

# AValiação de Modelos de Estimativa de Radiação Solar Global para o Estado de Goiás

Diego Simões Fernandes<sup>(1)</sup>, Alexandre Bryan Heinemann<sup>(2)</sup>, André de Oliveira Amorim<sup>(1)</sup>,  
Rosidalva Lopes Feitosa da Paz<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás, Rua 82 s/nº Palácio Pedro Ludovico Teixeira 2º Andar Setor Sul, Goiânia-GO, diegosifer@cnpaf.embrapa.br, dalvapaz@yahoo.com.br, amorim\_go@yahoo.com.br <sup>(2)</sup> EMBRAPA– Arroz e Feijão, Rod. Goiânia Nova Veneza, km 12, 75375-000, Santo Antônio de Goiás-GO, alexbh@cnpaf.embrapa.br

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011 -  
SESC, Guarapari, ES

**RESUMO:** O objetivo deste estudo foi calibrar e avaliar o desempenho, de forma diária, de cinco modelos empíricos de estimativa de radiação solar. Foram utilizados dados de 10 municípios do estado de Goiás. A calibração e validação dos modelos BC, CD, DB e DCBB foram feitas utilizando a minimização do erro do quadrado médio. Já o modelo HG foi utilizado o método de iteração. O desempenho da calibração e validação dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de determinação, erro do quadrado médio, erro relativo do quadrado médio, erro médio absoluto, eficiência do modelo pelo método de Nash-Sutcliffe e pelos índices de concordância de Willmott e de confiança de Camargo. Os resultados permitiram observar que os modelos que mais subestimam ou superestimam os valores de radiação solar foram o modular DCBB e o HG, nessa ordem, com o erro médio absoluto variando em média de 2,60 a 3,02 M.J.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> tanto na calibração quanto na validação. Conclui-se que os modelos CD e DB tiveram os melhores desempenhos em estimar os valores de radiação solar para o estado de Goiás.

**PALAVRAS-CHAVE:** radiação solar, temperatura do ar, modelos empíricos

## EVALUATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION MODELS IN GOIÁS STATE

**ABSTRACT:** The objective of this study was to calibrate and evaluate the performance of five empirical models for estimating daily solar radiation. Weather data set from 10 weather stations located in Goiás State were used. Calibration and validation of models BC, CD, DB and DCBB were done by minimization of mean square error. For HG model it was used the iteration method. The performance of calibration and validation for solar radiation models was evaluated considering the coefficient of determination, mean square error, relative the mean square error, mean absolute error, model efficiency based on Nash-Sutcliffe method and Willmott agreement index and Camargo confidence index. The results showed that the models that most underestimate or overestimate the values of solar radiation were the modular DCBB and HG, in this order, with mean absolute error ranged from 2.60 to 3.02 MJ.M<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup> for calibration and validation. It was conclude that CD and DB models had the best performances in estimating the values of solar radiation in Goiás state.

**KEYWORDS:** solar radiation, air temperature, empiric models

**INTRODUÇÃO:** Para um sistema agrícola sustentável, que esta a mercê da variabilidade e mudanças climáticas, existe um grande interesse e a necessidade de observar as interações entre clima e cultura. De acordo com alguns estudos (Mavromatis & Jagtap, 2005; Abraha & Savage, 2008) modelos de simulação de crescimento de culturas são ferramentas uteis para avaliar os impactos do clima sobre a agricultura. No entanto, a aplicação desses modelos requer a disponibilidade das características do solo, coeficientes genótipos da cultura e serie

histórica climática, composta por dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima e radiação solar global. Dentre essas variáveis, para o estado de Goiás, a maior limitação para a aplicação dessa ferramenta é a disponibilidade de series históricas diárias de radiação solar (Heinemann et al, 2008). Assim, objetivou-se avaliar modelos empíricos de estimativa de radiação solar global, baseados em observações de temperatura máxima e mínima para o estado de Goiás. Os modelos de estimativa da radiação solar utilizados foram Hargreaves (HG - Hargreaves et al., 1985), Bristow-Campbell (BC - Bristow & Campbell, 1984), Campbell-Donatelli (CD - Donatelli & Campbell, 1998), Donatelli-Bellocchi (DB - Donatelli & Bellocchi, 2001) e o modelo modular (DCBB - Donatelli et al., 2003).

**MATERIAL E MÉTODOS:** A região de estudo é o estado de Goiás. Esta região apresenta duas estações bem definidas, a seca (abril-setembro) e a chuvosa (outubro-março). Os dados meteorológicos utilizados são provenientes das estações meteorológicas automáticas da rede de observação do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do estado de Goiás (SIMEHGO). O número de anos, período, localização geográfica e municípios que essas estações pertencem estão descritas na Tabela 1. As variáveis meteorológicas utilizadas foram a temperatura máxima e mínima do ar e radiação solar. A consistência e qualidades dos dados foram verificadas de acordo com a metodologia descrita por Heinemann et al. (2007). A radiação solar global diária foi obtida como o produto da transmissividade da radiação atmosférica e da radiação potencial. As equações 1 a 5 ilustram como foram obtidos os valores da radiação solar estimada pelos modelo HG (eq. 1), BC (eq. 2), CD (eq. 3), DB (eq. 4) e DCBB (eq. 5).

Tabela 1 – Localização geográfica, altitude, período e número de anos utilizados das estações meteorológicas avaliadas nesse estudo.

ID	Município	Lat (°)	Lon (°)	Alt (m)	Período	Nº de anos
01	Minaçu	13,40	48,05	343	2004-2009	6
02	Ceres	15,31	49,60	739	2002-2007	6
03	Anápolis	16,33	48,95	1136	2005-2008	4
04	Anicuns	16,46	49,96	692	2006-2009	4
05	Vianópolis	16,74	48,52	1110	2004-2007	4
06	Cristalina	16,77	47,61	1189	2005-2008	4
07	Palmeiras de Goiás	16,80	49,93	596	2000-2001 2004-2005	4
08	Jandaia	17,05	50,15	637	2005-2008	4
09	Vicentinópolis	17,74	49,81	648	2000-2005	6
10	Jataí	17,88	51,71	696	2004-2009	6

ID – identidade; Lat – latitude; Lon – longitude; Alt – altitude.

$$\text{Rad}_{\text{HG}} = b R_a \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} + c \quad (1)$$

$$\text{Rad}_{\text{BC}} = \tau \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b\Delta T_i^c}{\Delta T_{\text{avg}}}\right) \right] * R_a \quad (2)$$

$$\text{Rad}_{\text{CD}} = \tau \left[ 1 - \exp\left(-b \left(0,017 \exp\left(\exp(-0,053 \Delta T_{\text{avg}})\right)\right) \Delta T_i^2 f_1(T_{\text{min}})\right) \right] * R_a \quad (3)$$

$$\text{Rad}_{\text{DB}} = \tau [1 - f_2(i)] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b\Delta T_i^2}{\Delta T_{\text{avg}}}\right) \right] * R_a \quad (4)$$

$$\text{Rad}_{\text{DCBB}} = \tau [1 + f_2(i)] \left[ \frac{-b\Delta T_i^2 f_1(T_{\text{min}})}{\Delta T_{\text{avg}}} \right] * R_a \quad (5)$$

Os modelos empíricos BC, CD, DB e DCBB foram calibrados utilizando o método de minimização do erro do quadrado médio. Já para o modelo HG foi utilizado o método de iteração, por meio da função nls do pacote MASS do software R. O desempenho dos modelos para calibração e validação foi avaliado utilizando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro do quadrado médio (EQM), o erro relativo do quadrado médio (ERQM), o erro médio absoluto (EMA) e a eficiência do modelo pelo método de Nash-Sutcliff (EF). Os valores obtidos pelos modelos calibrados foram avaliados pelo  $R^2$ , índice de concordância de Willmott (d) e índice de confiança de Camargo (c). Os índices c e d estão relacionados com a acurácia do modelo.

**RESULTADOS E DISCUSSÕES:** A Tabela 2 descreve os valores dos parâmetros empíricos dos 5 modelos que foram calibrados para as 10 localidades descritas na Tabela 1. O parâmetro “b” para os modelos HG, BC, CD, DB e DCBB, variaram entre 0,13 (CD) a 1,93 (BC). Segundo Liu et al. (2009), esse parâmetro para o modelo BC é diretamente afetado pela variação da temperatura. Já o parâmetro “c”, contido nos modelos HG e BC, variou entre -4,8 (HG) a 1,89 (BC). Os modelos DB e DCBB utilizam em seu cálculo os parâmetros “c<sub>1</sub>” e “c<sub>2</sub>”. Para ambos os modelos, esses parâmetros obtiveram valores semelhantes, sendo que o parâmetro “c<sub>1</sub>” variou de -0,06 a 0,06, e o parâmetro “c<sub>2</sub>” variou de 0,46 e 1,46.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros empíricos b, c, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, Tnc, utilizados para o processo de calibração diária dos modelos.

Mod.	Par.	ID (Município)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HG	b	0,19	0,18	0,17	0,18	0,18	0,16	0,17	0,17	0,14	0,18
	c	-2,67	-4,80	-0,07	-1,98	-3,69	1,42	-4,03	-2,15	0,82	-2,71
BC	b	0,61	0,96	0,70	0,75	0,69	0,39	0,87	1,93	0,42	0,94
	c	1,70	1,38	1,60	1,59	1,47	1,89	1,36	1,12	1,71	1,42
CD	b	0,44	0,13	0,46	0,42	0,18	0,51	0,13	0,13	0,30	0,23
	Tnc	110,0	19,59	110,0	110,0	26,28	110,0	23,68	16,09	110,0	28,62
DB	b	0,30	0,20	0,28	0,28	0,19	0,30	0,17	0,24	0,21	0,24
	c <sub>1</sub>	-0,02	0,04	-0,02	0,00	0,05	-0,06	0,04	0,06	0,02	0,01
	c <sub>2</sub>	1,42	1,41	1,46	1,22	0,46	1,46	0,76	1,03	0,74	0,74
DCBB	b	0,25	0,17	0,24	0,23	0,16	0,26	0,14	0,20	0,17	0,20
	c <sub>1</sub>	-0,03	0,04	-0,02	0	0,04	-0,06	0,04	0,05	0,01	0,01
	c <sub>2</sub>	1,42	1,41	1,46	1,22	0,46	1,46	0,76	1,03	0,74	0,74
	Tnc	140,05	41,77	84,10	107,55	44,23	78,22	33,68	41,58	200,0	44,37

Esses valores foram ligeiramente menores (“c<sub>1</sub>”) e maiores (“c<sub>2</sub>”) aos encontrados por Macromatis & Jagtap (2005). Embora a literatura mencione que o parâmetro Tnc não deva ultrapassar o valor de 110, nesse estudo obteve-se valores maiores, sendo que esse parâmetro variou de 16,09 para o modelo CD a 200 para o modelo DCBB. Abraha & Savage (2008) encontraram valores que variaram de 42,1 em Padova, Itália a 106,1 em Rothamsted, Reino Unido. Os índices de desempenho (EQM, ERQM, EMA, EF e  $R^2$ ) para calibração e validação dos modelos estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3** – Índices de desempenho dos modelos BC - Bristow-Campbell; CD - Donatelli Campbell; DB - Donatelli-Bellocchi; DCBB – modelo Modular; HG – Hargreaves EF – eficiência do modelo; ERQM – erro relativo do quadrado médio; EMA – erro médio absoluto;  $R^2$  - coeficiente de determinação.

Modelo	ID	Calibração					Validação				
		EQM	ERQM	EMA	EF	$R^2$	EQM	ERQM	EMA	EF	$R^2$
HG	1	3,79	13,83	2,98	0,53	0,53	4,15	15,12	3,29	0,41	0,43
	2	3,16	11,82	2,43	0,59	0,59	3,35	12,52	2,56	0,53	0,54
	3	3,90	13,14	3,07	0,39	0,39	3,91	16,12	3,15	0,39	0,39
	4	3,73	13,24	2,91	0,49	0,49	3,79	13,47	2,99	0,42	0,43
	5	4,40	16,65	3,37	0,46	0,46	4,40	16,65	3,48	0,38	0,44
	6	4,35	14,88	3,54	0,34	0,34	4,04	16,91	3,34	0,37	0,37
	7	2,66	10,30	2,10	0,67	0,66	3,24	12,53	2,57	0,56	0,57
	8	3,27	11,51	2,46	0,52	0,52	3,14	13,50	2,39	0,54	0,55
	9	3,64	15,30	2,84	0,39	0,39	3,76	15,77	3,04	0,43	0,43
	10	3,57	13,58	2,73	0,57	0,57	3,63	13,78	2,84	0,52	0,51
BC	1	3,18	11,59	2,38	0,67	0,67	3,73	13,57	2,84	0,53	0,55
	2	3,10	11,58	2,30	0,61	0,61	3,15	11,76	2,35	0,59	0,59
	3	3,65	12,31	2,73	0,46	0,47	3,62	14,93	2,79	0,48	0,49
	4	3,55	12,62	2,69	0,54	0,55	3,65	12,95	2,80	0,47	0,47
	5	4,25	16,09	3,08	0,50	0,50	4,16	15,72	3,06	0,45	0,50
	6	3,82	13,06	2,93	0,49	0,52	3,62	15,16	2,83	0,50	0,54
	7	2,56	9,92	2,05	0,69	0,69	2,97	11,48	2,24	0,63	0,65
	8	3,24	11,41	2,38	0,53	0,53	3,09	13,28	2,31	0,55	0,57
	9	3,15	13,25	2,43	0,54	0,55	3,56	14,94	2,85	0,49	0,51
	10	3,44	13,09	2,57	0,60	0,60	3,54	13,45	2,66	0,54	0,54
CD	1	3,30	12,04	2,46	0,64	0,68	3,81	13,88	2,86	0,50	0,56
	2	3,23	12,06	2,37	0,57	0,62	3,25	12,14	2,42	0,56	0,59
	3	3,77	12,72	2,76	0,43	0,48	3,78	15,61	2,84	0,43	0,50
	4	3,67	13,05	2,71	0,51	0,55	3,77	13,40	2,80	0,43	0,48
	5	4,28	16,18	3,10	0,49	0,52	4,24	16,03	3,03	0,42	0,49
	6	3,89	13,30	2,99	0,47	0,52	3,71	15,53	2,91	0,47	0,54
	7	2,66	10,27	2,06	0,67	0,70	2,90	11,19	2,16	0,65	0,66
	8	3,55	12,49	2,59	0,43	0,54	3,34	14,38	2,43	0,47	0,57
	9	3,24	13,64	2,50	0,51	0,56	3,59	15,10	2,88	0,47	0,53
	10	3,57	13,59	2,64	0,57	0,60	3,71	14,11	2,76	0,49	0,54
DB	1	3,29	12,00	2,45	0,64	0,68	3,82	13,90	2,85	0,50	0,57
	2	3,43	12,82	2,54	0,52	0,59	3,37	12,58	2,58	0,53	0,56
	3	3,77	12,72	2,73	0,43	0,48	3,75	15,49	2,80	0,44	0,50
	4	3,66	13,00	2,68	0,51	0,55	3,73	13,24	2,77	0,44	0,48
	5	4,37	16,53	3,09	0,47	0,51	4,49	16,98	3,25	0,35	0,44
	6	3,81	13,04	2,85	0,49	0,53	3,71	15,53	2,88	0,47	0,54
	7	3,12	12,07	2,53	0,54	0,64	3,09	11,92	2,31	0,60	0,63
	8	3,37	11,85	2,45	0,49	0,57	3,29	14,15	2,40	0,49	0,57
	9	3,23	13,58	2,49	0,52	0,56	3,67	15,41	2,96	0,45	0,50
	10	3,67	13,96	2,71	0,55	0,59	3,81	14,47	2,81	0,47	0,52
DCBB	1	3,34	12,17	2,51	0,63	0,68	3,88	14,12	2,93	0,49	0,57
	2	3,90	14,56	2,98	0,38	0,59	3,94	14,72	3,00	0,35	0,54
	3	3,78	12,75	2,73	0,42	0,48	3,76	15,51	2,79	0,44	0,50
	4	3,66	12,99	2,70	0,51	0,56	3,72	13,22	2,78	0,44	0,48
	5	4,64	17,56	3,20	0,40	0,49	4,50	17,02	3,28	0,35	0,41
	6	3,84	13,15	2,84	0,48	0,52	3,67	15,38	2,86	0,48	0,54
	7	4,06	15,69	3,33	0,22	0,69	4,20	16,21	3,23	0,26	0,63
	8	3,90	13,73	2,93	0,31	0,60	3,90	16,80	2,92	0,28	0,58
	9	3,35	14,07	2,58	0,48	0,56	3,85	16,18	3,10	0,40	0,50
	10	3,99	15,18	2,96	0,47	0,58	4,15	15,77	3,05	0,37	0,52

A eficiência dos modelos para as diferentes localidades variou de 0,22 (DCBB, Palmeiras de Goiás) a 0,69 (BC, Palmeiras de Goiás), conforme descreve a Tabela 3a. Os modelos BC, CD e DB, na calibração, foram os que apresentaram melhores desempenhos para estimar a radiação solar global diária. Já, o EQM variou de 2,56 M.J.m<sup>-2</sup>/dia (BC, Palmeira de Goiás) a 4,64 M.J.m<sup>-2</sup>/dia (DCBB, Vianópolis). Ambas as localidades, também apresentaram para os mesmos modelos o menor e maior valor de ERQM, 9,92 e 17,56%, respectivamente. O EMA

variou de 2,05 M.J.m<sup>2</sup>/dia (BC, Palmeiras de Goiás) a 3,54 M.J.m<sup>2</sup> (HG, Cristalina). Na validação dos modelos os valores da eficiência dos modelos (ERQM e EF) foram piores aos obtidos na calibração (Tabela 3b). O EQM teve uma variação menor entre às diferentes localidades para todos os modelos, variando de 2,9 M.J.m<sup>2</sup>/dia (CD, Palmeiras de Goiás) a 4,5M.J.m<sup>2</sup>/dia (DCBB, Vianópolis),. O ERQM não ultrapassou os 17%, sendo os menores valores observados em torno de 11%. Já o EMA seguiu a mesma tendência do EQM e variou de 2,16 M.J.m<sup>2</sup>/dia (CD, Palmeiras de Goiás) a 3,48 M.J.m<sup>2</sup>/dia (HG, Vianópolis). Os modelos tiveram bom desempenho em relação a exatidão (índice d), que variou de 0,77 (HG) a 0,87 (CD) para os valores de radiação solar simulados diariamente considerando toda a série histórica de dados, e precisões (índice c) consideradas “mau”, modelo HG (0,49) e “bom”, modelo CD (0,66). Separando os valores simulados em estações seca (abril-setembro) e chuvosa (outubro-março), não se observou melhoras significativas nos valores de exatidão e precisão dos modelos.

**CONCLUSÕES:** A partir dos resultados pode-se concluir que: 1. Os modelos Campbell-Donatelli e Donatelli-Bellocchi obtiveram os melhores desempenhos em estimar os valores de radiação solar diária para o estado de Goiás; 2. Apesar do modelo de Hargreaves ser largamente utilizado, apresentou o pior desempenho em estimar os valores de radiação solar global diária, obtendo os piores erros.

#### **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**, v.148, p.401-416, 2008.
- BRISTOW, K.L., CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily minimum and maximum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.31, p.159–166, 1984.
- DONATELLI, M., BELLOCCHI, G. Estimate of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst3.00. 2001. In: Proceedings of the Second International Symposium Modelling Cropping Systems, 16–18 July 2001, Florence, Italia, p.213–214.
- DONATELLI, M., CAMPBELL, G.S. A simple model to estimate global solar radiation. 1998, In: Proceedings of Fifth ESA Congress, vol. 2, Nitra, Slovak Republic, 28 Junho–2 Julho 1998, The Slovak Agriculture University, Nitra, Slovak Republic, p.133–134.
- DONATELLI M, BELLOCCHI G, FONTANA F. RadEst 3: a software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. **European Journal of Agronomy**, v.18, p.363–367, 2003.
- HARGREAVES, G.L., HARGREAVES, G.H., RILEY, J.P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.111, 265–275, 1985.
- HEINEMANN, A.B.; SILVA, S.C.; LOPES JUNIOR, S.; AMORIM, A.O.; ANDRADE, C.L.T.; BASTOS, E.A.; PAZ, R.L.F. **Características climáticas dos municípios de Santo Antônio de Goiás (GO), Porangatu (GO), Janaúba (MG), Sete Lagoas (MG), Parnaíba (PI) e Teresina (PI)**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2007. 36p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 214).
- HEINEMANN, A. B.; DINGKUN M.; LUQUET, D.; COMBRES, J. C.; CHAPMAN, S. Characterization of drought stress environments for upland rice and maize in central Brazil. **Euphytica** (Wageningen), v.162, p.395-410, 2008.
- MAVROMATIS, T.; JAGTAP, S.S. Estimating solar radiation for crop modeling using temperature data from urban and rural stations. **Climate Research**, v.29, p.233-243, 2005.