

## ESTIMATIVAS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL POR HARGREAVES E SAMANI NO MUNICÍPIO DE JAÚ-SP

**Bruno Marcos Nunes Cosmo<sup>1</sup>, Tatiani Mayara Galeriani<sup>3</sup>, Adolfo Bergamo Arlanch<sup>2</sup>,  
Glauber José de Castro Gava<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Mestrando em Irrigação e Drenagem, UNESP-Botucatu. E-mail: brunomcosmo@gmail.com

<sup>2</sup>Mestranda em Agricultura, UNESP-Botucatu. E-mail: tatianigaleriani@gmail.com

<sup>3</sup>Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP-Botucatu. E-mail: adolfoarlanh@gmail.com

<sup>4</sup>Doutor Pesquisador Científico, IAC e Prof. Doutor UNESP-Botucatu. E-mail: ggava@iac.sp.gov.br

### RESUMO

O setor agropecuário movimenta parcela significativa da economia mundial, contudo, ele se encontra vulnerável ao ambiente, impulsionando estudos que permitam prever o comportamento climático, para o emprego de medidas mitigatórias. Todavia, estes estudos nem sempre dispõem de dados reais e os meios de estimá-los também podem ser limitados. Neste contexto, o objetivo do estudo foi comparar a radiação solar global estimada pelo modelo de Hargreaves e Samani (1982), com valores reais obtidos no município de Jaú-SP. Para tal, coletou-se dados diários de temperatura e radiação solar entre os anos de 2009 a 2018 em uma estação de Jaú-SP, totalizando 3.652 observações. As estimativas de radiação foram realizadas pelo método de Hargreaves e Samani, com variação fixa do coeficiente empírico  $K_r$  entre 0,12 a 0,19. Em seguida avaliou-se os dados estimados e os dados reais por meio dos índices de correlação ( $r$ ), determinação ( $R^2$ ), concordância ( $d$ ) e confiança ( $c$ ). Os resultados demonstraram os melhores valores de  $K_r$  na faixa de 0,13 a 0,15, porém nenhuma estimativa foi classificada acima de tolerável pelo índice “ $c$ ”. Conclui-se que o modelo pode ser utilizado, quando não se dispuser de dados reais, contudo, a calibração local é preferível em relação ao uso de coeficientes fixos.

**Palavras-chave:** Agrometeorologia agrícola; Condições climáticas; Predição climática.

### 1 INTRODUÇÃO

O setor agropecuário é responsável por uma parcela significativa da economia nacional e mundial, fator que impulsiona o desenvolvimento de estudos buscando a evolução do setor e a elevação da produtividade de cultivos (SAATH; FACHINELO, 2018). Contudo, além dos fatores controláveis pelo ser humano como escolha do material, adubação, época de semeadura e outros relacionados ao manejo, existem fatores que não podem ser controlados, como, por exemplo, as condições climáticas (BUHLER, 2010).

Dentre os fatores climáticos que afetam o desenvolvimento agrícola, pode-se citar a temperatura, precipitação, radiação solar, dentre outros, que podem tanto favorecer o desenvolvimento vegetal, quanto limitá-lo. Conhecer o comportamento climático de vários anos, permite tentar prever o comportamento dos anos seguintes, possibilitando o uso de medidas de mitigação de adversidades (MONTEIRO, 2009; EMBRAPA, 2018).

O conhecimento do clima não permite apenas predizer o seu comportamento, mas também permite modelar o desenvolvimento e as respostas das culturas perante a tais condições (MONTEIRO, 2009). O emprego de modelos de predição do desenvolvimento vegetal ou modelagem agrícola têm crescido nas últimas décadas, dentre suas vantagens, destaca-se a redução de custos com a condução de experimentos, reduzindo a demanda de recursos humanos, financeiros e tempo (SCARPARE et al., 2012; URIBE et al., 2016).

Contudo, para a geração adequada destes modelos é necessário a utilização de dados e parâmetros consistentes e de longa duração. Para os trabalhos de modelagem, uma das informações fundamentais pauta-se na construção do banco de dados climáticos, com extensão mínima de alguns anos e/ ou décadas. Porém, não são todas as variáveis climáticas que são mensuradas e/ ou mensuradas de forma confiável por tanto tempo em todas as regiões do país (SCARPARE et al., 2012; BABA et al., 2014).

Variáveis como a temperatura e precipitação são de mensuração mais simples, e normalmente encontradas com maior facilidade e abundância nas estações climáticas distribuídas pelo Brasil, porém, dados confiáveis e de longa duração para variáveis como a radiação solar, devido aos equipamentos utilizados e possibilidade de divergência entre os equipamentos, são mais escassas (SILVA et al., 2012).

Desta forma, deve-se buscar meios de estimar estas informações de forma confiável, quando as mesmas não se encontrem disponíveis. Existem diversas propostas de estimativa da radiação solar, contudo, aquelas consideradas mais precisas, envolvem a utilização de muitos parâmetros e estes por sua vez, também podem não estar disponíveis em diversas situações (BERUSKI; PEREIRA; SENTELHAS, 2015).

Dentre os modelos que utilizam poucas variáveis, destaca-se o Hargreaves e Samani (1982), baseado na amplitude térmica, sendo considerado um modelo com boa adequação para muitas regiões, porém, por dispor de um coeficiente empírico (Kr), este pode apresentar ajustamento e adequação distinta em cada região.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi comparar a radiação solar global estimada pelo modelo de Hargreaves e Samani (1982), com valores reais em Jaú-SP.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto, comparou-se a radiação solar global estimada pelo modelo de Hargreaves e Samani (1982), baseado nas informações de temperatura, com dados reais coletados em uma estação meteorológica, por um período de 10 anos.

Os dados coletados foram temperatura mínima, média e máxima, precipitação, direção e velocidade do vento e radiação solar global, correspondentes ao período de 01/01/2009 à 31/12/2018, obtidos em estação meteorológica da Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC Jahu), localizada sob as coordenadas: Latitude 22°18'50" S, Longitude 48°32'54", com altitude de 583,4 m.

Considerando o uso de um modelo baseado apenas na temperatura, os demais dados além de temperatura e radiação solar global foram descartados do estudo, além disso, das 3.652 observações diárias para cada variável, descartou-se todas as observações com a ausência de dados de temperatura e/ ou radiação solar global, além de observações aparentemente incoerentes, resultando em um total de 3.473 observações diárias viáveis.

O modelo de estimativa de Hargreaves e Samani (1982) (Equação 1), leva em consideração um coeficiente empírico, denominado Kr que oscila entre 0,16 para regiões no interior do continente até 0,19 para regiões litorâneas, contudo, segundo o estudo de Mazzarella et al. (2019), o coeficiente Kr pode superestimar os valores de radiação solar global, mesmo quando calibrado regionalmente.

$$Q_g = K_r * \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} * Q_o \quad (1)$$

Onde:

**Q<sub>g</sub>**: Radiação Solar Global ou Incidente (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**K<sub>r</sub>**: Coeficiente Empírico oscilando de 0,16 a 0,19;

**T<sub>max</sub>**: Temperatura Máxima (°C);

**T<sub>min</sub>**: Temperatura Mínima (°C);

**Q<sub>o</sub>**: Radiação Incidente no Topo da Atmosfera ou Extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>).

Embora os valores de Kr recomendados oscilam de 0,16 a 0,19, o ajustamento regional pode gerar adequações distintas deste coeficiente. Em um estudo de Ramos, Vianna e Marin (2018), utilizando 32 estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil, constatou-se valores de Kr ajustados localmente oscilando entre 0,126 até 0,220, sendo o Kr ajustado o Sudeste do país de 0,152, enquanto a média do Kr ajustado para as estações em São Paulo (Campos do Jordão, Piracicaba, São Carlos, Taubaté e Votuporanga) de 0,147, indicando valores de Kr abaixo do limite recomendado de 0,16.

Desta forma, para este estudo, os valores de Kr empregados foram valores fixos, oscilando 0,005 entre si, de 0,12 até 0,19 (a faixa recomenda e sua mesma extensão com valores abaixo do recomendado). Para determinação dos valores de radiação no topo da atmosfera, foram utilizadas as equações 2, 3, 4 e 5.

$$Q_0 = \frac{J_0}{\pi} * \left(\frac{d}{D}\right)^2 * \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) * hn * \text{sen}\varnothing * \text{sen}\sigma + \text{Cos}\varnothing * \text{Cos}\sigma * \text{sen } hn \right] \quad (2)$$

$$\left(\frac{d}{D}\right) = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{NDA*360}{365}\right) \quad (3)$$

$$hn = \text{Arccos}(-\text{Tg}\varnothing * \text{Tg}\sigma) \quad (4)$$

$$\sigma = 23,45 * \text{sen}\left[\frac{360*(NDA-80)}{365}\right] \quad (5)$$

Onde:

**Q<sub>0</sub>**: Radiação Incidente no Topo da Atmosfera ou Extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>).

**J<sub>0</sub>**: Constante Solar (118,11 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**( $\frac{d}{D}$ )**: Razão entre a Distância Terra-Sol;

**hn**: Angulo Horário do Nascer do Sol;

**∅**: Latitude (Radianos);

**σ**: Declinação Solar (Radianos);

**NDA**: Número do Dia Juliano do Ano.

Os indicadores estatísticos utilizados para comparação dos modelos foram o Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Concordância ou Acurácia (d) (WILLMOTT, 1985) e Índice de Confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), sendo os três últimos, determinados através das equações 6, 7 e 8.

$$r = \frac{\sum_1^n (O_i - O) * (P_i - P)}{\sqrt{[\sum_1^n (O_i - O)^2] * [\sum_1^n (P_i - P)^2]}} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_1^n (O_i - P_i)^2}{\sum_1^n (|O_i - P| + |P_i - P|)^2} \right] \quad (7)$$

$$c = r * d \quad (8)$$

Onde:

**r**: Índice de Correlação (adimensional);

**O<sub>i</sub>**: Valores Medidos (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**O**: Média dos Valores Medidos (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**P<sub>i</sub>**: Valores Estimados (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**P**: Média dos Valores Estimados (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

**d**: Índice de Concordância (adimensional);

**c**: Índice de Confiança (adimensional).

A interpretação dos valores obtidos com os índices r e c, são apresentados na Tabela 1. Sendo o coeficiente c utilizado para classificar o ajustamento do modelo.

**Tabela 1.** Critério de interpretação dos valores de “r” e “c” para os modelos.

Índice de Correlação*	Índice de Confiança**
-----------------------	-----------------------

Valor de “r”	Precisão	Valor de “c”	Desempenho
0,0-0,1	Muito Baixo	> 0,85	Ótimo
0,1-0,3	Baixo	0,76-0,85	Muito Bom
0,3-0,5	Moderado	0,66-0,75	Bom
0,5-0,7	Alto	0,61-0,65	Mediano
0,7-0,9	Muito Alto	0,51-0,60	Tolerável
0,9-1,0	Quase Perfeito	0,41-0,50	Baixo
		<0,40	Muito Baixo

Fonte: \* Lêdo et al. (2012), \*\* Camargo e Sentelhas (1997).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de Hargreaves e Samani (1982) é considerado um dos modelos mais simples para estimativa da radiação solar, uma vez que depende apenas da amplitude térmica e do coeficiente Kr, contudo, os resultados da Tabela 2, indicam que sua utilização para a série de dados utilizada, apresenta um ajustamento no máximo tolerável, segundo a classificação do índice de confiança proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

**Tabela 2.** Valores de Média, Proporção aos Dados Reais (PDR), Desvio Padrão (DP), Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Concordância ou Acurácia (d), Índice de Confiança (c) e Classificação “c”, para o modelo de Hargreaves e Samani (1982), com coeficiente K oscilando de 0,12 a 0,19 (HS+ número decimal).

Dados	Média	PDR%	DP	$R^2$	r	d	c	Classificação “c”
Reais	15,12	100,00	3,38	----	----	----	----	----
HS120	13,42	88,76	3,37	0,53	0,72	0,76	0,55	Tolerável
HS125	13,98	92,46	3,51	0,53	0,72	0,79	0,57	Tolerável
HS130	14,54	96,16	3,65	0,53	0,72	0,81	0,58	Tolerável
HS135	15,10	99,87	3,79	0,53	0,72	0,82	0,59	Tolerável
HS140	15,66	103,57	3,93	0,53	0,72	0,82	0,59	Tolerável
HS145	16,22	107,28	4,07	0,53	0,72	0,81	0,59	Tolerável
HS150	16,78	110,98	4,21	0,53	0,72	0,80	0,58	Tolerável
HS155	17,34	114,68	4,35	0,53	0,72	0,78	0,57	Tolerável
HS160	17,90	118,39	4,49	0,53	0,72	0,76	0,55	Tolerável
HS165	18,45	122,02	4,63	0,53	0,72	0,74	0,54	Tolerável
HS170	19,01	127,73	4,77	0,53	0,72	0,71	0,52	Tolerável
HS175	19,57	129,43	4,91	0,53	0,72	0,69	0,50	Ruim
HS180	20,13	133,13	5,05	0,53	0,72	0,66	0,48	Ruim
HS185	20,69	136,84	5,19	0,53	0,72	0,63	0,46	Ruim
HS190	21,25	140,54	5,33	0,53	0,72	0,60	0,44	Ruim

Conforme observa-se na Tabela 1, os valores de r e  $R^2$  são iguais em todas as variações de Kr, visto que este é um coeficiente multiplicador, e, portanto, embora os valores mudam com sua alteração, mantém-se a proporcionalidade. Desta forma, segundo a classificação apresentada em Lêdo et al. (2012), os valores de r enquadram-se em muito

altos, porém, a classificação do índice de confiança enquadra-se como ruim e tolerável, sendo os melhores valores obtidos com a variação de Kr entre 0,135 e 0,145.

Estes valores encontram-se abaixo, porém próximos do Kr médio de São Paulo, de 0,147, obtido pelas médias dos Kr ajustados nas estações localizadas em São Paulo no estudo de Ramos, Vianna e Marin (2018), estando também abaixo ao Kr de 0,157 ajustado no mesmo estudo para a região sudeste do país. O índice de concordância encontra-se entre 0,60 a 0,82, sendo os maiores valores no intervalo de Kr de 0,13 a 0,15 (acima de 80), com maiores valores em 0,135 e 0,14, valores também onde a média dos valores estimados encontra-se mais próxima da média dos dados observados.

No estudo de Lêdo et al. (2012), estimando a radiação solar por meio da amplitude térmica, também utilizando a equação de Hargreaves e Samani (1982), com Kr de 0,16 e 0,166, na cidade de Barbalha-CE, encontrou valores de “r” de 0,56 (alto), porém com “c” de 0,34 e 0,36, respectivamente, ambos classificados como muito baixos.

Por outro lado, Paes et al. (2018), utilizando o modelo de Hargreaves e Samani (1982) em Botucatu-SP, encontrou valor de Kr ajustado para 0,17, obtendo valores de “r” entre 0,82 e 0,83 (muito alto), com valores de “d” entre 0,87 e 0,88, os autores não apresentam o valor de “c”, contudo, a partir de “r” e “d”, estima-se o “c” próximo de 0,7, enquadrado como bom.

Outro estudo conduzido por Mazzarella et al. (2019), para avaliar a estimativa de radiação solar no Rio de Janeiro, ajustou valores de Kr oscilando de 0,153 a 0,200, contudo, os valores de “c” encontrado foram superiores ao valor encontrado neste estudo, porém os autores consideram que o método não é satisfatório para as condições climáticas do local, sendo significativo em estações próximas de corpos d’água, e superestimando os valores de radiação em estações distantes destes.

Em nível nacional, Baratto et al. (2017), conduziu um estudo que apresentou valores de Kr oscilando de 0,1026 até 0,1719, demonstrando que os valores propostos inicialmente de 0,16 a 0,19, devem ser revistos em estudos locais, pois para muitas regiões brasileiras os valores de Kr mais adequados encontram-se abaixo de 0,16, por exemplo, para o estado de São Paulo os autores citam o Kr de 0,15 como mais homogêneo.

Portanto, a calibração local é um aspecto muito importante na realização de estudos climáticos, envolvendo a variável radiação e outros não avaliadas neste estudo, porém em determinadas situações o pesquisador pode não dispor de meios para realizar tal ajuste (dados de um longo período e afins), obrigando-lhe a utilizar parâmetros já analisados em outros estudos, nesse caso, por exemplo, ao comparar o valor de Kr de

outros estudos realizados em São Paulo, nota-se que eles encontram-se próximos a faixa obtida neste estudo, porém, sua confiabilidade para oscilar bastante entre regiões.

#### 4 CONCLUSÕES

Para a faixa de valores de  $K_r$  utilizada no modelo (0,12 a 0,19), constatou-se que os valores compreendidos entre 0,13 a 0,15 apresentaram maior balanceamento dos indicadores “r”, “d” e “c”, porém toda a faixa entre 0,12 a 0,17 foi classificada como tolerável segundo o índice “c”.

Portanto, destaca-se que o método é aplicável caso não se disponham de dados reais para a região, porém, está sujeito a fortes variações entre as observações estimadas e reais, apresentando quando em um grande volume de dados, média geral do modelo e das observações próximo. Contudo, como possível o uso de dados reais ou a calibração local do modelo ainda configuram as opções mais realistas e confiáveis.

#### 5 REFERÊNCIAS

BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.29, n.4, p.515-526, 2014.

BARATTO, R. L.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; JERSZURKI, D. Coeficiente de proporcionalidade  $K_{RS}$  da equação de Hargreaves e Samani para o Brasil. In: CONGRESSO ONLINE DE GESTÃO, EDUCAÇÃO E PROMOÇÃO DA SAÚDE, 14., 2017, Brasil. **Anais...**Brasil: CONVIBRA, 2017.p.1-13.

BERUSKI, G. C.; PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, p. 205-213, 2015.

BUHLER, O. D. **Manual de administração de agronegócios**. Paranavaí: UNESPAR, 2010. 234p.

CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Visão 2030: O futuro da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018. 212p.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, p. 225-230, 1982.

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. **Conexões Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v.6, n.1, p.15-26, 2012.

MAZZARELLA, D. S.; WANDERLEY, H. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; LYRA, G. B. Métodos baseados em temperatura do ar para estimativa de radiação solar incidente diária no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.06, p.2325-2338, 2019.

MONTEIRO, B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: O fator agrometeorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. 530p.

PAES, A. C.; SILVA, M. B. P.; GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M. Estimativa da irradiação solar global pelos modelos de Hargreaves-Samani e aprendizado de máquina SVM e ANN em Botucatu/SP/Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: CBENS, 2018. p.1-10.

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

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Piracicaba, v.56, n.2, p.195-212, 2018.

SCARPARE, F. V.; LIER, Q. J. V.; CORRÊA, S. T. R. et al. Modelos de crescimento da cana-de-açúcar e sua parametrização – Revisão. **Revista de Agricultura**, v.87, n.1, p.66-80, 2012.

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

URIBE, R. A. M.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. et al. Estimativa do acúmulo de fitomassa da soqueira de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N-fertilizante utilizando modelo de simulação. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p.126-139, 2016.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.90, p.8995-9005, 1985.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. José Carlos Toledo Veniziani Junior professor da Fatec de Jahu, por disponibilizar os dados climáticos da estação meteorológica.