



Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil

João Paulo Augusto Ramos¹; Murilo dos Santos Vianna¹ e Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mails: jonnybrao@yahoo.com.br, murilodsv@gmail.com e fabio.marin@usp.br

(*)Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 22 de setembro de 2017

Aceito em 20 de dezembro de 2018

Termos para indexação:

radiação solar
modelagem
agrometeorologia

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo otimizar e avaliar dois métodos de estimativa da radiação global diária para diferentes localidades brasileiras. Os métodos de Bristow e Campbell (BC) e Hargreaves e Samani (H) foram otimizados tomando como base 32 séries históricas de dados meteorológicos em diferentes localidades do Brasil. O desempenho de cada modelo foi avaliado por meio de índices estatísticos de precisão (r^2), acurácia (d) e raiz do erro médio quadrático (RMSE). Após a otimização, o melhor desempenho foi dado pelo modelo BC, em todas as regiões do Brasil, com RMSE médio de $3,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A otimização dos parâmetros contribuiu para diminuição do RMSE em 10% para H e 25% para BC. Encontraram-se valores médios de Kt para método H de 0,152 para a região Norte, 0,173 Nordeste, 0,145 Centro Oeste, 0,163 Sul e 0,152 Sudeste. Para os parâmetros A, B e C do método BC obteve-se, respectivamente, para cada região 0,619, 0,026 e 1,845 para a região Norte, 0,694, 0,074 e 1,489 Nordeste, 0,635, 0,029 e 1,697 Centro Oeste, 0,671, 0,044 e 1,580 Sul e 0,702, 0,025 e 1,747 Sudeste.

© 2018 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

A radiação solar global (R_g) é uma das variáveis meteorológicas de maior importância em estudos agrometeorológicos. É a principal fonte direta e indireta de energia para todos os processos biológicos do globo e o condicionante para diversos fatores meteorológicos (e. g. temperatura ou evapotranspiração) e atmosféricos. No setor energético é utilizada para geração de eletricidade ou aquecimento por diferentes tecnologias em constante evolução, como o aquecimento solar, energia solar fotovoltaica, energia

heliotérmica, e a arquitetura solar (Petela, 2010). Na agricultura é um dos fatores fundamentais para crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas viabilizando o processo fotossintético e condicionando o aumento da temperatura nos tecidos vegetais, dessa forma possui grande importância na gestão e avaliação do risco agrícola (Borges et al, 2010; Conceição e Marin, 2007). É tida também como variável chave em estudos de necessidade hídrica de culturas irrigadas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros (Monteith e Unsworth, 2012).

A maior parte do espectro de radiação emitido pelo Sol é na faixa do visível (400 a 700nm), ao atravessar a atmosfera, a R_g interage com seus constituintes e parte dessa radiação é absorvida e/ou espalhada em outras direções, sendo dividida em dois componentes: (i) a radiação solar difusa e (ii) radiação solar direta (Spitters, Toussaint e Goudriaan, 1986). Todo o espectro da R_g pode ser medido por um radiômetro específico denominado Piranômetro, que pode ser encontrado em boa parte das estações meteorológicas modernas. Outros aparelhos também são utilizados para medir a radiação infravermelha emitida pela Terra (Pirgeômetro) ou somente a radiação fotossinteticamente ativa (radiômetro PAR) (Sentelhas e Angelocci, 2012).

Atualmente, a medida de R_g em estações meteorológicas pode ser feita com custo relativamente baixo e certa simplicidade. No entanto, no Brasil ainda há algumas limitações para a constituição de longas séries de dados para estudos agroclimáticos notadamente nas principais regiões agrícolas do país, onde a cobertura da rede pública de estações meteorológicas é ainda insuficiente (Tanaka, 2013). Para suprir tal limitação, diversos autores propuseram alternativas de estimativa da R_g baseando-se em diferentes componentes meteorológicos como a umidade do ar (Yang e Koike, 2002), precipitação (Hunt et al., 1998; Liu e Scott, 2001; Rivington et al., 2005), nebulosidade (Davies Mckay, 1989; Hunt et al., 1998; Munner e Gul, 2000), insolação (Angstron, 1924; Wong e Chow, 2001; Almorox e Hontoria, 2004; Trnka et al., 2005; Chen et al., 2006) e amplitude térmica diária (Hargreaves e Samani, 1982; Bristow e Campbell, 1984).

Angström (1924) foi um dos primeiros a quantificar a R_g através de modelos empíricos envolvendo a radiação solar extraterrestre (R_a), fotoperíodo (N) e em dados de insolação (n) medidos por heliógrafos. Modelos que estimam R_g baseados na insolação possuem melhores resultados quando comparados a modelos que se utilizam de outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar e precipitação (Abraha e Savage, 2008), mas dados de insolação nem sempre estão disponíveis, especialmente em áreas de fronteira agrícola, onde o monitoramento meteorológico é relativamente recente e espacialmente esparso (Tanaka, 2013). Neste sentido, destaca-se os métodos propostos com base na temperatura do ar como uma estratégia interessante para o Brasil, uma vez que boa parte dos locais que não apresentam séries históricas de R_g tem dados disponíveis de temperatura máxima e mínima do ar. Além disso, a literatura aponta forte relação entre a amplitude térmica diária e a nebulosidade para determinadas regiões do globo (Allen et al., 1997), o que os torna bastante promissoras para o caso brasileiro.

Dois modelos bastante difundidos e utilizados para estimativa de R_g com base na amplitude térmica diária

foram os propostos por Hargreaves e Samani (1982) e Bristow e Campbell (1984). Diferentes autores analisaram o desempenho desses dois métodos em diferentes regiões do mundo, indicando bom desempenho no Canadá (Hunt et al., 1998); em diferentes localidades dos EUA (Goodin et al., 1999; e Ball et al., 2004); na Áustria e República Tcheca (Trnka et al., 2005); e para regiões pontuais do Brasil (Borges et al., 2010; Conceição, 2010; Conceição e Marin, 2007; Silva, Da et al., 2012; De Souza et al., 2017). Ambos os modelos assumem a premissa de que o incremento de temperatura diária ($T_{max} - T_{min}$) em uma superfície está diretamente relacionado ao montante de radiação solar incidente sobre ela. Esta abordagem somente é válida em dias que a temperatura mínima ocorre antes da temperatura máxima e sem chegada de massa de ar frio no período diurno (Parton e Logan, 1981). Para buscar corrigir o efeito local (relevo, advecção ou proximidade de corpos d'água), os autores introduziram parâmetros empíricos que podem ser ajustados para cada região ou época do ano (Bristow e Campbell, 1984; Hargreaves e Samani, 1982).

Neste sentido, o presente trabalho pretendeu aprimorar as estimativas de R_g para o Brasil analisando os dois métodos mais difundidos na literatura (Bristow e Campbell, 1984; Hargreaves e Samani, 1982). Os parâmetros empíricos ajustados por localidade poderão ser utilizados para estimativa da radiação solar global diária em períodos de dados faltantes e estudos de mudanças climáticas. Para tanto ambos os modelos foram calibrados para diferentes localidades brasileiras e seu desempenho determinado após calibração, disponibilizando assim os parâmetros ajustados para cada região do país.

Material e métodos

Dois modelos empíricos para estimativa da radiação solar global (R_g) com base na amplitude térmica foram utilizados neste trabalho (Hargreaves e Samani, 1982 e Bristow e Campbell, 1984). Ambos assumem a premissa de que o incremento de calor diário em superfície, que pode ser admitido pela amplitude térmica (ΔT , °C), está diretamente relacionado à quantidade de radiação solar incidente. A radiação solar extraterrestre (R_a) é geralmente utilizada para representar a radiação solar incidente no topo da atmosfera e a fração da radiação ou transmitância atmosférica é estimada pela correlação com a amplitude térmica, parâmetros de ajuste (e.g. K_t , A , B e C) são incluídos que podem ser calibrados para diferentes regiões ou épocas do ano. Com isso, neste trabalho foi utilizada uma base de dados de longa duração de R_g e temperatura máxima e mínima de ar para diferentes localidades do Brasil, nas quais os parâmetros empíricos e o desempenho dos modelos foram determinados.

Método de Hargreaves e Samani (H) e Bristow e Campbell (BC)

O modelo proposto por Hargreaves e Samani (1982) é um dos modelos mais simples de utilização e com bom desempenho em diferentes regiões do mundo, recomendando pelo boletim FAO-56, assume que a amplitude térmica está diretamente relacionada à fração da radiação solar extraterrestre (R_a) que atinge a superfície do solo, no entanto existem outros fatores como nebulosidade e umidade que podem influenciar a amplitude térmica em determinado local. Esses fatores, segundo Samani (2000), incluem latitude, altitude, topografia, padrão de tempestade, advecção e a proximidade de grandes massas de água. Para tanto, os autores incluíram um fator de correção (K_t) que visa diminuir os impactos dessas influências, de modo que para regiões situadas no interior do continente passa a ser $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ e para localidades próximas a grandes massas de água ou litorâneas $0,19\text{ }^{\circ}\text{C}^{-0,5}$, os autores propõem inclusive uma equação relacionando a umidade relativa (UR) diária e o fator de correção (K_t), buscando modelar o fator de ajuste diariamente.

Neste sentido, o modelo de Hargreaves e Samani (1982) é descrito pela equação 1. O modelo elaborado por Bristow e Campbell (1984), possui abordagem semelhante e relaciona empiricamente a amplitude térmica e a R_g por meio de três parâmetros de ajuste regionais (A, B e C) e a radiação solar extraterrestre (equação 2). Os autores sugerem ainda que o parâmetro B deve ser ajustado em função da amplitude térmica média mensal para diferentes épocas do ano para incluir a variações sazonais da transmitância atmosférica.

$$R_g = R_a \sqrt{\Delta T} K_t \quad (1)$$

$$R_g = R_a A \left[1 - e^{(-B\Delta T^C)} \right] \quad (2)$$

em que R_g é a radiação global diária na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); R_a é a radiação solar extraterrestre diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), determinada com boa precisão em função da constante solar, latitude e dia do ano (Teh, 2006); ΔT é a amplitude térmica diária, definida pela diferença entre a temperatura máxima e mínima do ar; K_t é o coeficiente de ajuste regional do método de Hargreaves e Samani (1982); e A, B e C parâmetros de ajuste do método de Bristow e Campbell (1984).

Banco de dados meteorológicos

Um banco de dados diário de R_g foi disponibilizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) composto por 252 localidades distribuídas em diferentes regiões do Brasil, em um período variável para cada localidade que compreende entre os anos de 1999 a 2016. Estas séries históricas, no entanto, careciam de valores de temperatura

do ar, que foram extraídos do cruzamento do conjunto de dados diários da rede de Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O cruzamento de informação entre os bancos de dados foi feito por meio da menor distância euclidiana calculada com base nas respectivas coordenadas geográficas de cada localidade. O critério de seleção foi o de maior proximidade no qual somente estações com pelo menos 10 km de distância linear seria utilizada. Após critério de seleção por distância, uma análise de consistência dos dados foi realizada para remover leituras de temperatura e R_g inconsistentes ($T_{\max} > 50^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} < 2^{\circ}\text{C}$; $T_{\max} < T_{\min}$; $0 < R_g < 45 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (Monteiro e Sentelhas, 2017). Desta forma, 32 estações meteorológicas foram selecionadas para o estudo cobrindo boa parte do território, na qual a região Sudeste e Nordeste foram as que obtiveram maior número de estações, seguidas de Centro-Oeste, Norte e Sul (Figura 1).

Em média os dados utilizados tiveram cerca de 10 anos de medições de R_g , com início próximo dos anos 2000 e término no ano de 2012. A estação de Piracicaba foi incluída já que os dados são disponibilizados gratuitamente pela página do Departamento de Biosistemas (<http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ). A série de dados medidos com R_g da estação de Piracicaba tinha ao menos 32 anos, com 85% das leituras dentro dos critérios de consistência. As demais localidades apresentaram mesma proporção de dados sem falhas ou inconsistentes com média de 3012 dias (n) para cada localidade (Tabela 1).

Calibração e análise de desempenho

Os dados estimados por ambos os modelos foram confrontados aos dados das leituras diárias. A partir de cada leitura (n) determinou-se o erro quadrático (equação 3) e para cada conjunto de série de dados meteorológico foi determinada raiz do erro médio quadrático (RMSE) (equação 4). A calibração foi realizada pelo método numérico de Gradação Reduzida Generalizada não linear (GRG-NL), no qual os parâmetros de ambos os modelos foram ajustados para minimizar o RMSE de cada série (Wallach *et al.*, 2013).

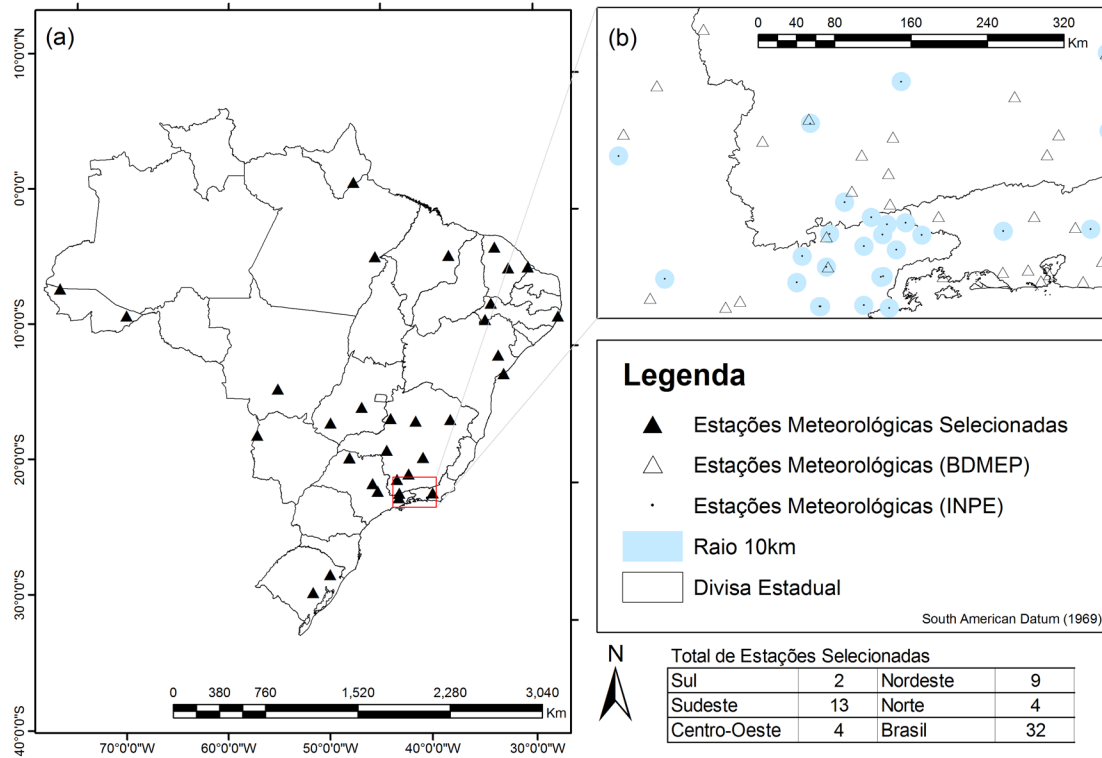
$$\varepsilon_n^2 = (Y_n - \hat{Y}_n)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2} \quad (4)$$

em que ε^2 é o erro quadrático de cada leitura (n); são os valores diários (n) estimados pelo método H e BC e medidos de R_g ; RMSE é a raiz do erro médio quadrático; e N é o número total de observações.

O processo de validação com dados independentes não

Figura 1. Distribuição espacial das estações meteorológicas dos dois bancos de dados e os raios de seleção (10 km) (b) e as estações selecionadas em que a distância entre estações fosse menor ou igual a 10 km (a).



foi realizado pelo fato dos métodos serem consagrados na literatura, desta forma quanto maior o número de observações maior seria a robustez da calibração para cada região. Após o procedimento de calibração foram determinados os índices de desempenho de cada modelo por meio dos índices de erro absoluto médio (equação 5), precisão (equação 6) e acurácia (equação 7) conforme Wallach (2013).

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (5)$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (7)$$

em que Y_i são valores observados e \hat{Y}_i estimados respectivamente e N é o número de observações; \bar{Y} é a média da radiação observada. Por fim, mapas com os parâmetros calibrados e erro de cada modelo foram gerados para o Brasil por meio de krigagem ordinária (interpolação), a metodologia empregada é sumarizada na Figura 2.

Resultados e discussão

Caracterizando a Radiação Solar Global no Brasil

Considerando os dados observados nas 32 localidades estudadas, obteve-se média anual da R_g observada para a região Norte de 20,3 MJ m⁻²dia⁻¹, Nordeste de 19,0 MJ m⁻²dia⁻¹, para as regiões Centro Oeste e Sudeste 17,4 e 17,5 MJ m⁻²dia⁻¹ respectivamente, e para a região Sul 16,6 MJ m⁻²dia⁻¹ a média geral de todas as regiões foi de 19,1 MJ m⁻²dia⁻¹ (Tabela 2). A R_g média apresentou tendência positiva de sul a norte, como já esperado devido ao ângulo de inclinação dos raios solares, bem como a variabilidade foi maior para regiões Sul em comparação as regiões Norte e Nordeste (Figura 3 e Figura 4).

O Brasil possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano, por estar localizado em sua maior parte na região intertropical, apresentando assim, médias anuais de irradiação relativamente altas em todo país. De acordo com o Atlas da radiação solar brasileiro (Pereira, 2006), o valor máximo médio ocorre no norte do Estado da Bahia, com 23,4 MJ m⁻²dia⁻¹, por se tratar de um clima semiárido com baixa precipitação anual. A menor irradiação solar global, cerca de 16,2 MJ m⁻²dia⁻¹ ocorre no litoral norte de Santa Catarina, por apresentar precipitação bem distribuída ao longo do ano. Vale ressaltar que

Tabela 1. Estações meteorológicas selecionadas por região e unidade federativa (UF), número de anos total de cada série, data inicial e final e número de dias de dados consistidos (n).

Estações	Região	UF	Anos	Início	Fim	n
Corumbá	Centro-Oeste	MS	7,2	2/1/2005	4/30/2012	2424
Cuiabá	Centro-Oeste	MT	8,5	6/1/2002	11/30/2010	2848
Goiânia	Centro-Oeste	GO	13,5	10/1/1998	3/31/2012	2502
Jataí	Centro-Oeste	GO	13,2	3/1/1999	4/30/2012	3309
Caxias	Nordeste	MA	8,0	5/1/2004	4/30/2012	2688
Jaguaruana	Nordeste	CE	6,3	1/1/2006	4/30/2012	1968
Ouricuri	Nordeste	PE	10,0	5/1/2002	4/30/2012	3353
Petrolina	Nordeste	PE	13,8	7/1/1998	4/30/2012	3920
Quixeramobim	Nordeste	CE	6,3	1/1/2006	4/30/2012	2065
Recife	Nordeste	PE	12,8	7/1/1999	4/30/2012	4176
Salvador	Nordeste	BA	11,3	9/1/1998	12/31/2009	3672
Serrinha	Nordeste	BA	12,8	8/1/1999	4/30/2012	3837
Sobral	Nordeste	CE	6,3	1/1/2006	4/30/2012	1802
Cruzeiro do Sul	Norte	AC	9,9	6/1/2002	4/30/2012	3068
Macapá	Norte	AP	5,3	1/1/2007	4/30/2012	1620
Marabá	Norte	PA	8,3	9/1/2003	11/30/2011	1311
Rio Branco	Norte	AC	8,0	5/1/2004	4/30/2012	2693
Araçuaí	Sudeste	MG	12,5	11/1/1999	4/30/2012	3912
Araxá	Sudeste	MG	8,6	8/1/2001	2/28/2010	2848
Belo Horizonte	Sudeste	MG	12,5	11/1/1999	4/30/2012	4180
Campos do Jordão	Sudeste	SP	12,9	6/1/1999	4/30/2012	4240
Lavras	Sudeste	MG	12,4	12/1/1999	4/30/2012	4307
Machado	Sudeste	MG	10,9	6/1/2001	4/30/2012	3678
Paracatu	Sudeste	MG	12,5	11/1/1999	4/30/2012	4174
Piracicaba	Sudeste	SP	32,0	1/1/1985	12/31/2016	9928
Pirapora	Sudeste	MG	13,2	3/1/1999	4/30/2012	4082
São Carlos	Sudeste	SP	8,9	6/1/2003	4/30/2012	2751
Taubaté	Sudeste	SP	5,5	11/1/2006	4/30/2012	1848
Teresópolis	Sudeste	RJ	6,6	10/1/2005	4/30/2012	2193
Votuporanga	Sudeste	SP	8,9	6/1/2003	4/30/2012	2820
Caxias do Sul	Sul	RS	7,6	10/1/2004	4/30/2012	2545
Encruzilhada do Sul	Sul	RS	7,6	10/1/2004	4/30/2012	2551

a variação interanual em cada região se difere em grande parte por conta da variação do fotoperíodo (função da latitude do local) e distribuição de chuvas (nebulosidade). Apesar das regiões próximas ao eixo do equador apresentarem maiores valores anuais de R_g , o valor de fotoperíodo é próximo a 12 horas diárias com pouca variação ao longo do ano, enquanto que na região Sul, os valores de fotoperíodo podem superar 14 horas nos meses de verão chegando a valores diários de R_g superiores aos de regiões equatoriais.

Calibração e Desempenho dos métodos de H e BC

Antes da otimização dos parâmetros, a comparação em uma escala de tempo diária entre as médias das radiações observadas (RG) e as médias das radiações estimadas pelos métodos de Hargreaves e Samani (1982) (RGH) e Bristow

e Campbell (1984) (RGBC), para as 32 estações estudadas, mostrou-se melhor para o conjunto de valores gerados entre RGO e RGH, com uma diferença média inferior a $0,34 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Das 32 estações, 17 apresentaram valores médios de RGH superiores à RGO em $1,76 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ enquanto que 15 estações apresentaram valores médios inferiores em $1,26 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Para o método BC, 10 estações apresentaram valores estimados superiores aos observados com média de $1,54 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, enquanto que 22 estações apresentaram valores inferiores com média de $3,06 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Utilizando os parâmetros originais, o modelo H apresentou melhor desempenho para todas as regiões brasileiras, com valor médio de RMSE de $4,40 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. O melhor desempenho foi dado pelo modelo BC após o ajuste, em todas as regiões do Brasil, com RMSE médio de $3,74 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

A Figura 5 ilustra a comparação entre as médias das ra-

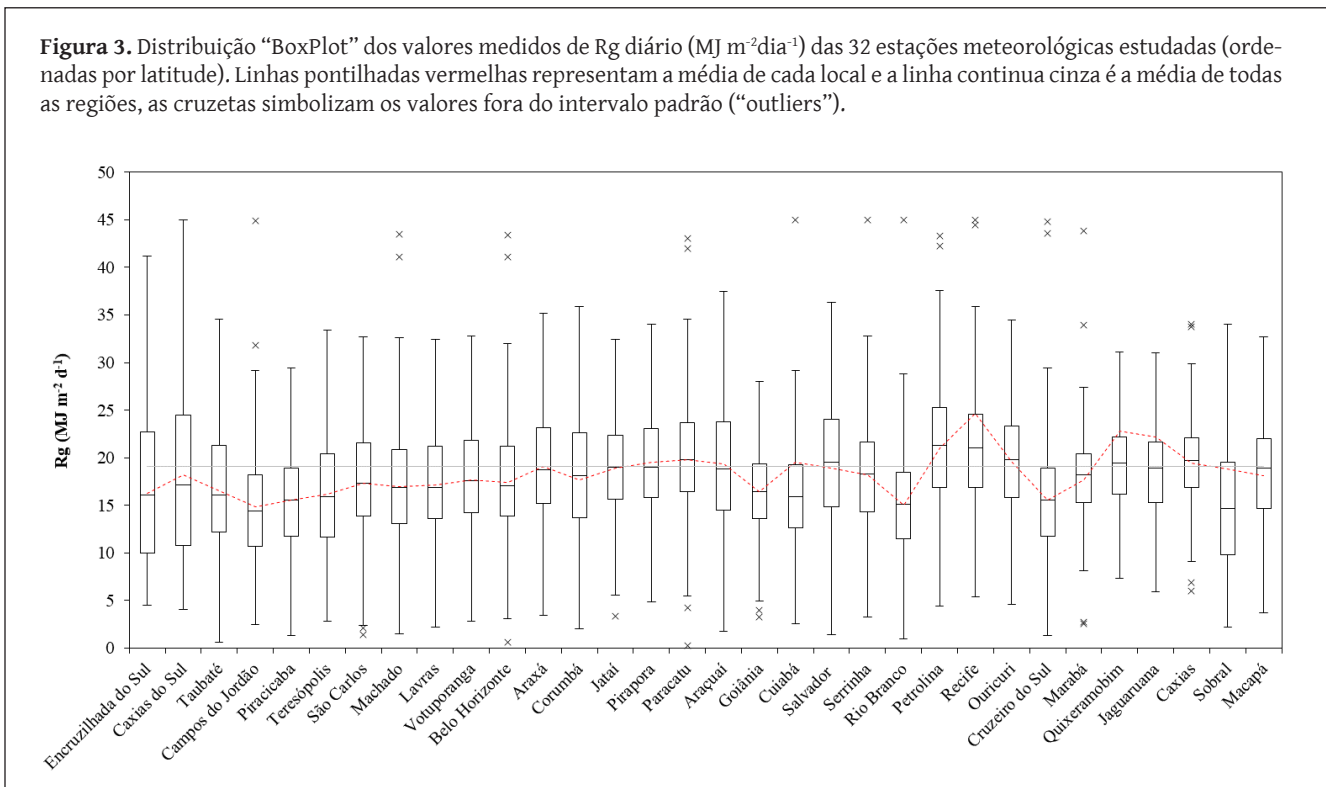
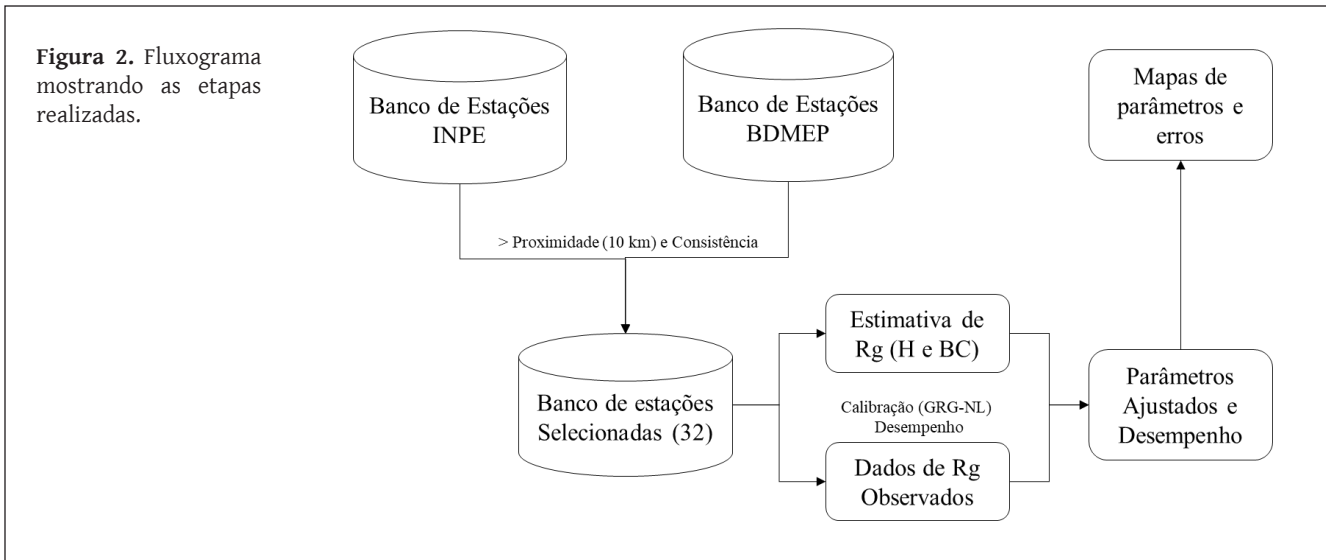
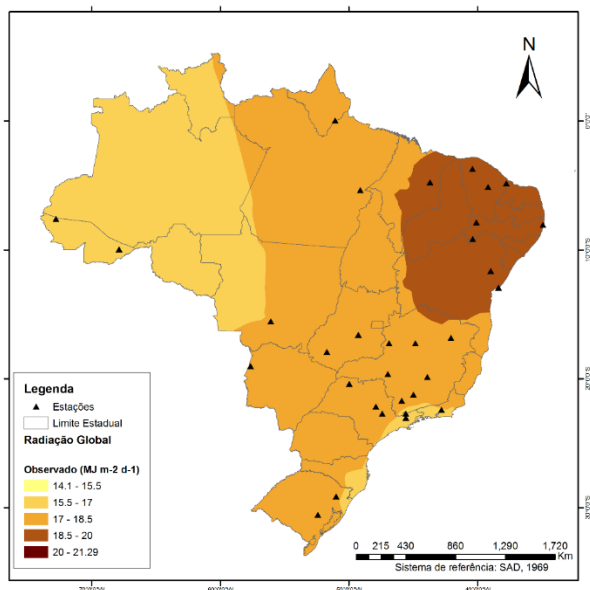


Tabela 2. Distribuição dos valores de Rg medidos nas 32 localidades por região do Brasil. Valores mínimos (Min), primeiro quartil (Q1), mediana, terceiro quartil (Q3), máximos (Max), média e desvio padrão (Desv Med) de cada localidade.

Região	Min	Q1	Mediana	Q3	Max	Média	Desv Med
Sul	4,0	10,4	16,4	23,6	45,0	16,6	10,8
Sudeste	0,6	13,6	17,2	21,5	37,5	17,5	6,4
Centro-Oeste	2,0	13,9	17,3	20,9	35,9	17,4	5,8
Nordeste	1,4	15,2	19,2	22,7	37,6	19,0	6,1
Norte	1,0	13,3	16,9	20,0	32,7	20,3	5,4

Figura 4. Distribuição espacial da média anual da radiação solar no Brasil para as 32 estações estudadas.



diações observadas e estimadas pelos dois modelos nas 32 estações estudadas antes e depois da otimização dos parâmetros. Após a otimização dos parâmetros, a comparação entre as médias das radiações estimadas pelos métodos e as médias observadas mostrou ajuste satisfatório, com erro médio na ordem de $0,01 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ entre RGH e RGO e $0,14 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ entre RGBC e RGO (Figura 5). Em comparação com dados diários, o método BC apresentou melhor ajuste (Figura 6 e Figura 7). As estimativas para as localidades da região Sul e Sudeste foram as que apresentaram melhor ajuste para o método BC (Figura 7), enquanto que as estimativas do método H obtiveram melhor ajuste para valores médios de R_g (Figura 6), subestimando R_g quando RGO é elevado e superestimando R_g quando RGO é inferior à média anual. Tal efeito pode ser corrigido por meio de determinação de parâmetros K_t para cada época do ano.

Segundo Medeiros et al. (2012), em uma comparação com dados RGO, gerados e disponíveis através do INPE,

Figura 5. Relação entre a radiação solar global (R_g) média estimada e medida (observada) pelo método H e BC antes (triângulos) e após (círculos) o ajuste para todas as localidades estudadas.

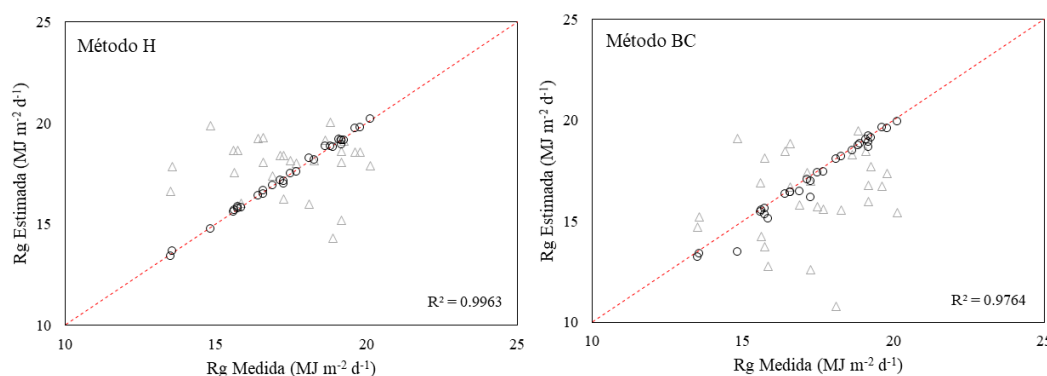
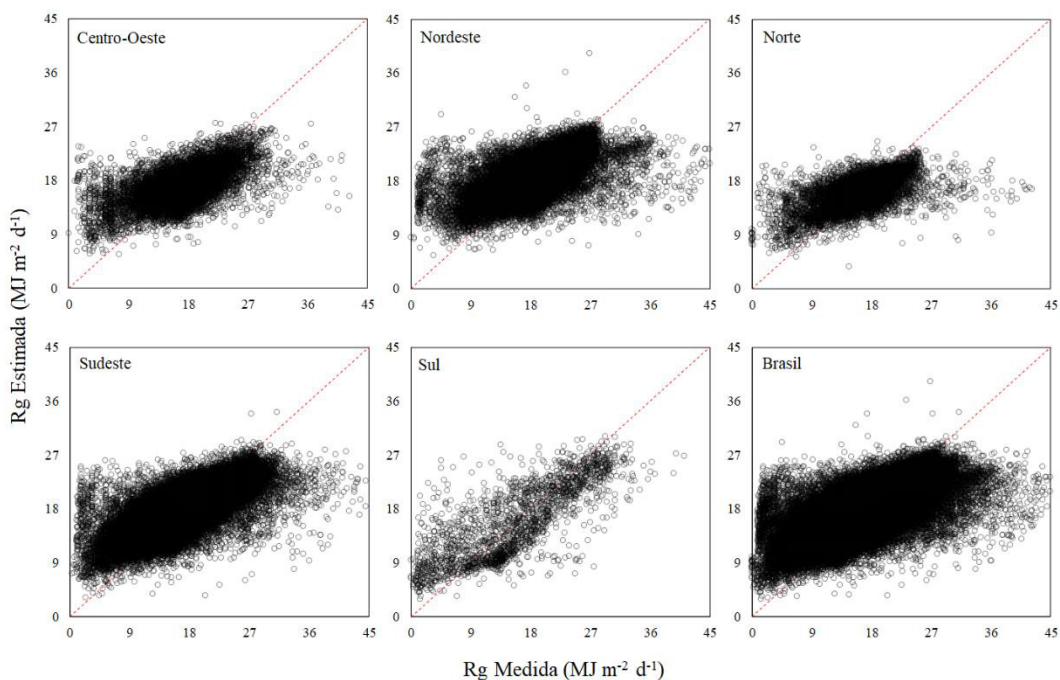


Figura 6. Relação entre a radiação solar global (R_g) estimada e medida pelo método H ajustado para diferentes regiões brasileiras e para todo o Brasil após a otimização dos parâmetros; linha vermelha é a linha 1:1.



para 18 estações localizadas no Brasil e dados de radiação solar estimados pelo modelo NASA/POWER, gerados pelo Departamento da NASA (“National Aeronautics and Space Administration”) de Previsão e Recursos Energéticos Mundiais, mostraram que os dados de radiação solar estimados foram superiores aos dados observados, com diferença inferior à $1,5 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. No entanto, em uma análise decenal, Monteiro et al. (2017) encontrou bons resultados entre RGO e o NASA/POWER, indicando que o sistema de estações digitais pode representar os padrões médios das regiões brasileiras. Macêdo et al (2016), através da análise de métodos de estimativa de R_g baseados em amplitude térmica para seis cidades do estado do Ceará, obtiveram como resultados menores erros na estimativa de R_g pelos métodos de H modificado por Richardson (1985) e Ball et al. (2004), com erro médio entre $1,55$ a $2,16 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

Após a otimização, o índice de acurácia de Willmott (d) apresentou pequeno aumento para o método H e substancial melhora no para o método BC. Os valores médios de acurácia (d) encontrados para método H foram respectivamente, antes e após a otimização, iguais a $0,65$ e $0,67$ para a região Norte, $0,68$ e $0,74$ para a região Nordeste, $0,71$ e $0,73$ para a região Centro Oeste, $0,85$ e $0,85$ para a região Sul e $0,79$ e $0,81$ para a região Sudeste. Para o método BC os valores médios encontrados por região, antes e após a otimização, foram respectivamente de $0,74$ e $0,79$ para a região Norte, $0,66$ e $0,76$ para a região Nordeste, $0,77$ e $0,78$ para a região Centro Oeste, $0,85$ e $0,88$ para a região Sul e $0,85$ e $0,87$ para a região Sudeste (Tabela 3). Borges et al.

(2010), através da utilização dos métodos de H, Thornton-Running (1999) (TR) e Weiss (2001) (WS) para o recôncavo Sul da Bahia, encontraram para o coeficiente de Willmott (d) valores iguais a $0,83$ para o método H, $0,88$ para o método TR e $0,55$ para o método WS.

O coeficiente de determinação r^2 do método H mostrou-se variável entre as regiões brasileiras, com valores entre $0,60$ e $0,75$ para o método H e $0,62$ e $0,78$ para o método BC. Apesar de considerável melhora nos índices de acurácia (d), previamente apresentados, os coeficientes de determinação r^2 não apresentaram substancial incremento (Tabela 4). Com base nos índices de determinação r^2 o método BC apresentou melhor precisão em todas as regiões analisadas em comparação ao método H.

Avaliando o desempenho do método H para estimativa de R_g na cidade de Jaguaruana, estado do Ceará, Nogueira et al. (2012) encontraram ajuste não satisfatório de $0,34$ (r^2), mostrando que para o local estudado o método não é uma boa alternativa para a estimativa de R_g . Conceição e Marin (2007) através da análise dos modelos H e BC para quatro localidades brasileiras, Campinas (SP), Jales (SP), Petrolina (PE) e Teresina (PI), concluíram também que o método BC por apresentar valor médio de r^2 igual a $0,70$, teve um desempenho melhor se comparado ao método H, com valor médio de r^2 igual a $0,61$. Lêdo et al. (2012), também analisaram o método H para a cidade de Barbalha - CE, e obtiveram valores menos expressivos se comparado à região Nordeste, porém, considerados também pouco representativos para os indicadores estatísticos r^2 e d , com

Figura 7. Relação entre a radiação solar global (R_g) estimada e medida pelo método BC ajustado para diferentes regiões brasileiras e para todo o Brasil após a otimização dos parâmetros; linha vermelha é a linha 1:1.

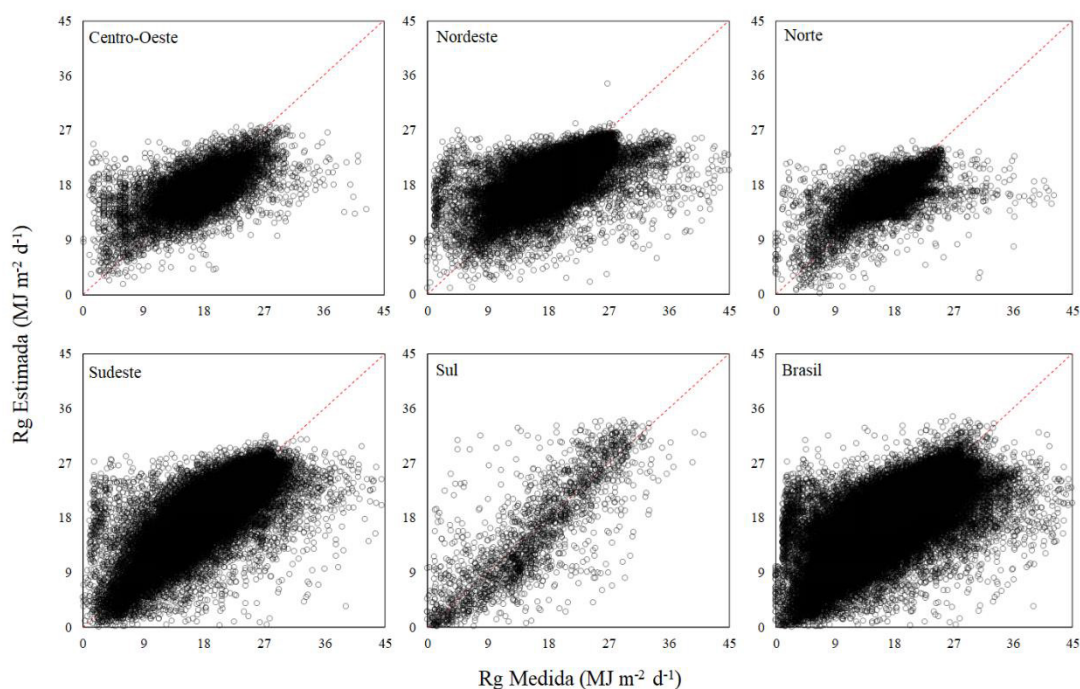


Tabela 3. Valores médios do coeficiente Willmott (d) dos métodos H e BC, para todas as regiões, antes e após otimização dos parâmetros

Regiões	d - Antes		d - Depois	
	Método H	Método BC	Método H	Método BC
Norte	0,65	0,74	0,67	0,79
Nordeste	0,68	0,66	0,74	0,76
Centro Oeste	0,71	0,77	0,73	0,78
Sul	0,85	0,85	0,85	0,88
Sudeste	0,79	0,85	0,81	0,87

Tabela 4. Valores médios do coeficiente r^2 para os métodos H e BC, para todas as regiões, antes e após otimização dos parâmetros.

Regiões	r^2 - Antes		r^2 - Depois	
	Método H	Método BC	Método H	Método BC
Norte	0,63	0,65	0,63	0,67
Nordeste	0,61	0,62	0,61	0,63
Centro Oeste	0,60	0,63	0,60	0,65
Sul	0,75	0,78	0,75	0,78
Sudeste	0,72	0,77	0,72	0,78

Tabela 5. Comparação entre as médias das radiações estimadas pelos métodos H e BC e média da radiação observada (RGO), e valores estatísticos após otimização.

Estações	Período (Anos)	RGH	RGBC	RGO	Método H			Método BC		
					r^2	RMSE	d	r^2	RMSE	d
Araçuaí	8	18,74	18,54	18,51	0,69	3,55	0,86	0,73	3,08	0,92
Araxá	7	18,90	18,72	18,94	0,41	4,28	0,76	0,55	3,80	0,86
Belo Horizonte	7	17,37	17,21	17,53	0,38	4,16	0,76	0,51	3,82	0,84
Campos do Jordão	4	13,34	13,25	14,10	0,39	4,02	0,76	0,43	3,92	0,80
Caxias do Sul	6	16,94	16,82	17,26	0,47	5,08	0,82	0,50	4,99	0,84
Caxias	10	18,74	18,71	19,31	0,27	3,60	0,68	0,29	3,57	0,71
Corumbá	4	18,38	17,75	18,52	0,41	4,12	0,78	0,45	4,06	0,80
Cruzeiro do Sul	7	15,24	15,08	15,12	0,41	3,76	0,69	0,46	3,54	0,79
Cuiabá	5	15,54	15,51	15,58	0,25	4,00	0,64	0,30	3,87	0,70
Encruzilhada do Sul	7	17,00	16,79	17,16	0,66	4,11	0,89	0,71	3,87	0,92
Goiânia	6	16,53	16,46	16,53	0,36	3,22	0,72	0,47	2,96	0,81
Jaguaruana	8	18,00	17,99	18,39	0,23	3,78	0,65	0,23	3,77	0,65
Jataí	9	18,96	18,88	19,05	0,45	3,82	0,77	0,51	3,61	0,83
Lavras	16	17,31	17,15	17,24	0,58	3,59	0,84	0,70	3,05	0,91
Macapá	7	18,36	18,19	18,15	0,47	3,87	0,67	0,51	3,47	0,82
Machado	13	17,46	17,30	17,24	0,54	3,98	0,81	0,64	3,49	0,89
Marabá	3	17,68	17,58	17,64	0,32	3,19	0,64	0,42	2,95	0,78
Ouricuri	11	19,93	19,89	19,68	0,55	3,49	0,80	0,58	3,29	0,86
Paracatu	5	18,79	18,61	18,72	0,51	3,56	0,79	0,73	2,67	0,92
Petrolina	11	22,00	21,89	21,29	0,41	4,55	0,74	0,45	4,41	0,80
Piracicaba	19	18,27	18,03	17,81	0,67	3,36	0,87	0,72	3,18	0,92
Pirapora	12	19,11	18,97	19,03	0,56	3,77	0,79	0,62	3,37	0,87
Quixeramobim	6	18,99	18,99	19,05	0,29	3,63	0,70	0,29	3,63	0,70
Recife	7	19,13	19,13	19,09	0,40	3,90	0,73	0,43	3,80	0,76
Rio Branco	9	15,53	15,42	15,45	0,37	3,99	0,68	0,42	3,80	0,76
Salvador	2	19,18	19,07	19,13	0,48	4,23	0,79	0,52	4,06	0,84
São Carlos	8	17,69	17,52	17,70	0,55	3,78	0,84	0,63	3,46	0,89
Serrinha	4	17,44	17,35	17,47	0,55	3,27	0,84	0,57	3,23	0,86
Sobral	2	17,54	17,54	17,56	0,30	3,51	0,69	0,30	3,50	0,68
Taubaté	6	16,76	16,53	16,66	0,60	3,96	0,84	0,68	3,50	0,90
Teresópolis	7	16,21	16,12	16,30	0,48	4,06	0,81	0,50	4,00	0,83
Votuporanga	4	17,95	17,86	18,09	0,37	4,21	0,75	0,46	3,97	0,81

valores iguais a 0,31, 0,56, respectivamente.

Comparando o desempenho de três diferentes métodos para estimar a Rg em quatorze locais do Estado de Santa Catarina, Massingham (2007) encontrou valores médios de

r^2 e d para os métodos H e BC próximos aos valores encontrados neste trabalho após otimização para a Região Sul (Tabela 3 e Tabela 4), sendo eles iguais respectivamente a 0,62, 0,77 para o método H e 0,63, 0,81 para o método BC.

Figura 8. Valores médios de RMSE ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) para o método H e BC por região antes da otimização.

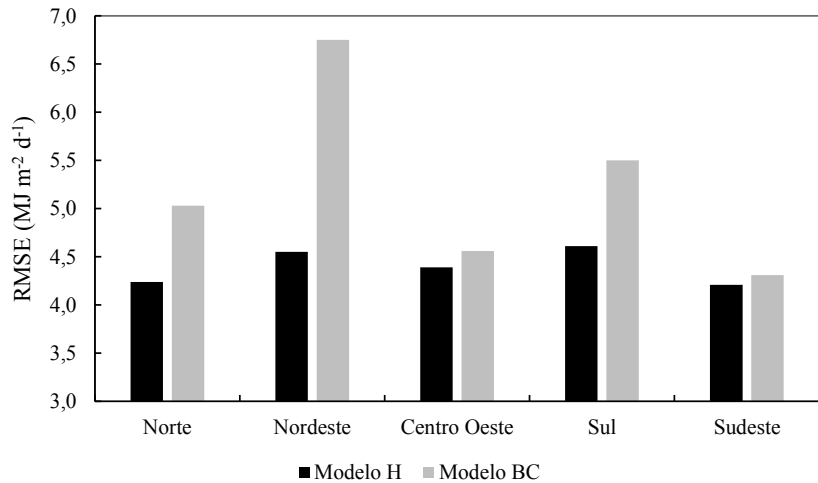
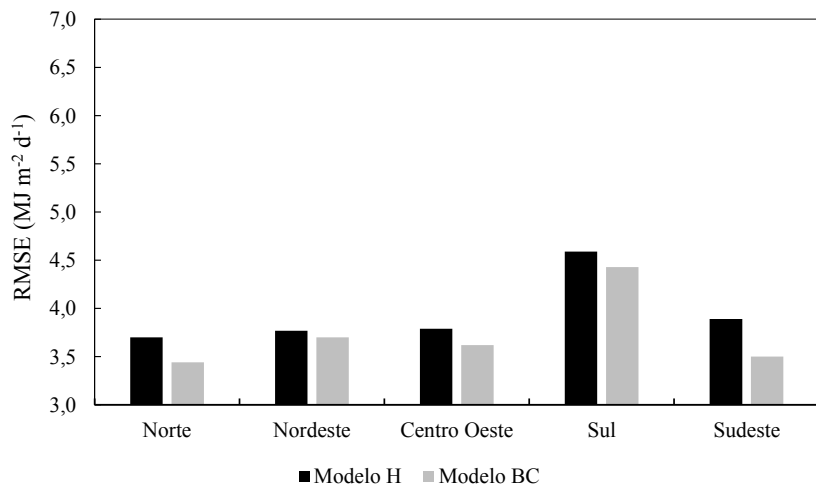


Figura 9. Valores médios de RMSE ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) para o método H e BC por região após a otimização.



Após a otimização, ambos os modelos apresentaram sensível melhora nos valores de RMSE em todas as regiões, sendo mais expressiva para o modelo BC (Figura 8 e Figura 9). Para o modelo H os valores médios de RMSE antes e após a otimização foram respectivamente $4,24$ e $3,70 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Norte, $4,55$ e $3,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Nordeste, $4,39$ e $3,79 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Centro Oeste, $4,61$ e $4,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sul e $4,21$ e $3,89 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sudeste. O modelo BC apresentou valores médios de RMSE antes e após a otimização respectivamente $5,03$ e $3,44 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Norte, $6,75$ e $3,70 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Nordeste, $4,56$ e $3,62 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Centro Oeste, $5,50$ e $4,43 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sul e $4,31$ e $3,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sudeste. Silva et al. (2012) analisaram nove modelos de estimativa de R_g , entre eles H e BC, para onze cidades localizadas no estado de Minas Gerais. Neste estudo, os autores também encontraram melhor ajuste do modelo BC em relação ao método

H, com RMSE médio entre $3,0$ e $3,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, enquanto que para o método H o RMSE médio encontrada esteve entre $3,5$ e $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

De forma geral, a otimização dos parâmetros contribuiu para diminuição do RMSE em 10% para H e 25% para BC para todo o Brasil (Tabela 5). O indicador estatístico erro médio absoluto (EMA) apresentou significativa melhora para os dois métodos analisados após a otimização, com valores que passaram de $4,13$ a $2,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Norte, $5,81$ a $2,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Nordeste, de $3,59$ a $2,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a Região Centro Oeste, $4,37$ a $3,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sul e $3,37$ a $2,64 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Sudeste, utilizando o método BC. Para o método H, os valores de EAM antes e após a otimização foram respectivamente de $3,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $2,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, a para a região Norte, $3,72 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $2,94 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Nordeste, $3,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $3,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a região Centro Oeste, $3,70 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $3,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$

para a região Sul e $3,31 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $3,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para a região Sudeste.

Analisando três métodos para estimativa da R_g no Recôncavo Sul da Bahia, entre eles o método H, Borges et al. (2010) encontraram valores de EMA parecidos com os otimizados para a região Nordeste, igual a $2,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, concluindo ser este o melhor método dentre os estudados pelos autores. Fernandes et al. (2011), por meio da calibração e validação de cinco métodos de estimativa de R_g para dez cidades do estado de Goiás, obtiveram valores de EMA de $2,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a calibração e $2,96 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a validação, utilizando o método H, e $2,55 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a calibração e $2,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a validação, utilizando o método BC, sendo estes valores próximos aos da região Centro Oeste após otimização dos parâmetros.

A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente de determinação (c), antes e após otimização dos parâmetros, para os dois métodos estudados. Embora não tenha ocorrido mudanças expressivas dos valores médios do coeficiente r^2 após otimização para os dois métodos analisados, são valores considerados com alta precisão, segundo a classificação de Hoppinks (2002). Nogueira et al. (2012) analisando o desempenho do método H na estimativa de R_g para Jaguaruana no estado do Ceará encontraram para o coeficiente r^2 0,59, valor muito parecido ao da região Nordeste, com precisão classificada como alta.

A média dos valores dos coeficientes K_t para as localidades próximas à costa litorânea, ou próximas à grande porção de água foi de $0,187 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, enquanto que para as localidades continentais e com certa distância do litoral, a média dos valores de K_t foi igual a $0,154 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, coerentes com os valores propostos por Hargreaves e Samani (1982).

Ao avaliarem nove modelos empíricos de estimativa de R_g , entre eles os modelos H e BC, para doze localidades espalhadas pelas regiões Metropolitana, Vale do Rio Doce e Zona da Mata de Minas Gerais, Silva et al. (2012) encontraram valores médios para os parâmetros utilizados pelos modelos H e BC, muito próximos aos encontrados para a região Sudeste (Tabela 6). Para o coeficiente de calibração K_t do modelo H, os autores encontraram $0,161 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, enquanto que para os coeficientes empíricos “A”, “B” e “C” do modelo BC eles encontraram 0,734, 0,018 e 1,828 respectivamente.

De forma similar, Geiss et al. (2010) ajustaram o coeficiente K_t do método H para as condições de Ponta Grossa - PR, para períodos mensal, sazonal e anual. Os autores encontraram valores próximos e coerentes aos da região Sul (Tabela 6), com média mensal K_t variando entre $0,1356 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$ e $0,1630 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, para o período sazonal (verão, outono, inverno e primavera) valores médios de $0,1571 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, $0,1585 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$, $0,1571 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$ e $0,1440 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$ respectivamente, e para média anual $0,1542 \text{ }^\circ\text{C}^{-0,5}$.

Os parâmetros empíricos dos modelos H e BC, foram

Tabela 7. Parâmetros empíricos dos métodos H e BC ajustados por localidade, após a otimização

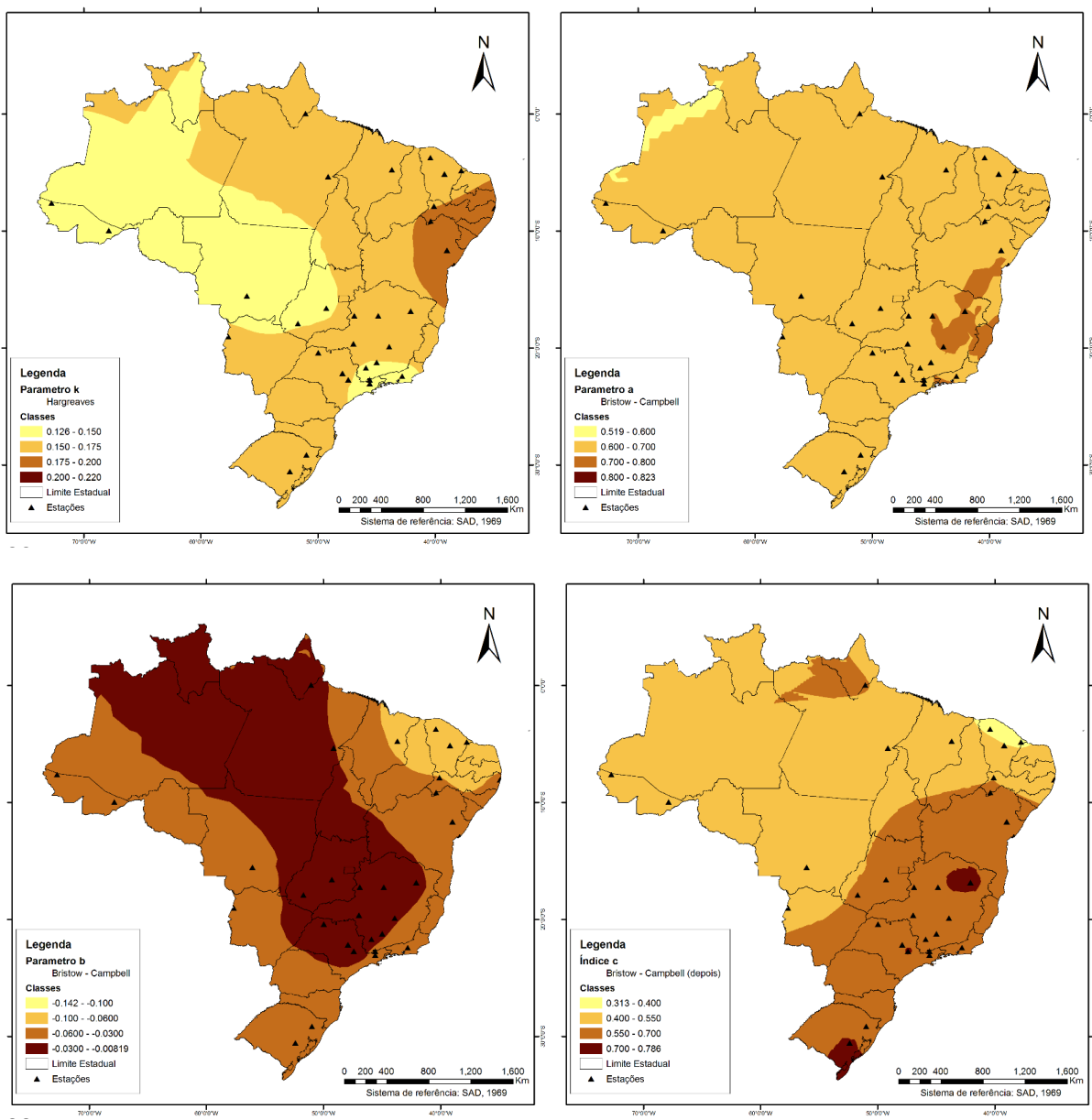
Estações	Hargreaves e Samani		Bristow e Campbell	
	KT	“A”	“B”	“C”
Araçuaí	0,157	0,703	0,016	1,847
Araxá	0,167	0,807	0,023	1,656
Belo Horizonte	0,171	0,670	0,025	1,879
Campos do Jordão	0,126	0,600	0,060	1,268
Caxias do Sul	0,164	0,675	0,062	1,401
Caxias	0,156	0,710	0,071	1,221
Corumbá	0,160	0,657	0,031	1,694
Cruzeiro do Sul	0,136	0,630	0,034	1,550
Cuiabá	0,132	0,519	0,038	1,680
Encruzilhada do Sul	0,162	0,688	0,026	1,758
Goiânia	0,137	0,596	0,012	2,003
Jaguaruana	0,157	0,634	0,117	1,129
Jataí	0,151	0,769	0,035	1,410
Lavras	0,150	0,734	0,018	1,720
Macapá	0,179	0,625	0,013	2,365
Machado	0,143	0,725	0,015	1,741
Marabá	0,155	0,652	0,024	1,773
Ouricuri	0,171	0,823	0,039	1,428
Paracatu	0,161	0,727	0,008	2,141
Petrolina	0,196	0,763	0,025	1,853
Piracicaba	0,155	0,698	0,014	1,914
Pirapora	0,158	0,652	0,012	2,106
Quixeramobim	0,163	0,759	0,142	0,911
Recife	0,199	0,589	0,031	2,284
Rio Branco	0,138	0,570	0,032	1,691
Salvador	0,220	0,610	0,032	2,417
São Carlos	0,159	0,722	0,031	1,587
Serrinha	0,161	0,736	0,102	1,072
Sobral	0,138	0,620	0,104	1,083
Taubaté	0,139	0,675	0,013	1,830
Teresópolis	0,136	0,768	0,071	1,043
Votuporanga	0,156	0,644	0,016	1,975

Tabela 6. Valores dos parâmetros empíricos dos métodos H e BC por região, após a otimização

Regiões	Método H		Método BC	
	KT ($^\circ\text{C}^{-0,5}$)	“A”	“B”	“C”
Norte	0,152	0,619	0,026	1,845
Nordeste	0,173	0,694	0,074	1,489
Centro Oeste	0,145	0,635	0,029	1,697
Sul	0,163	0,671	0,044	1,580
Sudeste	0,152	0,702	0,025	1,747

inseridos para representar as características atmosféricas e de superfície regionais de cada localidade, desta forma diversos autores modificaram e avaliaram diferentes métodos para determinação destes parâmetros com base nas

Figura 10. Espacialização do parâmetro Kt do método H; e dos parâmetros “A”, “B” e “C” do método BC após calibração



coordenadas geográficas e topografia (Goodin et al., 1999; Weiss et al., 2001), na tentativa de minimizar a necessidade da calibração local. Neste sentido, os mapas de cada parâmetro (Kt, A, B e C) calibrado é apresentado a seguir. O mapa do parâmetro Kt para Brasil apresentou variação entre 0,126 a 0,220 $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$, com valores menores para região Centro-Oeste e Amazônia e maiores valores para região litorânea da região Nordeste (Figura 10). Em quatro localidades na região noroeste do estado de Minas Gerais, Silva et al. (2012) obtiveram o coeficiente Kt variando entre de 0,166 a 0,186 ($r^2= 0,64$).

Com relação ao método BC, o parâmetro A apresentou baixa variabilidade espacial, apesar de variar entre 0,519 e 0,823, grande parte do país apresentou valores entre 0,600 a 0,700. O parâmetro B, apresentou maiores valores

em uma faixa do Estado de São Paulo ao bioma amazônico (entre -0,03 a -0,008) e menores valores para região do Nordeste (-0,142 e -0,100) (Figura 10). O parâmetro C variou de 0,313 a 0,766, com maiores valores isolados no extremo sul do país e norte de Minas Gerais (entre 0,700 e 0,766), e menores valores nas regiões Norte e parte das regiões Centro-Oeste e Nordeste com valores entre 0,313 e 0,400 (Figura 10). A correlação dos parâmetros empíricos a outras variáveis meteorológicas já foi reportada em outros estudos (Silva et al., 2012), e assim como a altimetria, podem ser incluídas como fator de co-krigagem para aprimorar o mapeamento dos parâmetros empíricos, no entanto tal análise requer séries de dados meteorológicos mais completos e cruzamento de informação de diferentes bases de dados.

Conclusão

Na ausência de dados de radiação solar global diária (Rg) em estações meteorológicas, os métodos de Hargreaves e Samani (H) e Bristow e Campbell (BC), baseados na amplitude térmica, mostraram-se capazes de estimar a Rg para diferentes localidades brasileiras, com o modelo BC se mostrando mais eficaz. Após a otimização dos parâmetros todas as localidades do Brasil, salvo as da região Sul, apresentaram erros médios quadráticos (RMSE) inferiores à 4 MJ m⁻² dia⁻¹. Além disso houve uma significativa melhora nos indicadores estatísticos analisados com diminuição do RMSE em 10% para o método de Hargreaves e Samani (H) e 25% para Bristow e Campbell (BC) em todas as localidades estudadas, confirmando a importância de ajuste regional para estes métodos. Apesar da melhora nas estimativas da radiação solar global, a otimização dos parâmetros por época do ano pode minimizar possíveis efeitos sazonais de cada região. Para isto, a integração de diferentes bancos de dados meteorológicos torna-se fundamental para criação de longas séries de dados históricos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados meteorológicos. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da pesquisa, processos n° 2014/05887-6, 2014/12406-4 e 2017/20925-0, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos #301424/2015-2 e #401662/2016-0, e aos revisores deste periódico pelas sugestões de melhorias e contribuições.

Referências

- 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**, Philadelphia, v.148, p.401-416, 2008.
- ALLEN, R. G. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrology Engineering**, Reston, VA, USA, v. 2, p. 56-67, 1997.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO: **Irrigation and Drainage Paper**, 56).
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain, **Energ. Convers. Manage.**, Cambridge, 45, 1529-1539, 2004.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Oxford, v. 50, n. 4, p. 121-6, 1924.
- BALL, R.A.; PURCELL, L.C.; CAREY, S.K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. **Agronomy Journal**, Wisconsin, v.96, n.2, p.391-397, 2004.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. DE; MAURICIO FILHO, A. C.; SILVA, T. S. M. DA; PAMPONET, B. M. 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, 2010.
- 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.
- CHEN R. S.; LU S.; KANG E.; YANG J.; JI X. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 47, p. 865-878, 2006.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; MARIN, F. R. Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários da radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 1, 2007.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Reference evapotranspiration based on solar radiation estimated by the Bristow-Campbell model. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.
- DAVIES, J. A.; MCKAY, D. C. Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 43, n. 3, p. 153-168, 1989.
- DE SOUZA, Adilson Pacheco et al. Radiação global por modelos simplificados para o Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 4, p. 215-227, 2017.
- DONATELLI, M.; CAMPBELL, G.S. A simple model to estimate global solar radiation. In: PROCEEDING ESA CONGRESS, 9, 1998, Nitra, Republic Slovak. **Proceedings...** Nitra, Republic Slovak: Slovak Agricultural University. p.133-134.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; AMORIM, A. O.; PAZ, R. L. F. Avaliação de modelos de estimativa de radiação solar global para o estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17, Guarapari - ES, **Anais...** UFLA, 2011.
- FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p. 449-453, 2009.
- GEISS, J. C.; SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E. Ajuste de um coeficiente empírico para estimar a radiação solar global na região de Ponta Grossa - Paraná. In: XVIII EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFPR. Curitiba. **Anais...** UFPR, 2010.
- GOODIN, D. G.; HUTCHINSON, J. M. S.; VANDERLIP, R. L.; KNAPP, M. C. Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Wooster, v. 91, p. 845- 851, 1999.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage**. ASCE; Delaware, v. 108, p. 225-30, 1982.
- HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 91, n. 3-4, p. 293-300, 1998.
- LIU, D. L.; SCOTT, B. J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 106, n. 1, p. 41-59, 2001.
- LÊDO, E. R. F.; SILVA, M. G.; NOGUEIRA, D. H.; ARRAES, F. D. D. Avaliação de modelo de estimativa da radiação solar global (Rs) com base na amplitude térmica. **Conex. Ci e Tecnologia**. Fortaleza, v.6 n.1, p. 15-26, 2012.
- MACÊDO, K. G.; OLIVEIRA, J. B.; ARRAES, F. D. D.; TORRES, W. L. V.; JUNIOR, J. C. L. Estimativa da radiação solar global com dados de temperatura do ar em seis cidades do estado do Ceará. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, V.24 n.1, p. 68-75, 2016.
- MASSIGNAM, A. M. Estimativa da radiação solar em função da amplitude térmica. XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Aracajú, **Anais...**2007.
- MEDEIROS, S. R.; PINTO, H. M. S.; MARIN, F. R. Evaluation of the model NASA/POWER for the estimate daily radiation data versus radiation daily observed data of the weather stations in Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17; 2., 2012, Gramado. **Anais...** Gramado: UFRGS, 2012.

- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PEDRA, G. U. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. **International Journal of Climatology**, London, v. 38, n. 3, p. 1571-1581, 2018.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere**. 4th Edition ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2012.
- MUNNER, T.; GUL, M. S. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 41, n. 5, p. 461-82, 2000.
- NOGUEIRA, D. H.; SILVA, M. G.; LEDO, E. R. F.; ARAÚJO, E. M. Estimativa da radiação solar global (RS) através da amplitude térmica diária. Cong. Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, Fortaleza, **Anais...** 2012.
- PARTON, W. J.; LOGAN, J. A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 23, p. 205-216, 1981.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006. 60p.
- PETELA, R. **Engineering thermodynamics of thermal radiation for solar power utilization**, v1, McGraw Hill, 2010.
- RICHARDSON, C. W. Weather simulation for crop management models. Trans. **ASABE**, Michigan, v. 28, n. 5, p. 1602 - 1606, 1985.
- RIVINGTON, M.; BELLOCCHI, G.; MATTHEWS, K. B.; BUCHAN, K. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 132, n. 3-4, p. 228-43, 2005.
- SAMANI, Z. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.126, n.4, p.265-267, 2000.
- SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: ESALQ, 2012. v. 12
- SILVA, C. R. DA; SILVA, V. J. DA; JÚNIOR, J. A.; CARVALHO, H. DE 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.
- SPITTERS, C. J. T.; TOUSSAINT, H.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 38, n. 1-3, p. 217-229, 1986.
- TANAKA, A. A. **Avaliação de métodos de estimativa da radiação solar global e da evapotranspiração de referência para o estado de Mato Grosso**. 2013. 109 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2013.
- TEH, C. B. S. **Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the Equations are Derived and Assembled into a Computer Program**, Dissertation, 2006.
- 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**, Philadelphia, 93: 211-228, 1999.
- TRNKA, M.; ZALUD, Z.; EITZINGER, J.; DUBROVSKY, M. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 131, n. 1-2, p. 54-76, 2005.
- WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment**. Academic Press, 2013.
- 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.
- WONG, L. T.; CHOW, W. K. Solar radiation model. **Applied Energy**, London, v. 69, n. 3, p. 191-224, 2001.
- YANG, K.; KOIKE, T. Estimating surface solar radiation from upper-air humidity. **Solar Energy**, Kidlington, v. 72, n. 2, p. 177-86, 2002.

REFERENCIAÇÃO

RAMOS, J. P. A.; VIANNA, M. S.; MARIN, F. R. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.26, n.1, p.37-51, 2018.



Estimation of global solar radiation based on thermal amplitude for different localities of Brazil

João Paulo Augusto Ramos¹; Murilo dos Santos Vianna¹ and Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP, Brazil. E-mails: jonnybrao@yahoo.com.br, murilodsv@gmail.com and fabio.marin@usp.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 September 2017

Accepted 20 December 2018

Index terms:

solar radiation

modeling

agrometeorology

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the performance of two models (Bristow and Campbell (1984) (BC) and Hargreaves and Samani (1982) (H)) and to optimize their parameters, based on a database of 32 locations in different Brazilian regions. The performance of each model was evaluated by means of statistical indexes of precision (r^2), accuracy (d) and root mean square error (RMSE) before and after the optimization. The best performance was given by BC model after adjustment, in all regions of Brazil, with mean RMSE of $3.74 \text{ MJ.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. The optimization contributed to a decrease of RMSE by 10% for H and 25% for BC. After optimization, we found average values for Kt of: 0.152 for the North, 0.173 Northeast, 0.145 Center West, 0.163 South and 0.152 Southeast. For the non-dimensional parameters of the BC model, 0.619, 0.026 and 1.845 for the North region, 0.694, 0.074 and 1.489 Northeast, 0.635, 0.029 and 1.697 Central West, 0.671, 0.044 and 1.580 South and 0.702, 0.025 and 1.747 Southeast.

© 2018 SBAGro. All rights reserved.

CITATION

RAMOS, J. P. A.; VIANNA, M. S.; MARIN, F. R. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.26, n.1, p.37-51, 2018.