

LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT DE LOCALIDADES BRASILEIRAS PARA A CONSTITUIÇÃO DE UM MÓDULO COMPUTACIONAL VOLTADO À DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS E ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

RONCOVSKY, V.²; SOUZA, J. L. M.¹

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

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho levantar e caracterizar os parâmetros “*a*” (linear) e “*b*” (angular) da equação de Angström-Prescott já calibrados para diversas localidades brasileiras, bem como constituir um módulo automático em planilha eletrônica para estimar a radiação solar incidente (*R_s*) e/ou insolação (*n*) das localidades levantadas. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas/DSEA/UFPR, e estruturado nas etapas: *i*) Levantamento dos parâmetros “*a*” e “*b*” da equação de Angström-Prescott; *ii*) Organização e análise dos parâmetros; e *iii*) Constituição do módulo automático para estimar a radiação solar incidente (*R_s*) e/ou a insolação (*n*) das localidades levantadas. Os parâmetros “*a*” e “*b*” da equação foram obtidos em pesquisas bibliográficas em artigos, dissertações e teses disponibilizados na *internet*. Na pesquisa realizada, além dos parâmetros, também foram levantados dados da latitude, longitude e classificação climática dos locais em que as estações climatológicas se encontram. O módulo computacional foi desenvolvido em planilha eletrônica, com auxílio da linguagem *Visual Basic for Application* (VBA). Identificaram-se 129 localidades, distribuídas por 22 estados, contendo estudos que ajustaram os parâmetros “*a*” e “*b*” da equação de Angström-Prescott. Não foram encontrados na *internet* trabalhos com os parâmetros ajustados para os estados de AL, RO, RR, SE e TO. O parâmetro “*a*” da equação apresentou valores variando entre 0,0190 e 0,5704, e o parâmetro “*b*” variou entre 0,0270 e 0,9490. A média dos parâmetros “*a*” e “*b*” encontrada nos trabalhos levantados foi de 0,2431 e 0,4123, respectivamente. O módulo computacional automático mostrou-se muito simples e funcional, sendo aplicável para diversas finalidades e localidades do território brasileiro.

Palavras-chave: Angström-Prescott, Radiação Global, Planilha Eletrônica, Modelo Matemático.

INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma fonte praticamente inesgotável de energia limpa, não poluente, capaz de sustentar a vida na terra, além de ser uma alternativa às fontes atuais de energia (Antunes Júnior et al., 2017). A radiação solar incidente (*R_s*), resultante do somatório da radiação direta e do céu, é importante não apenas para estudos envolvendo energia solar, mas também para aplicações agrícolas, ambientais, hidrológicas, climatológicas, meteorológicas e ecológicas (Pereira et al., 2002). A *R_s* é uma das variáveis necessárias para estimar a

evapotranspiração de referência (ETo) com o método de Penman-Monteith, sendo fundamental para quantificar o consumo hídrico das culturas agrícolas, contribuindo para o dimensionamento de sistemas de irrigação e planejamento de atividades na área de engenharia de água e solo (Andrade Junior et al., 2012). Além disso, sua utilização torna-se muito importante também na realização de estudos de zoneamento agrícola, estabelecimento e utilização de modelos de crescimento e produção na agricultura (Fontana; Oliveira, 1996).

Porém, a quantificação da radiação solar exige instrumentos específicos, de custo elevado, como radiômetros, actinógrafos e piranômetros, que requerem calibração e manutenção constantes (Dornelas et al., 2006). Existem poucas estações meteorológicas que registram a radiação solar, fazendo com que a disponibilidade de dados medidos seja reduzida (Polo et al., 2011). Além da falta de estações que estimem esses parâmetros, as que existem estão centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do país, enquanto há grandes áreas agrícolas que não dispõem de dados climáticos completos.

Na tentativa de eliminar o problema, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para a estimativa da R_s . Entre eles, o modelo de Angstrom-Prescott, proposto primeiramente por Angstrom em 1924 e, posteriormente, modificada por Prescott em 1940, é uma alternativa utilizada para estimar a R_s (Almorox et al., 2005; Liu et al., 2009).

Os coeficientes da equação de Angström-Prescott dependem, principalmente, das características físicas da camada atmosférica e são influenciados pela latitude e altitude do local, bem como pela época do ano (Pereira et al., 2002). Após a calibração dos parâmetros linear “ a ” e angular “ b ”, a equação de Angström-Prescott ($R_s = Ra \cdot (a + b \cdot n / N)$) torna-se uma interessante alternativa para estimar a R_s , utilizando como entrada a insolação (n) medida, radiação solar no topo da atmosfera (Ra) e o comprimento do dia (N).

No Brasil, o método de Angström-Prescott vem sendo largamente utilizado. Ribeiro (1980) determinou valores de “ a ” e “ b ” para 83 estações meteorológicas localizadas entre as latitudes 00°10’N a 32°01’S. Blanco e Sentelhas (2002) e Carvalho et al (2011) determinaram os coeficientes “ a ” e “ b ” para Piracicaba, SP e para Seropédica, RJ, respectivamente. Além desses, outros trabalhos podem ser encontrados na literatura apresentando os valores dos coeficientes para diversas localidades (Fontana; Oliveira, 1996; Dantas et al., 2003, Dallacort et al., 2004; Dornelas et al., 2006; Torres et al., 2010; Pereira et al., 2010; Jerszurki, Souza 2013; Martim et al., 2014; Medeiros et al., 2017; Andrade et al., 2020; Lena et al., 2020).

Atualmente, com o desenvolvimento e difusão da microeletrônica, as estações meteorológicas automáticas passaram a ser mais utilizadas, contando com sensores para a medida direta da radiação solar incidente. No entanto, as estações automáticas raramente contam com sensores para medida da insolação, que em muitas situações são importantes, especialmente para estudos agro-ecológicos. Assim, a equação de Angström-Prescott continua sendo útil na atualidade, servindo para estimar a insolação (n) com as medidas de R_s (Blanco, Sentelhas 2002).

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente estudo levantar e caracterizar os parâmetros “ a ” (linear) e “ b ” (angular) da equação de Angström-Prescott já calibrados para diversas localidades brasileiras, bem como constituir um módulo automático em planilha eletrônica para estimar a radiação solar incidente (R_s) e/ou insolação (n) das localidades levantadas.

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, e foi estruturado nas etapas:

i) Levantamento dos parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott

Por ser amplamente utilizada, foram levantadas publicações contendo 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 no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$); a – parâmetro linear da equação de Angström-PreScott (adimensional); b – parâmetro angular da equação de Angström-PreScott (adimensional); n – insolação diária (horas); N – duração do dia ou fotoperíodo (horas).

Os parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott foram obtidos em pesquisas bibliográficas em artigos, dissertações e teses disponibilizados na *internet*.

ii) Organização e análise dos parâmetros

Os parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott, levantados na pesquisa bibliográfica, foram tabulados em uma planilha eletrônica, sendo armazenadas as informações: Estado; cidade; coordenadas geográficas (latitude, longitude); classificação climática das localidades; valor dos parâmetros “a” e “b” ajustados; indicador estatístico utilizado para avaliar o ajuste dos parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott; e, referências bibliográficas dos estudos.

iii) Realização do módulo computacional

Após o levantamento e organização dos dados das publicações, contendo os parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott das localidades brasileiras, realizou-se um módulo computacional desenvolvido em planilha eletrônica, utilizando a linguagem *Visual Basic for Application* (VBA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No levantamento realizado por meio de pesquisas na *internet*, foram selecionados 24 trabalhos que ajustaram os parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott. Os estudos foram realizados por diversos autores, contabilizando o total de 129 localidades distribuídas por 22 estados. Não foram encontrados trabalhos com os parâmetros ajustados para os estados de Alagoas (AL), Rondônia (RO), Roraima (RR), Sergipe (SE) e Tocantins (TO).

A maioria dos trabalhos levantados utilizou o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar o ajuste dos parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-PreScott. O coeficiente de determinação (R^2) é um valor adimensional que varia entre -1 a 1 , sendo que quando mais próximo da unidade (1 ou -1), mais bem ajustados estão os parâmetros. Dornelas et al. (2006)

e Dallacort et al. (2004), calibrando os parâmetros “ a ” e “ b ” encontraram R^2 de 0,81 e de 0,87, respectivamente, para Brasília e a região de Palotina, PR.

No levantamento realizado, dentre os parâmetros “ a ” e “ b ” da equação de Angström-Prescott de todas as localidades analisadas, o parâmetro “ a ” apresentou média geral igual a 0,2431, sendo o maior valor encontrado igual a 0,5704 (Cruzeta – Rio Grande do norte; Ribeiro, 1980) e o menor igual a 0,019 (Campo dos Goytacazes – Rio de Janeiro; Mendonça et al., 2020). Para o parâmetro “ b ” foram encontrados na pesquisa valores limites entre 0,027 (Garanhus – Pernambuco; Andrade et al., 2020) e 0,9490 (Campo dos Goytacazes – Rio de Janeiro; Mendonça et al., 2020), com média geral igual a 0,4123.

O módulo automático desenvolvido foi denominado “Plataforma Moretti: Módulo Estimativa da radiação solar incidente de localidades brasileiras com a equação de Angström-Prescott” (Figura 1a). Na utilização do Módulo (Figura 1b), o usuário entra no formulário (botão "Entrar") e primeiramente deve selecionar o Estado e cidade que serão analisados. Em seguida, deve ser selecionada a variável entre a Radiação Solar Incidente (R_s) ou Insolação (n) que pretende estimar. O formulário tem como saída os seguintes dados da localidade escolhida: coordenadas geográficas (longitude e latitude); clima (conforme classificação climática de Köppen); parâmetros “ a ” e “ b ” da Equação de Angström-Prescott; coeficiente de determinação (R^2) obtido no ajuste dos parâmetros da equação; e, referências bibliográficas em que as informações foram publicadas/retiradas. Na Figura 1b verifica-se que foi selecionada a cidade de Curitiba, localizada no Estado do Paraná, e escolheu-se a Radiação solar incidente (R_s) para ser estimada, tendo como entrada a insolação (n) de 8 horas. Com as opções de entrada escolhidas obteve-se $R_s = 14,26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Caso seja selecionado um estado em que não foram encontrados parâmetros “ a ” e “ b ” da Equação de Angström-Prescott ajustados, o Módulo retornará a seguinte mensagem: “No levantamento realizado na internet não foram encontrados parâmetros da equação Angström-Prescott para esse estado” (Figura 2a).

Na escolha da opção para o cálculo da insolação (n), a utilização de valores da radiação solar incidente (R_s) muito baixos ou maiores que o valor da radiação no topo da atmosfera (R_a) podem retornar valores inconsistentes. Nesta situação, o Módulo apresenta uma mensagem avisando que o valor da insolação diária (n) não pode ser negativo ou que o valor da radiação solar incidente (R_s) não pode ser maior que o valor da radiação no topo da atmosfera (R_a). Na Figura 2b tem-se um exemplo de inconsistência citada acima, quando foi inserido o valor de $3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a radiação solar incidente (R_s), e na Figura 2c, quando foi inserido o valor de $40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a radiação solar incidente (R_s). Abaixo estão os avisos que poderão ser liberados, por *MsgBox*, nos casos em que os valores das entradas utilizadas para os cálculos de n forem inconsistentes: *i*) “Houve alguma inconstância, pois o valor da insolação diária (n) não pode ser negativo. Provavelmente o valor de R_s fornecido foi muito baixo”; *ii*) “O valor da radiação solar incidente (R_s) não pode ser maior que o valor da radiação no topo da atmosfera (R_a)”.

Na escolha da opção para o cálculo da radiação solar incidente (R_s), a utilização de valores da insolação (n) maiores que o valor do fotoperíodo também podem resultar em valores inconstantes. Nessa situação, o Módulo retorna uma mensagem avisando que o valor da insolação diária (n) não pode ser maior que o valor da duração do dia ou fotoperíodo (N). Na Figura 2d tem-se um exemplo da situação considerada, no qual foi inserido o valor de 16

horas para a insolação (n). Quando os valores da entrada utilizada para o cálculo de R_s forem inconsistentes, o seguinte aviso é liberado por *MsgBox*: i “O valor da insolação diária (n) não pode ser maior que o valor da duração do dia ou fotoperíodo (N)”.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ / SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

UFPR **M** Plataforma Moretti
LAMOSA - LABORATÓRIO DE MODELAGEM DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

PLATAFORMA MORETTI: MÓDULO - ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE DE LOCALIDADES BRASILEIRAS COM A EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT

Autores:
Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza (LAMOSA / DSEA / SCA / UFPR)
Graduanda orientada: Vanessa Roncovsky (Graduação em Agronomia / SCA / UFPR)
Graduanda orientada: Clarissa Grebogi Bilyk (Graduação em Agronomia / SCA / UFPR)

Endereço:
Rua dos Funcionários, 1540 - Curitiba, PR
CEP: 80035-050 Telefone: (041) 3350-5689
e-mail: jmoretti@ufpr.br
Site: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>

Entrar **Fechar**

Versão 1.0 / 2022
Roncovsky_AG_pMoretti_2022
Bilyk_AG_pMoretti_2022

(a)

Estado: Paraná - PR
Cidade: Curitiba
Intensidade, duração ou frequência: Radiação Solar Incidente (R_s)
Planilha: Informação e como citar

Voltar
Informação
Citação

EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT: ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (R_s) OU INSOLAÇÃO (n) PARA LOCALIDADES BRASILEIRAS

Latitude, longitude e clima da cidade / local:

Latitude: 25° 26' 00" S
Longitude: 49° 16' 00" W
Clima (classificação climática de Köppen): Cfb

Equação de Angström-Prescott e parâmetros da cidade / local:

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

a : 0,1732 ad.
 b : 0,3346 ad.
 R^2 : 0,794 ad. (1)

Cálculo da Radiação Solar Incidente (R_s) ou Insolação (n):

Data para o cálculo: 15-mar

Radiação no topo da atmosfera (R_a ; MJ m⁻² dia⁻¹): 36,27

Insolação (n ; horas): 8,0

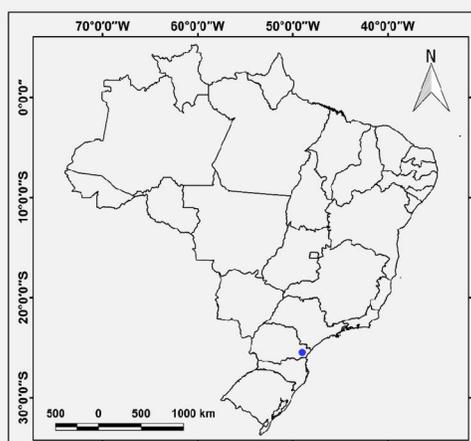
Radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹): 14,26

Calcular

Referência dos parâmetros da equação:

RIBEIRO A. M. de A. Estudo das relações entre radiação solar global (Q_g) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 1980.

Sendo: R_s - radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a - radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹); a e b - parâmetros da equação de Angström-Prescott (adimensional); n - insolação diária (horas); N - duração do dia ou fotoperíodo (horas); R^2 - Coeficiente de determinação obtido no ajuste dos parâmetros da equação (adimensional).



(b)

Figura 1 – Módulo “Estimativa da radiação solar incidente de localidades brasileiras com a equação de Angström-Prescott”, desenvolvido em planilha eletrônica: a) Interface da abertura do Módulo; e, b) Exemplo de uso do Módulo, para o cálculo da Radiação solar incidente (R_s).

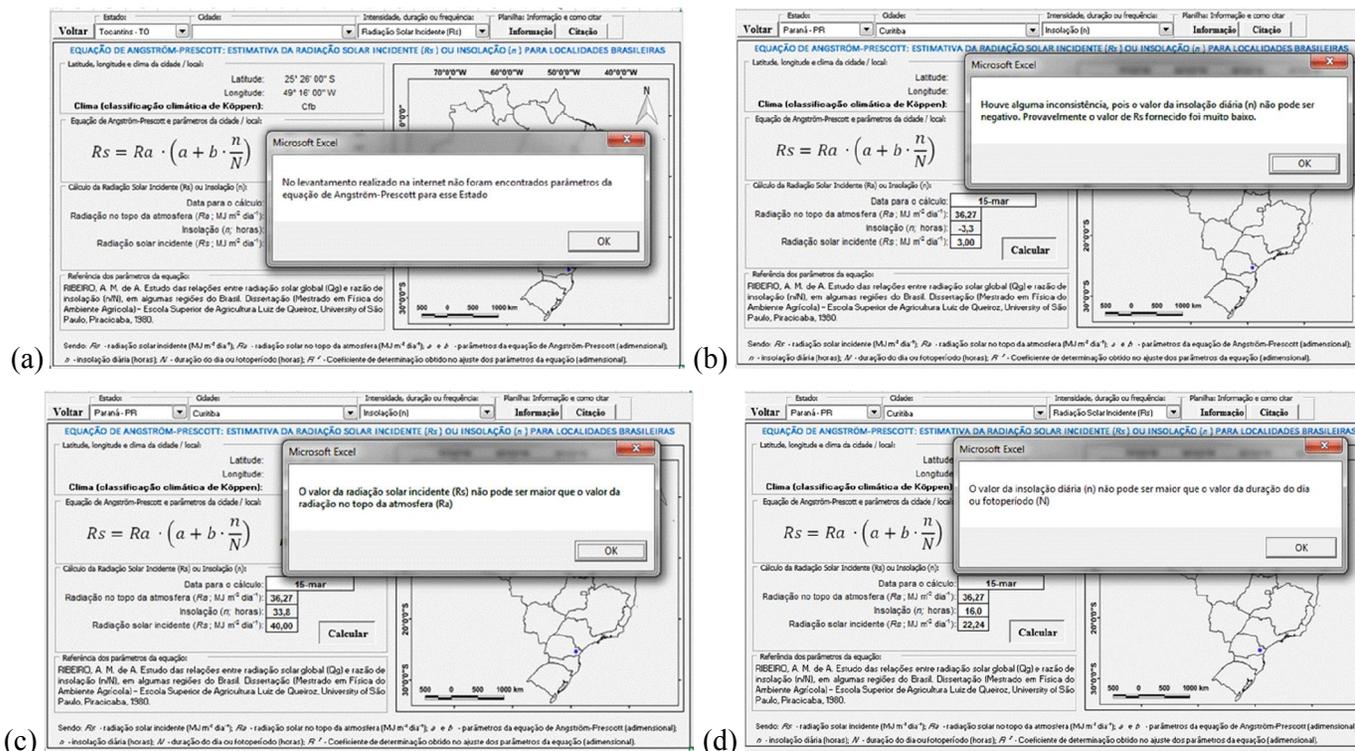


Figura 2 – Mensagens (*MsgBox*) que podem ser apresentadas na utilização do módulo “Estimativa da radiação solar incidente de localidades brasileiras com a equação de Angström-Prescott”: a) Quando é selecionado um Estado em que não foram encontrados localidades com os parâmetros “a” e “b” da equação de Angström-Prescott; b) Quando é fornecido um valor muito baixo de radiação solar incidente (*Rs*); c) Quando é fornecido um valor de radiação solar incidente (*Rs*) maior que o valor da radiação no topo da atmosfera (*Ra*); e, d) Quando é fornecido um valor de insolação diária (*n*) maior que o valor da duração do dia ou do fotoperíodo (*N*).

CONCLUSÕES

O levantamento realizado identificou 129 localidades, distribuídas por 22 Estados, contendo estudos ajustando parâmetros “*a*” e “*b*” para a equação de Angström-Prescott. Não foram encontrados na *internet* trabalhos com os parâmetros ajustados para os estados de AL, RO, RR, SE e TO.

O parâmetro “*a*” da equação de Angström-Prescott apresentou valores variando entre 0,0190 e 0,5704, e o parâmetro “*b*” variou entre 0,0270 e 0,9490. A média dos parâmetros “*a*” e “*b*” encontrada nos trabalhos levantados foi de 0,2431 e 0,4123, respectivamente.

O módulo computacional desenvolvido apresentou interface intuitiva e de fácil uso, mostrando-se muito simples e funcional, possibilitando a estimativa da radiação solar incidente ou insolação para qualquer uma das 129 localidades levantadas. Ao mesmo tempo, o módulo permitiu facilmente a disponibilização dos parâmetros “*a*” e “*b*”, visto que reúne todos os parâmetros ajustados em apenas um local, sendo aplicável para diversas finalidades e localidades do território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Clarissa Grebogi Bilyk, estudante de Agronomia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela colaboração nas pesquisas bibliográficas realizadas na *internet*.

LITERATURA CITADA

ALMOROX, J. et al. Estimation of monthly Ångström-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, v. 30, pag. 931-936, 2005.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba, Piauí. *Comunicata Scientiae*, v.3, n.1, pag. 50-54, 2012.

ANDRADE, A. R. S. de. et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação para município de Garanhuns/PE. *Convibra*, 2020.

ANTUNES JÚNIOR, E. J. et al. Ajuste dos parâmetros da equação de Angstrom-Prescott na estimativa da radiação global em municípios goianos. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2017.

BLANCO, F.F; SENTELHAS, P.C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, n.2, p. 295-300, 2002.

CARVALHO, D. F. de; et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.8, pag. 838-844, 2011.

DALLACORT, R. et al. Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a região de Palotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 26, n.3, pag. 329-336, 2004.

- DANTAS, A. et al. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, v.27, n.6, p. 1260-1263, 2003.
- DORNELAS, K. D. S. et al. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.8, pag. 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, n.1, pag. 87-91, 1996.
- JERSZURKI, D; SOUZA, J. L. M. de. Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. *Revista Ciência Rural*, v.43, n.3, pag. 383-389, 2013.
- LENA, B. P. et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR. *Acta Iguazu*, v.9, n.1, pag. 123-136, 2020.
- LIU, X. et al. 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.
- MARTIM, C. C. et al. Coeficientes de Angstrom-Prescott para a região Norte do Mato Grosso: primeira aproximação. In: *Proceedings of the XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-Campo Grande*. [In Portuguese]. 2014.
- MEDEIROS, F.J. de, et al. Calibration of Ångström-Prescott equation to estimate daily solar radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.32, n.3, pag. 409-416, 2017.
- MENDONÇA, J. C. et al. Coeficientes de Angström-Prescott para estimar a radiação solar global em Campos dos Goytacazes, RJ. *Irriga*, v.25, n.3, pag. 481-491, 2020.
- PEREIRA, A. R. et al. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, pag. 478, 2002.
- PEREIRA, S. T. et al. Estimativa da radiação solar global para a região de Pedra Azul, norte de Minas Gerais. *Enciclopédia Biosfera*, v.6, n.11, pag. 1-9, 2010.
- POLO, J. et al. A simple approach to the synthetic generation of solar irradiance time series with high temporal resolution. *Solar Energy*, v.85, pag.1164-1170, 2011.
- RIBEIRO, A. M. de A. Estudo das relações entre radiação solar global (Q_g) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 1980.
- TORRES, C. J. F. et al. Determinação dos coeficientes do modelo de Angström-Prescott para a região de canavieiras, Estado da Bahia. *Enciclopédia Biosfera*, v.6, n.11, pag. 1-7, 2010.