

MÓDULO COMPUTACIONAL PARA DISPONIBILIZAÇÃO DO COEFICIENTE k_{RS} DE HARGREAVES E SAMANI DE LOCALIDADES BRASILEIRAS E CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

SOUZA, J. L. M.¹; KIMURA, B. H.²; UHLIK, C. F.²; MAZIERO, R. O.²; MORETTI, M. S.³

¹Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ²Graduação em Agronomia, UFPR; ³Graduação em Engenharia Ambiental, UFTPR.

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo levantar, organizar e caracterizar os coeficientes k_{RS} da equação de Hargreaves e Samani, e constituir um módulo computacional em planilha eletrônica para disponibilização dos k_{RS} de localidades brasileiras e cálculo da radiação solar incidente (R_s). O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas/DSEA/UFPR, e estruturado nas etapas: Organização dos coeficientes; Análise da grandeza dos coeficientes; e, Constituição e teste do módulo computacional para disponibilização dos valores de k_{RS} e cálculo da radiação solar incidente. Os k_{RS} do modelo de Hargreaves e Samani, utilizados para a realização do módulo computacional contendo as principais localidades brasileiras, foram obtidos de um estudo anterior, que considerou séries de dados de 356 estações meteorológicas convencionais, distribuídas por todo o território nacional. A série de dados compreendeu o período entre os anos de 2006 e 2013. No estudo foram necessários dados diários medidos de radiação solar incidente (R_s) e temperaturas máxima ($T_{máx}$) e mínima ($T_{mín}$) do ar. O módulo computacional para a disponibilização dos k_{RS} e cálculo da R_s foi desenvolvido em planilha eletrônica, com auxílio da linguagem *Visual Basic for Application*. Das atividades desenvolvidas, verificou-se que regiões tropicais e subtropicais (como no Brasil) tem maior variação do k_{RS} em relação aos valores recomendados na literatura. O semi-árido do Nordeste e a costa Sul do Brasil tem os maiores e menos k_{RS} , respectivamente, no Brasil. Os k_{RS} médios no Brasil ficam em torno de 0,155 e 0,17 ao longo das estações do ano. Junho e julho têm os maiores k_{RS} ($\cong 0,17$) e janeiro e dezembro os menores ($\cong 0,15$), com variação gradual do seu valor ao longo do ano. Os climas *Af*, *As* e *BSh* tem os maiores valores médios de k_{RS} ($\cong 0,17$), enquanto *Cfa*, *Cfb*, *Cwa*, *Cwb*, *Am* e *Aw* os valores mais baixos ($\cong 0,16$). O módulo computacional automático mostrou-se muito simples e funcional, sendo uma ferramenta útil para pesquisadores e técnicos da área de engenharia de água e solo, disponibilizando os valores de k_{RS} mensal, estacional e anual, e realizando o cálculo da R_s .

Palavras-chave: Radiação de onda curta; radiação global; modelo matemático; programa; estimativa.

INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente (R_s) ou global (Q_g) é uma das componentes do balanço de radiação solar, e consiste na quantidade de energia solar em onda curta que atinge à superfície terrestre em determinado instante e local. A R_s afeta a temperatura do ar, evaporação da água do solo e transpiração das plantas (Kratzenberg et al., 2003), sendo muito utilizada para: estimar a evapotranspiração das culturas e crescimento de plantas (Almorox, 2004); avaliar o processo fotossintético dos vegetais (Wart et al., 2013); dimensionar sistemas para produção de energia solar; modelos de simulação para estudos nas áreas de agricultura, ambiente, recursos hídricos, meteorologia e ecologia (Hunt, 1998).

A R_s pode ser medida com instrumentos como radiômetros, actinógrafos bimetálicos e piranômetros, geralmente instalados em estações meteorológicas (Dornelas et al., 2006). Apesar da sua importância, a R_s não é medida na maioria das estações meteorológicas, devido aos custos e necessidade de manutenção e calibração dos instrumentos necessários. Por outro lado, mesmo nas estações em que a R_s é medida, é comum à ocorrência de muitos dados diários faltantes ou inconsistentes nas séries de dados, devido às falhas ou problemas no funcionamento dos equipamentos (Hunt et al., 1998; Abraha e Savage, 2008). Neste contexto, muitos estudos científicos tem sido realizados visando o desenvolvimento de métodos que estimam a R_s (Liu et al., 2009), baseando-se em variáveis climáticas obtidas mais facilmente nas estações meteorológicas. Desta forma, a R_s frequentemente pode ser estimada com relações empíricas, que necessitam como entrada variáveis meteorológicas facilmente disponíveis (Angström, 1924; Prescott, 1940; Hargreaves, 1981; Bristow e Campbell, 1984), interpolação linear (Hay e Suckling, 1979; Rivington et al., 2006), dados de satélite geoestacionário (Pinker et al., 1995) e/ou redes neurais artificiais (Lam et al., 2008).

Hargreaves e Samani (1982) desenvolveram um modelo empírico baseada na amplitude térmica ($T_{máx} - T_{mín}$), radiação solar no topo da atmosfera (R_a) e do coeficiente de proporcionalidade k_{R_s} , para estimar a radiação solar incidente (R_s). Como necessita como entrada apenas dos dados de temperatura máxima e mínima diária do ar, o modelo de Hargreaves e Samani (1982) consiste em excelente alternativa para estimar a R_s . Allen (1997) e Allen et al. (1998) recomendaram valores de $k_{R_s} = 0,16$ para regiões não-litorâneas, em que massas de terra são dominantes e as massas de ar não são fortemente influenciadas por grandes corpos da água, e $k_{R_s} = 0,19$ para regiões costeiras. Os valores são os mesmos propostos por Hargreaves (1994).

No entanto, existe certa incerteza quanto à magnitude do k_{R_s} e sua variabilidade ao longo do ano (Samani, 2004). Souza et al. (2016) e Baratto et al. (2017) verificaram variabilidade dos k_{R_s} para o período mensal, estacional e anual. Souza et al. (2016) obteve valores de k_{R_s} para um *grid* de 276 pontos (malha 0,25 por 0,25 graus) para o Estado do Paraná. Baratto et al. (2017) analisaram dados de 356 estações meteorológicas convencionais, distribuídas por todo o território nacional.

Os trabalhos de Souza et al. (2016) e Baratto et al. (2017) são interessantes, e os valores de k_{R_s} obtidos possibilitam a estimativa da R_s de forma alternativa para todo o Brasil. No entanto, devido à quantidade de resultados das análises, os valores de k_{R_s} apresentados pelos autores foram disponibilizados na forma de mapas especializados, limitando a obtenção do valor específico (original) de cada local ou ponto analisado. Logo, acredita-se que a constituição de um módulo computacional contendo os k_{R_s} resultante destas pesquisas seria

uma excelente ferramenta e forma de disponibilização de dados, auxiliando pesquisadores e técnicos da área de engenharia de água e solo, que necessitam realizar a estimativa da R_s de forma mais precisa.

Diante do contexto apresentado, evidenciando a importância e aplicabilidade da R_s para diversas finalidades, bem como a existência de estudos que já obtiveram coeficientes de equações empíricas para estimar a R_s , teve-se por objetivo no presente estudo: levantar, organizar e caracterizar os coeficientes k_{RS} da equação de Hargreaves e Samani, e constituir um módulo computacional em planilha eletrônica para disponibilização dos k_{RS} de localidades brasileiras e cálculo da radiação solar incidente (R_s).

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas, do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Paraná. As atividades foram realizadas nas seguintes etapas:

i) Obtenção dos coeficientes k_{RS} do modelo de Hargreaves e Samani:

O k_{RS} do modelo de Hargreaves e Samani (1982) das principais localidades brasileiras, utilizados para a realização do módulo computacional, foram obtidos do estudo realizado por Baratto et al. (2017). Nas análises foram consideradas séries de dados de 356 estações meteorológicas convencionais, distribuídas por todo o território nacional (Figura 1), sendo: 65 estações localizadas na região Sul; 98 no Sudeste; 67 no Centro-Oeste; 91 no Nordeste; e, 35 no Norte. A série de dados compreendeu o período entre 2006 e 2013. Foram necessários dados diários medidos de radiação solar incidente (R_s) e temperaturas máxima ($T_{máx}$) e mínima ($T_{mín}$) do ar.

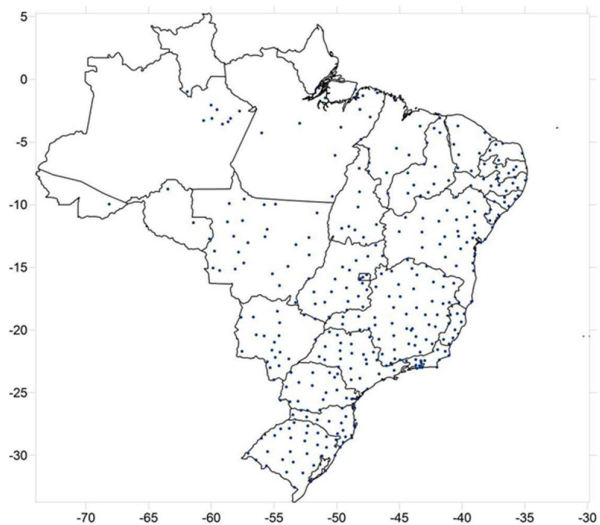


Figura 1. Mapa contendo a distribuição espacial das estações meteorológicas no território brasileiro, utilizadas para a realização do trabalho.

O cálculo dos valores diários do coeficiente de proporcionalidade k_{RS} da equação de Hargreaves e Samani (1982) foi realizado invertendo-se a equação original (Baratto, 2016; Equação 1):

$$Rs = k_{RS} \cdot Ra \cdot \sqrt{T_{máx} - T_{mín}} \quad (1)$$
$$k_{RS} = \frac{Rs}{Ra \cdot \sqrt{T_{máx} - T_{mín}}}$$

Sendo: R_s – radiação solar incidente ou global, estimada com a equação de Hargreaves e Samani (1982) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); k_{RS} – coeficiente de proporcionalidade ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$); R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $T_{mín}$ e $T_{máx}$ – temperaturas mínima e máxima diárias do ar ($^{\circ}\text{C}$).

ii) Organização dos coeficientes k_{RS}

Cada estação teve número específico de dias amostrados e analisados. Devido às falhas nas séries de dados das estações, consequência do das medições e eventualidades, cada ponto analisado apresentou entre 1823 a 2785 dados diários. Os dias que apresentaram falhas foram desconsiderados, sendo retirados da série de valores diários de k_{RS} .

iii) Análise da grandeza dos coeficientes de proporcionalidade k_{RS}

Os dados levantados foram tabulados em planilha eletrônica, sendo armazenadas as informações: Estado; cidade; estação meteorológica/local; coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude); clima; e, valor dos coeficientes de proporcionalidade k_{RS} ajustados para o período mensal, estacional e anual. Os coeficientes de proporcionalidade k_{RS} de Hargreaves e Samani do estudo de Baratto et al. (2017) foram analisados, identificando-se os percentuais das localidades analisadas nas regiões brasileiras, bem como as medidas de tendência e dispersão dos k_{RS} dos períodos mensal, estacional e anual dos tipos climáticos brasileiros.

iv) Realização do módulo computacional

Após a organização dos dados das principais locais/regiões brasileiras, o módulo computacional para a disponibilização dos k_{RS} e cálculo da R_s foi desenvolvido em planilha eletrônica, com auxílio da linguagem *Visual Basic for Application (VBA-Macro)*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os k_{RS} ao longo do território brasileiro apresentaram coeficiente de variação muito pequeno ($CV < 16\%$), indicando que seus valores estão muito próximos da média. As médias dos k_{RS} em períodos anuais foram interpoladas e mapeadas para o território nacional, possibilitam a visualização por cores da magnitude de seus valores (Figura 2). De forma geral, os k_{RS} foram maiores nas regiões litorâneas, decrescendo nas regiões do interior do país.

O k_{RS} depende de mais variáveis além das descritas por Allen et al. (1998) e Samani (2004). Em regiões temperadas a variação do k_{RS} é pequena, mas em regiões tropicais e subtropicais (como no Brasil), o k_{RS} teve maior divergências ou variação em relação aos valores recomendados na literatura (Figura 2). Nas regiões costeiras, em que Allen et al. (1998) recomendam $k_{RS} = 0,19$, houve discrepâncias. No Nordeste foram registrados k_{RS} de até 0,28, enquanto que na região litorânea de Santa Catarina até Rio de Janeiro foram encontrados $k_{RS} \cong 0,15$.

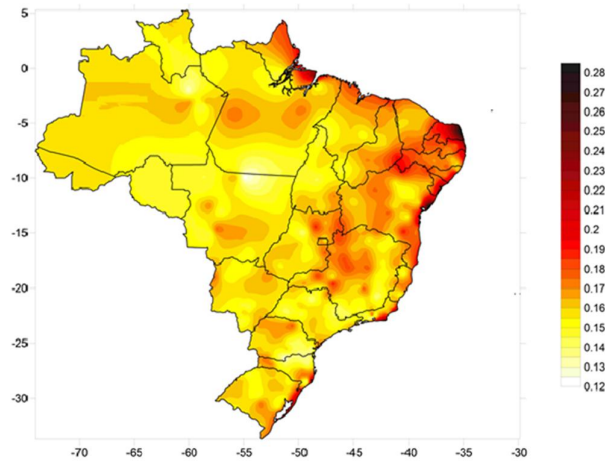


Figura 2. Espacialização dos valores médios de k_{RS} nas localidades brasileiras, considerando a periodicidade anual. (Fonte: Baratto, 2016; Baratto et al., 2017)

O valor máximo de R_s ocorreu na região do semi-árido do Nordeste. A localidade apresenta baixa precipitação anual e a menor nebulosidade do Brasil, resultando em grande amplitude térmica e, conseqüentemente, altos valores de k_{RS} . Por outro lado, o valor mínimo de R_s ocorreu na costa Sul do Brasil, região com alta precipitação e alta nebulosidade, especialmente no inverno, associados ao anticiclone polar Antártico. Ambas as regiões apresentaram coeficiente de proporcionalidade k_{RS} diferentes da recomendação de Allen et al. (1998).

Como temperatura e nebulosidade afetam o k_{RS} , realizou-se a análise de sua variação conforme as estações do ano (Figura 3). Na primavera, regiões interiores e costeiras apresentaram, respectivamente, k_{RS} de 0,15 e 0,19, concordando com as recomendações de Allen et al. (1998). Na região Norte, obteve-se valores de k_{RS} próximos a 0,15 nas estações de Verão e Primavera, e maiores nas estações de Outono e Inverno. No verão, o aumento de nebulosidade e precipitação justificam os valores de k_{RS} reduzidos, visto que são medidas inversamente proporcionais. Em contrapartida, durante o inverno, quando há baixa nebulosidade e precipitação, os k_{RS} tendem a aumentar.

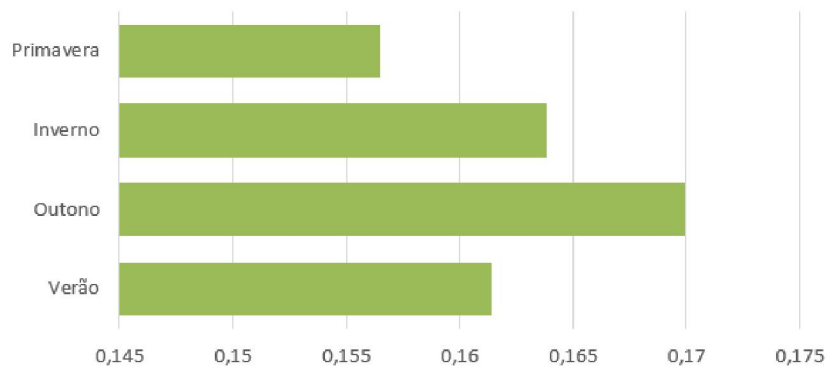


Figura 3. Média do coeficiente de proporcionalidade k_{RS} nas estações do ano, verificada para as localidades brasileiras analisadas.

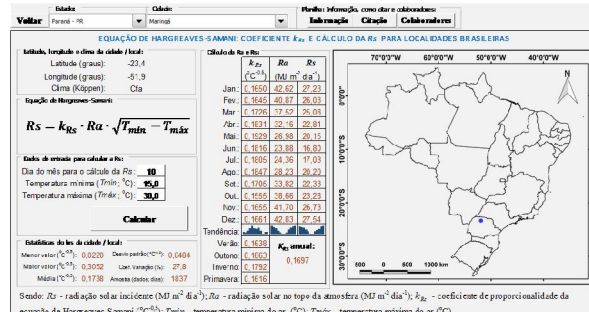
As variações de temperatura e nebulosidade que afetam o k_{RS} estacional se refletiram no k_{RS} mensal. Junho e julho apresentaram os maiores valores de k_{RS} , que fica em torno de 0,17. Nos meses de janeiro e dezembro ocorreram incidências de valores menores que 0,15. Observa-se também que o coeficiente possui variação gradual ao longo do ano.

Analisando a variável climática, observou-se que os climas *Af*, *As* e *BSh* apresentaram os maiores valores de k_{RS} (em torno de 0,17). Os climas *Cfa*, *Cfb*, *Cwa*, *Cwb*, *Am* e *Aw* apresentaram valores médios de 0,16. Como há pouca variação do coeficiente em relação ao clima, é incorreto utilizar o clima local como parâmetro para estimar a k_{RS} . Há outros fatores que podem afetar o k_{RS} , como a maritimidade e a continentalidade.

O módulo automático desenvolvido foi denominado “Plataforma Moretti: Módulo coeficiente k_{RS} de Hargreaves e Samini de localidades brasileiras e cálculo da radiação solar incidente” (Figura 4a). No Módulo para o cálculo da R_s (Figura 4b), o usuário seleciona o Estado e cidade que serão analisados. O formulário tem como entrada o dia que se deseja calcular a R_s e as temperaturas mínima (T_{min}) e máxima (T_{max}). Como saída, o formulário apresenta os seguintes dados da localidade escolhida: coordenadas geográficas (longitude e latitude); clima (conforme classificação climática de Köppen); coeficientes k_{RS} médios da equação de Hargreaves e Samini para os períodos mensal, estacional e anual; e, valores de R_a e R_s calculados para os períodos mensal, estacional e anual. Na Figura 4b verifica-se que foi selecionada a cidade de Maringá, localizada no Estado do Paraná, tendo como entrada o dia 10, $T_{min} = 15$ °C e $T_{max} = 30$ °C. Com as opções de entrada escolhidas obteve-se as R_a e R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) na periodicidade mensal, estacional e anual para Maringá-PR.



(a)



(b)

Figura 4. Módulo “Coeficiente k_{RS} de Hargreaves e Samini de localidades brasileiras e cálculo da radiação solar incidente”, desenvolvido em planilha eletrônica: a) Interface da abertura do Módulo; e, b) Formulário com a disponibilização dos k_{RS} para o período mensal, estacional e anual, e cálculo da radiação solar incidente (R_s).

Caso seja selecionado um Estado em que não há coeficientes k_{RS} da equação de Hargreaves e Samini, o Módulo informa a mensagem: “O Estado escolhido não tem valores de k_{RS} , por falta de série de dados climáticos para fazer seu ajuste”. Entrando-se com valores de T_{min} e T_{max} contendo amplitude que proporcione valores estimados de R_s superiores à R_a , o Módulo informa a mensagem: “O valor da radiação solar incidente (R_s) não pode ser maior que o valor da radiação solar no topo da atmosfera (R_a). Verifique se está correta a amplitude entre os valores de temperatura fornecidos como entrada”.

CONCLUSÕES

Nas regiões temperadas a variação do k_{RS} é pequena, mas em regiões tropicais e subtropicais (como no Brasil) o k_{RS} tem maior variação em relação aos valores recomendados na literatura.

Os maiores k_{RS} ocorreram no semi-árido do Nordeste, e os menos na costa Sul do Brasil. Os k_{RS} médios no Brasil ficam em torno de 0,155 e 0,17 ao longo das estações do ano. Variações de temperatura e nebulosidade que afetam o k_{RS} estacional refletiram no k_{RS} mensal. Junho e julho têm os maiores k_{RS} ($\cong 0,17$) e janeiro e dezembro os menores ($\cong 0,15$), ocorrendo variação gradual do coeficiente ao longo do ano. Os climas *Af*, *As* e *BSh* apresentaram os maiores valores médios de k_{RS} ($\cong 0,17$), e os climas *Cfa*, *Cfb*, *Cwa*, *Cwb*, *Am* e *Aw* os valores mais baixos ($\cong 0,16$).

O Módulo computacional desenvolvido mostrou-se muito simples e funcional, disponibilizando os valores de k_{RS} mensal, estacional e anual das 356 localidades brasileiras levantadas, e possibilitando o cálculo da *Ra* e *Rs* com muita rapidez.

LITERATURA CITADA

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

ALLEN, R. G. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrologic Engineering, Logan**, v.2, n.2, p.56-67, 1997.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements – FAO**. Irrigation and drainage, paper 56. Rome, 1998.

ALMOROX, J.; HONTORIA C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**, v.45, p.1529-1535, 2004.

ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.50, p.121-126, 1924.

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. **Anais. CONVIBRA**, 2017. 13p. (Evento Online: www.convibra.org).

BARATTO, R. L. Coeficiente de proporcionalidade k_{RS} da equação de Hargreaves e Samani para o Brasil. Curitiba, 2016. 72p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v.31, p.159-166, 1984.

DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström- Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1213-1219, 2006.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.120, n.6, p.1132–1139, 1994.

HARGREAVES, G. H. Responding to tropical climates. **In: The 1980-81 Food and Climate Review, The Food and Climate Forum**, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, p.29-32, 1981.

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

HAY, J. E.; SUCKLING, P. W. An assessment of the networks for measuring and modelling solar radiation in British Columbia and adjacent areas of western Canada. **Canadian Geography**, v.23, p.222-238, 1979.

HUNT, L.A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, n.3-4, p.293-300, 1998.

KRATZENBERG, M. G.; COLLE, S.; PEREIRA, E. B.; MANTELLI NETO, S. L.; BEYER, H. G.; ABREU, S. L. Rastreabilidade de radiômetros para medição da energia solar no Brasil. **In: METROLOGIA PARA A VIDA, 2003, Recife. Anais. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2003.**

LAM, J. C.; WAN, K. K. W.; YANG, L. Solar radiation modeling using ANNs for different climates in China. **Energy Conversion and Management**. v.49, n.5, p.1080-1090, 2008.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; WANG, Q.; JENSEN, R. J.; ZHAN, G, Y.; PORTER, J. R. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest equations for California. Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, n.1, p.73-84, 2009.

PINKER, R. T.; FROUIN, R.; LI, Z. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.108-124, 1995.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v.64, p.114-118, 1940.

RIVINGTON, M.; MATTHEWS, K. B.; BELLOCCHI, G.; BUCHAN, K. Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data. **Agricultural Systems**, v.88, p.451-471, 2006.

SAMANI, Z. Discussion of “History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.129, n.1, p. 53–63, 2004.

SOUZA, J. L. M.; ERTAL, M.; BARATTO, R. L.; XAVIER, A. C.; JERSZURKI, D.; GURSKI, B. C. Coeficiente de proporcionalidade k_{RS} da equação de Hargreaves e Samani para o estado do Paraná. **Anais. CONVIBRA, 2016. 8p. (Evento Online: www.convibra.org).**

WART, V. J.; KERSEBAUM, C. K.; PENG, S.; MILNER, M., CASSMAN, G. K. Estimating crop yield potential at regional to national scales. **Field Crops Research**, v.143, p.34-43, 2013.