

TRANSMISSIVIDADE E ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA E ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR À SUPERFÍCIE EM CAJAZEIRAS-PB

Hudson Ellen Alencar Menezes

Doutorando em Meteorologia, UFCG, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, e-mail: hudsonellen@bol.com.br

Renilson Targino Dantas

Prof. Titular, UFCG, Unidade Acadêmica de Ciências atmosféricas do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, e-mail: renilson@dca.ufcg.edu.br

Lindenberg Lucena da Silva

Mestrando em Meteorologia, UFCG, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, e-mail: loubeg@bol.com.br

Rodrigo Cézar Limeira

Mestrando em Meteorologia, UFCG, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, e-mail: rodrigocezarlimeira@yahoo.com.br

Resumo - Este trabalho teve o objetivo de encontrar as melhores equações para estimativa das irradiações solar global e difusa à superfície e determinar a transmissividade e atenuação atmosférica em Cajazeiras - PB. Neste sentido foram utilizados dados da estação solarimétrica deste local, pertencentes à Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande no período compreendido entre junho de 1976 e dezembro de 1994. Na estimativa da irradiação solar global à superfície em Cajazeiras - PB, a equação de regressão mais recomendada é a polinomial para os dias de céu claro a parcialmente nublado, e a equação exponencial para dias de céu parcialmente nublado a nublado, assim como, a função polinomial foi a que melhor se ajustou aos dados de irradiação solar difusa. A transmissividade atmosférica foi sempre crescente no período de julho a novembro independente das condições atmosféricas, e com relação a atenuação atmosférica, a mesma foi máxima (62,2%) em junho, e sempre superior a 50% em dias parcialmente nublado a nublado, independente da época do ano.

Palavras-Chave: Nebulosidade, Correlações, Razão de Insolação.

TRANSMISSIVITY AND REDUCTION ATMOSPHERIC AND ESTIMATE OF THE SOLAR IRRADIATION TO THE SURFACE IN CAJAZEIRAS-PB

Abstract - This work had the objective of to find the best equations for estimate of the global and diffuse solar irradiances to the surface and to determine the transmissivity and atmospheric attenuation in Cajazeiras - PB. In this sense data of the station solarimetric of this place were used, belonging to the Academic United of Atmospheric Sciences of the Center of Technology and Natural Resources of the Federal University of Campina Grande in the period understood between June of 1976 and December of 1994. In the estimate of the global solar irradiation to the surface in Cajazeiras - PB, the regression equation more recommended it is the polinomial for the days of clear sky the partially cloudy, and the exponential equation for days of sky partially cloudy the cloudy, as well as, the function polinomial was the one that better it was adjusted to the data of diffuse solar irradiation. The atmospheric transmissivity was always growing in the period of July to independent November of the atmospheric conditions, and with relationship the atmospheric attenuation, the same was maximum (62,2%) in June, and always superior to 50% in days partially cloudy the cloudy, independent of the time of the year.

Keywords: Cloudiness, Correlations, Reason of Heatstroke.

INTRODUÇÃO

A irradiação solar constitui-se no mais importante elemento meteorológico, pois dela depende basicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. Na superfície da Terra, a mesma condiciona a evaporação da água em superfícies líquidas e de solo úmido e é necessária para o crescimento e desenvolvimento vegetal, além de ser fundamental às atividades do ser humano.

Portanto, a determinação da irradiação solar em locais distintos da superfície terrestre é motivo constante de pesquisas, que vem cada vez mais, tornando-se mais ampla, do ponto de vista de serem testados mais métodos de estimativa, assim como, a escolha de faixas do espectro, é importante, principalmente no que se refere às características específicas de cada interesse.

Recentemente, grande número de investigadores tem usado técnicas para determinarem o balanço de radiação à

superfície a partir do balanço de radiação no topo da atmosfera, sendo suas componentes determinadas por meio do "Geostationary Operational Environmental Satellites" (GOES), o que resulta também em estudos de transmitância atmosférica. A nebulosidade assume um importante papel nos modelos do balanço de radiação e clima. 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. Dantas *et al.* (1999) determinaram a transmissividade atmosférica máxima em Cabaceiras e Belém do Brejo do Cruz em torno de 0,73 em novembro e 0,76 em julho respectivamente.

Embora a irradiação solar global possa ser medida por radiômetros ou piranômetros, existem diversos métodos para sua estimativa, sendo o modelo empírico proposto por Angstron (1924) e modificado por Prescott (1940) o mais utilizado. Martinez-Losano *et al.* (1984) citam vários trabalhos mostrando valores para os coeficientes **a** e **b** da regressão linear, evidenciando a grande variabilidade dos mesmos, influenciados principalmente pela latitude e altitude da estação meteorológica, coeficiente de reflexão da superfície, ângulo de declinação solar, concentração de vapor d'água e poluição natural e/ou artificial. Dantas *et al.* (1999) determinaram **a** e **b** em Cabaceiras - PB e Belém do Brejo do Cruz - PB da ordem de 0,28 e 0,38 e 0,22 e 0,46 respectivamente, e que, a razão entre as irradiações solar global à superfície e no topo da atmosfera foi mínima no segundo semestre do ano nas referidas localidades.

Considerando-se que os dados de irradiação solar são muito importantes à diversas aplicações, e que o alto custo na aquisição e manutenção dos instrumentos que medem as componentes da irradiação solar fazem com que a mesma não seja observada de forma contínua nas estações meteorológicas, muitos pesquisadores, na tentativa de obterem informações sobre a irradiação solar incidente na superfície terrestre, nas formas direta e difusa, têm desenvolvido relações estatísticas para estimar tais componentes (Jeter e Balaros, 1990). A irradiação solar direta é influenciada diretamente pela transmissividade atmosférica, da mesma forma, que a massa ótica tem a mesma função sobre a transmissão à irradiação solar global à superfície (Revfeim, 1976) e o mesmo autor aplicou as hipóteses racionais de Angstron, no sentido de que o aumento de nebulosidade acarreta diminuições da insolação e da transmissividade atmosférica (Revfeim, 1978). Menezes e Dantas (2001) concluíram que a estimativa de irradiação solar global à superfície em dias de céu nublado em Cajazeiras - PB foi sempre menor na pré-estação chuvosa (novembro e dezembro).

O objetivo deste trabalho é estimar as irradiações solar global e difusa à superfície utilizando equações de regressão, e analisar o comportamento da transmissividade e atenuação atmosférica em Cajazeiras - PB.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados referem-se ao período de junho de 1976 a dezembro de 1994 da estação de Cajazeiras (06°53'S; 38°34'W; 298m) localizada no Alto Sertão Paraibano, a qual faz parte da Rede Solarimétrica do Estado da Paraíba, pertencente à Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Foram utilizados dados de irradiação solar global na superfície (I_g), irradiação solar difusa na superfície (I_d) e insolação real (n) medidas através de Piranômetros e Heliógrafos respectivamente. A irradiação solar incidente no topo da atmosfera (I_o) foi determinada por (Ometto, 1981):

$$I_o = 916,7E_o(h_p \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin h_p) \quad (1)$$

Onde, ϕ é a latitude geocêntrica, e de acordo com Spencer (1971), a excentricidade (E_o) e a declinação do Sol (δ) são expressas por:

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos \theta + 0,001280 \sin \theta + 0,000719 \cos 2\theta + 0,000077 \sin 2\theta \quad (2)$$

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

$$\text{Sendo, } \theta = 2\pi d/365, \text{ em que } d = \text{dia juliano (0-364)} \quad (4)$$

$$h_p = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (5)$$

A insolação máxima teórica (N) foi determinada como:

$$N = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)/15 \quad (6)$$

A nebulosidade foi identificada em função da razão de insolação (n/N). A partir dessas informações pôde-se estimar a irradiação solar global à superfície por meio da equação de Angstron (1924) e pelas equações (9), (10), (11) e (12), dadas por:

$$I_g = I_o (a + b n/N) \quad (7)$$

$$K_g = a + b r, \text{ onde } K_g = I_g/I_o \text{ e } r = n/N \quad (8)$$

$$K_g = a + b \ln(r), \text{ onde } a \text{ e } b \text{ são coeficientes da regressão logarítmica} \quad (9)$$

$K_g = a + br + c(r)^2$, onde **a**, **b** e **c** são coeficientes da regressão polinomial. (10)

$K_g = ar^b$, onde **a** e **b** são coeficientes da regressão de potência. (11)

$K_g = a \exp(br)$, **a** e **b** são coeficientes da regressão exponencial. (12)

Pode-se também estimar a irradiação solar difusa à superfície da seguinte forma:

$$I_d = a + bK_g \quad (13)$$

Onde $K_g = I_g/I_o$ e **a** e **b** são coeficientes da regressão linear. (14)

$I_d = a + b \ln(K_g)$, onde **a** e **b** são coeficientes da regressão logarítmica. (15)

$I_d = a + bK_g + c(K_g)^2$, **a**, **b** e **c** são coeficientes da regressão polinomial. (16)

$I_d = a(K_g)^b$, onde **a** e **b** são coeficientes da regressão de potência. (17)

$I_d = a \exp(bK_g)$, **a** e **b** são coeficientes da regressão exponencial. (18)

A transmitância atmosférica (τ) foi determinada através da relação dada por Middleton (1961) em uma versão da publicação de Bougue's da seguinte forma:

$$dI = dI_o \exp(-k_a m) \quad (19)$$

Onde, dI = irradiância solar à superfície terrestre, encontrada mediante registro de diagramas das estações solarimétricas do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande;

dI_o = irradiância solar no topo da atmosfera, calculada por:

$$dI_o = E_0 S_0 \cos Z \quad (20)$$

Em que, S_0 é a constante solar e Z é o ângulo zenital do sol.

O termo $\exp(-k_a m)$ expressa a transmitância atmosférica (τ), determinada no período compreendido entre 07:00 e 17:00 horas local, e sua integração no referido período dará a transmissividade atmosférica (T), ou seja:

$$T = \int \tau d\tau \quad (21)$$

O coeficiente de atenuação atmosférica (k_a) também determinado no mesmo período, foi calculado por:

$$K_a = (1/m) * \ln(dI_o/dI) \quad (22)$$

Onde, m é a massa ótica que de acordo com Kaster (1966) é dada por:

$$m = 35(1224 \cos^2 Z + 1)^{-0,5} \quad (23)$$

Neste trabalho foram considerados dias claros a parcialmente nublados ($0,5 \leq r \leq 1,0$) e dias parcialmente nublados a nublados ($0 \leq r < 0,5$). Os coeficientes **a**, **b** e **c** foram determinados para cada mês do ano mediante as curvas que relacionam a razão das irradiações solar na superfície da Terra e no topo da atmosfera com a razão de insolação para estimativa da irradiação solar global à superfície; as curvas que relacionam a irradiação solar difusa à superfície com a razão das irradiações solar na superfície da Terra e no topo da atmosfera para estimativa da irradiação solar difusa à superfície. Estatisticamente, essas correlações foram avaliadas por meio do coeficiente de determinação (R^2), mostrando até que nível pode-se expressar a confiança na estimativa realizada, dado por (Hoffman e Vieira, 1983):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{obs} - \bar{Y})^2} \quad (24)$$

Em que, Y_{obs} corresponde aos valores observados, Y_{est} corresponde aos valores estimados e $\bar{Y}$ corresponde às médias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verifica-se que na maioria dos meses da Tabela 1, para a condição de céu claro a parcialmente nublado, os coeficientes de determinação variam muito pouco. Sendo a equação polinomial a que melhor explica a estimativa da irradiação solar global à superfície em Cajazeiras - PB nessa condição.

Tabela 1 - Equações e coeficientes de regressão para estimativa da irradiação solar global à superfície em dias de céu claro a parcialmente nublado.

Mês	linear	logarítmica	Polinomial	potência	exponencial
Jan	$y = 0,3503x + 0,3233$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,246\text{Ln}(x) + 0,6606$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3052x^2 - 0,0936x + 0,4796$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,6642x^{0,4314}$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3683e^{0,6117x}$ ($R^2 = 0,54$)
Fev	$y = 0,3702x + 0,3123$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,2631\text{Ln}(x) + 0,6698$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 0,2301x^2 + 0,0327x + 0,4322$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,6731x^{0,4577}$ ($R^2 = 0,47$)	$y = 0,362e^{0,6419x}$ ($R^2 = 0,47$)
Mar	$y = 0,3005x + 0,354$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,2095\text{Ln}(x) + 0,6426$ ($R^2 = 0,51$)	$y = -0,0928x^2 + 0,4328x + 0,3084$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,6463x^{0,3753}$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,3858e^{0,5368x}$ ($R^2 = 0,50$)
Abr	$y = 0,3389x + 0,3005$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,2432\text{Ln}(x) + 0,6282$ ($R^2 = 0,51$)	$y = -0,3097x^2 + 0,7906x + 0,1406$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,6325x^{0,4539}$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,3436e^{0,6307x}$ ($R^2 = 0,50$)
Mai	$y = 0,3584x + 0,2662$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,2603\text{Ln}(x) + 0,6142$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 0,3973x^2 - 0,2378x + 0,483$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,6184x^{0,5049}$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 0,3159e^{0,691x}$ ($R^2 = 0,46$)
Jun	$y = 0,431x + 0,1985$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3116\text{Ln}(x) + 0,6176$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,4836x^2 - 0,2962x + 0,4626$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,6214x^{0,6088}$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 0,2743e^{0,8407x}$ ($R^2 = 0,51$)
Jul	$y = 0,4754x + 0,1688$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,3419\text{Ln}(x) + 0,6303$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 1,1715x^2 - 1,2877x + 0,8104$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,634x^{0,662}$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 0,2596e^{0,9192x}$ ($R^2 = 0,47$)
Ago	$y = 0,4059x + 0,2593$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,301\text{Ln}(x) + 0,6552$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,4925x^2 - 0,3497x + 0,5415$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,6583x^{0,5333}$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,3272e^{0,7166x}$ ($R^2 = 0,52$)
Set	$y = 0,4217x + 0,2511$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,3055\text{Ln}(x) + 0,6606$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,4542x^2 - 0,259x + 0,4981$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,6638x^{0,5401}$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3224e^{0,7432x}$ ($R^2 = 0,54$)
Out	$y = 0,4957x + 0,1971$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3672\text{Ln}(x) + 0,6798$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -0,1897x^2 + 0,7823x + 0,0916$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,6866x^{0,6584}$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,2897e^{0,8854x}$ ($R^2 = 0,54$)
Nov	$y = 0,4334x + 0,254$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,3116\text{Ln}(x) + 0,6741$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,4087x^2 - 0,1743x + 0,4729$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,6793x^{0,5548}$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,3223e^{0,7687x}$ ($R^2 = 0,52$)
Dez	$y = 0,3733x + 0,3089$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,2723\text{Ln}(x) + 0,6708$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,0359x^2 + 0,3196x + 0,3284$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,6752x^{0,4731}$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3608e^{0,6459x}$ ($R^2 = 0,53$)

Para a condição de céu parcialmente nublado a nublado, conforme a Tabela 2, existem pequenas e irrelevantes diferenças com o coeficiente de determinação das equações de regressão, sendo a que melhor explica a estimativa da irradiação solar global à

superfície em Cajazeiras em função da insolação real (n) e a insolação máxima teórica (N), a equação exponencial, tornando-se a mais apropriada para essa condição.

Tabela 2 - Equações e coeficientes de regressão para estimativa da irradiação solar global à superfície em dias de céu parcialmente nublado a nublado.

Mês	linear	logarítmica	polinomial	potência	exponencial
Jan	$y = 0,5497x + 0,2482$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,1369\ln(x) + 0,5953$ ($R^2 = 0,54$)	$y = -1,094x^2 + 1,1875x + 0,1732$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,6675x^{0,3882}$ ($R^2 = 0,59$)	$y = 0,2536e^{1,5084X}$ ($R^2 = 0,52$)
Fev	$y = 0,4509x + 0,3018$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,0948\ln(x) + 0,5657$ ($R^2 = 0,47$)	$y = 0,0504x^2 + 0,4229x + 0,3048$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,584x^{0,2288}$ ($R^2 = 0,46$)	$y = 0,3093e^{1,084X}$ ($R^2 = 0,50$)
Mar	$y = 0,4094x + 0,301$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,0888\ln(x) + 0,543$ ($R^2 = 0,47$)	$y = 0,0452x^2 + 0,3831x + 0,3042$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,5604x^{0,2179}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 0,3102e^{0,9976X}$ ($R^2 = 0,54$)
Abr	$y = 0,4103x + 0,2863$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,1047\ln(x) + 0,5488$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,0405x^2 + 0,3858x + 0,2893$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,5745x^{0,2669}$ ($R^2 = 0,56$)	$y = 0,296e^{1,0275X}$ ($R^2 = 0,56$)
Mai	$y = 0,3336x + 0,2974$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,0943\ln(x) + 0,5196$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -0,4542x^2 + 0,6214x + 0,258$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,5376x^{0,2405}$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 0,3059e^{0,8426X}$ ($R^2 = 0,55$)
Jun	$y = 0,3249x + 0,2748$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,0727\ln(x) + 0,4691$ ($R^2 = 0,47$)	$y = 0,2045x^2 + 0,2065x + 0,2888$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,48x^{0,1989}$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,2837e^{0,8714X}$ ($R^2 = 0,53$)
Jul	$y = 0,32x + 0,295$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,0729\ln(x) + 0,4872$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,2694x^2 + 0,1629x + 0,3141$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 0,4992x^{0,1917}$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,3024e^{0,8279X}$ ($R^2 = 0,56$)
Ago	$y = 0,3459x + 0,2963$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 0,0865\ln(x) + 0,517$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 1,217x^2 - 0,3965x + 0,3869$ ($R^2 = 0,56$)	$y = 0,5261x^{0,2099}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 0,3087e^{0,8331X}$ ($R^2 = 0,54$)
Set	$y = 0,4207x + 0,2617$ ($R^2 = 0,58$)	$y = 0,1064\ln(x) + 0,5285$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,0524x^2 + 0,3876x + 0,2662$ ($R^2 = 0,58$)	$y = 0,5505x^{0,2755}$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 0,2774e^{1,0733X}$ ($R^2 = 0,60$)
Out	$y = 0,5932x + 0,2244$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,1654\ln(x) + 0,6156$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 0,2366x^2 + 0,4414x + 0,2461$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,6735x^{0,4162}$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 0,2547e^{1,4604X}$ ($R^2 = 0,57$)
Nov	$y = 0,3493x + 0,3145$ ($R^2 = 0,59$)	$y = 0,0749\ln(x) + 0,5225$ ($R^2 = 0,59$)	$y = -0,4565x^2 + 0,5991x + 0,2892$ ($R^2 = 0,60$)	$y = 0,5375x^{0,1888}$ ($R^2 = 0,61$)	$y = 0,3188e^{0,8747X}$ ($R^2 = 0,60$)
Dez	$y = 0,3696x + 0,339$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,0831\ln(x) + 0,559$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -0,5519x^2 + 0,6716x + 0,3062$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 0,5783x^{0,1987}$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,3426e^{0,874X}$ ($R^2 = 0,51$)

Verifica-se que na maioria dos meses da Tabela 3, para a condição de céu claro a parcialmente nublado, os coeficientes de determinação variam muito pouco, apesar de pequenas diferenças, a equação polinomial é

a que melhor explica a estimativa da irradiação solar difusa à superfície em Cajazeiras - PB para essa condição.

Tabela 3 - Equações e coeficientes de regressão para estimativa da irradiação solar difusa à superfície em dias de céu claro a parcialmente nublado.

Mês	Linear	logarítmica	polinomial	potência	exponencial
Jan	$y = -417,53x + 378,58$ ($R^2 = 0,52$)	$y = -227,03\ln(x) + 11,118$ ($R^2 = 0,49$)	$y = -1761,7x^2 + 1604x - 193,97$ ($R^2 = 0,60$)	$Y = 45,697x^{1,911}$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 1025,9e^{3,5454x}$ ($R^2 = 0,54$)
Fev	$y = -469,24x + 411,13$ ($R^2 = 0,58$)	$y = 263,06\ln(x) - 6,3556$ ($R^2 = 0,55$)	$y = -1849x^2 + 1687,9x - 209,43$ ($R^2 = 0,63$)	$Y = 39,594x^{2,1831}$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 1288,5e^{3,9243x}$ ($R^2 = 0,59$)
Mar	$y = -488,18x + 408,17$ ($R^2 = 0,50$)	$y = -265,74\ln(x) - 20,591$ ($R^2 = 0,48$)	$y = -1507,4x^2 + 1209,4x - 65,611$ ($R^2 = 0,53$)	$Y = 35,642x^{2,2107}$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 1281,7e^{4,0886x}$ ($R^2 = 0,54$)
Abr	$y = -410,8x + 347,25$ ($R^2 = 0,51$)	$y = -216,25\ln(x) - 9,2782$ ($R^2 = 0,50$)	$y = -954,88x^2 + 627,05x + 68,77$ ($R^2 = 0,53$)	$Y = 35,212x^{1,9681}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 920,91e^{3,7737x}$ ($R^2 = 0,51$)
Mai	$y = -454,31x + 345,45$ ($R^2 = 0,52$)	$y = -235,06\ln(x) - 46,293$ ($R^2 = 0,50$)	$y = -1428,7x^2 + 1086,7x - 65,148$ ($R^2 = 0,56$)	$Y = 15,854x^{2,8322}$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 1832,7e^{5,5288x}$ ($R^2 = 0,55$)
Jun	$y = -399,9x + 310,42$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -205,06\ln(x) - 33,944$ ($R^2 = 0,52$)	$y = -324,14x^2 - 57,944x + 221,96$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 19,943x^{-2,34}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 1046,6e^{4,6189x}$ ($R^2 = 0,50$)
Jul	$y = -384x + 298,57$ ($R^2 = 0,57$)	$y = -191,63\ln(x) - 29,536$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -1241,8x^2 + 933,17x - 42,08$ ($R^2 = 0,62$)	$Y = 17,409x^{2,4446}$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 1169,9e^{4,9384x}$ ($R^2 = 0,58$)
Ago	$y = -515,78x + 393,94$ ($R^2 = 0,67$)	$y = -292,43\ln(x) - 66,42$ ($R^2 = 0,65$)	$y = -636,78x^2 + 222,12x + 182,64$ ($R^2 = 0,67$)	$Y = 12,845x^{3,4616}$ ($R^2 = 0,61$)	$y = 3100,4e^{6,1667x}$ ($R^2 = 0,64$)
Set	$y = -503,12x + 408,01$ ($R^2 = 0,60$)	$y = -282,65\ln(x) - 40,004$ ($R^2 = 0,58$)	$y = -1209x^2 + 891,42x + 11,758$ ($R^2 = 0,61$)	$Y = 23,194x^{2,7687}$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 1911,1e^{4,967x}$ ($R^2 = 0,60$)
Out	$y = -461,33x + 389,15$ ($R^2 = 0,54$)	$y = -267,53\ln(x) - 26,191$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -230,82x^2 - 188,99x + 309,93$ ($R^2 = 0,54$)	$Y = 29,841x^{2,4022}$ ($R^2 = 0,43$)	$y = 1257,4e^{4,1611x}$ ($R^2 = 0,43$)
Nov	$y = -384,18x + 351,75$ ($R^2 = 0,51$)	$y = -216,66\ln(x) + 9,1462$ ($R^2 = 0,49$)	$y = -1608,8x^2 + 1493,6x - 188,51$ ($R^2 = 0,56$)	$y = 43,65x^{-1,8821}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 867,52e^{3,3594x}$ ($R^2 = 0,50$)
Dez	$y = -425,17x + 380,45$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -232,51\ln(x) + 4,9925$ ($R^2 = 0,50$)	$y = -1426x^2 + 1209,3x - 80,257$ ($R^2 = 0,58$)	$Y = 43,548x^{1,9359}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 1012e^{-3,5728x}$ ($R^2 = 0,52$)

Para a condição de céu parcialmente nublado a nublado, conforme a Tabela 4, existem pequenas e irrelevantes diferenças com o coeficiente de determinação das equações de regressão, tendo em

vista que a melhor equação para a explicação da estimativa da irradiação solar difusa à superfície em Cajazeiras - PB é a equação polinomial, sendo a mais recomendada para essa condição.

Tabela 4 - Equações e coeficientes de regressão para estimativa da irradiação solar difusa à superfície em dias de céu parcialmente nublado a nublado.

Mês	linear	logarítmica	polinomial	potência	exponencial
Jan	$y = 388,13x + 24,354$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 140,42\ln(x) + 312,48$ ($R^2 = 0,55$)	$y = -956,25x^2 + 1111,9x - 104,7$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 466x^{1,0705}$ ($R^2 = 0,58$)	$y = 53,445e^{2,8859x}$ ($R^2 = 0,51$)
Fev	$y = -282,92x + 330,98$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 127,25\ln(x) + 100,39$ ($R^2 = 0,53$)	$y = -224,05x^2 - 77,296x + 284,99$ ($R^2 = 0,54$)	$Y = 120,58x^{0,6342}$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 381,05e^{1,4131x}$ ($R^2 = 0,56$)
Mar	$y = 488,79x - 31,851$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 177,96\ln(x) + 331,15$ ($R^2 = 0,52$)	$y = -787,83x^2 + 1096,6x - 144,04$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 644,69x^{1,555}$ ($R^2 = 0,62$)	$y = 28,967e^{4,1091x}$ ($R^2 = 0,56$)
Abr	$y = 345,65x + 20,836$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 128,25\ln(x) + 279,41$ ($R^2 = 0,49$)	$y = 385,24x^2 + 39,319x + 79,694$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 343,87x^{0,8491}$ ($R^2 = 0,47$)	$y = 62,344e^{2,2784x}$ ($R^2 = 0,50$)
Mai	$y = 306,96x + 37,627$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 127,41\ln(x) + 278,03$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 798,04x^2 - 379,77x + 183,2$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 318,3x^{0,7496}$ ($R^2 = 0,51$)	$y = 77,942e^{1,7885x}$ ($R^2 = 0,52$)
Jun	$y = 628,21x - 92,853$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 235,25\ln(x) + 375,15$ ($R^2 = 0,54$)	$y = -3372x^2 + 3148,8x - 557,18$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 913,05x^{1,9249}$ ($R^2 = 0,58$)	$y = 20,065e^{5,1102x}$ ($R^2 = 0,56$)
Jul	$y = 320,45x + 43,753$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 112,96\ln(x) + 276,77$ ($R^2 = 0,54$)	$y = -558,64x^2 + 728,1x - 28,047$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 350,79x^{0,7814}$ ($R^2 = 0,57$)	$y = 71,239e^{2,1705x}$ ($R^2 = 0,53$)
Ago	$y = 546,86x - 51,67$ ($R^2 = 0,46$)	$y = 221,67\ln(x) - 370,8$ ($R^2 = 0,47$)	$y = -3268,8x^2 + 3194,5x - 584,76$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 587,96x^{1,3824}$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 42,194e^{3,4096x}$ ($R^2 = 0,44$)
Set	$y = 147,5x + 119,62$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 56,59\ln(x) + 231,26$ ($R^2 = 0,46$)	$y = 160,16x^2 + 19,309x + 144,56$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 239,16x^{0,3172}$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 127,9e^{0,827x}$ ($R^2 = 0,47$)
Out	$y = -329,88x + 339,32$ ($R^2 = 0,55$)	$y = 147,28\ln(x) + 71,751$ ($R^2 = 0,51$)	$y = -1343,2x^2 + 948,87x + 41,804$ ($R^2 = 0,63$)	$Y = 90,586x^{0,9035}$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 472,94e^{2,0488x}$ ($R^2 = 0,58$)
Nov	$y = 306,91x + 77,54$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 122,33\ln(x) + 314,21$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 793,66x^2 - 353,87x + 211,93$ ($R^2 = 0,54$)	$y = 347,5x^{0,6004}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 108,88e^{1,5041x}$ ($R^2 = 0,50$)
Dez	$y = -663,57x + 475,45$ ($R^2 = 0,50$)	$y = 284,06\ln(x) - 51,201$ ($R^2 = 0,49$)	$y = -2607,2x^2 + 1627,2x - 22,616$ ($R^2 = 0,53$)	$Y = 44,789x^{1,6727}$ ($R^2 = 0,48$)	$y = 998,77e^{3,9151x}$ ($R^2 = 0,50$)

Para a condição de céu claro a parcialmente nublado, observa-se que a transmissividade atmosférica em Cajazeiras é menor de maio a agosto (55%). De acordo com a Figura 1, a curva de transmissividade atmosférica decresce de janeiro a maio, depois cresce

de junho até dezembro, justificando a presença menor de nuvem nesses meses. A atenuação apresenta-se maior de março a junho, final da estação chuvosa da região (Alto Sertão Paraibano) cerca de 45%, e menor entre os meses de agosto e dezembro, em função da

pouca nebulosidade para essa condição. Os resultados obtidos para esta condição estão em parte de acordo com Cavalcanti *et al.* (2001), onde eles concluíram que no período menos chuvoso do ano, observa-se os

maiores valores de transmitância atmosférica global e, no período mais chuvoso do ano, observa-se os menores valores na região de Maceió - AL.

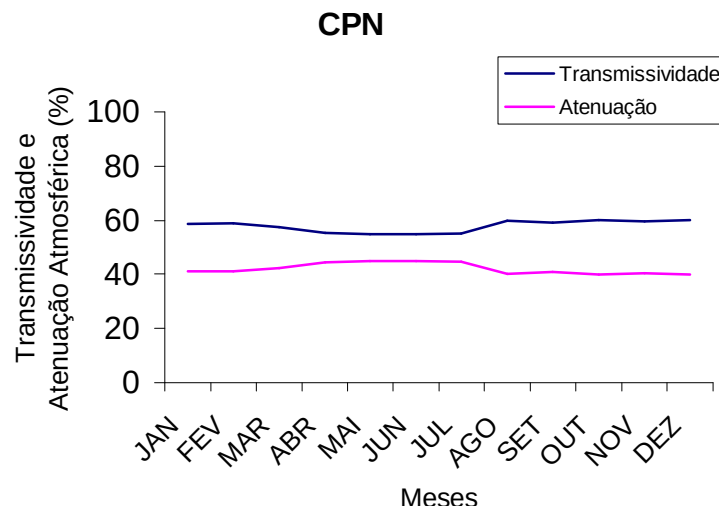


Figura 1 – Transmissividade e atenuação atmosférica em dias de céu claro a parcialmente nublado.

Para a condição de céu parcialmente nublado a nublado em Cajazeiras, nota-se na Figura 2 que, como o céu está mais nublado e a nuvem é um dos principais fatores que contribui para a atenuação, a atenuação é sempre maior do que a transmissividade, tendo maior valor em junho (62%), enquanto que a transmissividade atmosférica é menor de maio a agosto, cerca de 40%, devido a presença maior de

nuvens, o que proporcionou maior absorção e maior reflexão pelas nuvens e pela atmosfera de um modo geral. Estes resultados concordam com Dantas *et al.* (2000), que mostraram na realidade uma interferência de nuvens, principalmente nos horários de 09:00, 10:00 e 15:00 horas local, e em função desta influência da nebulosidade, a transmitância atmosférica média foi aproximadamente 57% no mesmo município.

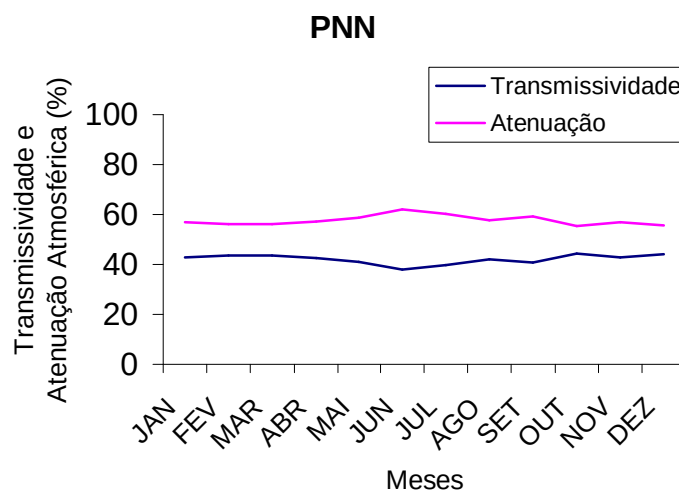


Figura 2 – Transmissividade e atenuação atmosférica em dias de céu parcialmente nublado a nublado.

CONCLUSÕES

Para estimativa da irradiação solar global à superfície em Cajazeiras - PB, a equação de regressão mais recomendada é a polinomial para dias de céu claro a parcialmente nublado, e a equação exponencial para dias de céu parcialmente nublado a nublado. No caso da falta de recursos adequados para que se possa encontrar as regressões polinomial e exponencial, podemos utilizar a regressão linear, devido diferenças pequenas com relação a equação polinomial e exponencial, e a facilidade de se trabalhar com a equação linear.

A função que melhor se ajustou aos dados de irradiação solar difusa foi a função polinomial.

A transmissividade atmosférica foi sempre crescente no período de julho a novembro independente da condição atmosférica.

Com relação a atenuação atmosférica observou-se que a mesma foi sempre superior a 50% em dias parcialmente nublado a nublado, independente da época do ano, atingindo o máximo (62,2%) em junho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UACA/CTRN/UFCG, pelo fornecimento dos dados e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelas bolsas concedidas aos alunos para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGSTRON, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal Research Society**, v. 50, p. 121-5, 1924.

CAVALCANTI, E. A. B.; SOUZA, J. L.; M. FILHO, G.; NICÁCIO, R. M.; BARRETO, E. J. S.; SILVA NETO, J. L.; SANTOS, E. A. Irradiância Solar Global e Difusa na região de Maceió-AL. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, XII e Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, III, 2001, Fortaleza - CE. **Anais**: Fortaleza - CE: SBA, 2001, p. 106-107.

DANTAS, R. T.; CARNEIRO, G. M.; MELO, E. C. S.; SOARES, D. B. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom para dois municípios do estado da Paraíba. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, XI, 1999, Florianópolis - SC. **Anais**: Florianópolis - SC: SBA, 1999, p. 2399-403.

DANTAS, R. T.; SOUZA, W. M.; ARAÚJO, J. A. P. Transmissão Atmosférica em três municípios do estado da Paraíba. In: Congresso Brasileiro de

Meteorologia, XI, 2000, Rio de Janeiro - RJ. **Anais**: Rio de Janeiro - RJ: SBMET, 2000, p. 3949-54.

HOFFMAN, R.; VIEIRA, S. **Análise de Regressão** – Uma introdução à Econometria. 2ª Edição. Editora Hucitec. 1983.

JETER, S. M.; BALAROS, C. A. Development of improved solar radiation models for predicting beam transmittance. **Solar Energy**, v. 44, n. 3, p. 149-56, 1990.

KASTEN, F. A new table and approximate formula for relative optical air mass. **Areh. Meteorology Geophysics Bioclimatology Ser. B**, v. 14, p. 206-33, 1966.

MARTINEZ-LOZANO, J. A. *et al.* The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 33, p. 109-28, 1984.

MENEZES, H. E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da Irradiação Solar Global à Superfície em Cajazeiras-PB. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, XII e Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, III, 2001, Fortaleza - CE. **Anais**: Fortaleza - CE: SBA, 2001, p. 143-144.

MIDDLETON, W. E. K. “**Pierre Bouguer’s Optical Treatise on the Gradation of Light**”. University of Toronto Press, Toronto, 1961.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Trans. Res. Soc. Aust.**, v. 1, p. 114-8, 1940.

REVFEIM, K. J. A. Solar radiation at a site of known orientation on the earth’s surface. **Journal of Applied Meteorology**, v. 15, p. 651-56, 1976.

REVFEIM, K. J. A. A Simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, p. 1126-31, 1978.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, v. 2, p. 172, 1971.