

MODELO DE TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA: UM ESTUDO DE CASO PARA O MUNICÍPIO DE PETROLINA-PE

Rochele Sheila VASCONCELOS¹
Geber Barbosa de Albuquerque MOURA¹
Fabrício Marcos Oliveira LOPES¹
Suzana Maria Gico Lima MONTENEGRO²

- RESUMO: Objetiva-se com este trabalho desenvolver e propor modelos estatísticos para a estimativa da transmissividade atmosférica sob condições de céu claro e parcialmente nublado para Petrolina-PE. Os novos modelos foram desenvolvidos por regressões linear simples e múltipla, com uma base de dados classificados em 9 dias de céu claro e 9 dias de céu parcialmente nublado com predominância para claro, do ano de 2010. As variáveis de entrada para obtenção dos modelos para o cálculo da transmissividade atmosférica foram: transmissividade atmosférica real, água precipitável, pressão atmosférica, ângulo zenital e turbidez atmosférica. O programa estatístico ESTATISTICA foi utilizado para obtenção dos modelos. Os dados meteorológicos: radiação solar global (Wm^{-2}), radiação direta (Wm^{-2}), pressão atmosférica (mb), umidade relativa (%) e temperatura do ar ($^{\circ}C$), foram utilizados para obtenção das variáveis de entrada dos modelos, obtidos a cada minuto na estação meteorológica de Petrolina-PE. O melhor modelo para o cálculo da transmissividade atmosférica variou conforme o dia em estudo. Para dias de céu claro ou com pouca interferência de nuvens, as menores diferenças média relativa foram obtidas com o modelo Reg.M2 de 1,92% e 2,91%, no entanto o modelo Reg.S3, em que o ângulo zenital é a única variável de entrada, passa a ser um modelo mais acessível para obtenção da transmissividade atmosférica em dias de céu claro, apresentando uma diferença média relativa de 6,45% e 5,26%. Para os dias com interferência de nuvens tanto o modelo Reg.M1 quanto o modelo obtido em Allen apresentaram as menores diferenças média relativa de 0,58% e 2,29% e 1,83% e 1,68%, respectivamente.
- PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar direta; turbidez atmosférica; projeto SONDA

1 Introdução

A radiação solar é a principal fonte de energia para diversos processos naturais que ocorrem na superfície terrestre, sendo que do total de energia radiante emitida pelo Sol, apenas uma pequena parte chega à superfície da Terra. A radiação solar quando penetra na

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Departamento de Engenharia Agrícola, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/nº, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil, E-mail: *rochelly17@hotmail.com*; *geber@depa.ufrpe.br*; *pabriciope@gmail.com*

² Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Departamento de Engenharia Civil, Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/nº, Cidade Universitária, CEP: 50141-530, Recife, PE, Brasil, E-mail: *suzana@ufpe.br*

atmosfera terrestre, sofre uma série de processos que a modificam, ou seja, parte da energia incidente é absorvida e outra é espalhada, ambas influenciando o espectro, modificando consideravelmente a energia espectral que passa através da atmosfera (GOMES, 2009). Tais fatores como as práticas agrícolas realizadas numa região, a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e outras formas de mudanças no uso da terra, impactam no aumento da absorção da radiação pela atmosfera e pelas nuvens, influenciando assim a transmissividade atmosférica daquela região.

A modelagem de sua propagação na atmosfera não é simples, devido à complexidade das interações combinadas com componentes atmosféricos tais como, gases, nuvens e aerossol, e à variabilidade espaço temporal deles (CEBALLOS, 2000).

A irradiação solar em uma superfície varia em função da variação anual da distância zenital e azimutal solar (variação sazonal) que ocorre devido à variação da declinação em função da inclinação do eixo de rotação da Terra ($23^{\circ} 27'$) em relação ao plano orbital da Terra ao redor do Sol, da variação da distância Terra-Sol (ROSA, 2007).

Vários tipos de radiações eletromagnéticas passam facilmente pela atmosfera, enquanto outras são impedidas de atravessá-la. A forma com que a atmosfera permite que a radiação a atravesse é conhecida como transmissividade, ela depende dos componentes da atmosfera e varia de acordo com o comprimento de onda (FERREIRA, 2006). A transmissividade atmosférica (τ) é obtida através da relação entre a radiação solar global incidente em superfície (R_g) e aquela no topo da atmosfera (R_o). A transmissividade expressa às condições atmosféricas em termos de cobertura de nuvens e presença de material particulado, como o vapor d'água e aerossóis de um modo geral, que são responsáveis por esses dois processos, o espalhamento e a absorção. A mesma é bastante utilizada em modelos que necessitam a quantificação da radiação solar incidente na superfície, pois não podemos desconsiderar a presença da atmosfera (GUIMARÃES, 2003).

Tem-se utilizado modelos existentes na literatura para obtenção da transmissividade atmosférica e calculados para qualquer região do Brasil sem nenhum ajuste para as condições locais e poucos trabalhos foram desenvolvidos com esse propósito. Devido à grande importância da transmissividade atmosférica na obtenção do saldo de radiação a superfície, torna-se necessário a definição de uma equação para estimativa da transmissividade atmosférica e validação de equações existentes para cada região do planeta.

Objetiva-se com esse trabalho desenvolver e propor modelos estatísticos para a estimativa da transmissividade atmosférica para condições de céu claro e parcialmente nublado para Petrolina-PE.

2 Material e métodos

2.1 Área de estudo

O Estado de Pernambuco localiza-se nas latitudes de $7^{\circ} 20'$ a $9^{\circ} 29'$ S e Longitudes de $34^{\circ} 30'$ a $41^{\circ} 21'$ W, limitado pelos estados de Alagoas (ao sul), Paraíba (ao norte), Ceará (ao oeste) e o Oceano Atlântico (ao leste). O Estado de Pernambuco é subdividido em cinco mesorregiões: Metropolitana do Recife, Zona da Mata, Agreste, Sertão e São Francisco. O estudo foi realizado no Município de Petrolina – PE, localizado entre as coordenadas $8^{\circ} 35' 13''$ e $9^{\circ} 28' 22''$ de latitude sul e $40^{\circ} 57' 20''$ e $40^{\circ} 12' 37''$ de

longitude oeste que se encontra inserido na região semiárida do Estado de Pernambuco (Figura 1).

O Município de Petrolina integra a mesorregião do Sertão do São Francisco, com extensão territorial total de aproximadamente, 4.756,0 km², o que representa, cerca de, 4,8% da extensão territorial do Estado de Pernambuco. No município encontra-se um grande polo agrícola (Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho), onde a fruticultura irrigada é o principal fator do desenvolvimento, e que, as maiores produções de fruteiras se encontra no mesmo, a qual coloca Pernambuco como um dos maiores produtores e exportadores de frutas do país.

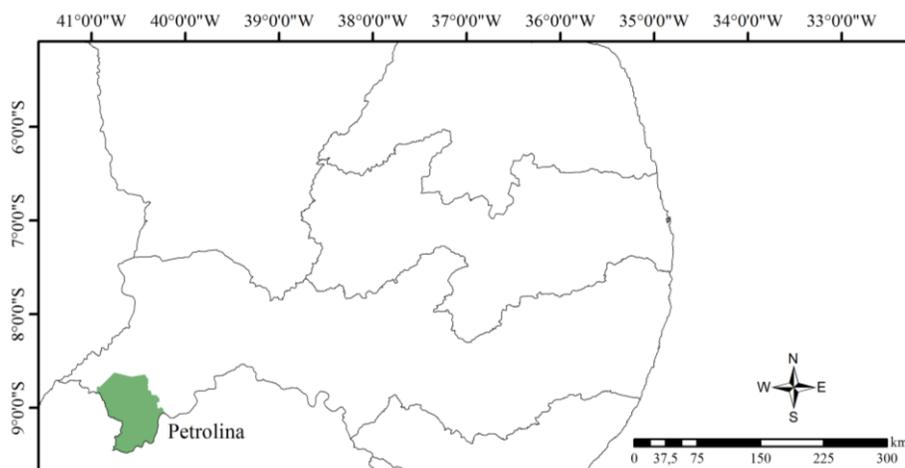


Figura 1 – Mapa de localização da cidade de Petrolina-PE.

2.2 Clima da região

Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima do tipo BSW^h, semiárido, e valores médios anuais das variáveis climatológicas: temperatura do ar de 26,5 °C, precipitação pluvial de 541,1 mm, umidade relativa do ar igual a 65,9%, evaporação do tanque classe "A" igual 2.500 mm ano⁻¹ e velocidade do vento de 2,3 m s⁻¹. A precipitação é irregularmente distribuída no espaço e no tempo, concentrando-se nos meses de dezembro a abril; a insolação anual é superior a 3.000 h (AZEVEDO *et al.*, 2003).

O Sertão Pernambucano apresenta, em sua maior área, faixas de precipitações entre 400 e 800 mm anuais, com os menores valores situados na mesorregião do São Francisco (POSSAS *et al.*, 2012).

2.3 Dados meteorológicos

Foram utilizados dados de radiação global (Wm⁻²), radiação direta (Wm⁻²), pressão atmosférica (mb), umidade relativa (%) e temperatura (°C), obtidos no site <http://sonda.ccst.inpe.br>, a cada minuto na estação de Petrolina-PE com as seguintes

coordenadas geográficas (9° 04' 08" S de latitude e 40° 19' 11" O de longitude) e altitude de 387 m (Figura 2).

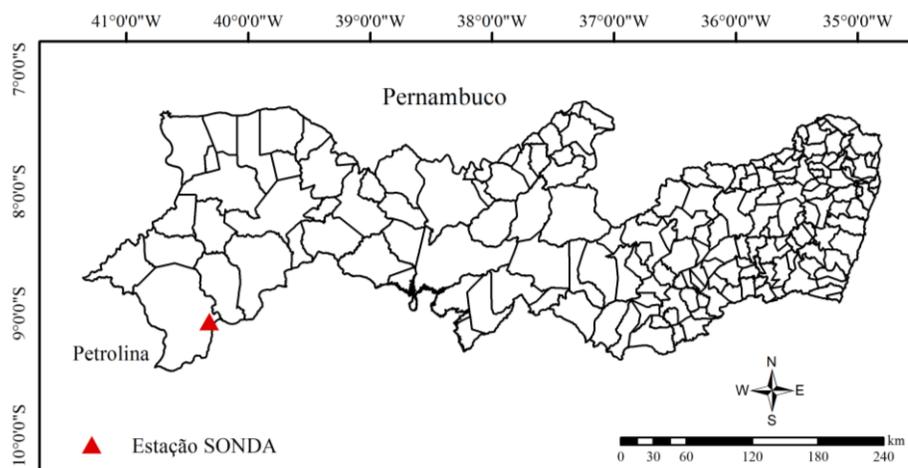


Figura 2 - Localização da estação Sonda-Petrolina.

Para aquisição dos dados de radiação solar global foi utilizado o piranômetro CM 21 (Kipp & Zonen), na faixa espectral de 0,3 µm a 2,8 µm. Sensor de temperatura e umidade do ar modelo 41372 (R. M. Young Company) - Aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar. Sensor de pressão barométrica PTB101 (Vaisala) - Aquisição de dados de pressão na faixa de 600 mb a 1060 mb, utilizando um sensor capacitivo (CECONI *et al.*, 2010).

2.4 Estimativa da cobertura do céu

O estudo foi realizado sob condições de céu claro e parcialmente nublado, sendo definido por meio do índice de claridade (Kt), onde o mesmo é representado pela razão entre a radiação solar incidente (R_g) (MJ m⁻² dia⁻¹) e a irradiação no topo da atmosfera (R_o) (MJ m⁻² dia⁻¹), equação (1) (RENSHENG *et al.* 2004; QUERINO *et al.*, 2011). Este índice irá variar de acordo com a quantidade de nuvens e aerossóis na atmosfera, e com isso haverá um aumento ou uma redução das componentes direta ou difusa, da radiação solar que atinge a superfície, possibilitando a classificação do céu quanto a sua nebulosidade (MARTINS *et al.*, 2014).

$$Kt = \frac{R_g}{R_o} \tag{1}$$

A classificação da cobertura do céu foi baseada no trabalho de Teramoto e Escobedo (2012) que, Kt ≤ 0,35 é definido como céu nublado, entre 0,35 < Kt ≤ 0,55 como céu parcialmente nebuloso, 0,55 < Kt ≤ 0,65 como céu parcialmente nebuloso com predominância para claro e Kt > 0,65 como céu claro.

Para estimativa da irradiação no topo da atmosfera (R_o), utilizou-se a expressão obtida em Iqbal (1983) que é calculada em função da constante solar ($S_o = 1367 \text{ Wm}^{-2}$), raio vetor da órbita terrestre (d_r) (equação 3), latitude local (φ), declinação solar (δ) e ângulo zenital (θ) (equação 2), dadas por

$$R_o = S_o \times \text{Cos}\theta \times d_r \quad (2)$$

em que

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi \times d_j}{365}\right) \quad (3)$$

em que d_j corresponde ao dia Juliano.

Para o ângulo zenital solar (θ) utilizou-se a equação (4):

$$\text{cos}\theta = \text{sen}\varphi \times \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \times \text{cos}\delta \times \text{cosh} \quad (4)$$

em que φ é a latitude do local, δ é a declinação solar obtida conforme a equação (5) (IQBAL,1983) e h é o ângulo horário correspondente ao instante em questão, determinado em função da hora solar ($h > 0$ para o período da manhã e $h < 0$ para o período da tarde) (equação 6):

$$\delta = 23,45 \text{sen}\left[\frac{360}{365}(284 + d_j)\right] \quad (5)$$

$$h = (\text{hora} - 12) \times 15^\circ \quad (6)$$

2.5 Transmissividade atmosférica

Foi utilizado o modelo proposto por Majumdar *et al.* (1972) e Boes (1981), apresentados por Allen (1996) e a transmissividade atmosférica real a fim de comparar com os novos modelos de transmissividade desenvolvidos para a região de estudo conforme descritos abaixo.

2.5.1 Novos modelos de transmissividade atmosférica

Os novos modelos foram desenvolvidos por regressão linear simples e múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados para obtenção dos parâmetros das equações, com uma base de dados classificados em 9 dias de céu claro e 9 dias de céu parcialmente nebuloso com predominância para claro, do ano de 2010, classificados de acordo com Teramoto e Escobedo (2012). Foram utilizados dados de transmissividade atmosférica real, água precipitável, pressão atmosférica, ângulo zenital e turbidez atmosférica, conforme descritos abaixo, utilizando-se o programa estatístico ESTATISTICA 12 (STATSOFT, INC., 2013) para obtenção dos modelos.

1. Modelo de regressão linear simples:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

em que Y_i é a variável explicada (dependente) (transmitância atmosférica); α e β parâmetros do modelo e X_i é a variável explicativa (independente) (ângulo zenital), e ε_i é a variável que inclui todos os fatores residuais mais os possíveis erros de medição.

2. Modelo de regressão linear múltiplo:

$$Y_i = X_0 + \sum_{i=1}^n X_i VM + \varepsilon_i \quad (8)$$

em que Y_i é a variável explicada (dependente) (transmitância atmosférica); $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$ são parâmetros do modelo; VM são as variáveis meteorológicas e ε_i é o erro associado a i -ésima observação com parâmetros $(0, \sigma^2)$.

2.5.1.1 Dados de entrada dos modelos

A água precipitável em (mm), foi calculada de acordo com a equação (9) proposta por Garrison e Adler (1990) é o ângulo zenital solar (θ) foi obtido de acordo com a equação (4) dada por

$$W = 0,14 \times e_a \times P + 2,1, \quad (9)$$

em que W é a água precipitável (mm), P é a pressão atmosférica (Kpa), obtida conforme a equação (10) (ASCE-EWRI, 2005) e e_a é a pressão real do vapor (Kpa) obtida de acordo com a equação (11) dada por

$$P = 101,3 \times \left(\frac{T_a - 0,0065 \times z}{T_a} \right)^{5,26}, \quad (10)$$

em que T_a é a temperatura do ar, em Kelvin e z é a altitude em metros.

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (11)$$

em que e_s é pressão de saturação do vapor (Kpa) obtida pela equação (12) dada por

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}\right), \quad (12)$$

em que T é a temperatura do ar em ($^{\circ}\text{C}$).

A turbidez atmosférica foi obtida conforme a metodologia proposta por Louche *et al.* (1987).

A transmissividade atmosférica real foi calculada conforme a equação (13), segundo Iqbal (1983) dada por

$$\tau_{real} = \frac{R_g}{S_o \times \cos\theta \times d_r}, \quad (13)$$

em que R_g é a radiação global obtida na estação meteorológica (W m^{-2}), S_o é a constante solar (1367 W m^{-2}), θ é o ângulo zenital solar calculado de acordo com a equação (4), d_r é o inverso do quadrado da distância relativa terra-sol, obtida segundo equação (3).

A pressão atmosférica utilizada como dado de entrada para obtenção dos modelos de transmissividade atmosférica foi obtida na estação meteorológica em mb.

2.5.2 Transmissividade atmosférica – Majumdar *et al.* (1972) e Boes (1981)

A Transmissividade atmosférica, segundo Majumdar *et al.* (1972) e Boes (1981), apresentado por Allen (1996) para condições de céu claro é dada pela equação (15)

$$\tau = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos\theta} - 0,075 \times \left(\frac{W}{\cos\theta} \right)^{0,4} \right], \quad (15)$$

em que θ_{hor} é o ângulo zenital solar (equação 4); P é a pressão atmosférica média em kPa; k_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo $k_t = 1$ para céu claro e $k_t = 0,5$ para turbidez extrema (Allen, 1996); W é a água precipitável (mm), calculada de acordo com a equação (9).

2.6 Análise estatística

A avaliação da precisão das estimativas foi pelas seguintes estatísticas: diferença média absoluta (DMA), da diferença média relativa (DMR %) e a raiz da diferença quadrática média (RDQM), obtidas pelas equações 16, 17 e 18, apresentadas a seguir.

$$DMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X'_i - X_i| \quad (16)$$

$$DMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X'_i - X_i}{X_i} \right| \quad (17)$$

$$RDQM = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X'_i - X_i)^2}{N} \right)^{1/2} \quad (18)$$

em que X_i corresponde ao valor de transmissividade atmosférica real (obtida a partir de dados medidos na estação meteorológica); X_i' corresponde ao valor de transmissividade atmosférica estimada pelos modelos e N corresponde ao número de pares de dados de transmissividade atmosférica.

A RDQM avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e os valores estimados (BINOTI *et al.*, 2015).

Para verificar o desempenho dos modelos foi realizado o cálculo do coeficiente de Pearson, r ($p < 0,05$) que mede o grau da correlação e a direção dessa correlação, se positiva ou negativa entre duas variáveis de escala métrica. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1.

Foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos para correlacionar os valores estimados com os medidos: exatidão - índice de Willmott " d "; e de confiança ou desempenho " c ".

A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, é dada estatisticamente pelo índice de concordância " d " proposto por Willmott *et al.* (1985). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pela equação

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right], \quad (19)$$

em que P_i é o valor estimado; O_i é o valor observado e O é a média dos valores observados.

O índice de desempenho " c " avalia o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da transmissividade atmosférica. Este índice reúne os índices de precisão, dado pelo coeficiente de correlação (r) que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório e o de concordância " d ". O índice " c " é calculado conforme a equação

$$c = r \times d. \quad (20)$$

Camargo e Sentelhas (1997) propuseram um critério para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice c , apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do desempenho dos métodos de estimativa da transmissividade atmosférica pelo índice c

Valores de c	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

3 Resultados e discussão

Na Tabela 2 são apresentados os modelos de regressão linear simples e múltipla de transmissividade atmosférica. Os modelos apresentaram-se significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). O modelo Reg.M1 obteve o maior valor do coeficiente de determinação (R^2) de 86%, e o menor valor foi obtido com o modelo Reg.S3 com R^2 de 79%. Todos os coeficientes apresentaram-se significativos ao nível de 5% de probabilidade para os três modelos testados.

Tabela 2 - Descrição dos modelos de transmissividade atmosférica

	Modelos	R^2
Reg.M1	$\tau = 3,631724 + 0,430556 \times \cos \theta - 0,003270 \times P$ $+ 0,003925 \times W - 0,043758 \times TL$	0,861
Reg.M2	$\tau = 0,510067 + 0,405415 \times \cos \theta - 0,032072 \times TL$	0,849
Reg. S3	$\tau = 0,395913 + 0,350906 \times \cos \theta$	0,793

$\cos \theta$ - ângulo zenital solar (radianos), P- Pressão (milibares), W- Água precipitável (milímetros), TL- Turbidez (adimensional).

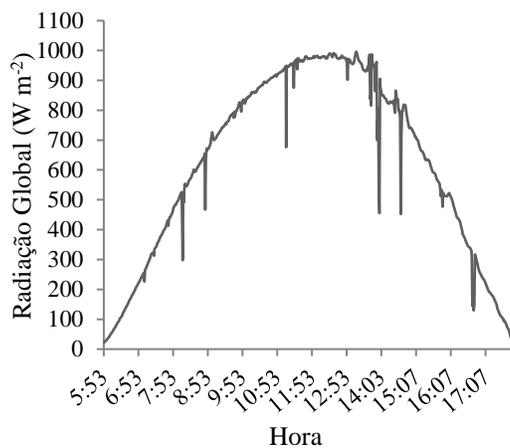
Os modelos Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3 obtiveram as seguintes correlações (r): 0,9276, 0,9216 e 0,8909, respectivamente. Na Tabela 3 estão descritos os índices de exatidão (d) conforme proposto por Camargo e Sentelhas (1997) e os de confiança ou desempenho (c) para cada modelo estatístico e para os dias em estudo. Verifica-se que todos os modelos obtiveram desempenho ótimo para todos os dias analisados.

Nos dias 04/01/2014 e 09/01/2014 foram observados interferência de nuvens, devido a queda da radiação global em determinadas horas do dia (Figura 2A e 2B). O dia 27/05/2014, apresentou pouca interferencia de nuvens no período de 14 as 16 horas (Figura 1C) e o dia 28/05/2014, correspondeu a um dia de céu claro (Figura 1D). Esses dias foram selecionados para testar os novos modelos de transmissividade, juntamente com o modelo obtido em Allen (1996). A seguir, seguem os gráficos de radiação solar global ($W m^{-2}$) dos respectivos dias em estudo.

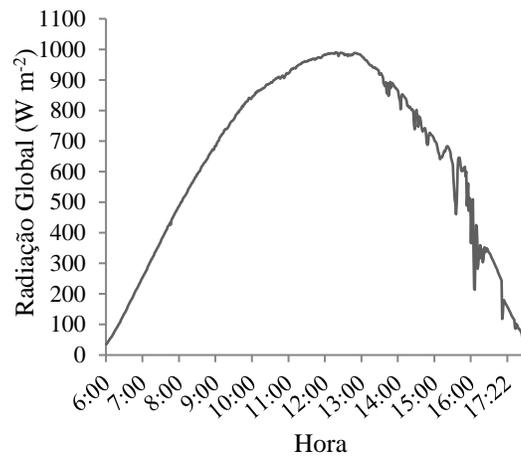
Tabela 3 - Índice de exatidão (d), índice de confiança ou desempenho (c) e classe de desempenho para os modelos Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3, para os dias em estudo

Data	Modelo	D	c	Classe de desempenho
04/01/2014	Reg.M1	0,9999	0,9277	Ótimo
09/01/2014		0,9999	0,9276	Ótimo
27/05/2014		0,9997	0,9975	Ótimo
28/05/2014		0,9984	0,9262	Ótimo
04/01/2014	Reg.M2	0,9994	0,9211	Ótimo
09/01/2014		0,9997	0,9214	Ótimo
27/05/2014		0,9999	0,9215	Ótimo
28/05/2014		0,9998	0,9214	Ótimo
04/01/2014	Reg. S3	0,9964	0,8064	Ótimo
09/01/2014		0,9967	0,8067	Ótimo
27/05/2014		0,9989	0,8085	Ótimo
28/05/2014		0,9993	0,8088	Ótimo

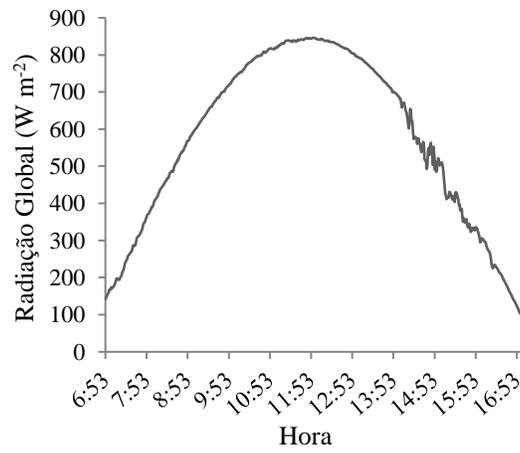
(A)



(B)



(C)



(D)

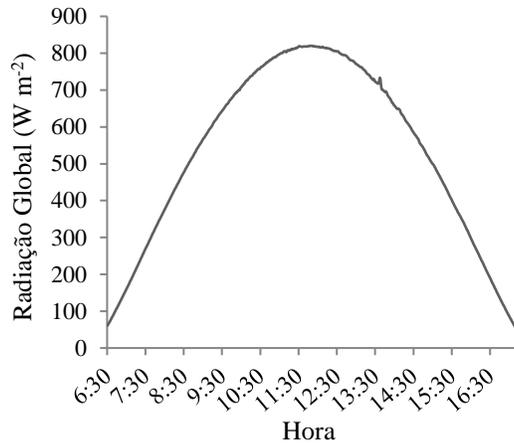


Figura 3 - Comportamento da radiação global (Wm^{-2}) a cada minuto para Petrolina para os dias em estudo; (A) 04/01/2014, (B) 09/01/2014, (C) 27/05/2014 e (D) 28/05/2014.

Na tabela 4 constam os valores da transmissividade atmosférica obtidos pelos modelos (Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3) juntamente com o modelo obtido em Allen (1996), comparado aos valores de transmissividade atmosférica real, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM).

Para o dia 04/01/2014 a menor diferença média relativa (DMR) de 0,58% foi observado com o modelo Reg.M1 e a maior diferença de 11,38% com o modelo Reg.S3. Para o dia 09/01/2014 o modelo obtido em Allen (1996) apresentou a menor diferença média relativa de 1,68%, aproximando-se da diferença obtida com o modelo Reg.M1, de 1,83% e a maior diferença média relativa foi obtida com o modelo Reg.S3, de 10,89%.

No entanto, considerando a diferença média percentual para os dias de céu claro ou com pouca interferência de nuvens, o modelo Reg.M2 apresentou as menores diferenças, de 1,92% para o dia 27/05/2014 e 2,91% para o dia 28/05/2014. Para o dia 27/05/2009 a maior diferença média relativa foi observada com o modelo obtido em Allen (1996) e para o dia 28/05/2009 a maior diferença média relativa foi obtido com o modelo Reg.M1. De acordo com Echer *et al.* (2001), a radiação solar em condição de céu claro é pouco atenuada quando comparada com condições de céu encoberto (parcialmente ou totalmente). Percebe-se que para o dia com maior nebulosidade o modelo que melhor respondeu foi Reg.M1, que contém as variáveis pressão, água precipitável, ângulo zenital e turbidez.

A turbidez atmosférica impacta na transmissividade, devido à presença de aerossóis, sendo que esses possuem a função de absorver ou refletir a radiação solar, influenciando na transparência da atmosfera quanto à radiação solar.

Portanto o melhor modelo a ser utilizado para o cálculo da transmissividade atmosférica varia conforme o dia em estudo. Pode-se observar que em dias de céu claro a transmissividade atmosférica para a região em estudo é mais afetada em função do ângulo zenital e da turbidez atmosférica. Segundo Djafer e Irbah (2013), a turbidez atmosférica expressa a atenuação da radiação solar que atinge a superfície da Terra, sob o céu sem

nuvens e descreve a espessura óptica da atmosfera. Em dias de céu nublado ou parcialmente nublado, o modelo obtido em Allen (1996) e Reg.M1 foram os que melhor representaram essas condições, pois ambos possuem as mesmas variáveis de entrada (ângulo zenital, pressão atmosférica, água precipitável e turbidez atmosférica).

Tabela 4 - Valores da transmissividade real (τ_{real}) e da transmissividade obtidos pelos modelos: Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3 e obtido em Allen (1996) com suas respectivas diferença média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os dias estudados

Data	τ_{real}	τ_{Allen} (1996)	DMA	DMR (%)	RDQM
04/01/2014	0,697	0,681	0,02	2,29	0,43
09/01/2014	0,702	0,689	0,01	1,68	0,31
27/05/2014	0,649	0,697	0,04	7,44	1,20
28/05/2014	0,634	0,675	0,04	6,54	1,06
Data	τ_{real}	$\tau_{Reg. M1}$	DMA	DMR (%)	RDQM
04/01/2014	0,697	0,693	0,004	0,58	0,11
09/01/2014	0,702	0,714	0,01	1,83	0,34
27/05/2014	0,649	0,670	0,02	3,27	0,53
28/05/2014	0,634	0,686	0,05	8,26	1,33
Data	τ_{real}	$\tau_{Reg.M2}$	DMA	DMR (%)	RDQM
04/01/2014	0,697	0,664	0,03	4,78	0,89
09/01/2014	0,702	0,679	0,02	3,14	0,58
27/05/2014	0,649	0,661	0,01	1,92	0,31
28/05/2014	0,634	0,601	0,01	2,91	0,47
Data	τ_{real}	$\tau_{Reg.S3}$	DMA	DMR (%)	RDQM
04/01/2014	0,697	0,618	0,08	11,38	2,11
09/01/2014	0,702	0,625	0,07	10,89	2,01
27/05/2014	0,649	0,607	0,04	6,45	1,04
28/05/2014	0,634	0,601	0,03	5,26	0,85

Na Figura 4 observa-se a transmissividade observada em relação as transmissividade calculada pelos modelos Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3, no qual apresentam-se bastante semelhantes, apresentando comportamento exponencial, devido ao caminho óptico no nascer e pôr-do-sol ser maior e por tanto apresentar transmissividade pequena, percebe-se na Figura 4 que a transmissividade menor que 0,55 tem um comportamento, enquanto que acima desse valor observa-se um comportamento linear, aproximando-se da linha $y=x(1:1)$.

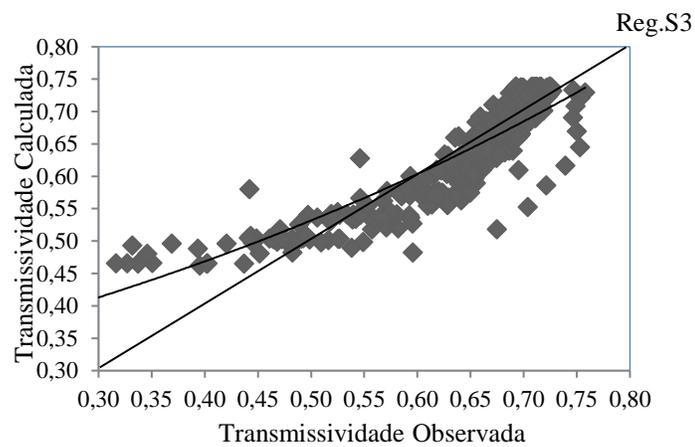
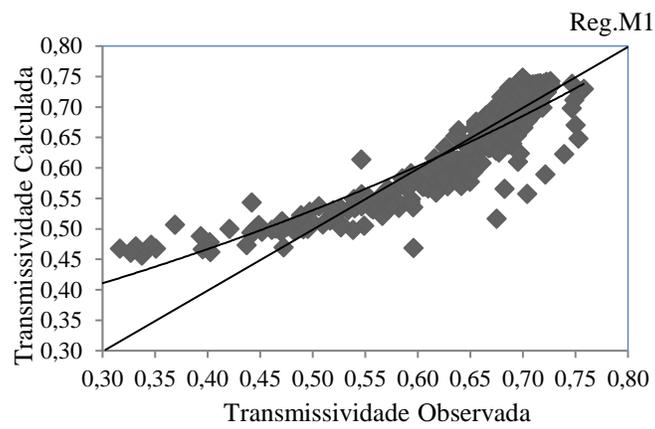
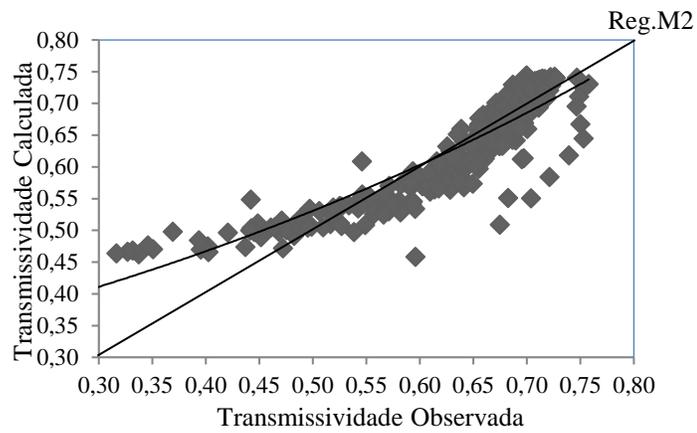


Figura 4 - Transmissividade observada em relação as transmissividade calculada pelos modelos Reg.M1, Reg.M2 e Reg.S3.

A transmissividade atmosférica obtida como o modelo obtido Reg.M1 se aproximou mais da transmissividade atmosférica real em relação aos outros modelos, para os dias em que houve grande interferência de nuvens, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5. Os demais modelos Reg.M2 e Reg.S3 seguem comportamento semelhantes, no qual se aproximam mais da transmissividade atmosférica real para dias de céu claro ou com baixa interferência de nuvens (Figuras 6 e 7).

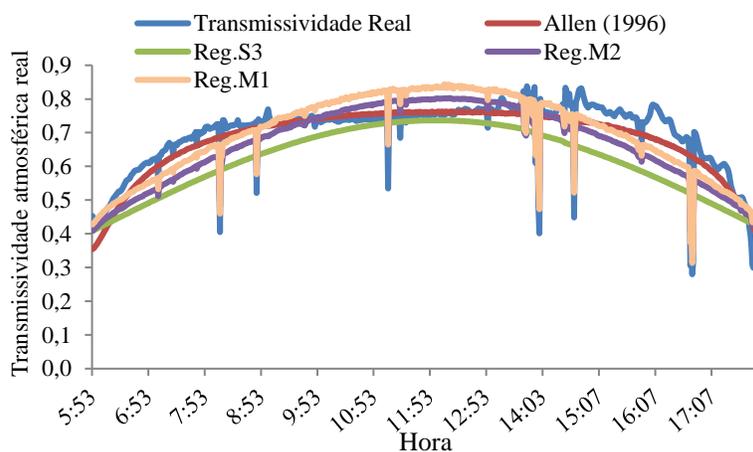


Figura 5 - Comparação entre a transmissividade atmosférica real com a transmissividade obtidas pelos modelos: modelo obtido em Allen (1996), modelo Reg.M1, modelo Reg.M2 e modelo Reg.S3, para o dia 04/01/2014.

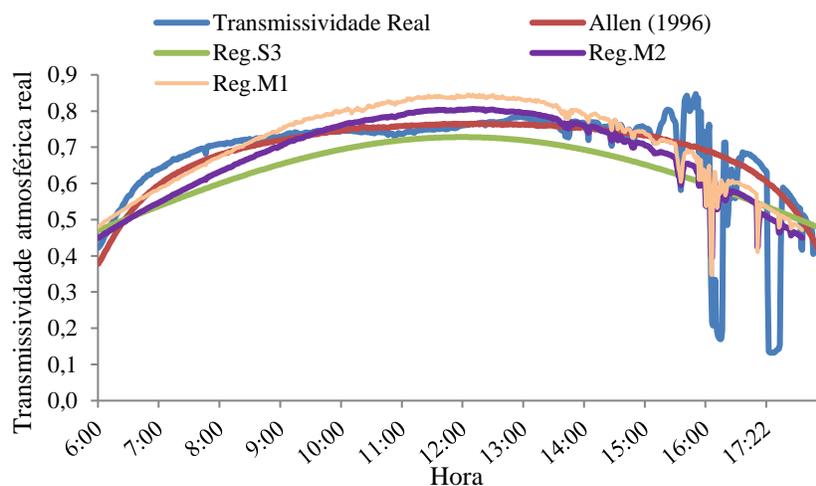


Figura 6 - Comparação entre a transmissividade atmosférica real com a transmissividade obtidas pelos modelos: modelo obtido em Allen (1996), modelo Reg.M1, modelo Reg.M2 e modelo Reg.S3, para o dia 09/01/2014.

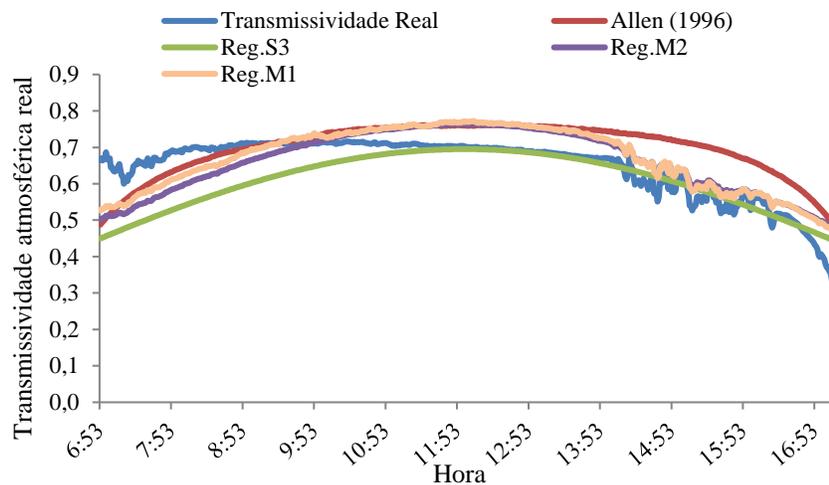


Figura 7 - Comparação entre a transmissividade atmosférica real com a transmissividade obtidas pelos modelos: modelo obtido em Allen (1996), modelo Reg.M1, modelo Reg.M2 e modelo Reg.S3, para o dia 27/05/2014.

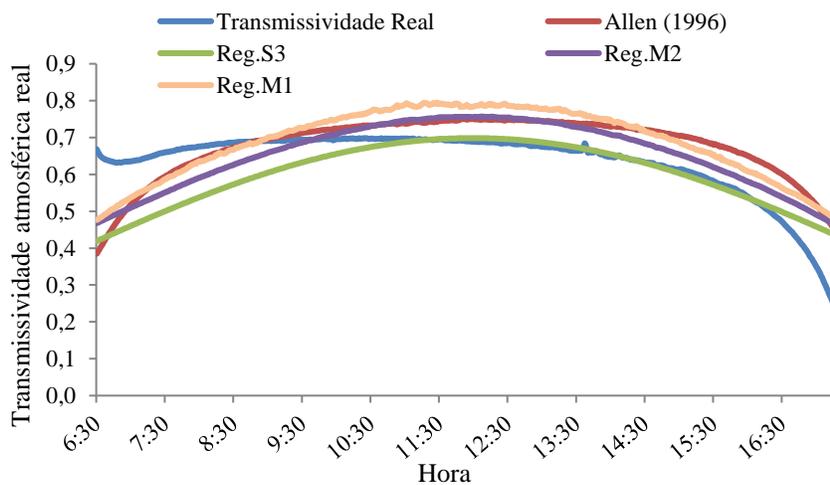


Figura 8 - Comparação entre a transmissividade atmosférica real com a transmissividade obtidas pelos modelos: modelo obtido em Allen (1996), modelo Reg.M1, modelo Reg.M2 e modelo Reg.S3, para o dia 28/05/2014.

Segundo Menezes e Dantas (2002), as nuvens reduzem a quantidade de energia solar absorvida no sistema Terra-Atmosfera, tendo em vista que a refletividade das mesmas é bem maior do que a refletividade da atmosfera sem nuvens e com isso há uma maior ou menor transmissão radiativa.

Como em uma reação em cadeia, quando ocorre alteração intensa na composição atmosférica, as propriedades óticas da atmosfera sofrem variações e, conseqüentemente, alteram a quantidade de radiação solar incidente.

Conclusões

O melhor modelo a ser utilizado para o cálculo da transmissividade atmosférica varia conforme as condições atmosféricas do dia, ou seja, para dias de céu claro ou com pouca interferência de nuvens os menores erros foram obtidos com o modelo Reg.M2, no entanto o modelo Reg.S3, onde o ângulo zenital é a única variável de entrada, passa a ser um modelo mais acessível para obtenção da transmissividade atmosférica em dias de céu claro; para dias com interferência de nuvens tanto o modelo Reg.M1 quando o modelo obtido em Allen (1996) apresentaram os menores erros.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor; ao projeto Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) pela disponibilidade dos dados meteorológicos.

VASCONCELOS, R. S.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O. Transmissivity atmospheric models for Sertão Pernambucano. *Rev. Bras. Biom.* Lavras, v.35, n.4, p.765-784, 2017.

- *ABSTRACT: The aim of this study was to develop and propose statistical models to estimate atmospheric transmissivity under conditions of clear and partly cloudy sky in the city of Petrolina, PE, Brazil. The new models were developed for simple and multiple linear regressions, with a database classified into nine days of clear skies and 9 days of partly cloudy sky, predominantly clear sky, in 2010. The input variables to fit the models for calculating the atmospheric transmissivity were actual atmospheric transmissivity, precipitable water, atmospheric pressure, zenith angle and atmospheric turbidity. The statistical software STATISTICA was used to fit the models. The meteorological data: solar radiation ($W m^2$), direct radiation ($W m^2$), atmospheric pressure (mb), relative humidity (%) and air temperature ($^{\circ} C$) were used as input variables of the models, obtained by the minute on weather station Petrolina. The best model for the calculation of atmospheric transmissivity varied by day study. For a clear day or low cloud interference, the lowest average relative differences were obtained with the Reg.M2 model of 1.92% and 2.91%, however the Reg.S3 model, where the zenith angle is the only input variable, becomes a more affordable model to find the atmospheric transmissivity on a clear day, with an average of 6.45% on difference and 5.26%. For days with clouds interference Reg.M1 both the model and the model obtained in Allen had the lowest average difference relative 0.58% and 2.29% and 1.83% and 1.68%, respectively.*
- *KEYWORDS: Direct solar radiation; atmospheric turbidity; project SONDA.*

Referências

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, p.97-106, 1996.

ASCE-EWRI. *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE, 2005.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.1, n.58, p. 241-254, 2003.

BINOTI, M. L. M. S. *et al.* Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando redes neurais artificiais. *Revista Cerne*, v.21, n.1, p.97-105, 2015.

BOES, E. C. Fundamentals of solar radiation. In KREIDER, J. F. and KREITH, F. (Ed.) *Solar Energy Handbook*. New York: McGraw-Hill, v.2, n.1, p.2-78, 1981.

CEBALLOS, J. C. Estimativa de Radiação solar à superfície com céu claro: Um modelo simplificado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.15, n.1, p.113-122, 2000.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CECONI, M.; SCHUCH, N. J.; FAVERA, A. C.; LUIZ, W. E.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E.B. Modelagem numérica da irradiação solar como método alternativo na avaliação do potencial energético disponível. *Revista Geográfica Acadêmica*, v.4, n.2, p.41-52, 2010.

DJAFER, D.; IRBAH, A. Estimation of atmospheric turbidity over Ghardaïa city. *Atmospheric Research*, v.128, p.76-84, 2013.

ECHER, E.; SOUSA M. P.; SCHUCH, N. J. The beer's law applied to the earth's atmosphere. *Revista Brasileira de Física*, v.23, n.3, p.276-283, 2001.

FERREIRA, A. G. *Meteorologia Prática*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p.188.

GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, v.44, p.225-241, 1990.

GOMES, H. E. *Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais*. 2009. 125f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2009.

GUIMARÃES, A. P. C. *Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre*. 2003.162f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2003.

IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. London: Academic Press, 1983. 390p.

LOUCHE A.; MAUREL, M.; SIMONNOT, G.; PERI, G.; IQBAL, M. Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct total irradiance measurements. *Solar Energy*, v.38, n.2, p.89-96, 1987.

MAJUMDAR, N. C.; MATHUR, B. L.; KAUSHIK, S. B. Prediction of direct solar radiation for low atmospheric turbidity. *Solar Energy*, v.13, p.383-394, 1972.

MARTINS, P. A. S.; QUERINO, C. A. S.; PAVÃO, V. M.; QUERINO, J. K. A. S.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-AM. *Revista EDUCamazônia*, v.12, n.1, p.86-98, 2014.

MENEZES, H. E. A.; DANTAS, R. T. Ajuste de funções para estimativa da irradiação solar difusa em Cajazeiras - PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz do Iguaçu - PR. *Anais...* Foz do Iguaçu, 2002. P. 2284-2289.

RENSHENG, C.; ERSI, K.; JIANPING, Y.; SHIHUA, Z. W.; YONGJIAN, D. Estimation of Horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China. *Renewable Energy*, v.29, p.717-726, 2004.

POSSAS, J. M. C.; CORREA, M. M.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; CALDAS, A. M.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhão-mansão no Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.9, p.993-998, 2012.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C.; MARQUES FILHO, A. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (KT), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.26, n.2, p.204-294, 2011.

ROSA, R. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. 6.ed. Uberlândia: EDUFU, 2007. 248p.

STATSOFT, INC. *Programa computacional Statistica 12*. E.A.U. 2013. Disponível em: <<http://www.statsoft.com/Company/About-Us/History>>.

TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.9, p.985-992, 2012.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATE, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v.90, p.8995-9005, 1985.

Recebido em 09.04.2016

Aprovado após revisão em 30.12.2016