)$$

Em que:  $G_{sc}$  é a constante solar (0,0820 MJ.m<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>);  $d_r$ , adimensional;  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr do Sol, em radianos;  $\varphi$  é a latitude do local, em radianos;  $\delta$  é o declinação solar, em radianos, e J é o dia juliano.

As propostas de BALL *et al.* (2004), BRISTOW E CAMPBELL (1984), CHEN *et al.* (2004), HARGREAVES (1981) e MEZA E VARAS (2000) requerem a utilização de coeficientes “a”, “b” e “c” em seus modelos, os quais foram calibrados com o auxílio do *software* TableCurve 2D v5.01 (SYSTAT, 2002), a partir da série histórica de dados de radiação solar global para o município. Para os demais modelos, foram utilizados os coeficientes determinados pelos autores referidos.

**Tabela 2.** Modelos utilizados para a estimativa da radiação solar global

Eq.nº	Abreviatura	Equação	Coefficientes	Referência
5	BA	$R_s = \{a[(T_{max} - T_{min})^{0,5}]b\}$	a,b	Ball <i>et al.</i> (2004)
6	BC	$R_s = a \cdot [\exp(-b \Delta T^c)] \cdot R_a$	c	Bristow e Campbell (1984)
		$b = 0,036 \exp(-0,154 \cdot \overline{\Delta T})$		
7	CH	$R_s = R_a \cdot [a(T_{max} - T_{min})^b]$	a,b	Chen <i>et al.</i> (2004)
8	Ha	$R_s = a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$	a	Hargreaves (1981)
9	MV	$R_s = 0,75 \cdot (1 - \exp(-b \Delta T^2)) \cdot R_a$	b	Meza e Varas (2000)
10	Ann	$R_s = R_a \cdot K_{RS} \cdot (1 + 2,7 \cdot 10^{-5} \overline{\Delta T}) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5}$	-	Annandale <i>et al.</i> (2002)
11	DC	$R_s = R_a \cdot \{0,75 [1 - \exp(-0,226 (T_{max} - T_{min})^2)]\}$	-	Donatelli e Campbell (1998)
12	GD	$R_s = R_a \cdot \{0,68 [1 - \exp(-0,03 (T_{max} - T_{min})^{2,02})]\}$	-	Goodim <i>et al.</i> (1999)
13	HS	$R_s = K_{rs} \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot R_a$	-	Hargreaves e Samani (1982)
14	WS	$R_s = 0,75 \cdot \left( 1 - \exp \left( -b \frac{\Delta T^2}{R_a} \right) \right) \cdot R_a$	-	Weiss <i>et al.</i> (2001)

Rs - radiação solar incidente na superfície (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); Ra - radiação solar incidente extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); a, b, c - coeficientes de calibração dos modelos empíricos (adimensionais);  $K_{RS}$  = coeficiente empírico (0,16 para cidades do interior e 0,19 para cidades litorâneas);  $\Delta T$  – amplitude térmica;  $\overline{\Delta T}$  – amplitude térmica média; Tmin – temperatura mínima do ar; Tmax – temperatura máxima.

Para avaliar o desempenho dos modelos, foram utilizados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) por meio da análise de regressão linear, sendo considerados como de melhor desempenho os modelos com os coeficientes mais próximos a um.

Além disso, foram utilizados a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE), o erro absoluto médio (MBE), o índice (d) proposto por WILLMOTT (1981) e o índice de CAMARGO & SENTELHAS (Id) (1997), adaptado por PIMENTA

*et al.* (2018), conforme a Tabela 3, para avaliar o desempenho dos modelos. Para o indicador RMSE, quanto menor o seu valor, melhor é o desempenho do modelo; para o indicador MBE, valores positivos superestimam e valores negativos subestimam os valores estimados. Já o índice (Id) qualifica os modelos de acordo com o seu desempenho, sendo os melhores aqueles que obtiveram valores próximos a um, ou seja, maior dependência estatística linear entre as variáveis (Tabela 4).

**Tabela 3.** Indicadores de desempenho, raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE), erro absoluto médio (MBE), índice de Willmot (d) e índice de Camargo e Sentelhas (Id) utilizados para classificar os modelos

Eq.nº	Parâmetros de desempenho	Equações
15	RMSE	$\sqrt{\left(N^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2\right)}$
16	MBE	$N^{-1} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $
17	d	$1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O  +  O_i - O )^2} \right]$
18	Id	$r \cdot d$

Pi são os valores estimados, Oi os valores observados, P a média dos valores estimados e O a média dos valores observados; N = número de observações; r = coeficiente de correlação.

**Tabela 4.** Critérios para a classificação do desempenho dos modelos de estimativa da radiação solar global pelo índice Id

Valores de Id	Classificação
0.90 – 1.00	Excelente
0.80 – 0.90	Ótimo
0.70 – 0.80	Muito Bom
0.60 – 0.70	Bom
0.50 – 0.60	Moderadamente Bom
0.40 – 0.50	Moderado
0.30 – 0.40	Moderadamente Ruim
0.20 – 0.30	Ruim
0.10 – 0.20	Muito Ruim
0.00 – 0.10	Péssimo

Fonte: Pimenta *et al.* (2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos dez modelos de estimativa da radiação solar global (Rs) estudados, foi realizada a calibração em cinco deles: BALL *et al.* (2004) (BA), BRISTOW E CAMPBELL (1984) (BC), CHEN *et al.* (2004) (CH), HARGREAVES (1981) (Ha) e MEZA & VARAS (2000) (MV); seus valores podem ser observados na Tabela 5.

O coeficiente “c” de Bristow & Campbell (BC) apresentou pouca variação para os anos estudados, com valor médio de 2,02, podendo esse ser utilizado, mostrando que não foi necessária a calibração desse coeficiente para Santa Maria-RS e demais locais semelhantes climatologicamente.

Para o modelo de Hargreaves (Ha), o coeficiente “a” obteve um valor médio de 0,16. Esse valor foi 6,1% superior aos obtidos por LIU *et al.* (2009) e 5,7% aos obtidos por ALMOROX *et al.* (2011), embora próximo ao recomendado por ALLEN *et al.* (1998) para um local situado no interior do continente e não calibrado, ressaltando a universalidade deste modelo.

O coeficiente “b” 0,010 obtido com o modelo de Meza e Varas (MV) foi igual aos apresentados pelos próprios autores MEZA & VARAS (2000), que sugerem que o valor de “b” após sua calibração fique na faixa de 0,004 a 0,010.

Os modelos propostos por Ball (BA) e Chen (CH), apresentaram resultados médios para o coeficiente “a” de 0,10, valores estes abaixo dos encontrados por MACÊDO *et al.* (2016), em seis cidades do estado do Ceará, com média de 0,33 para o modelo de BA e 0,35 para o modelo de CH. O mesmo ocorreu para o coeficiente “b”, no qual os valores foram abaixo dos encontrados pelo próprio MACÊDO *et al.* (2016), que encontrou valores médios de 0,58 para Ball e 0,28 para Chen.

Os parâmetros de desempenho dos modelos

podem ser observados na Tabela 6. Observou-se que houve pouca variação de desempenho entre os modelos estudados. Observa-se que os modelos de Ball, Chen e Meza e Varas, de acordo com todos os parâmetros, foram os que obtiveram o melhor desempenho, entre os modelos estudados, para Santa Maria. Esse resultado corrobora os resultados encontrados por MACÊDO *et al.* (2016), que, em seu estudo para o estado do Ceará, também encontraram os modelos de Ball e Chen entre os melhores avaliados. Já para o modelo de Meza e Varas, os resultados encontrados corroboram os valores obtidos por SILVA *et al.* (2012), para o noroeste de Minas Gerais. Pode-se destacar que os modelos BC, Ha, Ann, GD, HS e WS juntamente com os modelos supracitados apresentaram os melhores desempenhos.

Os modelos de Ball, Chen e Meza e Varas apresentaram desempenho classificado como ótimo, de acordo com o índice (Id) de Camargo e Sentelhas. Em relação ao erro absoluto médio (MBE), foram observados os valores de 1,50 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para o modelo de Ball e 1,48 para o modelo de Chen MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para Santa Maria. Os modelos de MV, Ha, BC, Ann e HS, que juntamente com os modelos supracitados obtiveram melhor desempenho para Santa Maria, apresentaram classificação, conforme índice Id, muito bom, e MBE de 1.78, 1.81, 1.83, 1.88 e 1.81 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para o indicador de desempenho raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE), os modelos de BALL *et al.* (2004) e CHEN *et al.* (2004) obtiveram o melhor desempenho para Santa Maria, 5,70 respectivamente. O modelo DC obteve o menor desempenho “bom”, em comparação com os demais modelos analisados para o município estudado, apresentando RMSE de 12,98 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e MBE 9,50 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

**Tabela 5.** Valores dos coeficientes de calibração de cada modelo para o município de Santa Maria – RS

Modelos	Coeficientes Calibrados		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Ball (BA)	0.10	1.33	-
Bristow e Campbell (BC)	-	-	2.02
Chen (CH)	0.10	0.67	-
Hargreaves (Ha)	0.16	-	-
Meza e Varas (MV)	-	0.010	-

**Tabela 6.** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE), erro absoluto médio (MBE), índice de Willmot (d), índice de Camargo e Sentelhas (Id) e suas respectivas classificações para a análise de concordância da radiação solar medida e estimada, para Santa Maria – RS

<b>Modelos com calibração</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>MBE</b>	<b>d</b>	<b>Id</b>	<b>Classificação</b>
Ball (BA)	0.67	5.70	1.50	0.98	0.80	Ótimo
Bristow e Campbell (BC)	0.60	6.16	1.83	0.97	0.78	Muito Bom
Chen (CH)	0.67	5.70	1.48	0.98	0.80	Ótimo
Hargreaves (Ha)	0.64	5.90	1.81	0.97	0.78	Muito Bom
Meza e Varas (MV)	0.72	6.11	1.78	0.97	0.82	Ótimo
<b>Modelos sem Calibração</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>MBE</b>	<b>d</b>	<b>Id</b>	<b>Classificação</b>
Annandale (Ann)	0.64	5.92	1.88	0.97	0.78	Muito Bom
Donatelli e Campbell (DC)	0.43	12.98	9.50	0.91	0.60	Bom
Goodim (GD)	0.63	8.22	4.80	0.96	0.76	Muito Bom
Hargreaves e Samani (HS)	0.64	5.89	1.81	0.97	0.78	Muito Bom
Weiss (WS)	0.63	6.08	-3.20	0.96	0.76	Muito Bom

A Figura 1 apresenta as representações gráficas da radiação solar ( $R_s$ ) observada por meio dos dados da estação meteorológica, comparada aos valores de  $R_s$  estimados pelos modelos estudados para o município de Santa Maria. Observa-se que a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 e da linha de regressão reforça os parâmetros de desempenho apresentados na Tabela 6.

Observa-se, na Figura 1, que todos os modelos testados tiveram um bom desempenho na estimativa da radiação solar global diária. No geral, o modelo proposto por Meza e Varas obteve o melhor desempenho com  $R^2$  de 0,72. Para os demais modelos, os valores de  $R^2$  variaram de 0,60 a 0,67. Estes resultados corroboram os encontrados por BORGES *et al.* (2010) para a cidade de Cruz das Almas-BA, porém, são inferiores aos encontrados por BRISTOW & CAMPBELL (1984), que oscilaram entre 0,92 e 0,95 e DONATELLI & CAMPBELL (1998), em média de 0,88. Estes resultados são esperados, uma vez que os modelos desses autores foram desenvolvidos de acordo com as características climáticas do local.

Ao comparar a linha de tendência gerada entre os dados de  $R_s$  medidos e os estimados com a reta 1:1, observam-se as tendências de cada um dos modelos ao longo das variações de  $R_s$ . Dessa forma, os valores que estão abaixo do ponto de intercessão da linha de tendência não se anulam com os valores acima dela. Assim, nota-se que todos os cinco modelos calibrados – Ball, Bristow e Campbell, Chen, Hargreaves e Meza e Varas – apresentaram tendência em subestimar os valores

de  $R_s$  diária em relação à média, que foi em torno de  $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e a superestimar os valores acima dessa, conforme verificado em outros estudos (MAHMOOD; HUBBARD, 2002; LIU *et al.*, 2009; BORGES *et al.*, 2010). Essas tendências, segundo MAHMOOD & HUBBARD (2002), podem estar associadas com advecção em escala local, movimento frontal e o método de regressão. Com base nas afirmações supracitadas, os autores aplicaram uma regressão linear para nove locais nos EUA e obtiveram melhores desempenhos.

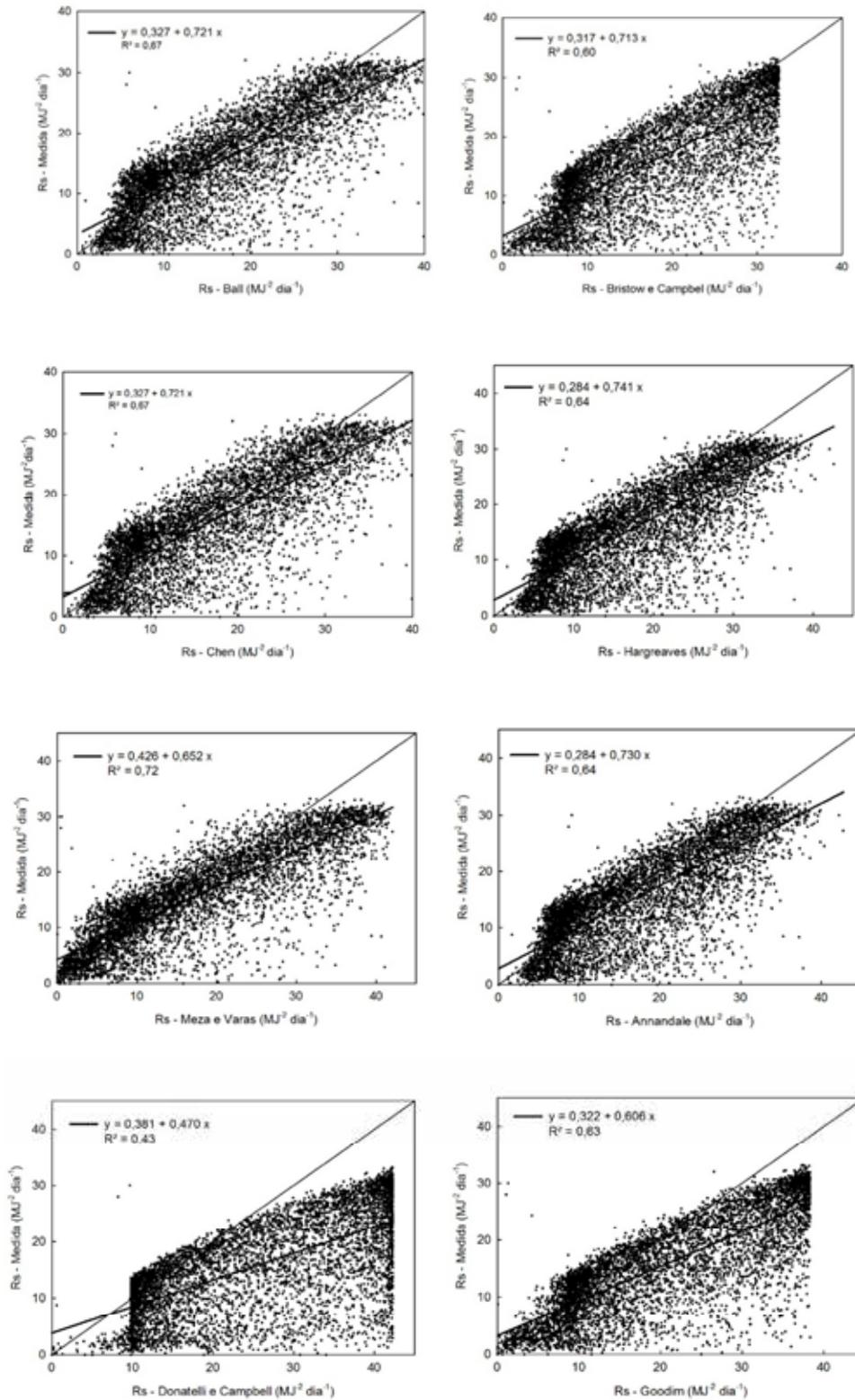
Já para os cinco modelos sem calibração dos seus coeficientes, os melhores resultados para o coeficiente de determinação foram obtidos pelos modelos propostos por Hargreaves e Samani, Annandale, Goodim e Weiss, com  $R^2$  em torno de 63,5%. Assim, pode-se afirmar que esses modelos apresentam uma eficiência acima de 60% na estimativa da radiação solar, valores estes acima aos encontrados por LIU *et al.* (2009) e por ABRAHA & SAVAGE (2008).

O pior resultado foi encontrado utilizando-se o modelo proposto por Donatelli e Campbell (1998), o qual apresentou um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,43, valor esse próximo aos encontrados por MACÊDO *et al.* (2016), em estudos realizados em seis cidades do estado do Ceará. Vale ressaltar que os modelos propostos por HARGREAVES & SAMANI (1982) e ANNANDALE *et al.* (2002), mesmo não possibilitando calibração, apresentaram bons resultados para Santa Maria, indicando que seus coeficientes constantes estão adequados para a cidade em estudo, podendo ser

recomendado seu uso em condições semelhantes climatologicamente.

Ao comparar a linha de tendência gerada entre os dados de Rs medidos na estação meteorológica

e os estimados com a reta 1:1, para os modelos sem calibração, observam-se as tendências dos modelos ao longo das variações de Rs. Assim, nota-se que os modelos Hargreaves e Samani, Goodim e



**Figura 1.** Representação gráfica dos valores de Rs estimados por dez modelos e medidos na estação meteorológica para Santa Maria – RS

Annandale apresentaram tendência em subestimar os valores de  $R_s$  da média, que foi em torno de  $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e a superestimar os valores acima desta, corroborando LIU *et al.* (2009) e BORGES *et al.* (2010).

O modelo proposto por WEISS *et al.* (2001) foi o único, entre os demais modelos estudados, que apresentou tendência em subestimar os valores de  $R_s$  medidos em relação aos estimados. Em contrapartida, o modelo proposto por DONATELLI & CAMPBELL (1998) foi o modelo que mais superestimou os valores de  $R_s$ .

## CONCLUSÕES

- Para os modelos com calibração dos seus coeficientes, os modelos propostos por Ball (BA), Chen (CH) e Meza e Varas (MV) apresentaram melhor desempenho, sendo, assim, recomendados para uso quando não houver disponibilidade de dados de radiação medidos no local de estudo.
- Nos modelos sem calibração, exceto o modelo de Donatelli e Campbell (DC), que apresentou desempenho bom, os demais modelos apresentaram desempenho em média de 0,77, indicando desempenho muito bom.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHA, M.G.; SAVAGE, M.J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.148, n. 3, p.401-416, 2008.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMOROX, J. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. **Turkish Journal of Physics**, Erzurum, v.35, n.1, p.53-64, 2011.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppe's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

ANNANDALE, J.G.; JOVANIC, N.Z.; BENADE, N.; ALLEN, R.G. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, Cordoba, v.21, p.57-67, 2002.

B. FARIBA, A. ALI, R. AHMAD. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study. **Renew Sustain Energy Rev**, 21 (2013), p.798-821.

JAHANI, Y. DINPASHOH, A.R. NAFCHI. **Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation** *Renew Sustain Energy Rev*, 73 (2017), p.878-891.

B. JAMIL, N. AKHTAR. **Comparison of empirical models to estimate monthly mean diffuse solar radiation from measured data: case study for humid-subtropical climatic region of India** *Renew Sustain Energy Rev*, 77 (2017), p.1326-1342.

BALL, R.A.; PURCELL, L.C.; CAREY, S.K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, n.5, p.391-397, 2004.

BENGHANEM, M.; MELLIT, A.A simplified calibrated model for estimating daily global solar radiation in Madinah, Saudi Arabia. **Theoretical and applied climatology**, v. 115, n.1-2, p.197-205,2014. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0884-2>.

BORGES, V.P. et al. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.1, p.961-969, 2010.

BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN,

- A.B.; PRESTES, S.D.; HORN, J.F.C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v.42, p.1563-1567, 2012.
- BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v.31, p.159-166, 1984.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CARVALHO, D.F. et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.8, p.838-844, 2011. Disponível em: Acesso em: 15 maio. 2019.
- CHEN, R.S.; ERSI, K.; YANG, J.P.; LU, S.H.; ZHAO, W.Z. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.45, p.1759-1769, 2004.
- DONATELLI, M.; CAMPBELL, G.S. A simple model to estimate global solar radiation. In: **Proceedings**. ESA Congr., 5th, Nitra, Slovak Republic, 28 June–2 July 1998. The Slovak Agricultural University, Nitra, Slovak Republic, p.133-134, 1998.
- FARIA, R.T. et al. Clima – Programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Revista Engenharia Agrícola**, v.23, n.2, p.372-387, 2003.
- GOODIN, D.G.; HUTCHINSON, J.M.S.; VANDERLIP, R.L.; KNAPP, M.C. Estimating solar irradiance for crop modelling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Wooster, v.91, p.845-851, 1999.
- HARGREAVES, G.H. Responding to tropical climates. In: **The 1980–81 Food and Climate Review**, The Food and Climate Forum, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo, p.29-32. 1981.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage**. ASCE; Delaware, v.108, p.225-30, 1982.
- INMET. Normais climatológicas (1961 – 1990). Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília 2017.
- K. MOHAMMADI, S. SHAMSHIRBAND, A. KAMSIN, P.C. LAI, Z. MANSOR. Identifying the most significant input parameters for predicting global solar radiation using an ANFIS selection procedure. **Renew Sustain Energy Rev**, 63 (2016), p.423-434.
- LIU, X.; et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Angström-Prescott coefficient: locally calibrated versus the FAO recommended. **Agricultural Water Management**, Colombo, v.96, n.7, p.1137-1145, 2009.
- MACÊDO, K.G.; OLIVEIRA, J.B.; ARRAES, F.D.D.; TORRES, W.L.V.; LIMA JUNIOR, J.C. Estimativa da radiação solar global com dados de temperatura do ar em seis cidades do estado do Ceará. **Engenharia na Agricultura**, v.24, n.1, p.68-75, 2016.
- MAHMOOD, R.; HUBBARD, K.G. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, n.4, p.723-733, 2002.
- MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.100, p.231- 241, 2000.
- PIMENTA, B.D.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J.H.; BEN,

L.H.B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.22, n.5, p.301-307, 2018.

SILVA, C.R.; SILVA, V.J.; ALVES JUNIOR, J.; CARVALHO, H.P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.3, p.281-288, 2012.

Systat for Windows version 5.01. Systat Software Inc. Chicago – IL, USA. 2002.

V.H. Quej, J. Almorox, M. Ibrakhimov, L. Saito. **Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula**, Mexico Energy Convers Manag, 110 (2016), p.448-456.

WEISS, A.; HAYS, C.J.; HU, Q.; EASTERLING, W.E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. **Agronomy Journal**, Wooster, v.93, p.1321-1326, 2001.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.