

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA A REGIÃO DE PEDRA AZUL, NORTE DE MINAS GERAIS

Samara Teixeira Pereira¹, Welder Camilo P. Santos¹, Jhones da Silva Amorim²,
Felizardo Adenilson Rocha³, Joseane Oliveira da Silva³

1. Discentes do curso de Engenharia Ambiental do Instituto Federal da Bahia – IFBA – Campus Vitória da Conquista, Bahia
(samaraeng,amb@gmail.com; welder.camilo@gmail.com)
 2. Graduando em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (jhones_sa@hotmail.com)
 3. Professor do Instituto Federal da Bahia – IFBA – Campus Vitória da Conquista, Bahia, (felizardoar@hotmail.com; joseaneoliveiras@yahoo.com.br)
-

RESUMO

A melhor maneira de se obter a quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre é por meio piranômetro, que mede a radiação solar, mais especificamente, a radiação solar de raios diretos, em incidência normal, Apesar de serem de elevado custo, é o mais precisos de todos os instrumentos de medição da radiação. Contudo, em virtude da falta de dados dessa natureza, faz-se necessário estimar a radiação solar. Dentre as diversas equações empíricas, a de uso mais difundido é aquela proposta por Ångström em 1924, modificada por Prescott em 1940. Este trabalho teve como objetivo a determinação dos parâmetros da equação de Angström-Prescott para estimativa da radiação solar incidente sobre a cidade de Vitória da Conquista, Bahia. O trabalho foi desenvolvido a partir de dados diários de insolação e de radiação solar global do período de 1998 a 2008, fornecidos pelo INMET. A quantidade de energia incidente sobre a cidade de Pedra Azul pode ser determinada com boa precisão por meio do modelo de Angstrom-Prescott, utilizando os valores de 0,265 e 0,325 para os coeficientes a e b, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação Solar, modelo de Angström-Prescott, insolação

ESTIMATE OF THE SOLAR GLOBAL RADIATION TO PEDRA AZUL CITY, NORTH OF MINAS GERAIS ESTATE

ABSTRACT

The best way to obtain the quantity of solar radiation that reaches the land surface is through pyranometer, which measure the solar radiation, more specifically the solar radiation with normal incidence, Although have a high cost, is the most precise for all measuring instruments of radiation. However, considering the lack of such data, it is necessary to estimate the solar radiation. The several empirical expressions, more widespread use is that proposal by Angström in 1924 and later modified by Prescott. This work had as objective the determination of the parameters of the equation of Ångström-Prescott to estimate the solar radiation incident on the Pedra Azul city. The work was developed from data daily of insolation and solar global radiation in the

period of the 1998 to 2008, provided by INMET. It was conclude that Angstrom-
Prescott model allows the estimating solar radiation with a good precision.

KEYWORDS: Solar Radiation, parameters, Angström-Prescott model, insolation

INTRODUÇÃO

A energia solar é a principal fonte de energia renovável, sendo responsável também pela fotossíntese e, conseqüentemente, pela produção das plantas cultivadas, disponível ao homem e a vida na terra, Além disso, é também de grande importância em estudos ecológicos e ambientais, sendo o principal fator condicionante da temperatura do ar e do solo, bem como dos processos de evaporação e transpiração (BLANCO & SENTELHAS, 2002).

O sol fornece 99,97% da energia que é utilizada para vários fins no sistema Terra-atmosfera, A cada minuto o sol irradia cerca de 56×10^{26} calorías de energia, da qual a Terra intercepta apenas $2,55 \times 10^{18}$ calorías. Embora isto represente somente meio milionésimo da energia solar total emitida para o espaço, calcula-se que seja 30 mil vezes maior que o consumo total anual da energia do mundo. A quantidade de energia solar recebida, por uma unidade diária, por uma superfície, que forme ângulos retos com os raios solares no topo da atmosfera é de aproximadamente 2 calorías por $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ou 2 Langleys por minuto (AYOADE, 2007).

A quantidade de radiação solar global e sua distribuição temporal são as principais variáveis para a concepção sistemas de energia solar (CELIK & YORUKOGLU, 2006). Neste sentido, estimar a radiação é de extrema importância.

A disponibilidade da energia solar, também denominada de radiação solar global ou incidente sobre a superfície terrestre depende da latitude local e da posição no tempo, devido à inclinação do eixo que descreve os movimentos de rotação e translação. Com isso, a duração de claridade solar varia em algumas regiões e períodos do ano.

Muitos instrumentos podem ser usados para medir os componentes do balanço de radiação, mas geralmente são de elevado custo (AYOADE, 2007), O uso de dados diários se faz necessário para monitorar o desempenho de ganhos como iluminação natural e em processos agrícolas, A radiação solar, ao se propagar na atmosfera, até atingir a superfície da Terra, passa pelos processos de espalhamento e absorção, Em conseqüência da razão do espalhamento, observa-se, além da componente direta, a irradiação solar difusa, sendo a soma dessas duas componentes denominada irradiação solar global (MELANIA et al., 2005).

Para localidades com ausência de coleta de dados de radiação solar, valores estimados podem ser obtidos através de modelos matemáticos, que diferem entre si pelo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada. Segundo Santos et al, (1983), *apud* Pereira et. al. (2002), uma análise dos modelos encontrados na literatura para estimar a radiação solar global demonstra que o uso destes modelos deve ser incentivado e não a disseminação de redes de estações radiométricas, as quais são nas regiões tropicais de baixa densidade e as séries de medidas radiométricas, quando disponíveis, são geralmente de pouca duração,

Um das equações mais difundidas é a proposta por Angstrom (1924) e mais tarde modificada por Prescott (1940), *apud* DALLACORT (2004). A partir desse estudo, pode-se definir a quantidade máxima de energia que poderia ser

armazenada em coletores e o período em que essa demanda energética seria máxima.

No Brasil, o método de Angstrom-Prescott vem sendo amplamente utilizado para estimativa da radiação solar global. Ribeiro (1980) determinou os valores de “a” e “b” para 32 estações meteorológicas localizadas entre 3° e 32° de latitude sul; o valor de “a” variou de 0,15 a 0,31 com tendência de redução com o aumento da latitude, enquanto o valor de “b” variou de 0,22 a 0,63 havendo tendência de redução do valor desse coeficiente com o aumento da latitude até 20°, sendo que a partir dessa latitude, “b” aumentou. Blanco & Sentenhas (2002), ajustou os coeficientes do modelo de Angstrom com partição diária, mensal, sazonal e anual e concluíram que não houve diferença significativa entre os valores, embora os valores dos coeficientes apresentem variação ao longo do ano. Os ajustes realizados pelos autores apresentaram valores de coeficiente de determinação superiores a 0,80.

Ampratwum & Dorvlo (1999) obtiveram várias expressões que incluem as funções de regressão de Angström-Black do tipo linear, logarítmica, linearlogarítmica, quadrática e trigonométrica para estimar a densidade de fluxo de radiação (Qg) a partir do número de horas de brilho solar em uma região árida de Oman.

Diante do exposto, apesar de vários trabalhos já terem sido realizados nessa área, fica evidente que o estudo de captação e quantificação da energia solar é cada vez mais necessário. Desta forma, ajustar o modelo de Angstrom-Prescott em condições de distribuição diária e sazonal para a radiação solar global foi objetivo deste trabalho, trazendo informações importantes para o melhor aproveitamento da energia solar na cidade de Pedra Azul, norte de Minas Gerais.

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada para a cidade de Pedra Azul, localizada no extremo norte de Minas Gerais e identificada pelas coordenadas geográficas de 15°14' 40" Sul e 40° 13' 45" oeste, com altitude de 269 metros.

No processo de ajuste dos coeficientes da equação de Angstrom-Prescott, utilizaram-se valores de radiação solar global e insolação, cedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010), provenientes da estação convencional do respectivo município, com base de dados climáticas do período entre 1998 a 2008.

Para se obter a equação de Angstrom-Prescott, faz-se necessário conhecer valores da radiação incidente no topo da atmosfera e da radiação solar global. Segundo Vianello & Alves (2000), no estudo da quantificação da energia solar que chega até o nosso planeta, é importante conhecer-se a distância Terra-Sol (D) para um determinado dia do ano. Essa distância pode ser estimada em termos da distância média (\bar{D}) por meio da seguinte equação desenvolvida por Spencer (1971), *apud* Vianello & Alves (2000):

$$\frac{\bar{D}}{D}^2 = 1,00011 + 0,034221\cos X + 0,00128\sin X + 0,000719\cos 2X + 0,000077\sin 2X \quad (1)$$

Sendo X, expresso em radianos, dado como $X = 2\pi (DJ-1) / 365$, em que “DJ” é o número do dia do ano, Calcula-se em seguida a declinação solar (δ), que é o ângulo entre o raio vetor do astro e o plano equatorial celeste. Na estimativa da declinação solar, empregou a equação proposta por Spencer (1971):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos X + 0,070257 \sin X - 0,006758 \cos 2X + 0,000907 \sin 2X - 0,002697 \cos 3X + 0,001480 \sin 3X \quad (2)$$

Sendo δ expresso em radianos,

Com os dados da latitude do local (ϕ) e da declinação (δ), calculou-se o ângulo horário H:

$$H = \arccos - \text{Tg}(\phi), \text{Tg}(\delta) \quad (3)$$

Na determinação do fotoperíodo ou número máximo possível de horas de brilho solar, foi usada a equação 4, desprezando-se os efeitos da refração atmosférica:

$$N = \frac{2.H}{15} \quad (4)$$

De acordo com Vianello & Alves (2000), para o cálculo da radiação solar incidente no topo da atmosfera, pode-se utilizar a seguinte equação 5:

$$Q_o = 37,60 \cdot \left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2 \cdot (H \cdot \text{sen} N \phi \cdot \text{sen} \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} H) \quad (5)$$

De posse dos valores de Q_o , Q_g , n e N , e com o auxílio do software Estatística procedeu-se o ajuste dos coeficientes da equação de Angstrom, com periodicidade diária e sazonal. A equação de Angstrom-Prescott, analisada neste trabalho pode ser descrita como $Q_g = Q_o [a + b \cdot (n/N)]$.

Utilizou-se uma série de 11 anos de dados (1998 a 2008) para o cálculo dos parâmetros “a” e “b” da equação de Angstrom-Prescott, separando-os em partições diária e sazonal. Para a partição sazonal, separaram-se os dados por estação do ano, totalizando uma série de quatro estações por ano.

Após a separação dos dados, foram feitos os cálculos para a determinação dos parâmetros por meio de regressão linear simples, obtendo-se assim os coeficientes de determinação (R^2) para cada equação.

A avaliação da equação foi feita com base nos seguintes critérios estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RQMR) e coeficiente residual de massa (CRM), conforme descrito por Loague e Green (1991) e Xevi *et al*, (1996).

A raiz quadrada do erro médio (RQMR) permite que se verifique o erro obtido na estimativa dos valores observados.

$$RQMR = \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n_o \right]^{1/2} \quad (3)$$

O Coeficiente Residual de Massa (CRM) é menor ou igual a 1, com o valor zero indicando a condição ótima. O CRM representa a medida da tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores observados, Valores positivos indicam tendência à superestimação pelo modelo. A expressão matemática que descreve essa medida é:

$$\text{CRM} = \left[\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i - \sum_{i=1}^n y_i \right) / \sum_{i=1}^n y_i \right] \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, observa-se a distribuição dos valores da razão de radiação (Q_g/Q_0) e da razão de insolação (n/N) e a equação ajustada. Os coeficientes para a partição diária foram de 0,3251 e 0,2656 para os parâmetros “a” e “b”, respectivamente. No entanto, o ajuste com base em dados diários apresentou R^2 de 0,57, mostrando baixa relação entre a razão de radiação e a razão de insolação, ou seja, houve muita dispersão dos dados.

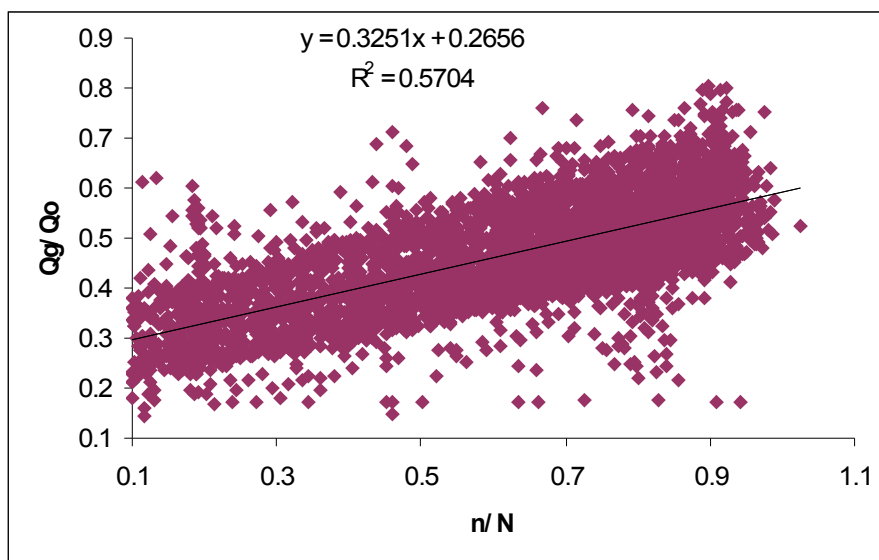
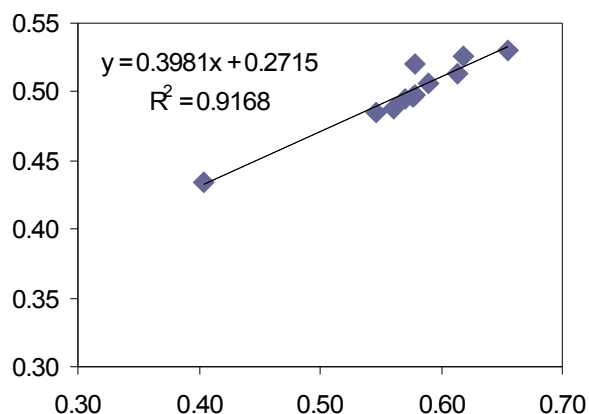


FIGURA 1: Regressão linear diária entre a razão de radiação Q_g/Q_0 e a razão de insolação n/N para o município de Pedra Azul, MG

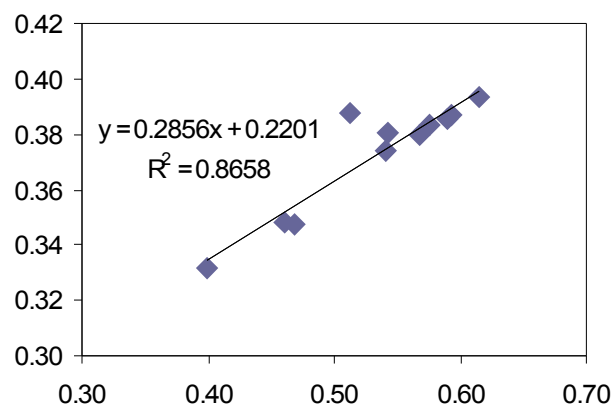
Os parâmetros “a” e “b” da equação de Angstrom-Prescott para as quatro estações do ano estão exibidas nas Figuras 4 e 5 abaixo. Estes coeficientes a e b representam o coeficiente angular e linear das equações das retas mostradas nas Figuras 4 e 5. Verificou-se que em todas as estações do ano o ajuste obteve R^2 superior a 0,86.

Observa-se que quando ocorre maior incidência de radiação solar o coeficiente angular da reta tende a aumentar, fato também constatado por Blanco e Sentelhas (2002). Portanto, quando “(n/N)” tende a um, situação de ausência total de nuvens ou máximo de horas de brilho solar, (Q_g/Q_o) tende à soma dos coeficientes “a” e “b”, obtendo-se a transmissividade máxima da radiação solar global.

Pôde-se notar que, de acordo com as médias sazonais, no período de 1998 a 2008 há uma predominância do brilho solar, nos meses de setembro a fevereiro, ou seja, da primavera ao verão, apesar de coincidir com a estação chuvosa.

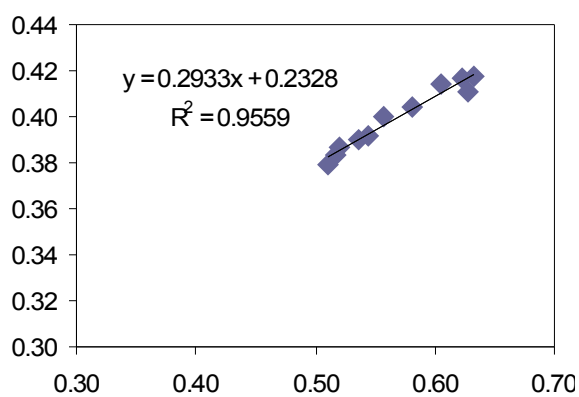


(2a)

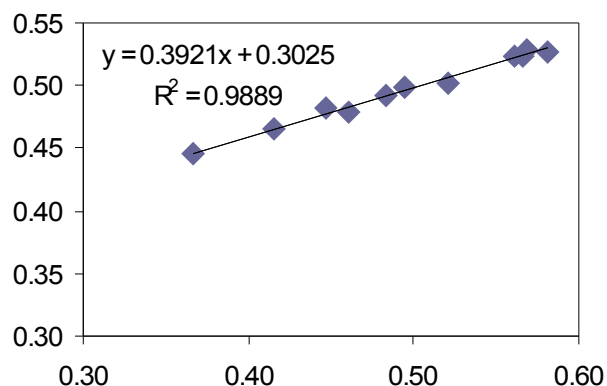


(2b)

FIGURAS 2a e 2b. Ajuste da equação de Angstrom com partição sazonal para o verão (2a) e para o outono (2b)



(3a)



(3b)

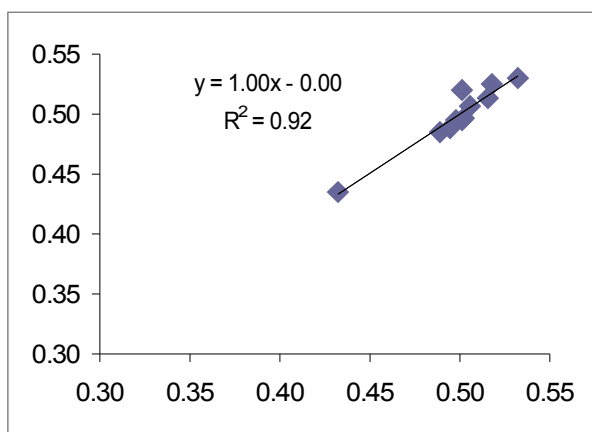
FIGURAS 3a e 3b. Ajuste da equação de Angstrom com partição sazonal para o inverno (3a) e para a primavera (3b)

Os resultados de RQMR, CRM e R^2 exibidos pela Tabela 1 permitem inferir que a equação de Angstrom-Prescott pode ser usada na estimativa da radiação solar global para a região de Pedra Azul, uma vez que os valores de RQMR e CRM são próximos do valor zero, enquanto o valor de R^2 foi superior a 0,85.

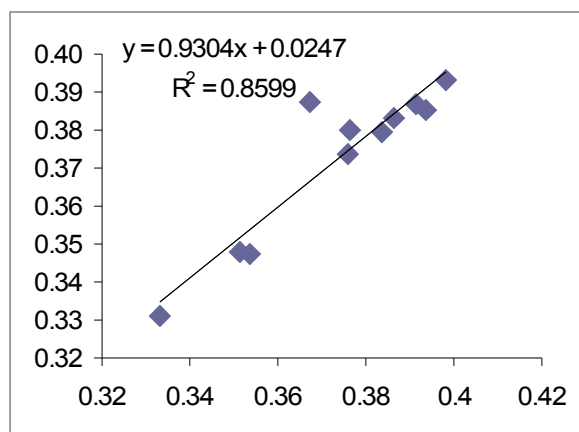
TABELA 1. Valores de RQMR, CRM e R^2 para os ajustes sazonais

Sazonal	RQMR	CRM	R^2
Verão	0,0240	-0,0003	0,92
Outono	0,0250	0,0035	0,86
Inverno	0,0132	0,0030	0,94
Primavera	0,0086	0,0001	0,99

A correlação entre os valores observados e simulados (preditos) são apresentadas nas Figuras 2 e 3 abaixo. Por estas Figuras é possível inferir que a houve um bom ajuste ($R^2 > 0,85$) dos dados experimentais ao modelo de Angstrom, para todas as estações do ano.

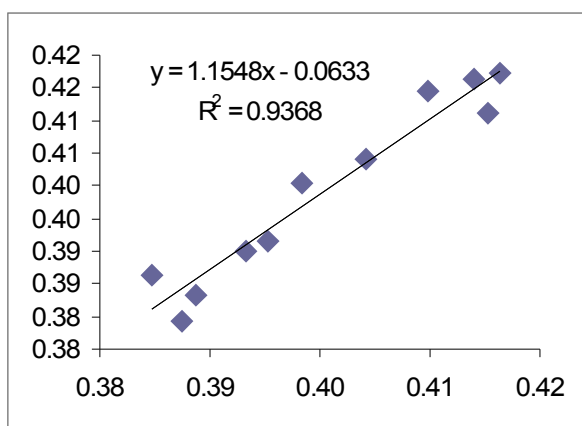


(4a)

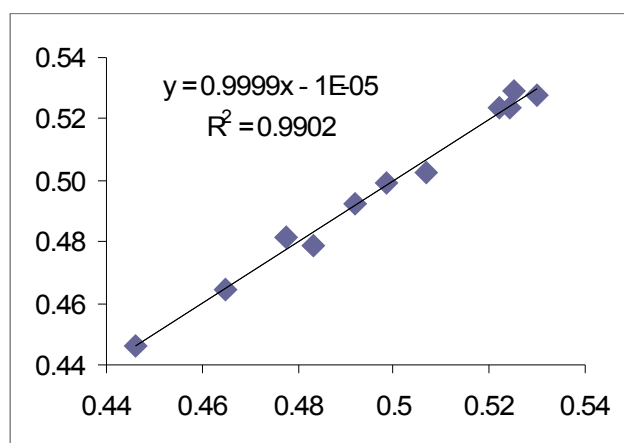


(4b)

FIGURAS 4a e 4b. Correlação entre os valores observados (eixo x) e os preditos ou simulados (eixo y) pelo modelo para o inverno (4a) e para a primavera (4b)



(5a)



(5b)

FIGURAS 5a e 5b. Correlação entre os valores observados (eixo x) e os preditos ou simulados (eixo y) pelo modelo para o inverno (5a) e para a primavera (5b)

O ajuste diário dos coeficientes a e b foram de 0,265 e 0,325, respectivamente. Os valores de radiação simulados com tais coeficientes permitiram

encontrar valores máximos e mínimos de radiação solar global de 22,15 e 8,78 MJ,m⁻²,d⁻¹, respectivamente; enquanto os reais valores máximos e mínimos medidos experimentalmente (observados) foram de 28,84 e 3,62 MJ,m⁻²,d⁻¹. Portanto, os coeficientes ajustados com dados diários amenizam a amplitude de radiação real de campo. Os valores de RQMR e CRM foram de 2,833 e 0,005 respectivamente, evidenciando um bom ajuste do modelo.

CONCLUSÕES

A quantidade de energia incidente sobre a cidade de Pedra Azul pode ser determinada com boa precisão por meio do modelo de Angstrom-Prescott, $Q_g/Q_o = 0,265 + 0,325.n/N$.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade dos dados climáticos utilizados na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPRATWUM, D.B.; DORVLO, A.S.S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**, v.63, p.161-167, 1999.

AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

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

CELIK, A.N.; YORUKOGLU, M. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. **Revista Energy Conversion and Management**, Turquia, v.47, p.2441-2450, 2006.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; SILVA, F.F.; TRINTINALHA, M. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Agronomy Maringá, v.26, n.3, p.329-336, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em: 11 de Julho de 2010.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Amsterdam, **Journal of contaminant Hydrology**, n.7, p.51-73, 1991.

MELANIA I, V.; REINALDO P. R. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de Cascavel – PR, **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v.25, n.1, p.76-85, jan./abr, 2005.

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

RIBEIRO, A.M.A. Estudo das relações entre radiação global (Qg) e razão de insolação (n/N), em algumas regiões do Brasil, Piracicaba, 1980. 88p. (Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1980.

STATSOFT, Statistica for windows V.5,5 Tulsa: Statsoft, 1996.

VIANELLO, R.L. ALVES, A.R.; **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 2000. 449p.

XEVI, E.; GILLEY, J.; FEYEN, J. Comparative study of two crop yield simulation models. **Agricultural Water Management**, v.30, p.155-173, 1996.