



## Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia

Valéria P. Borges<sup>1</sup>, Aureo S. de Oliveira<sup>2</sup>, Maurício A. Coelho Filho<sup>3</sup>, Tibério S. M. da Silva<sup>3</sup> & Bruce M. Pamponet<sup>2</sup>

### RESUMO

Em estudos agroambientais a radiação solar incidente ( $R_s$ ) é uma das mais importantes variáveis meteorológicas. Na ausência de dados observados de  $R_s$  é possível estimá-los mediante modelos. O objetivo deste estudo foi avaliar modelos baseados na temperatura do ar para estimativa diária de  $R_s$  nas condições do Recôncavo Sul da Bahia. Utilizaram-se dados de  $R_s$  do período de 2004 a 2006, medidos por uma estação meteorológica automática pertencente ao INMET, instalada em Cruz das Almas, Bahia. Como etapa preliminar, verificou-se a qualidade dos dados de  $R_s$  tomando-se como referência curvas de radiação esperada em dias claros. Os seguintes modelos foram avaliados: Hargreaves-Samani para regiões interiores e regiões costeiras, Thornton-Running e o de Weiss. O desempenho de cada método foi avaliado através dos seguintes indicadores: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ). Os resultados obtidos recomendam o modelo de Hargreaves-Samani para regiões costeiras por apresentar o valor de RM mais próximo de 1 (1,01), menor EAM (2,54 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), menor RQME (3,13 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e o maior  $d_w$  (0,90).

**Palavras-chave:** radiação solar global, piranômetro, modelo de simulação

## Evaluating models for estimation of incoming solar radiation in Cruz das Almas, Bahia, Brazil

### ABSTRACT

Solar radiation at the earth's surface ( $R_s$ ) is one of the essential weather variables for several agro-environmental studies. In the absence of measured  $R_s$ , it's possible to simulate them by models. Using three years of daily  $R_s$  data (2004-2006) collected by an INMET (Brazilian Meteorological Service) automatic weather station installed in the municipality of Cruz das Almas, BA, three air temperature-based  $R_s$  simulation models were evaluated. As a preliminary step, data quality was investigated and, when needed, adjustments were made based on clear sky solar radiation envelopes. The following models were evaluated: Hargreaves-Samani for both interior and coastal regions, Thornton-Running, and the Weiss model. Linear regression  $R^2$ , mean ratio (MR), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and the index of agreement of Willmott ( $d_w$ ) were used for model performance evaluation against measured  $R_s$ . The results recommended the coastal-region Hargreaves-Samani for prediction of  $R_s$  in the Reconcavo of Bahia, Brazil, since it presented the MR value closest to 1.00 (1.01), the lowest MAE (2.54 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), the lowest RMSE (3.13 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), and the highest  $d_w$  (0.90).

**Key words:** global solar radiation, pyranometer, simulation model

<sup>1</sup> UACA/UFCG. CEP 58400-480, Campina Grande, PB. Fone: (83) 3310-1054. E-mail: valpborges@gmail.com

<sup>2</sup> Núcleo de Engenharia de Água e Solo/UFRB. CEP 44380-000, Cruz das Almas, BA. Fone: (75) 3621-2798. E-mail(s): aureo@ufrb.edu.br; bruce.mota@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, Laboratório de Irrigação e Fertirrigação. CEP 44380-000, Cruz das Almas, BA. Fone: (75) 3621-8021. E-mail: macoelho@cnpmf.embrapa.br; tiberio@cnpmf.embrapa.br

## INTRODUÇÃO

A radiação solar é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema Terra-Atmosfera, constituindo-se em importante variável meteorológica em estudos de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros. No entanto, a disponibilidade de dados medidos é ainda limitada, pois o número de estações de superfície que registram a radiação solar é reduzido comparado ao daquelas que com mais frequência registram, por exemplo, a temperatura do ar e a precipitação pluviométrica (Thornton & Running, 1999; Weiss et al., 2001).

Para localidades com ausência de coleta de dados de radiação solar, valores estimados podem ser obtidos através de modelos matemáticos, que diferem entre si pelo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada. Os modelos de Angström (Angström, 1924) e de Johnson-Woodward (Rivington et al., 2005; Miller et al., 2008) utilizam a insolação (horas de brilho solar fornecida pelo heliógrafo) para estimar a radiação solar incidente. A temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a evaporação da água e a precipitação pluvial têm sido igualmente utilizadas (Hargreaves & Samani, 1982; Thornton & Running, 1999; Weiss & Hays, 2004).

É importante ressaltar que os modelos são, em geral, restritos às condições para as quais foram desenvolvidos, apresentando problemas de transferabilidade, quando não devidamente calibrados. Allen (1997) apresentou um modelo auto-calibrante para estimativa da radiação solar incidente, a partir da amplitude térmica diária. Thornton & Running (1999) e Weiss & Hays (2004) defendem que estimativas confiáveis da radiação solar incidente podem ser obtidas sem praticamente nenhuma calibração local, por meio de modelos baseados na temperatura do ar.

O objetivo deste estudo foi avaliar para as condições meteorológicas de Cruz das Almas, na região do Recôncavo Sul, Bahia, três modelos amplamente utilizados e testados para simulação da radiação solar incidente, utilizando-se dados de temperatura do ar.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Dados meteorológicos

Utilizaram-se, para a realização deste estudo, três anos (2004-2006) de dados diários de temperatura e umidade do ar, temperatura do ponto de orvalho e radiação solar incidente. Os dados foram coletados na área experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, Cruz das Almas, Bahia (12° 40' 39" S; 39° 06' 23" W; 225 m de altitude) por meio de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O clima local é do tipo Am, segundo a tipologia climática de Köppen (Baptista & Oliveira, 1998).

Os dados meteorológicos, reportados em intervalos horários, passaram por uma triagem inicial, com ênfase nos valores de radiação solar incidente, para verificar a integridade

de e coerência dos dados, eliminando da série, quando necessário, os dias com falhas. De um total possível de 1096 dias, restaram 982 com dados considerados adequados aos objetivos deste estudo, assim distribuídos: 320 dias em 2004, 297 em 2005 e 365 em 2006. Computados os totais e as médias para cada dia do período, obtiveram-se os valores máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do ponto de orvalho média e total diário de radiação solar incidente.

### Qualidade dos dados de radiação solar

A radiação solar incidente sobre uma superfície plana e horizontal é uma fração da radiação solar no topo da atmosfera. Esta fração de radiação que chega à superfície depende das condições atmosféricas locais, as quais caracterizam a transmitância atmosférica para a radiação de

$$R_s = K_t R_a \quad (1)$$

ondas curtas (Eq. 1).

sendo:

$R_s$  – radiação solar incidente, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

$K_t$  – coeficiente de transmitância atmosférica, adimensional

$R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Em situações de céu claro (ausência de nuvens), o coeficiente de transmitância tende a um valor máximo para aquela condição atmosférica e  $R_s = R_{so}$ , sendo  $R_{so}$  a radiação solar incidente em dia claro; portanto,  $R_{so}$  estabelece um limite superior para  $R_s$ . Com base nessa premissa, os valores diários de  $R_s$  foram submetidos a uma análise prévia de qualidade seguindo metodologia proposta por Allen (1996), com o objetivo de verificar e corrigir a existência de erro contínuo na série. O procedimento de ajuste consistiu em plotar, ao longo do ano, os dados medidos de  $R_s$  e visualmente compará-los com a curva de  $R_{so}$  estimada.

Na determinação de  $R_{so}$  (Eq. 2) adotou-se um procedimento que leva em conta os coeficientes de transmitância atmosférica para radiação direta e difusa.

$$R_{so} = (K_B + K_D)R_a \quad (2)$$

sendo:

$R_{so}$  – radiação solar em dia claro, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

$K_B$  – coeficiente de transmitância atmosférica para radiação direta, adimensional

$K_D$  – coeficiente de transmitância atmosférica para radiação difusa, adimensional.

A determinação dos valores diários de  $R_a$  seguiu procedimentos apresentados por Allen (1996), sendo  $R_a$  função da constante solar (0,082 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), latitude (radiano) e época do ano (dia).

O valor de  $K_B$  foi determinado como segue (Allen, 1996):

$$K_B = 0,98 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{K_{bs} \sin \beta} - 0,075 \left( \frac{W}{\sin \beta} \right)^{0,4} \right] \quad (3)$$

sendo:

$P$  – pressão atmosférica estimada com base na altitude local, kPa (98,67 para Cruz das Almas, BA)

$K_{tb}$  – coeficiente de turbidez atmosférica, adimensional (igual a 1,0 para Cruz das Almas – ar relativamente limpo)

$\beta$  – ângulo do Sol acima do horizonte, radianos

$W$  – água precipitável na atmosfera, mm.

Na Eq. 3 o valor de  $\beta$  para intervalos diários é calculado com base na latitude local e época do ano, como segue:

$$\text{sen}\beta_{24} = \text{sen}\left[0,85 + 0,3\varphi \text{sen}\left(\frac{2\pi\text{DDA}}{365} - 1,39\right) - 0,42\varphi^2\right] \quad (4)$$

sendo:

$\beta_{24}$  – valor médio de  $\beta$  durante o período diurno, ponderado em função de  $R_a$ , radianos

$\varphi$  – latitude, radianos

DDA – número de ordem do dia do ano, adimensional.

A equação utilizada para estimativa de  $W$  é (Allen, 1996):

$$W = 0,14e_a P + 2,1 \quad (5)$$

sendo:  $e_a$  – pressão atual de vapor d'água na atmosfera, kPa

Para um dado dia, a pressão atual de vapor d'água, foi calculada pela Eq. 6 a partir dos dados observados da temperatura do ponto de orvalho média, como se segue:

$$e_a = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27T_d}{237,3 + T_d}\right] \quad (6)$$

sendo:  $T_d$  – temperatura do ponto de orvalho média, °C.

Uma vez determinado o valor de  $K_B$ , o coeficiente  $K_D$  foi calculado pela Eq. 7 (Allen, 1996).

$$K_D = 0,35 - 0,36K_B \quad (7)$$

### Modelos de estimativa da radiação solar incidente

Os modelos avaliados neste estudo baseiam-se na Eq. 1, diferindo em relação à determinação do coeficiente de transmissividade atmosférica,  $K_t$ . Todos os modelos utilizam a amplitude térmica diária como principal variável de entrada. Dois dos métodos apresentados (o de Thornton-Running e o de Weiss) são versões modificadas do modelo de Bristow & Campbell (1984). Em todos os casos, foram mantidas as constantes dos modelos como originalmente propostos, ou seja, não se objetivou neste estudo a calibração local dos mesmos.

### Modelo de Hargreaves-Samani (HS)

Hargreaves & Samani (1982) foram uns dos primeiros a propor estimativas de radiação solar incidente a partir da temperatura do ar, por meio da Eq. 8:

$$R_s = K_t(T_x - T_n)^{0,5}R_a \quad (8)$$

sendo:

$K_t$  – coeficiente de calibração igual a 0,16 (região

interior) e 0,19 (região costeira), adimensional

$T_x$  – temperatura máxima do ar, °C

$T_n$  – temperatura mínima do ar, °C

$R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Segundo Hargreaves & Samani (1982), entende-se como região interior aquela em que os padrões do tempo meteorológico são dominados por grandes massas de terra e como região costeira aquela cujos padrões do tempo são dominados pela proximidade com grandes massas de água. Neste estudo, se avaliou o modelo para ambos os valores de  $K_t$ , considerando-se que a cidade de Cruz das Almas encontra-se em uma zona de transição entre a faixa litorânea e o semi-árido, distando em torno de 60 km da linha de costa, o que sugere a hipótese de forte influência do oceano Atlântico sobre as condições meteorológicas locais.

### Modelo de Thornton-Running (TR)

O modelo de Thornton-Running (Thornton & Running, 1999) utiliza a amplitude térmica diária e mensal para determinação do coeficiente de transmissividade atmosférica, como se segue:

$$R_s = R_{so}\left[1 - 0,9\exp(-B(T_x - T_n)^{1,5})\right] \quad (9)$$

sendo:  $B$  – coeficiente empírico de ajuste, adimensional.

O coeficiente de ajuste  $B$  é determinado com base nas normais climatológicas do local, através do parâmetro  $\Delta T_m$ , como se segue:

$$B = 0,031 + 0,201\exp(-0,185\Delta T_m) \quad (10)$$

sendo:  $\Delta T_m$  – amplitude térmica mensal média, °C.

Na aplicação deste modelo, a  $R_{so}$  foi calculada por meio da Eq. 2 e a  $\Delta T_m$  para cada mês do ano (janeiro a dezembro) baseou-se em 20 anos de dados diários de temperatura do ar.

### Modelo de Weiss (WS)

A Eq. 11 corresponde ao modelo mais simples entre os avaliados por Weiss et al. (2001) em várias regiões agrícolas dos Estados Unidos, sendo identificado no presente estudo como modelo de Weiss (WS). Este modelo utiliza, além da amplitude térmica do ar, utiliza a radiação solar no topo da atmosfera para estimativa de  $K_t$ . Todos os componentes da Eq. 11 já foram devidamente definidos nas equações anteriores.

$$R_s = 0,75\left[1 - \exp\left(-0,226\frac{(\Delta T)^2}{R_a}\right)\right]R_a \quad (11)$$

Neste caso,  $\Delta T$  é definido como:

$$\Delta T = T_{xi} - \left(\frac{T_{n(i)} + T_{n(i+1)}}{2}\right) \quad (12)$$

sendo:

$T_x$  – temperatura máxima do ar, °C

$T_n$  – temperatura mínima do ar e  $i$  um subscrito indicativo do dia atual.

### Indicadores de desempenho

O desempenho do modelo baseou-se nos seguintes indicadores (Legates & McCabe Jr., 1999): (a) coeficiente de determinação da regressão linear,  $R^2$ ; (b) razão média, RM (Eq. 13); (c) erro absoluto médio, EAM (Eq. 14); (d) raiz quadrada do quadrado médio do erro, RQME (Eq. 15) e (e) índice de concordância de Willmott,  $d_w$  (Eq. 16).

$$RM = \frac{E_i}{O_i} \quad (13)$$

sendo:

$E_i$  – valor estimado ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ )  
 $O_i$  – valor observado ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^N |E_i - O_i|}{N} \quad (14)$$

sendo:  $N$  – número de observações.

$$RQME = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N} \right]^{0,5} \quad (15)$$

$$d_w = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (16)$$

sendo:  $\hat{O}$  – média dos valores observados ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ )

O coeficiente  $R^2$  e o índice  $d_w$  são indicadores de concordância adimensionais entre as estimativas e os valores observados. Segundo Legates & McCabe Jr. (1999), é apropriado quantificar o erro nas mesmas unidades da variável; neste caso, radiação solar incidente expressa em  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ . Os indicadores RM, EAM e RQME possuem esta característica, constituindo EAM e RQME em parâmetros estatísticos não negativos e sem limite superior. Valores esperados de  $R^2$ ,  $d_w$  e RM em torno de 1 e valores de MAE e RQME tendendo a zero são indicativos de bom desempenho de um modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Radiação solar ajustada

Obtiveram-se, na averiguação da qualidade dos dados de radiação solar, fatores de ajuste, conforme metodologia proposta por Allen (1996). A Figura 1 mostra os valores de  $R_s$  antes e após o ajuste que resultou nos seguintes fatores: 0,93 até DDA (dia do ano) 286 e 0,89 após este dia para o ano de 2004; 0,90 até DDA 208 e 1,08 a partir de DDA 276 para o ano de 2005 e 1,10 para todos os dias do ano de 2006. Para designar os dados observados de  $R_s$  após o ajuste e então utilizados na avaliação dos modelos, adotou-se o símbolo  $R_{s(a)}$ .

Como mencionado anteriormente, a correção dos dados medidos de  $R_s$  com base na curva de  $R_{s0}$  é um procedimento

simples de controle da qualidade dos valores medidos. Parte-se da premissa de que dentro de períodos relativamente longos, por exemplo um ano, há registros de dias completamente claros e para os quais a radiação solar medida é máxima. Assim, ao se plotar em função do tempo, dados medidos de  $R_s$  e valores estimados de  $R_{s0}$ , um desvio sistemático de  $R_s$  em relação a  $R_{s0}$  é indicativo de possíveis problemas de calibração ou mau funcionamento do instrumento (Allen, 1996). O fator de correção para ajuste dos dados funcionaria, na prática, como fator de calibração do piranômetro. Outros autores (Samani et al., 2007; Gavilan et al., 2008) têm adotado esse procedimento como critério de controle da qualidade de dados de  $R_s$  em estudos de evapotranspiração.

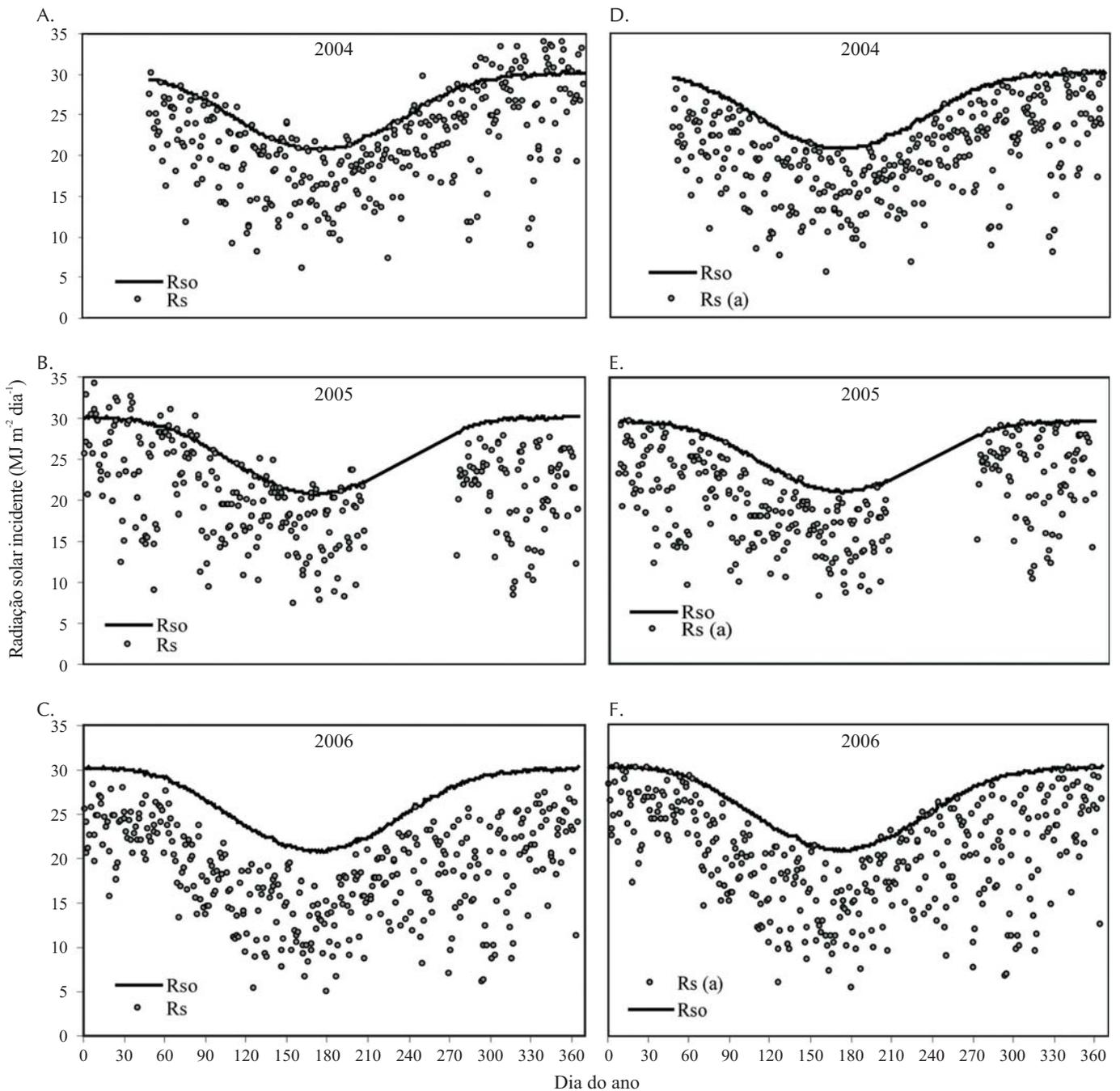
### Análise do desempenho dos modelos

A Tabela 1 resume os indicadores de desempenho dos modelos avaliados. Quatro dos cinco indicadores recomendam o modelo HS<sub>2</sub> (Hargreaves-Samani com  $K_r = 0,19$  – zonas costeiras) para simulação da radiação solar incidente  $R_s$  na região do Recôncavo da Bahia. Apesar de não ter apresentado o maior  $R^2$ , o referido modelo apresentou o menor RM, com sobre-estimativa de  $R_s$  em apenas 1%, em média; o menor EAM e o menor RQME, ambos indicativos de que, para este modelo, o erro médio entre valores estimados e observados de  $R_s$  foi o menor. Este modelo foi também o que apresentou índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ) o mais próximo de 1. O segundo modelo mais indicado é o de Thornton-Running, tendo apresentado, inclusive, desempenho melhor que o de Hargreaves-Samani com  $K_r = 0,16$  (HS<sub>1</sub>). O modelo de Weiss foi inferior aos demais, de acordo com os indicadores de desempenho. Os valores de  $R^2$  na Tabela 1 sugerem que esse indicador por si só, não é suficiente para a eleição de um dos modelos como o mais apropriado para estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia.

**Tabela 1.** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), razão média (RM), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) e índice de concordância de Willmott ( $d_w$ ) para todos os modelos avaliados de estimativa da radiação solar incidente

Modelo	Parâmetro de desempenho				
	$R^2$	RM ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1} / MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ )	EAM ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ )	RQME ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ )	$d_w$
HS <sub>1</sub>	0,688	0,85	4,06	4,76	0,77
HS <sub>2</sub>	0,688	1,01	2,54	3,13	0,90
TR	0,729	1,14	2,72	3,54	0,88
WS	0,716	0,49	9,97	10,43	0,55

Comparando-se as duas versões do modelo de Hargreaves-Samani, a versão HS<sub>2</sub> ( $K_r = 0,19$ ) indicada para regiões costeiras (Hargreaves & Samani, 1982; Allen, 1997), foi superior à versão HS<sub>1</sub> ( $K_r = 0,16$ ) indicada para regiões interiores. Apesar de Cruz das Almas não ser uma região costeira propriamente dita, a relativa proximidade com o oceano Atlântico ( $\pm 60$  km da linha de costa) pode ter significativa influência sobre os padrões de tempo (nebulosi-

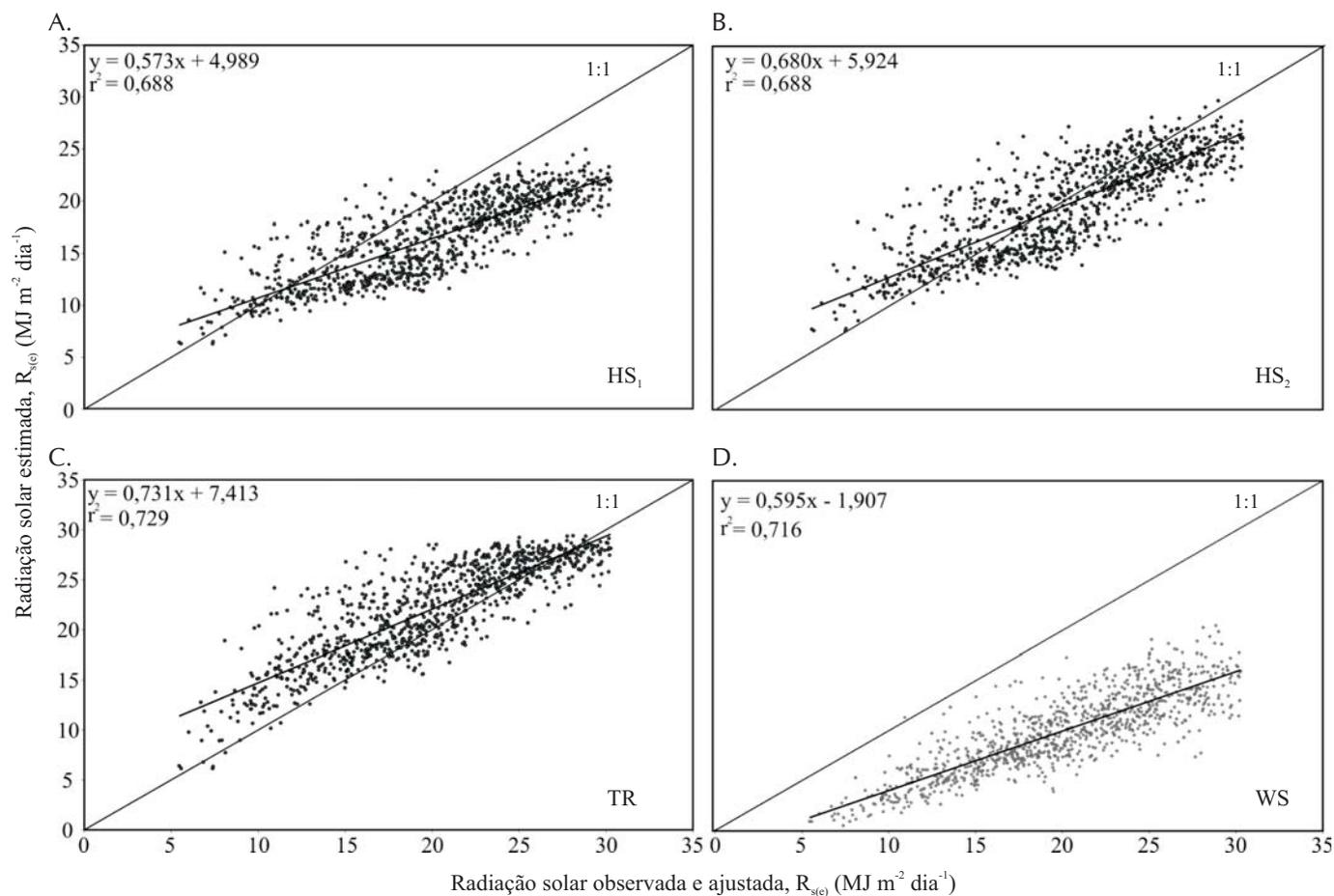


**Figura 1.** Valores medidos de  $R_s$  antes (A, B, C) e após o ajuste (D, E, F) delimitados pela curva da radiação solar esperada em dia claro  $R_{so}$ , para os três anos do período de dados (Fator de ajuste: 0,93 e 0,89 em 2004; 0,90 e 1,08 em 2005 e 1,10 em 2006)

dade e precipitação pluviométrica), influenciando a amplitude térmica do ar. Vale ressaltar que a direção predominante do vento na região é sudeste. Grandes massas de ar tendem a moderar as diferenças entre a temperatura máxima e mínima do ar (Allen, 1997; Ahrens, 2008). Em média, a amplitude térmica mensal de Cruz das Almas varia de 7,0 °C, nos meses de maio e junho, a 9,7 °C em janeiro, com média anual de 8,3 °C.

A Figura 2 mostra os gráficos de regressão linear entre a radiação solar incidente estimada e a observada. A dispersão dos pontos em torno da reta de regressão e da reta 1:1 reforça os indicadores de desempenho da Tabela 1.

A distribuição dos pontos em torno da reta 1:1, no caso do modelo HS<sub>2</sub> (Figura 2B), justifica a razão média de 1,01 entre os valores simulados e os medidos de  $R_s$  e, consequentemente, os menores valores de EAM e RQME. Os modelos HS<sub>1</sub> e WS apresentaram tendência de subestimativa da radiação solar incidente, enquanto o de Thornton-Running apresentou tendência de superestimativa, em torno de 14%. Segundo Thornton & Running (1999), esse modelo não requer calibração local possuindo, em teoria, as características de um modelo universal. Allen & Robison (2007), no entanto, melhoraram o desempenho do modelo em Idaho ao redefinirem os coeficientes da Eq. 10 que estima o parâmetro B.



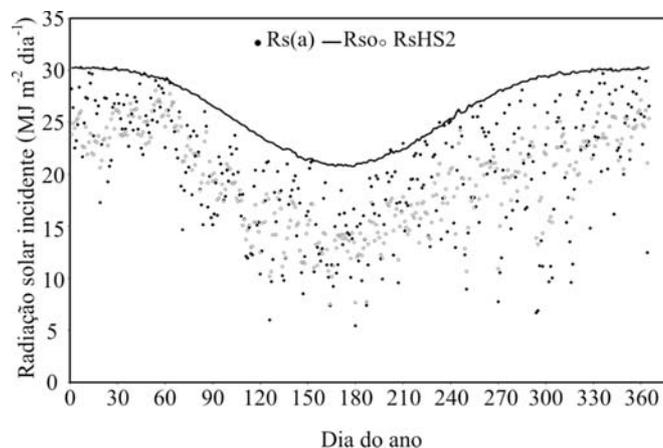
**Figura 2.** Radiação solar incidente observada e ajustada  $R_{s(a)}$  versus radiação solar incidente estimada  $R_{s(e)}$  pelos modelos de Hargreaves-Samani com  $K_t = 0,16$  (A), Hargreaves-Samani com  $K_t = 0,19$  (B), Thornton-Running (C) e Weiss (D), para todo o período de dados (2004-2006), em Cruz das Almas, Bahia

A despeito de sua maior complexidade, o modelo de Thornton-Running possui a vantagem de não produzir estimativas de  $R_s$  superiores a  $R_{s0}$ , além de ser capaz de prever valores de  $R_{s0}$ , já que, para um dado valor de  $\Delta T_m$  a relação  $R_s/R_{s0}$  converge para 1, em amplo espectro de valores de  $\Delta T$  (Allen & Robison, 2007).

O modelo de Weiss revelou-se inadequado para estimativa de  $R_s$  para a localidade estudada, com valores de EAM e RQME muito superiores aos demais modelos (Tabela 1), em decorrência da evidente tendência de subestimava da radiação solar incidente, resultado da baixa transmissividade atmosférica estimada,  $K_t$  (Eq. 1), com média em torno de 0,30. Desempenho semelhante foi observado por Ball et al. (2004) enfatizando as limitações existentes para a transferibilidade do modelo para outras regiões sem a devida calibração local. Como mencionado anteriormente, Weiss et al. (2001) avaliaram 14 formulações do modelo de Bristow & Campbell (1984) e a versão utilizada neste estudo (Eq. 11) é a mais simples. Naquela equação, o coeficiente -0,226 foi derivado com dados meteorológicos da localidade de Mead, Nebraska.

O modelo de Hargreaves & Samani (1982) (Eq. 8) é um método conservador, no sentido de que as estimativas feitas com aquela equação raramente superestimam  $R_s$  para condições de céu claro (Allen, 1997). Essa é uma característica desejável já que a  $R_s$  medida na ausência de nuvens repre-

senta um limite superior para a radiação solar incidente em dada localidade e valores de  $R_s$  em geral superiores a  $R_{s0}$  com frequência indicam problemas de calibração ou mau funcionamento do instrumento (Allen, 1996). Tal característica do modelo pode ser facilmente visualizada na Figura 3, que apresenta a distribuição dos valores estimados e medidos de  $R_s$  durante o ano de 2006, limitados pela curva de  $R_{s0}$ .



**Figura 3.** Radiação solar incidente medida ( $R_{s(a)}$ ) e estimada pelo modelo de Hargreaves & Samani com  $K_t = 0,19$  ( $R_{sHS2}$ ) para o ano de 2006, limitadas pela curva da radiação solar esperada em dias claros ( $R_{s0}$ )

Coerente com a Figura 2B, é possível delimitar no gráfico da Figura 3 duas regiões a partir de uma linha base em torno de  $R_s = 18,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , de tal maneira que para  $R_s > 18,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , o valor estimado é menor que o medido e para  $R_s < 18,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , o valor estimado pelo modelo  $HS_2$  é maior que o medido. Disso resulta menor amplitude anual para a radiação solar estimada. A constatação de que os maiores valores de  $R_s$  foram subestimados pelo modelo  $HS_2$ , sugere que a calibração do modelo de Hargreaves-Samani para a região estudada pode resultar em melhores estimativas de  $R_s$ , por meio da utilização de um valor de  $K_r$  diferente de 0,19.

### CONCLUSÃO

Com base em três anos de dados meteorológicos obtidos por meio de uma estação automática, o modelo de Hargreaves-Samani para estimativa da radiação solar incidente em zonas costeiras ( $K_r = 0,19$ ), apresentou para Cruz das Almas, na região do Recôncavo Sul da Bahia, o melhor desempenho entre os modelos avaliados.

### LITERATURA CITADA

- Ahrens, D. C. Essentials of meteorology. 5<sup>th</sup> edition. Monterey: Brooks-Cole, 2008. 504p.
- Allen, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, n.2, p.97-106, 1996.
- Allen, R. G. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.2, n.2, p.56-97, 1997.
- Allen, R. G.; Robison, C. W. Evapotranspiration and consumptive irrigation water requirements for Idaho. <http://www.kimberly.uidaho.edu/ETIdaho/>. 05 Mai. 2007
- Angström, A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.50, p.121-126, 1924.
- Ball, R. A.; Purcell, L. C.; Carey, S. K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agronomy Journal*, v.96, n.2, p.391-397, 2004.
- Baptista, W. A.; Oliveira, L. M. Atributos climáticos do estado da Bahia. Salvador: SEI – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. 85p. Série Estudos e Pesquisas 38
- Bristow, K. L.; Campbell, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.31, n.2, p.159-166, 1984.
- Gavilan, P.; Estévez, J.; Berengena, J. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.134, n.1, p.1-12, 2008.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.108, p.225-230, 1982.
- Legates, D. R.; McCabe Jr., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v.35, n.1, p.233-241, 1999.
- Miller, D. G.; Rivington, M.; Matthews, K. B.; Buchan, K.; Bellochi, G. Testing the spatial applicability of the Johnson-Woodward method for estimating solar radiation from sunshine duration data. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.148, n.2, p.466-480, 2008.
- Rivington, M.; Bellochi, G.; Matthews, K. B.; Buchan, K. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.132, n.3-4, p.228-243, 2005.
- Samani, Z.; Bawazir, A. S.; Bleiweiss, M.; Skaggs, R.; Tran, V. D. Estimating daily net radiation over vegetation canopy through remote sensing and climatic data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, n.4, p.291-297, 2007.
- Thornton, P. E.; Running, S. W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.93, n.4, p.211-228, 1999.
- Weiss, A.; Hays, C. J. Simulation of daily solar irradiance. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.123, n.3-4, p.187-199, 2004.
- Weiss, A.; Hays, C. J.; Hu, Q.; Easterling, W. E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop simulations. *Agronomy Journal*, v.93, n.6, p.1321-1326, 2001.