

**COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT PARA ESTIMAR A
RADIÇÃO SOLAR INCIDENTE OU INSOLAÇÃO PARA O ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

ASSOLARI, G.M.¹; SOUZA J.L.M.²; CRUZ, J.B.C.³; VIANA, J. L.³

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

³Pós-Graduação Ciência do Solo, UFPR

RESUMO

A radiação solar incidente (R_s) e a insolação diária (n) são variáveis meteorológicas importantes na modelagem em projetos de engenharia de água e solo, bem como no manejo de cultivos agrícolas e da irrigação. Sendo comum a inexistência ou baixa qualidade de medidas da R_s e n em estações climatológicas, equações como a de Angström-PreScott permitem estimar a R_s ou n a partir de parâmetros a e b calibrados para o local de interesse. Teve-se por objetivo no presente trabalho estimar os coeficientes a (linear) e b (angular) da equação de Angström-PreScott, para períodos mensal, sazonal e anual, no Estado do Rio Grande do Sul. Os dados climáticos diários necessários (R_s e n), no período entre 2006 e 2013, foram obtidos de 41 estações meteorológicas distribuídas no Rio Grande do Sul. Posteriormente, os valores de a e b foram comparados com os recomendados pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) e literatura. Foram elaborados mapas com os valores dos coeficientes a e b (estimados) com o método de interpolação por *krigagem* simples. Os coeficientes a variam de 0,01 a 0,30 (média de 0,14) e os coeficientes b variaram de 0,50 a 1,20 (média 0,77). Dependendo do local, os valores determinados foram iguais ou diferentes dos recomendados pela FAO ($a = 0,25$; $b = 0,50$) e bibliografia, indicando a necessidade de confirmar a metodologia utilizada, bem como realizar a validação dos coeficientes da equação para cada local de estudo, em diferentes épocas do ano. A metodologia utilizada no presente trabalho para estimar os coeficientes a e b está em fase de avaliação para compensar a ausência de dados de R_s e n nas estações meteorológicas.

Palavras-chave: Radiação solar global, estação meteorológica; modelo matemático.

INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente (R_s) na superfície terrestre é a principal fonte energética para muitos processos físicos, químicos e biológicos, tais como o crescimento vegetal e fotossíntese (Chen, 2011). Informações sobre R_s vêm ganhando importância recentemente, não apenas para estudos envolvendo a energia solar, mas também para aplicações agrícolas, climatológicas, ambientais, hidrológicas, meteorológicas e ecológicas (Hena et al., 2013; Hunt et. al., 1998).

Para obtenção da R_s é necessário equipamento específico, de custo de aquisição elevado, que demanda equipe técnica especializada para o manuseio, bem como manutenção periódica (Dornelas et al., 2006). Em estações que tem o equipamento para medição da R_s , também existem dias que os valores são perdidos ou apresentam inconsistência por falhas operacionais (Hunt et al., 1998).

Apesar da sua importância a R_s não é comumente medida nas estações climatológicas convencionais. Por outro lado, com a redução do custo e aumento na implantação de estações climatológicas automáticas, o problema se inverteu. A R_s passou a ser medida, mas a insolação (n) não, e a obtenção de dados de n tornou-se muito mais difícil. Como a R_s e n são variáveis importantes em diversos estudos e aplicações, tem-se basicamente dois grandes problemas quanto à obtenção de dados de R_s ou n : *i*) Indisponibilidade dos dados de R_s ou n devido a inexistência de aparelhos nas estações, ou existência de estação convencional (falta medida da R_s) ou automática (falta medida da n); e, *ii*) Série de dados possuindo falhas ou inconsistência, devido a falta de manutenção adequada dos equipamentos de medida.

Diante desse contexto, modelos estatísticos de estimativa foram desenvolvidos e amplamente utilizados baseando-se na insolação (n ; brilho solar sem nuvem), conforme equação de Angström (1924) e Prescott (1940), ou na temperatura máxima e mínima, conforme equações de Hargreaves e Samani (1982) e Bristow e Campbell (1984).

A equação de Angström-Prescott foi proposta por Angström (1924) e adaptada por Prescott (1940). Devido a dificuldade de realizar medições em dias claros, totalmente sem nuvens, Prescott (1940) sugeriu a utilização da radiação solar no topo da atmosfera, propondo um modelo que relaciona a razão entre a radiação incidente e a radiação no topo da atmosfera (R_s/R_a) com a razão entre o brilho solar e o fotoperíodo (n/N) (Liu et al., 2009).

Assim, a R_s ou n pode ser estimada facilmente utilizando os coeficientes empíricos a e b da equação de Angström-Prescott. O coeficiente a representa a radiação difusa e o coeficiente b a radiação direta da R_s (Dallacort et al., 2004). Os coeficientes a e b dependem da latitude, época do ano e altitude, bem como variam devido as mudanças no tipo e espessura de nuvens e concentração de poluentes (Almorox et al., 2008). Quanto maior a latitude, maior a amplitude da radiação solar extraterrestre entre o verão e o inverno (Pereira et al., 2002).

Mediante o exposto, por sua aplicação e simplicidade, teve-se por objetivo no presente trabalho estimar os coeficientes a (linear) e b (angular) da equação de Angström-Prescott, para períodos mensal, sazonal e anual, no Estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA), no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Paraná. As análises foram realizadas com dados oriundos de 41 estações meteorológicas do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Conforme classificação climática de Köppen, a região possui clima Subtropical, predominantemente do tipo Cfa, com verões quentes e úmidos, apresentando também ao nordeste do Estado clima Cfb, com verões amenos (Álvares et al., 2013).

Foram utilizados dados históricos diários de radiação solar incidente (R_s) proveniente de estações automáticas e insolação diária (n) obtidos de estações convencionais, medidos no período entre 2006 a 2013. No levantamento dos dados, a ausência de medições de R_s e n das estações em diferentes localidades foram compensadas utilizando dados das estações mais próximas, considerando: posicionamento geográfico (latitude, longitude e altitude), clima, número de falhas, data das leituras, entre outros.

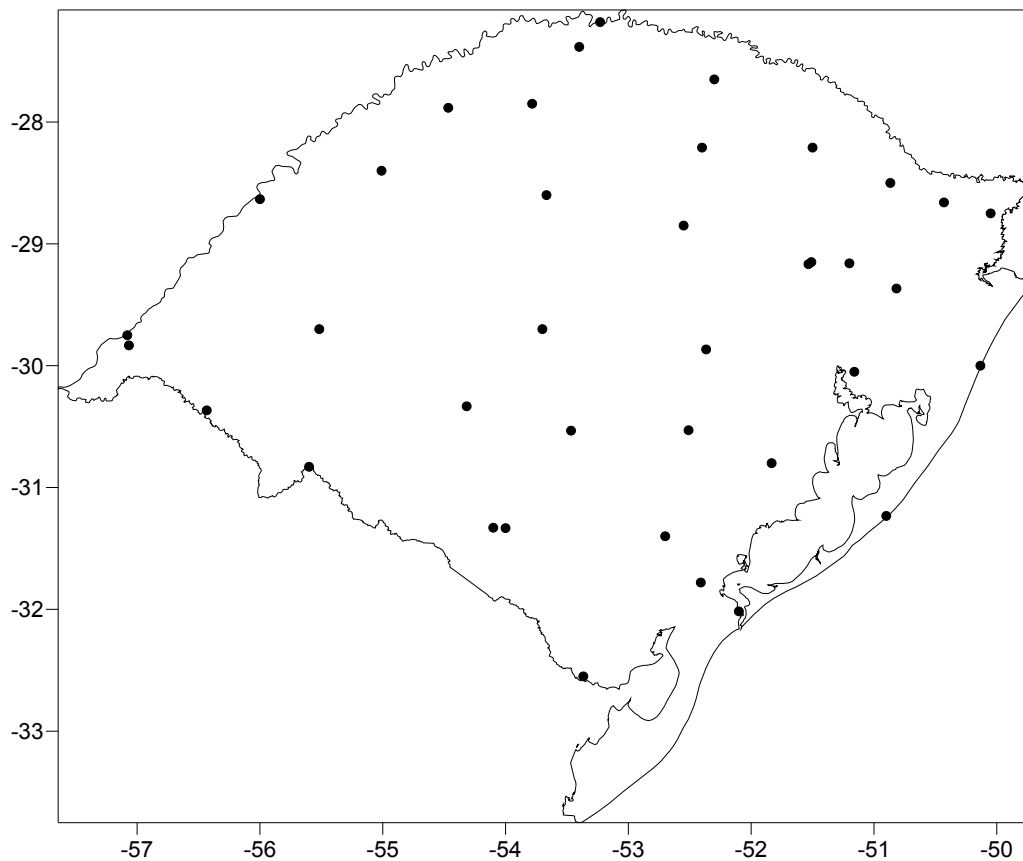


Figura 1 – Posicionamento geográfico das 41 estações meteorológicas do Estado do Rio Grande do Sul, utilizadas nas análises.

O cálculo dos coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940) para os períodos anual, sazonal e mensal foram obtidos a partir de análise de regressão linear, com o auxílio de uma planilha eletrônica desenvolvida especialmente para essa finalidade (Figura 2). A planilha eletrônica tem como entrada as leituras diárias de R_s e n , bem como a latitude das estações meteorológicas, e como saída os valores dos parâmetros a e b para os períodos de interesse.

Figura 2 – Planilha eletrônica desenvolvida para calcular automaticamente os parâmetros a e b da equação de Angström-Prescott.

$$R_s = R_a \cdot \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right)$$

Sendo: R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_a – radiação solar incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n – insolação diária (h dia^{-1}); N – duração máxima teórica do dia (h dia^{-1}); a – coeficiente linear (adimensional); b – coeficiente angular (adimensional).

Os valores da radiação solar no topo da atmosfera (R_a) para períodos diários foram calculados com as equações:

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)]$$

Sendo: R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); G_{sc} – constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A declinação solar (δ) e a distância relativa Terra-Sol (d_r) foram obtidas com as equações:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

Sendo: d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); δ – declinação solar (radianos); J – dia Juliano (decimal).

O ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (ω_s) foi obtido com a expressão:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$$

Sendo: ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

Os parâmetros a e b estimados para períodos mensal, sazonal e anual foram interpolados por *krigagem* simples utilizando o *software Surfer*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros a e b estimados com a equação de Angström-Prescott para os períodos mensal, sazonal e anual, no Estado do Rio Grande do Sul, encontram-se apresentados nas Figuras 3 a 6.

Os coeficientes a variam de 0,01 a 0,30 (média de 0,14), enquanto a os coeficientes b variaram de 0,50 a 1,20 (média de 0,77). Os resultados obtidos diferem dos recomendados pela FAO ($a = 0,25$ e $b = 0,50$), o que era esperado, pois existe recomendação que o ideal seria encontrar os parâmetros a e b para cada região (Allen et al., 1998). Observou-se também que os valores estimados do coeficiente b são maiores que os encontrados por Fontana e Oliveira (1996) e Berlato (1971).

Fontana e Oliveira (1996) encontraram coeficientes a e b da equação de Angström-Prescott, média anual, no Rio Grande do Sul utilizando estações da FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária), no período de 1980 a 1990. Os valores estimados no presente trabalho foram próximos aos encontrados pelos autores nas estações: Farroupilha ($a = 0,17$ e $b = 0,60$), apresentando mesmo valor de a (0,17) e variação de 0,08 para o b (0,68); Júlio de Castilhos ($a = 0,17$ e $b = 0,62$), com variação de 0,01 para o a (0,16) e o mesmo valor para o b (0,62). No entanto, verificou-se também grande variação nas estações de Erechim ($a = 0,19$ e $b = 0,47$) e Santa Rosa ($a = 0,15$ e $b = 0,55$) comparando com os

valores estimados no presente trabalho: Erechim ($a = 0,03$ e $b = 1,10$) e Santa Rosa ($a = 0,02$ e $b = 1,20$).

Berlato (1971) encontrou valores de a e b iguais a 0,23 e 0,46, respectivamente, correlacionando dados de 17 estações do Serviço de Ecologia Agrícola da Secretaria de Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, no período de 1955 a 1965.

Os maiores valores do coeficiente a foram encontrados no verão, nos meses de dezembro a março, no sentido Nordeste-Sudoeste, sendo que os menores valores ocorreram no sentido Norte-Noroeste do Estado.

Observou-se valores maiores do coeficiente b estimado no inverno do que no verão (Figura 4), concordando com Fontana e Oliveira (1996). O coeficiente b apresentou maiores valores na porção Norte-Noroeste do estado em todos os períodos considerados, tendo a porção central do estado os menores valores estimados.

A metodologia desenvolvida está em fase de análise e, pretende-se realizar estudos de estimação dos coeficientes a e b para todo o território nacional. Como o coeficiente a representa a radiação difusa e o coeficiente b a radiação direta, em um dia totalmente claro “ $a + b$ ” deveria ser igual a 1: $a = 0,25$ e $b = 0,75$, conforme Angström (1924). Dessa forma, observou-se a superestimação do coeficiente b do modelo em relação aos dados observados, provavelmente em decorrência da metodologia utilizada. Os valores dos coeficientes a e b foram calibrados, porém ainda não foram validados, sendo necessárias novas análises para essa finalidade, considerando anos diferentes dos utilizados para fazer a calibração.

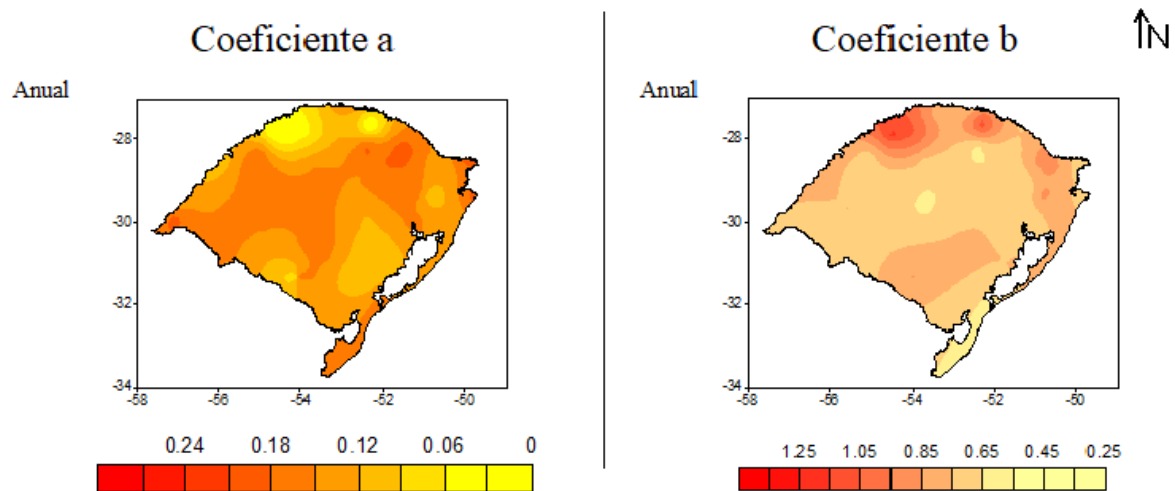


Figura 3 – Espacialização dos coeficientes a e b anual da equação de Angström-Prescott, estimados para o Estado do Rio Grande do Sul.

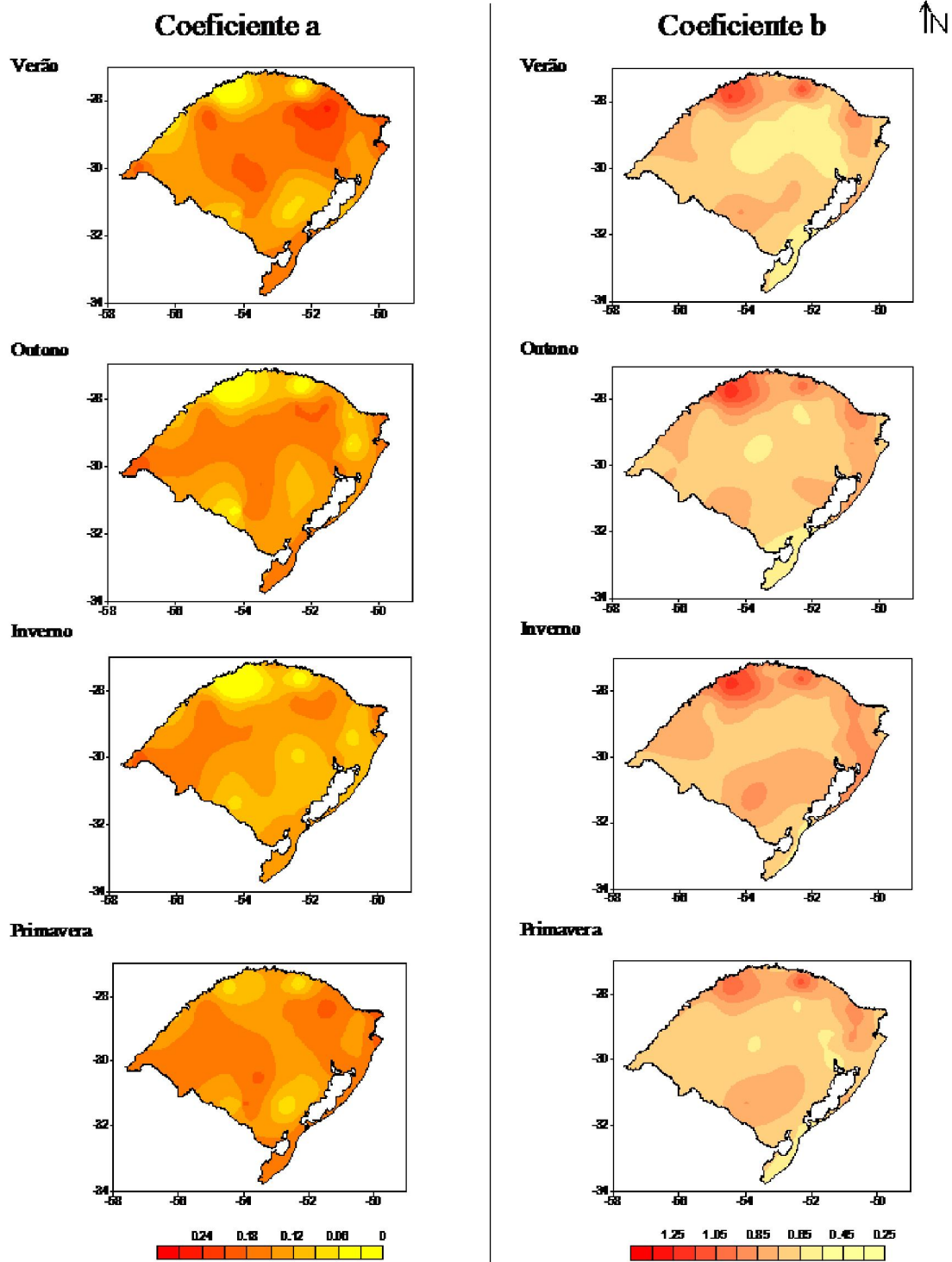


Figura 4 – Espacialização dos coeficientes a e b sazonal da equação de Angström-PreScott, para o Estado do Rio Grande do Sul.

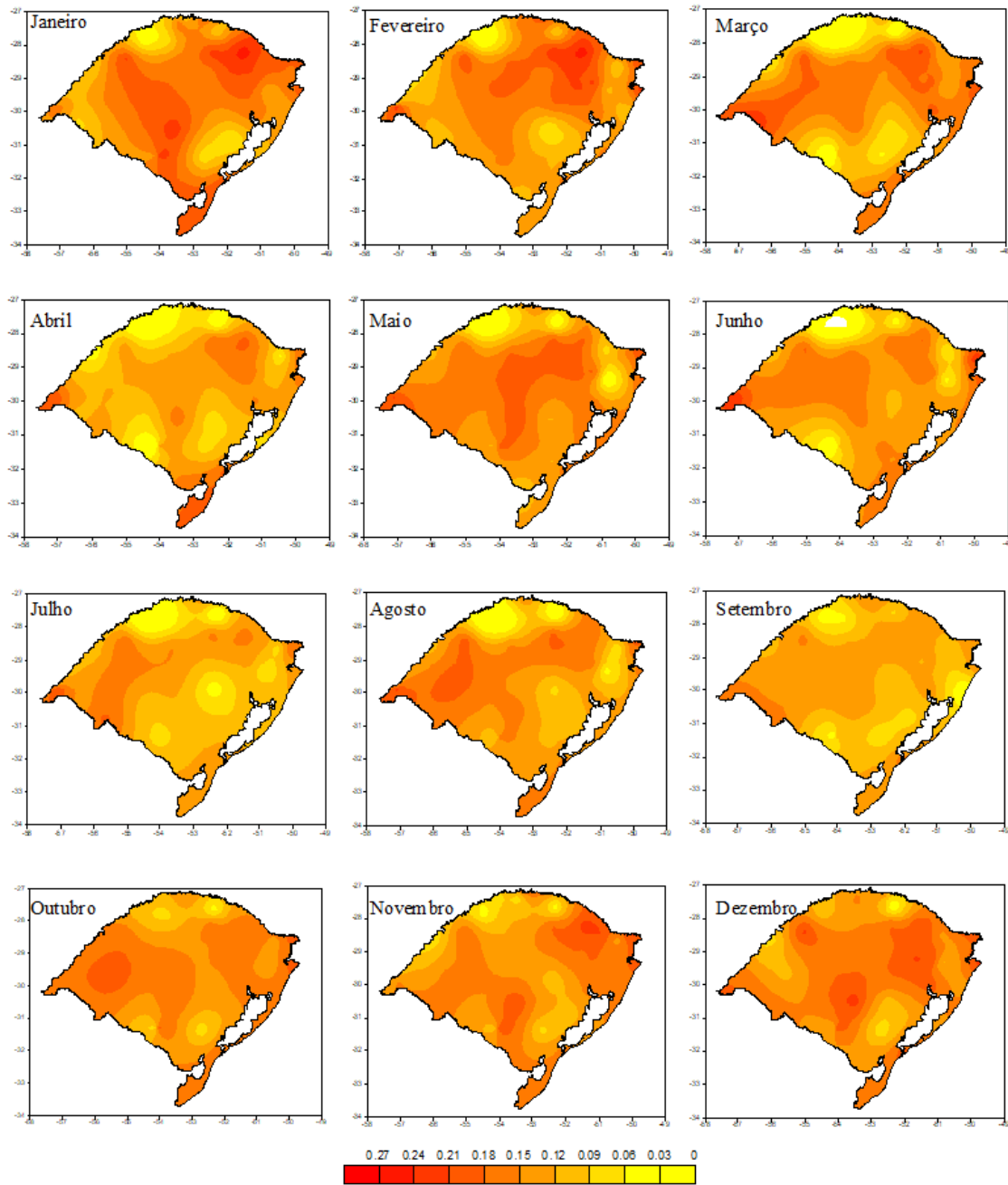


Figura 5 – Espacialização do coeficiente a mensal da equação de Angström-Prescott, para o Estado do Rio Grande do Sul.

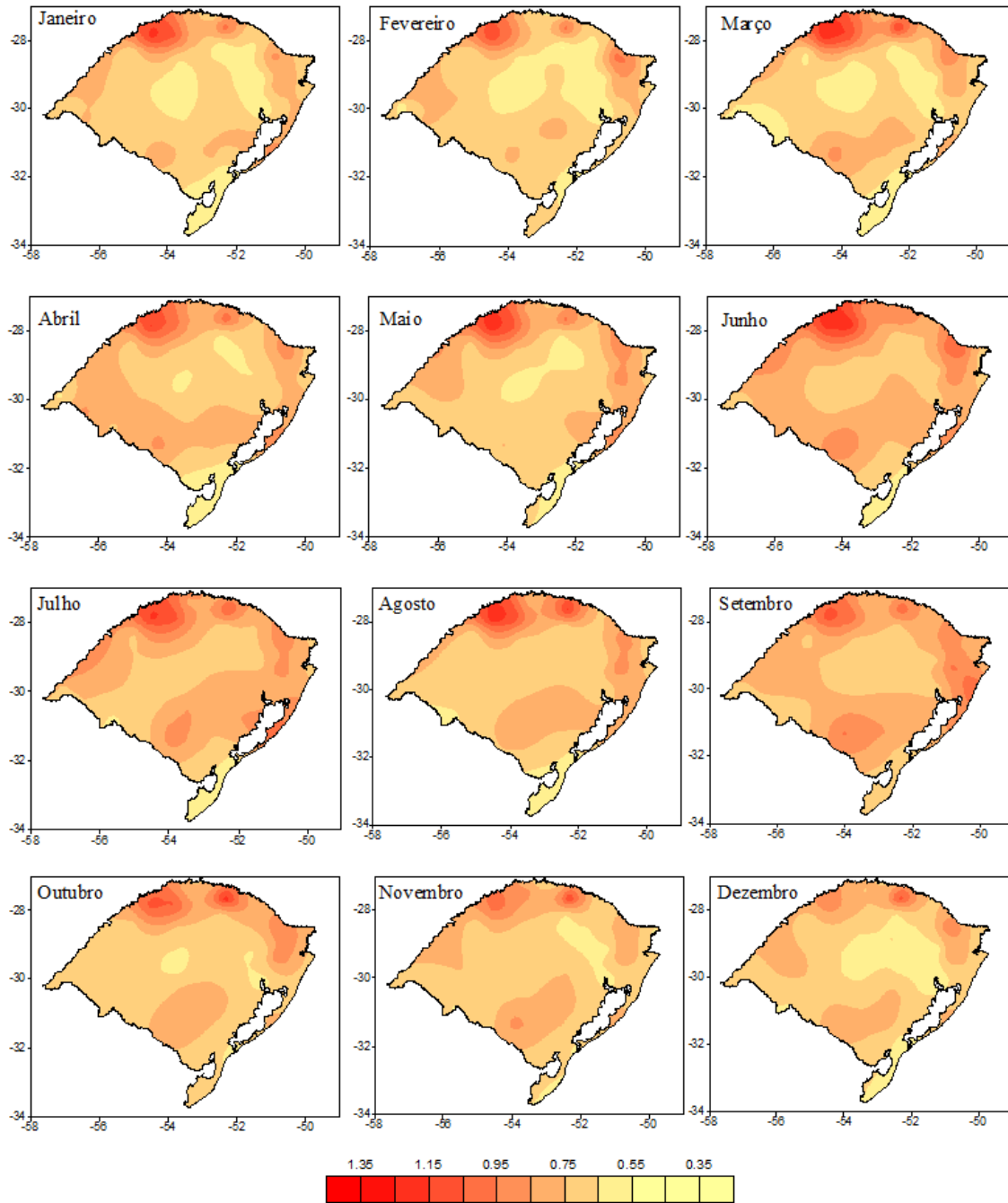


Figura 6 – Espacialização do coeficiente b mensal da equação de Angström-Prescott, para o Estado do Rio Grande do Sul.

CONCLUSÕES

Os coeficientes a variam de 0,01 a 0,30 (média de 0,14) e os coeficientes b variaram de 0,50 a 1,20 (média 0,77). Dependendo do local, os valores determinados foram iguais ou diferentes dos recomendados pela FAO ($a = 0,25$; $b = 0,50$) e bibliografia, indicando a necessidade de confirmar a metodologia utilizada, bem como realizar a validação dos coeficientes da equação para cada local de estudo e em diferentes épocas do ano.

A metodologia utilizada no presente trabalho para estimar os coeficientes a e b (compensando ausências de dados de R_s e n nas estações meteorológicas) mostrou-se promissora, mas precisa ser devidamente avaliada, considerando a estatística e desempenho do modelo, bem como a realização de validação dos coeficientes em todos os locais.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements**. FAO, Rome, Italy, 1998, 297 p.
- ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of global solar radiation in Venezuela. **Interciencia**, v. 33, p. 280-283, 2008.
- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-126, 1924.
- BERLATO, M. A. Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**. Porto Alegre, v.5, p. 115-131, 1971.
- 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.
- CHEN, J.; LIU, H.; WU, W.; XIE, D. Estimation of monthly solar radiation from measured temperature using support vector machines. **Renewable Energy**, v. 36, p. 413-420, 2011.
- DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; SILVA, F. F.; TRINTINALHA, M. A. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom para a região de Palotina, estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, p. 329-336, 2004.
- DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angstrom-PreScott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p. 1213-1219, 2006.
- FONTANA, D. C., OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p. 87-91, 1996.

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

HENA, A.; ALI, S.; RAHMAN, M. A simple statistical model estimate incidente solar radiation at the surface from NOAA-AVHRR satellite data. **International Journal of Information Technology and Computer Science**, v. 2, p. 36-41, 2013.

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

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; PORTER, J. R. Calibration of the Angstrom-PreScott coefficients (a , b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p. 696-710, 2009.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 2002, 478 p.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Hydrology, Science Australian**, v. 64, p. 114-118, 1940.