

COEFICIENTE DE PROPORCIONALIDADE K_{rs} DA EQUAÇÃO DE HARGREAVES E SAMANI PARA O ESTADO DO PARANÁ

SOUZA J.L.M.¹; ERTAL M.²; BARATTO R.L.²; XAVIER A.C.³; JERSZURKI D.⁴; GURSKI B.C.⁴

¹Professor, UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ²Graduação Agronomia, UFPR; ³Professor, UFES; ⁴Doutorado em Ciência do Solo, UFPR

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho estimar os valores do coeficiente de proporcionalidade K_{rs} da equação de Hargreaves e Samani, para os períodos mensal, sazonal e anual, para todo o Estado do Paraná, considerando dados interpolados formando malha 0,25 por 0,25 graus. Os dados climáticos necessários para a realização das análises foram obtidos de estações meteorológicas. A série de dados analisados compreende o período entre 1980 e 2013. A estimativa do coeficiente empírico de proporcionalidade K_{rs} foi realizado conforme a equação de Hargreaves e Samani. Foram utilizados dados de 276 pontos espacializados no Estado do Paraná, que foram analisados com uma planilha eletrônica, especialmente desenvolvida para essa finalidade, gerando valores médios de K_{rs} para o Estado do Paraná. Foram obtidos valores médios mensais, estacionais e anuais para os 276 pontos. A partir dos valores calculados foram gerados mapas com o programa de geoprocessamento *Surfer*, utilizando o método de interpolação *krigagem*, para períodos mensais, estacionais e anuais. Os dados e mapas de K_{rs} (anual, mensal e estacional) foram analisados e comparados com os fatores que influenciam o K_{rs} e dados obtidos por outros autores. Nas análises realizadas verificou-se que o coeficiente de proporcionalidade K_{rs} variou ao longo do Estado do Paraná. Os menores valores ocorreram nas regiões litorâneas e os maiores valores ocorreram com o aumento da longitude e redução da latitude. O K_{rs} também variou conforme os meses e estações do ano. As variações ao longo do Estado do Paraná foram pequenas, mas afetam os valores de radiação solar incidente (R_s) e foram importantes para estabelecer valores de referência para cálculo da R_s .

Palavras-chave: radiação solar incidente, estimativa, amplitude térmica, coeficiente de proporcionalidade

INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente (R_s) que chega à superfície terrestre é a fonte de energia utilizada para os processos químicos, biológicos e físicos, como a utilizada na fotossíntese pelas plantas, em placas solares para produção de energia e o descongelamento de calotas polares. Poucas estações realizam o seu registro diário na superfície terrestre.

No Estado do Paraná, os valores de R_s são medidos comumente apenas nas estações automáticas, por meio de equipamentos que necessitam de boa manutenção e calibração, o que nem sempre ocorre. Valores confiáveis de R_s são fundamentais nas estimativas da evapotranspiração de referência (E_{To}), pelo método de Penman-Monteith, e em estudos ambientais e agrícolas. Assim, muitos métodos de estimativa da R_s têm sido propostos, utilizando variáveis mais facilmente disponíveis nas estações meteorológicas, como insolação (somente medida nas estações convencionais) e temperatura máxima, mínima e média do ar.

Visando simplificar os cálculos para estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}), Hargreaves e Samani (1982) desenvolveram um método simples para estimar a radiação solar incidente, utilizando apenas a radiação solar no topo da atmosfera (R_a) e a amplitude térmica do período. Assim, para utilizar a equação é necessária a obtenção de um coeficiente de proporcionalidade empírico, denominado K_{rs} . O problema é que os valores de K_{rs} variam, principalmente em regiões costeiras e no interior do estado, devido às massas de terra que dominam a região (ALLEN, 1997).

Logo, apesar da simplicidade do método de Hargreaves e Samani (1982), para obter melhores estimativas da R_s e ser melhor difundido nas atividades científicas e técnicas é imprescindível que os coeficientes de proporcionalidade K_{rs} sejam obtidos considerando séries de dados climáticos longas e consistentes, para várias regiões e períodos do ano.

Diante do exposto, teve-se por objetivo no presente trabalho estimar os valores do coeficiente de proporcionalidade K_{rs} da equação de Hargreaves e Samani, para os períodos mensal, sazonal e anual, para o Estado do Paraná, considerando dados interpolados em uma malha 0,25 por 0,25 graus.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado para o Estado do Paraná, que se encontra dividido em 10 mesorregiões geográficas: Metropolitana, Centro-oriental, Sudeste, Norte pioneiro, Norte central, Noroeste, Centro-ocidental, Centro-sul, Sudoeste e Oeste (IPARDES, 2010). O clima do Estado do Paraná encontra-se dividido em duas grandes classes, conforme classificação de Köppen, sendo:

- Clima Cfa: Clima subtropical, tendo temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida; e,
- Clima Cfb: Clima temperado propriamente dito, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.

As estimativas do coeficiente de proporcionalidade K_{rs} foram obtidas com a equação de Hargreaves e Samani (1982).

$$Rs = Krs \cdot Ra \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}}$$

Sendo Rs – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); Krs – coeficiente de proporcionalidade ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$); $T_{\max}$ – temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\min}$ – temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); Ra – radiação solar incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Foram utilizados dados de estações meteorológicas automáticas e convencionais. A partir dos dados obtidos nas estações, realizou-se interpolação e espacialização dos mesmos, originando-se malha de 276 pontos (malha 0,25 por 0,25 graus) no Estado do Paraná (FIGURA 1).

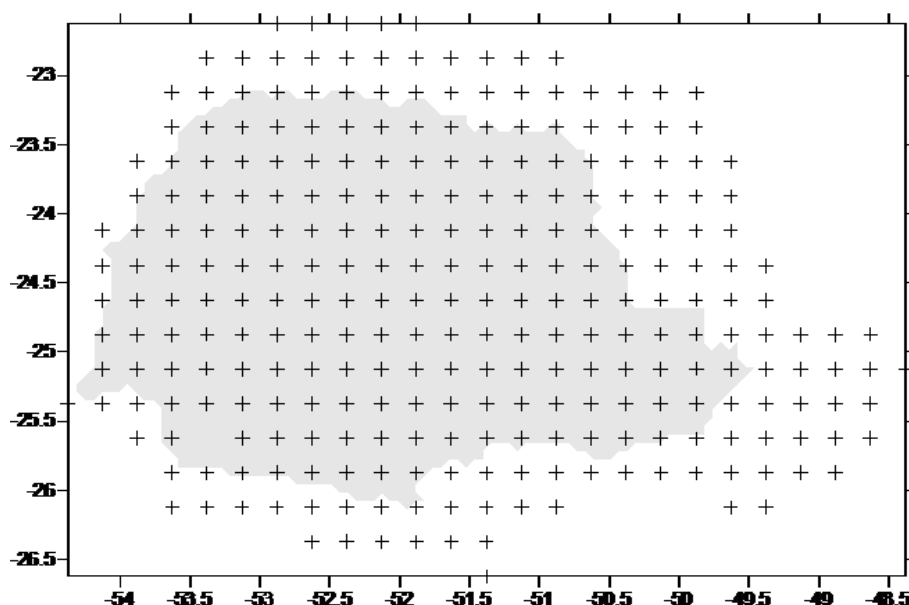


FIGURA 1 – Mapa de espacialização no Estado do Paraná dos pontos interpolados, desenvolvido para gerar os dados de temperatura máxima, mínima e latitude.

Os valores de Krs foram obtidos a partir da média da série de 35 anos de dados que foram calculados. Foram utilizados um total de 3.256.900 dados. Assim, foram gerados para os 276 pontos do Estado do Paraná, valores de Krs mensal, estacional e anual.

Em seguida, os valores de Krs foram interpolados gerando-se mapas para períodos mensal (janeiro; fevereiro; março; abril; maio; junho; julho; agosto; setembro; outubro; novembro; dezembro), estacional (verão; outono; inverno; primavera) e anual, para o Estado do Paraná.

No processamento dos dados, foi utilizado o método de interpolação por *Krigagem* na geração dos mapas, por meio do programa *Surfer 7.0*. Foram geradas curvas de níveis, colocadas na escala de 0,05 de Krs entre cores, e entre os valores de 0,13 à 0,18 de Krs , englobando todos os valores obtidos para o Estado do Paraná.

Os dados e mapas de Krs (anual, mensal e estacional) foram analisados e comparados com os fatores que influenciaram o Krs e dados obtidos por outros autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas de tendência e dispersão dos valores médios de *Krs* para período mensal, estacional e anual (média de todos os dias e anos dos 276 pontos), obtidos com a equação de Hargreaves e Samani (1982), para todo o Estado do Paraná, encontram-se apresentados e resumidas na TABELA 1.

TABELA 1. Medidas de tendência e dispersão dos valores mensais, estacionais e anuais de coeficiente de proporcionalidade *Krs*, estimados com a equação de Hargreaves e Samani (1982), para 276 pontos espacializados no Estado do Paraná.

Período	----- Valores de <i>Krs</i> (adimensional) -----				
	Média	Maior valor	Menor Valor	Desvio padrão	Coeficiente de Variação (%)
Janeiro	0,152	0,161	0,141	0,006	4,0
Fevereiro	0,153	0,163	0,142	0,006	3,7
Março	0,158	0,170	0,146	0,006	4,0
Abril	0,160	0,175	0,147	0,007	4,4
Maio	0,159	0,174	0,146	0,007	4,2
Junho	0,156	0,173	0,140	0,008	4,8
Julho	0,156	0,173	0,141	0,007	4,5
Agosto	0,151	0,164	0,138	0,006	3,7
Setembro	0,141	0,152	0,129	0,005	3,6
Outubro	0,143	0,153	0,132	0,006	3,9
Novembro	0,151	0,161	0,139	0,006	4,0
Dezembro	0,150	0,160	0,137	0,007	4,4
Verão	0,153	0,163	0,142	0,006	3,9
Outono	0,159	0,174	0,145	0,007	4,4
Inverno	0,151	0,165	0,137	0,006	4,0
Primavera	0,147	0,157	0,136	0,006	4,0
Anual	0,152	0,165	0,140	0,006	4,0

O menor dos menores valores médios anual de *Krs* ocorreu no mês de setembro (0,129), bem como o maior dos maiores valores médios anual de *Krs* ocorreu em abril (0,175) (TABELA 1). Com os dois valores extremos, verificou-se que amplitude foi pequena. No entanto, não se pode esquecer que pequenas variações no coeficiente de proporcionalidade *Krs* podem representar grandes alterações nos valores de radiação incidente (*Rs*) estimados. Dessa forma, uma variação do valor de *Krs* de 0,13 para 0,18 pode aumentar os valores da radiação solar incidente de 14 para 19 MJ.m⁻².dia⁻¹.

Um aspecto muito positivo nas estimativas do *Krs* foi verificar que os coeficientes de variação (CV) encontrados foram muito baixos, inferiores a 4,8% (TABELA 1). Logo, as

variações verificadas nos valores de *Krs* ficaram muito próximas da média, o que permite a sua utilização com mais segurança.

A espacialização e interpolação dos valores médios anuais de *Krs* no Estado do Paraná possibilitou verificar que os valores cresceram da região litorânea (0,13) para o interior do Estado (0,165), ou seja, aumentaram no sentido leste para oeste. As regiões com maior latitude no Estado também apresentaram maiores valores de *Krs* (0,16 a 0,18). Logo, os resultados obtidos no presente trabalho são interessantes, pois não concordam com as considerações realizadas por Allen et al. (1998). Os autores comentam que em localidades do interior, onde dominam as grandes extensões de terra e as massas de ar não são tão fortemente influenciadas por um grande corpo de água, o valor do *Krs* recomendado é 0,16. Para localidades costeiras, onde as massas de ar estão influenciadas por uma massa de água nas proximidades, o *Krs* recomendado é 0,19. Os resultados obtidos no presente trabalho indicam o oposto, sendo os valores de *Krs* menores próximos da região litorânea (0,13 a 0,145), intermediários na região central do Estado (0,145 a 0,16) e maiores na porção oeste e norte (0,16 a 0,18) (FIGURA 2). Dessa forma, acredita-se que os valores de *Krs* podem estar sujeitos a outros fatores, além dos considerados por Allen et al. (1998). Samani (2004) e Todorovic et al. (2013) levantaram incertezas quanto ao valor de *Krs* a ser adotado, considerando que em climas temperados a variação do *Krs* é mínima, mas para locais onde o clima é tropical e subtropical podem ocorrer grandes variações.

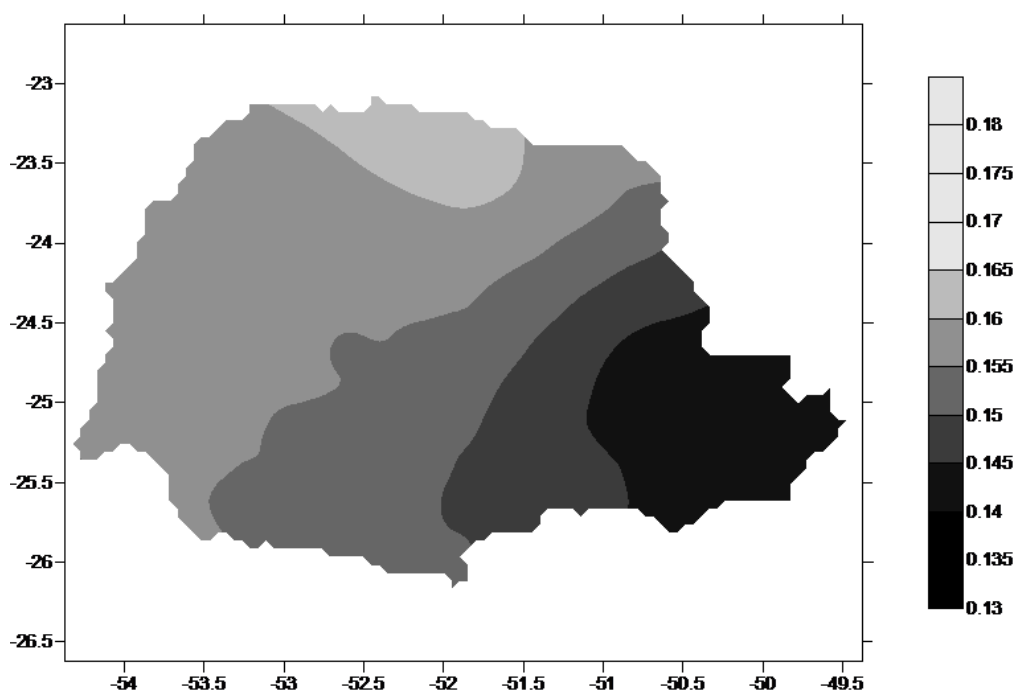


FIGURA 2 – Valores médios estimados do coeficiente de proporcionalidade *Krs* de Hargreaves e Samani (1982) para o Estado do Paraná, considerando todo o Ano.

Os valores de *Krs* podem variar bastante ao longo das estações do ano (FIGURA 3), o que torna interessante a sua caracterização. Basicamente, as distribuições dos valores médios de *Krs* no Estado do Paraná ficaram muito parecidas para as estações do verão e inverno. O

outono foi o período em que os valores médios de *Krs* ficaram predominantemente maiores que 0,15 na maior parte do Estado, com exceção de uma faixa que se encontra próximo do litoral e Região Metropolitana de Curitiba. Por sua vez, a primavera foi o período em que os valores médios de *Krs* ficaram predominantemente menores que 0,16 na maior parte territorial do Estado, com exceção de uma pequena área localizada no extremo norte do Estado.

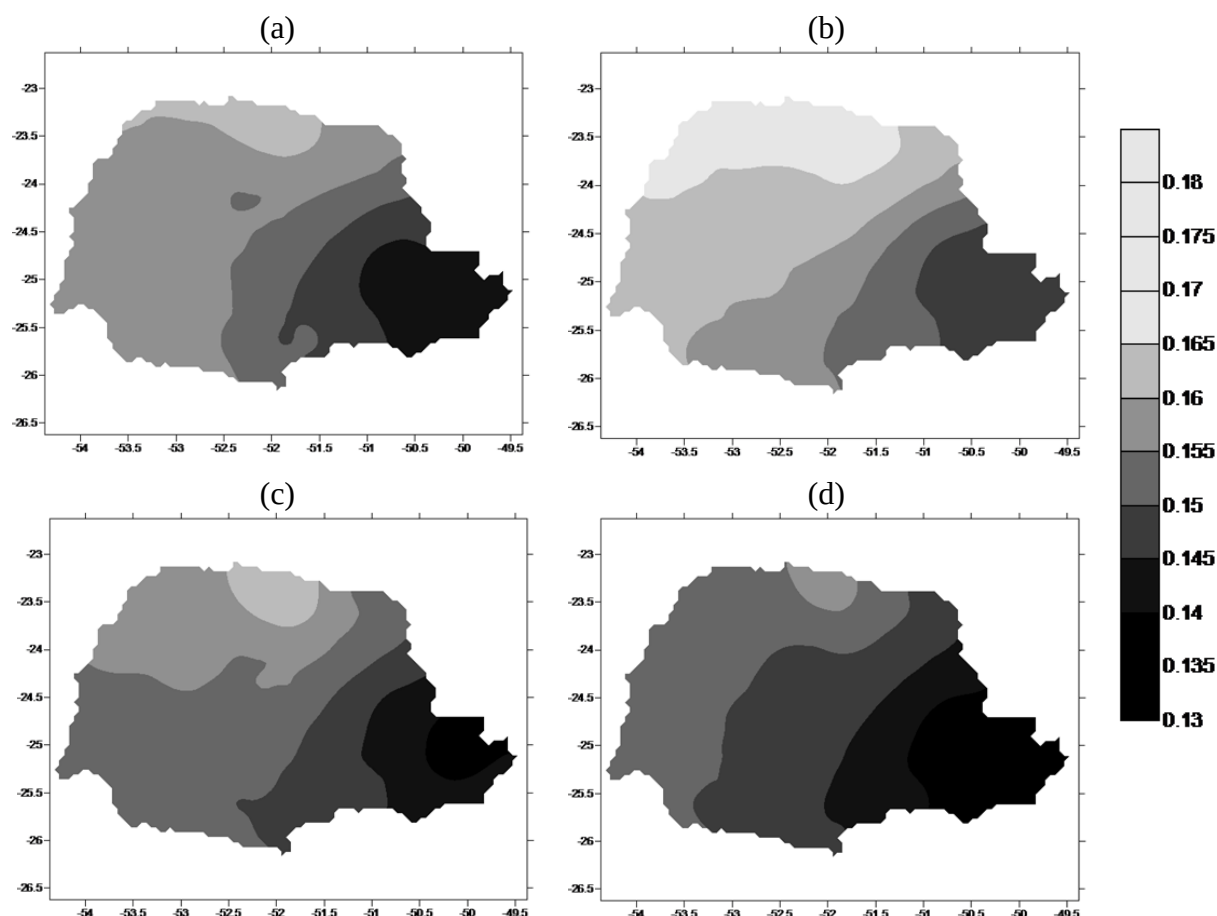


FIGURA 3 – Valores médios estimados do coeficiente de proporcionalidade *Krs* de Hargreaves e Samani (1982) para o Estado do Paraná, nas estações do Verão (a), Outono (b), Inverno (c) e Primavera (d).

As variações no clima tiveram influência decisiva nos resultados sazonais obtidos. A amplitude térmica está relacionada com os valores de *Krs* obtidos ao longo do ano e sua variação no Estado. Segundo Grimm (2009) a amplitude térmica anual é influenciada pelas correntes marítimas quentes, aumentando a umidade relativa do ar, diminuindo a amplitude térmica. Silva et al. (2015) verificou variações da amplitude térmica no Estado do Paraná, sendo que uma estação localizada no Sul do Estado apresentou oscilações de temperatura entre 4,7 °C a 19,4 °C em julho, e entre 13,7 °C a 26,8 °C em janeiro. Em outra localizada no Noroeste do Estado, as temperaturas variaram entre 13,9 °C e 24,8°C, em julho, e entre 21,1 °C e 31,1 °C, em janeiro.

Seguindo a tendência apresentada para as estações do ano, e suas influências climáticas e de sazonalidade, os valores de *Krs* médio mensal também apresentaram variação ao longo do ano. Verificou-se ao longo dos meses que os valores de *Krs* variaram de 0,13 e 0,17 para um mesmo local. As variações concentram-se principalmente nas regiões distantes do litoral, da Região Central para o Oeste e Norte do Paraná. É importante observar que o valor de *Krs* mais adequado (mensal, sazonal ou anual) dependerá do tipo e rigor da atividade agrícola a ser realizada (planejamento, projeto, manejo e pesquisa).

Geralmente, atividades de planejamento e projeto são menos exigentes que as operações de manejo e pesquisa, em que o nível de detalhamento e disponibilidade de dados é muito maior. Logo, valores de *Krs* médio anual podem ser muito úteis para atividade de planejamento e projetos, enquanto valores de *Krs* estacional e mensal são interessantes para manejo de atividades agrícolas ou auxílio e desenvolvimento de pesquisas.

De forma geral, o mês que mais chamou a atenção por sua discrepância ou proximidade dos valores de *Krs* médio mensal foi Setembro (FIGURA 4b), uma vez que foi o mês com os menores valores de *Krs* no Estado do Paraná, tendo valores entre 0,13 e 0,14, com coloração mais escura para todo o Estado. Somente no Norte do Estado observaram-se valores acima de 0,14. Os meses de Março, Maio (FIGURA 4a), Junho e Julho foram os meses em que os valores de *Krs* ficaram acima de 0,16. Somente o leste do Estado do Paraná (Região Metropolitana de Curitiba) ficou com valores menores, entre 0,13 e 0,15.

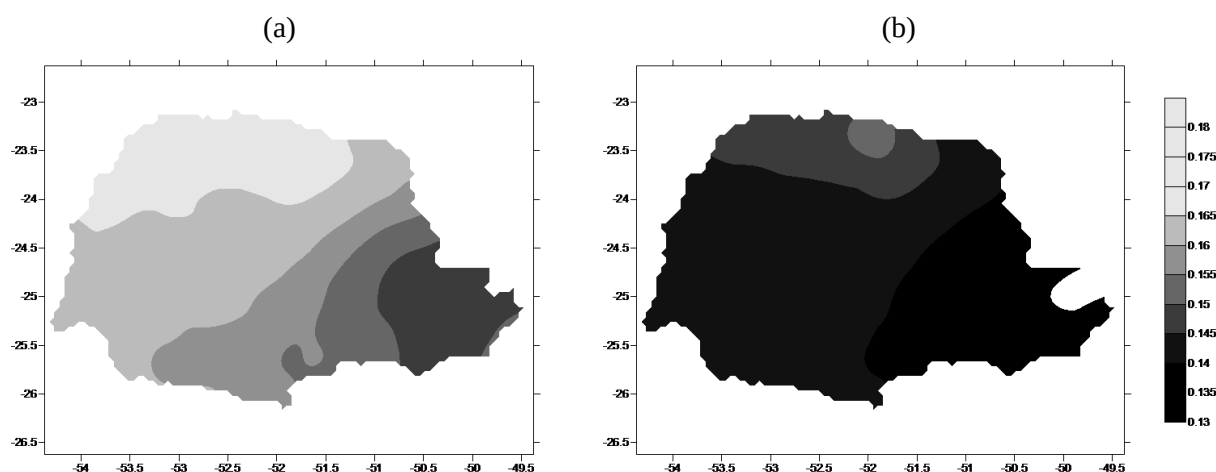


FIGURA 4 – Valores médios estimados do coeficiente de proporcionalidade *Krs* de Hargreaves e Samani (1982) para o Estado do Paraná, nos meses de Maio (a) e Setembro (b).

CONCLUSÃO

O coeficiente de proporcionalidade *Krs* médio anual para o Estado do Paraná foi de 0,152, com variação de 4,0%. Recomenda-se utilizar os valores anuais para atividades como projetos e planejamento agrícola. Já os valores para as estações do ano, no Estado do Paraná, foram de 0,153; 0,159; 0,151; 0,147 para as estações do verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Os valores podem ser utilizados para atividades com maior detalhamento.

Os coeficientes de proporcionalidade *Krs* mensais variam entre 0,129 a 0,175 ao longo dos meses. As variações foram pequenas, mas proporcionam alterações na radiação incidente

(Rs). Recomenda-se utilizar os *Krs* mensais para cada região do Estado quando a atividade a ser realizada necessitar de melhores estimativas da *Rs*, como no manejo de atividades agrícolas e desenvolvimento de pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, Italy, 1998.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: *Tempo e Clima no Brasil*. Organizadores: Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti, Nelson Jesus Ferreira, Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva e Maria Assunção Faus da Silva Dias. São Paulo. Oficina de Textos, 2009.

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

IPARDES. Mesoregiões geográficas. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social – IPARDES, 2010.

SAMANI, Z., Discussion of “History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation”. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.129, n.1, p. 53-63, 2004.

SILVA W. L., DEREZYNSKI C., CHANG M., FREITAS M., MACHADO B. J., TRISTÃO L., RUGGERI J. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, n.2, p.181-194, 2015.

TODOROVIC, M., KARIC, B., PEREIRA, L.S., Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Management*, v.50, p.184-193, 2013.