

## Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação para município de Garanhuns/PE

Antonio Ricardo Santos de Andrade<sup>a</sup>, Joherlan Campos de Freitas<sup>b</sup>, Edijailson Gonçalves Silva<sup>c</sup>, Maria Gorete dos Santos Silva<sup>c</sup>, Hugo Orlando Carvalho Guerra<sup>d</sup>, Ricardo Normando Baptista do Nascimento Neto<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns-UAG, Avenida Bom Pastor, s/n, Boa Vista, Garanhuns-PE. CEP: 55.296-901. E-mail: arsauag@uag.ufrpe.br, r1n2b3@hotmail.com.

<sup>c</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns-UAG, Avenida Bom Pastor, s/n, Boa Vista, Garanhuns-PE. CEP: 55.296-901. E-mail: edijailsongoncalves@gmail.com, mgorete@gmail.com.

<sup>b</sup> Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882, Campina Grande - PB. CEP: 58429-900. E-mail: jorlanf@hotmail.com, hugo\_carvalho@hotmail.com

**RESUMO:** O objetivo do estudo é estimativa da radiação solar global com base na insolação no município de Garanhuns/PE. Foram utilizados dados diários para os doze meses do ano, da série climatológica mensal de 2010 à 2020, da radiação solar global ( $Q_g$ ) e número de horas de brilho solar ( $n$ ) obtido por meio do piranômetro e do heliógrafo tipo Campbell-Stokes, respectivamente, do banco de dados da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na clínica de Bovino da Universidade Federal de Pernambuco. Os valores da radiação solar global ( $Q_g$ ) foram obtidas a partir da estimação dos coeficientes “a” e “b” do modelo empírico de Angström-Prescott por meio da regressão linear. As maiores incidências da  $Q_g$  e da insolação foram verificadas nos meses de janeiro, fevereiro, abril, outubro, novembro e setembro, coincidindo com o período de menor nebulosidade local. Os valores médios mensais do coeficiente angular ( $b$ ) foram 0,0469, 0,0478 e 0,0499 no meses de abril, maio e junho, respectivamente, no período chuvoso e variaram de 0,0149 (março) a 0,0268 (dezembro) para período seco. Os melhores desempenhos do modelo foram obtidos para as estimativas de  $Q_g$  para o período chuvoso, com equações de regressão com  $R^2$  superiores a 0,70.

**Palavra-chave:** irradiância global, nebulosidade, análise de regressão

**ABSTRACT:** The objective of the study is to estimate the global solar radiation based on insolation in the municipality of Garanhuns/PE. Daily data were used for the 12 months of the year, the monthly climatological series from 2010 to 2020, the global solar radiation ( $Q_g$ ) and the number of hours of solar brightness ( $n$ ) obtained by means of the pyranometer and the Campbell-Stokes heliograph, respectively, the database of the National Institute of Meteorology (INMET) station, located in the Bovine clinic of the Federal University of Pernambuco. The values of global solar radiation ( $Q_g$ ) were obtained from the estimation of the coefficients “a” and “b” of the Angström-Prescott empirical model by linear regression. The highest incidences of  $Q_g$  and sunstroke were observed in the months of January, February, April, October, November and September, coinciding with the period of least local cloudiness. The monthly mean values of the angular coefficient ( $b$ ) were 0.0469, 0.0478 and 0.0499 in the months of April, May and June, respectively, in the rainy period and ranged from 0.0149 (March) to 0.0268 (December) for the dry period. The best performances of the model were obtained for  $Q_g$  estimates for the rainy period, with regression equations with  $R^2$  higher than 0.70.

**Key word:** global solar irradiance, cloudiness, regression analysis

## INTRODUÇÃO

A insolação ou número de horas de brilho solar, definido como a quantidade de tempo que o disco solar não é obscurecido por nuvens, é uma medida indireta da radiação solar global e uma das mais antigas. Com dados de brilho solar estima-se a radiação solar global, que devidamente armazenada, serve de parâmetro para elaboração de mapas e/ou cartas solares. A radiação solar é uma forma de energia limpa e barata, constituindo a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos, tais como fotossíntese das plantas, evapotranspiração, crescimento de culturas, dentre outros. O conhecimento correto dos níveis de radiação solar incidente em uma determinada região é especialmente importante em setores estratégicos como economia, na política e no meio ambiente (RANIERO et al., 2018).

Um número bastante grande de tipos de instrumentos para medir o brilho solar têm sido desenvolvido nos últimos 140 anos. Porém, nenhum destes instrumentos é completamente satisfatório em todos os aspectos, tais como, calibragem e manutenção da instrumentação e custo (RANIERO et al., 2018). A determinação do número de horas de brilho solar, além de caracterizar climatologicamente as condições de radiação solar de um local, permite a obtenção do índice de insolação, que é a relação entre o número real e o número máximo possível de horas de brilho solar. Este índice é usado em vários modelos de estimativa de radiação, e constitui a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos (BORGES et al., 2010). A melhor forma de conhecer o perfil de radiação incidente em uma localidade é por meio do estudo de valores medidos por instrumentação. Entretanto, a grande problema envolvido na coleta de dados de radiação é o alto custo da instrumentação radiométrica (SOUZA et al., 2011). Além disto, requerem a utilização de programas de aquisição de dados e de pessoal especializado para a manutenção e calibragem da instrumentação, aumentando o custo dessas medidas.

Neste sentido, estações radiométricas de baixa densidade com menor desenho tecnológico, tendem a utilizar modelos para estimar a insolação (horas de brilho solar) e até mesmo para recuperar valores perdidos ou ausentes em uma série de dados (VAREJÃO-SILVA, 2006). Com a introdução de aparelhos modernos de medidas, o monitoramento ambiental (aquisição e armazenamento) tornou-se automático e digital. Mas a coleta de dados de insolação (horas de brilho solar) não acompanhou essa evolução e continua a ser realizada em algumas regiões de forma manual, onde um observador qualificado conta o número de horas de brilho solar. Em que, interpretações subjetivas, devido à falta de treinamento ou rotinas de coleta diferentes por observadores distintos, podem induzir a uma erro sistemática, afetando diretamente a formação de uma base de dados de qualidade. Além disto, várias estações meteorológicas do país disponibilizam seus dados online (sendo eles para escalas de horário a períodos semanal-quinzenal), e devido a problemas de equipamentos e software, esses dados são disponibilizados com variações de unidades ou de elementos (variáveis) climatológicas em si. Dados como radiação solar global, nebulosidade e insolação, dentre outros, são facultados entre as estações. Essas variações dificultam o uso dos dados, tornando-se potenciais erros de interpretação e convenções.

Devido à existência de uma relação entre a radiação solar e a insolação (horas de brilho solar), que é diferente para cada local e para cada época do ano, modelos estatísticos têm sido desenvolvidos por meio de análises de regressão para sua estimativa a partir dos dados de insolação (BURIOL et al., 2012) O primeiro modelo de estimativa foi publicado por Angström (1924). Prescott (1940) simplificou a equação de Angström (1924), de modo que, a partir dos

coeficientes lineares e angulares da equação de regressão linear simples entre a razão de insolação e a razão de radiação solar global, foi possível estimar a radiação solar global, como base os dados de insolação (BURIOL et al., 2012). A partir daí, este modelo de estimativa, com adaptações introduzidas de acordo com as condições climáticas de cada local, passou a ser utilizado de forma universal. Neste contexto, o objetivo do estudo é estimar a radiação solar global ( $Q_g$ ), com base nos dados de insolação ou horas de brilho solar ( $n$ ) para o município de Garanhuns/PE, bem como avaliar a variabilidade temporal da radiação solar, insolação e da nebulosidade (cobertura de nuvens).

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Caracterização do local e obtenção dos dados*

A área de estudo está localizada no município de Garanhuns no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil, sob o Planalto da Borborema, com as coordenadas de latitude  $8^{\circ}53'25''$  Sul e de longitude  $36^{\circ}29'34''$  Oeste. À distância até a capital é de 229 km e tem uma área de aproximadamente  $472 \text{ Km}^2$ , onde 131.313 mil habitantes residem em uma das mais importantes regiões leiteiras do Estado de Pernambuco. É limitado pelos municípios de São João, Jucati, Capoeiras, Caetés, Paratama, Saloá, Terezinha, Brejão, Lagoa do Ouro, Correntes, Palmeirina (IBGE, 2015).

O clima local de Garanhuns é definido como tropical quente subúmido seco, que se refere a classificação  $As'$ ,  $BShs'$  e  $Cs'a$  (quente e úmido com chuvas de outono-inverno, clima seco de baixas latitudes com chuvas de outono-inverno e mesotérmicos com verões quentes e chuvas de outono-inverno, respectivamente) segundo a tipologia climática de Köppen (ALVARES et al., 2013). Por se localizar em uma área de transição, possui características referentes ora ao clima tropical quente e úmido, ora ao clima tropical quente e seco, não se configurando, no entanto, os valores extremos desses dois tipos climáticos. A temperatura média anual está entre  $20,1$  e  $22,0^{\circ}\text{C}$ , enquanto a pluviosidade está entre  $751 - 1000$  mm anuais (ANDRADE, 2009; CONDEPE/FIDEM, 2017; BARBOSA et al. 2016; Andrade et al., 2018).

Foram utilizados dados diários de radiação solar global ( $Q_g$ ) registrados por um radiômetro, com piranômetro tipo kipp e Zonen CM22, de funcionamento eletrônico na Plataforma de Coleta de Dados (PCD), da estação convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na sede municipal de Garanhuns – A322 código OMM -81955 da Clínica de Bovinos da Universidade Federal Rural de Pernambuco ( $-8,9109^{\circ}\text{S}$ ;  $-36,493^{\circ}\text{W}$ ; 828 m). Os valores diários da insolação ou horas de brilho solar ( $n$ ), com precisão decimo de horas foram obtidos por meio do heliógrafo tipo Campbell-Stokes e da nebulosidade ( $N_e$ ), décimas de céu encoberto por nuvens (valor de 0 a 10), estimada visualmente, imaginando-se todas as nuvens arrumadas juntas e arbitrando-se, aproximadamente, a fração do céu que isso representa, para o período 2010-2020.

### *Radiação solar extraterrestre, ângulo horário ou duração do dia solar e fotoperíodo*

Os valor de  $Q_0$  foi obtida com base na latitude local ( $\phi$ ), declinação solar ( $\delta$ ) e no ângulo horário ou duração do dia solar ( $H$ ), ângulo zenital em um dato instante ( $Z_h$ ) baseando-se na lei do Cosseno de Lambert mostra essa relação entre a irradiância solar ( $I_h$ ) e  $Z_h$  da seguinte forma (VIANELLO & ALVES, 1991):

$$I_h = I_n \cos Z_h \quad \text{Eq.(1)}$$

Como a distância Terra-Sol varia continuamente, para obtermos o valor real de  $I_h$  há necessidade de se aplicar a correção  $(d/D)^2$  a  $J_o$  e multiplicar ambos por  $\cos Z_h$ :

$$I_h = J_o (d/D)^2 \cos Z_h \quad \text{Eq (2)}$$

Em que:

$I_n = J_o =$  constante solar.

$\cos Z_h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h$

$h =$  hora do dia, expressa em ângulo (ângulo horário)

$\phi =$  latitude do local (0 a  $\pm 90^\circ$ )

$\delta =$  declinação solar (0 a  $\pm 23,45^\circ$ )

NDA = número do dia do ano (1 a 365)

$h =$  hora do dia expressa em ângulo horário = [(hora local – 12).15]

Integrando-se os valores instantâneos de  $I_h$ , determina-se a radiação solar extraterrestre diária ( $Q_o$ ), radiação solar incidente numa superfície horizontal paralela ao plano do horizonte local, no topo da atmosfera:

$$Q_o = \int_{Hns}^{Hps} I_h dH = \int_{Hns}^{Hps} J_o (d/D)^2 \cos Z_h dH \quad \text{Eq. (3)}$$

Desenvolvendo-se a integral acima, têm-se que radiação solar extraterrestre é uma função da latitude e da época do ano (declinação solar). A equação de estimativa de  $Q_o$  é dado por:

$$Q_o = 36,60 (D/d)^2 (Hns \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin Hns) \quad \text{Eq (4)}$$

Em que  $Q_o =$  radiação solar extraterrestre na unidade  $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ,  $d =$  distância média Terra-Sol (km),  $D =$  distância Terra-Sol no momento considerado (km). Sendo  $(D/d)^2$  a distância relativa Terra-Sol obtida conforme Spencer (1971), em função do número do dia do anos (NDA) e  $Hns =$  ângulo horário ao nascer do sol (rad).

$$(D/d)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos [2\pi (NDA - 1)/365] + 0,001280 \sin [2\pi (NDA - 1)/365] + 0,00719 \cos \{2 [2\pi (NDA - 1)/365]\} + 0,000077 \sin \{2 [2\pi (NDA - 1)/365]\} \quad \text{Eq. (5)}$$

As Eqs. 6 e 7, foram usadas para determinação da declividade solar ( $\delta$ ) e do ângulo de horário na hora do nascer do sol (ângulo da radiação do sol,  $Hns$ ), ambos expressos em rad.

$$Hns = \arccos - (\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\delta = 23,45 \sin [(360/365).(NDA - 80)] \quad \text{Eq. (7)}$$

Em que  $H_{ns}$  = ângulo de horário (rad),  $\phi$  = latitude local e  $\delta$  = declividade solar (rad).

Como o fotoperíodo (N) é a duração do dia desde o nascer até o pôr do Sol, temos que na sua trajetória aparente o Sol descreve um arco simétrico em relação ao meio-dia. Pode-se dizer, então, que N é o dobro do ângulo horário ao nascer e pôr do Sol, e função da latitude e da declinação solar, e foi calculada pela equação (OMETTO, 1981):

$$N = (2/15) \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad \text{Eq. (8)}$$

*Correlação entre irradiação global diária média mensal e insolação (horas de brilho de sol) - Modelo de Angström – Prescott*

A radiação solar global incidente sobre uma superfície plana e horizontal é uma fração da radiação solar no topo da atmosfera. Esta fração de radiação que chega à superfície depende das condições atmosféricas locais, as quais caracterizam a transmitância atmosférica para a radiação de ondas curtas como se segue na equação abaixo (BORGES et al., 2010):

$$Q_g = T_g Q_o \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que  $Q_g$  = radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $T_g$  = coeficiente de transmissividade atmosférica, denominada de razão de radiação solar global (adimensional) e  $Q_o$  = radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

Todos os modelos propostos na estimativa da  $Q_g$  baseiam-se na Equação 9, diferindo em relação à determinação do coeficiente de transmissividade atmosférica ( $T_g$ ), além de utilizar a amplitude térmica diária como principal variável de entrada. A proposta do modelo empírica de Angström-Prescott (Equação 10) e deste trabalho é que podem-se estabelecer fórmulas empíricas que necessitam apenas de da insolação ou horas de brilho solar (n) em uma região, para estimar a radiação solar global, com suficiente precisão para fins agroclimáticos (VARGAS et al., 2019).

A radiação solar global foi estimada a partir da insolação ou número de horas de brilho solar (n) utilizando-se do modelo empírica de Angström-Prescott, que baseia-se na relação matemática entre razão de radiação solar global ( $T_g$ ) que denominada de transmitância global e a razão de insolação (h) (BLANCO & SENTELHAS, 2002; SANTOS et al., 2003; DANTAS et al., 2003; BURIOL et al., 2012; BELÚCIO et al., 2014). Esta relação matemática é da forma:

$$Q_g = Q_o ( a + b \cdot n/N ) \quad (10)$$

Em que a e b são os coeficientes linear e angular que expressão a fração de radiação que chega a superfície da terra em dias nublados e sem nuvens, respectivamente, e que foram estimados por meio da regressão linear; n é a insolação à superfície (determinado pelo heliógrafo Campbell-Stokes como padrão) e N é o fotoperíodo ou duração do dia.

Determinou-se, para cada dia, a razão de radiação solar global ( $T_g$ ) e a razão de insolação (h), com a utilização das Equações 11 e 12:

$$T_g = \frac{Q_g}{Q_o} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$h = \frac{n}{N} \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que  $Q_g$  = radiação solar global medida à superfície,  $Q_o$  = radiação solar global teórica extra terrestre, ambas em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $n$  = insolação real e  $N$  = duração máxima do brilho solar ou fotoperíodo, ambas em  $\text{h dia}^{-1}$ .

Substituído as Eqs 11 e 12 na Equação 10, obtém-se o modelo simplificada proposta por que Angström-Prescott, que expressar a relação entre a radiação global ( $Q_g$ ) e as razões de brilho solar ( $h$ ) e da radiação solar global ( $T_g$ ):

$$T_g = a + b \cdot h \quad \text{Eq.(13)}$$

No modelo de Angström-Prescott, a razão de insolação ( $h$ ) é tomado como variável independente em uma regressão linear onde a variável dependente é radiação solar global ( $T_g$ ). Os valores de “ $h$ ” foram calculados levando-se em considerando as medidas de insolação pelo heliográficos de Campbell-Stokes e comparados com os valores de  $T_g$ , que representa a proporção da radiação solar determinada no limite extremo da atmosfera que efetivamente atinge a superfície terrestre, que expressa a transmissividade atmosférica e que determina as condições de nebulosidade (CARMO et al., 2015). Como ao longo do dia a espessura da atmosfera varia em função do ângulo zenital,  $T_g$  também varia:  $T_g < a$  ao nascer e pôr do sol e  $T_g > a$  ao meio dia.

Uma vez obtidos os valores de  $Q_o$  e possuindo os valores de  $n$  e  $Q_g$  para cada dia do ano, os dados foram agrupados e por meio de análise de regressão linear os valores dos coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ” foram estimados com base no modelo linear empírica de Angström-Prescott (Equação 13). Os coeficientes médios do modelo foram determinados para o período mensal da série climatológica de 2010 à 2020.

#### *Estatística descritiva dos dados*

Procedeu-se a análise estatística descritiva por meio de confecções de gráficos dos 11 anos de dados da variáveis radiação solar global ( $Q_g$ ), insolação ou horas de brilho solar ( $n$ ) e nebulosidade ( $Ne$ ) com o objetivo de caracterizar o comportamento preliminar da distribuição das três variáveis metrológicas na região e presença de valores discrepantes dos dados (BUSSAB & MORETTIN, 2010).

#### *Validação da estimativa da insolação (horas de brilho de sol)*

A partir deste ajuste os modelos foram avaliados pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de correlação de Person ( $r$ ), pela concordância expressa pelo índice “ $d$ ”, de Willmott et al. (1985), conforme a Eq. 14 e pelo índice de confiança de desempenho “ $c$ ” (Eq. 15) que é obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação ( $r$ ) pelo índice “ $d$ ” de Willmott (BUSSAB & MORETTIN, 2010; GARCIA et al., 2017).

Os índices "d" e "c" com variação entre 0 e 1, indicam o grau de desempenho e concordância entre valores estimados e observados, e quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho do modelo, enquanto que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica a precisão do modelo, ou seja, indica o quanto da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes, e quanto mais próximos de 1, melhor o ajuste do modelo, isso indica que os valores obtidos na previsão de valores são similares aos resultados reais (BUSSAB & MORETTIN, 2010; BESKOW et al., 2011).

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$c = r d \quad \text{Eq.(15)}$$

Em que  $E_i$  = valor estimado,  $O_i$  = valor observado, ambos em ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d.}^{-1}$ ) e  $n$  = número de observações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a comportamento da radiação solar global, nebulosidade e insolação em Garanhuns, para os 11 anos de dados, que correspondente série climatológica mensais de 2010 à 2020. Observa-se que, a radiação solar foi elevada nos meses de janeiro-abril e setembro-dezembro, atingindo  $1,50 \text{ WJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ , que caracteriza a época seca da região, decorrente da reduzida nebulosidade na área e conseqüentemente do maior número de horas de insolação (Figura 1). O trimestre maio-junho-julho, observou-se os menores valores de radiação solar atingindo  $1,12 \text{ WM m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ , que caracteriza a época de chuva da região.

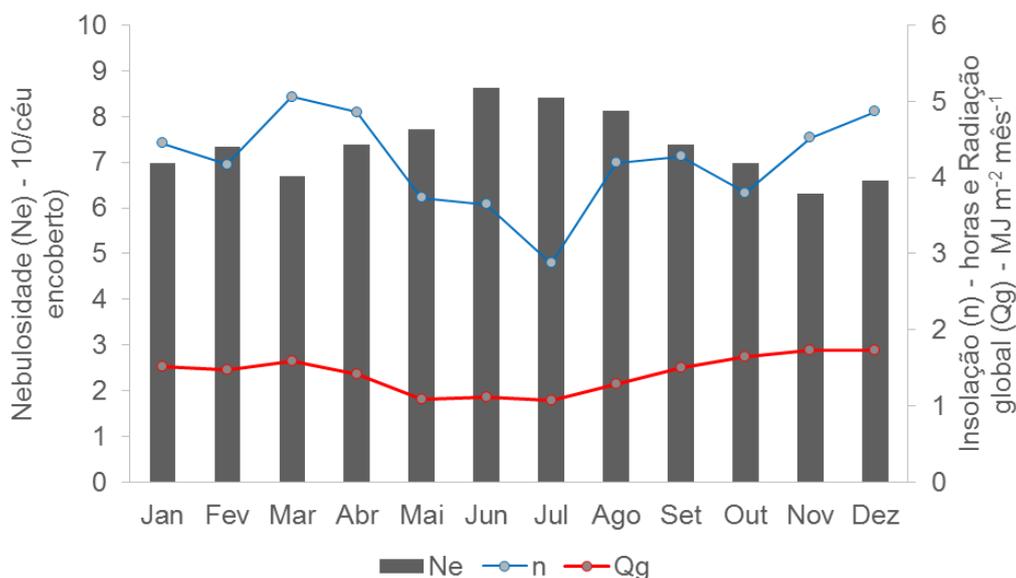


Figura 1. Nebulosidade (em 10/céu encoberto) e insolação (h) de Garanhuns/PE, referentes ao período de janeiro de 2010 a dezembro de 2020.

Quanto aos valores de nebulosidade, verificou-se, durante os meses de maio-julho (trimestre), que foi o período de maior nebulosidade e a que apresentou menor insolação, coincidindo com o período chuvoso do município de Garanhuns. Conseqüentemente, o período da região, de maio-julho apresentou menor nebulosidade e maior insolação, no período seco da região (Figura 1). Segundo Santos et al. (2003) o alto percentual de umidade e a alta concentração na atmosfera de núcleos de condensação condicionam a formação da nebulosidade reduzindo significativamente a insolação.

Nas Figuras 2 e 3 mostram os diagramas de dispersão dos valores diários da razão de insolação ( $h = n/N$ ) e da transmitância atmosférica global ( $T_g = Q_g/Q_o$ ) para o período de 2010 e 2020, para os doze meses do período estudado do município de Garanhuns/PE. Constatou-se que para todos os meses, foi encontrada uma alta correlação entre os valores mensais da razão de  $h$  e da  $T_g$ .

O exame das equações de regressão nas Figura 2 e 3, mostra que as diferenças nos coeficientes de interceptação (coeficiente linear) e de inclinação (coeficiente angular) entre a  $h$  e  $T_g$  são bem expressivos para cada mês analisado.

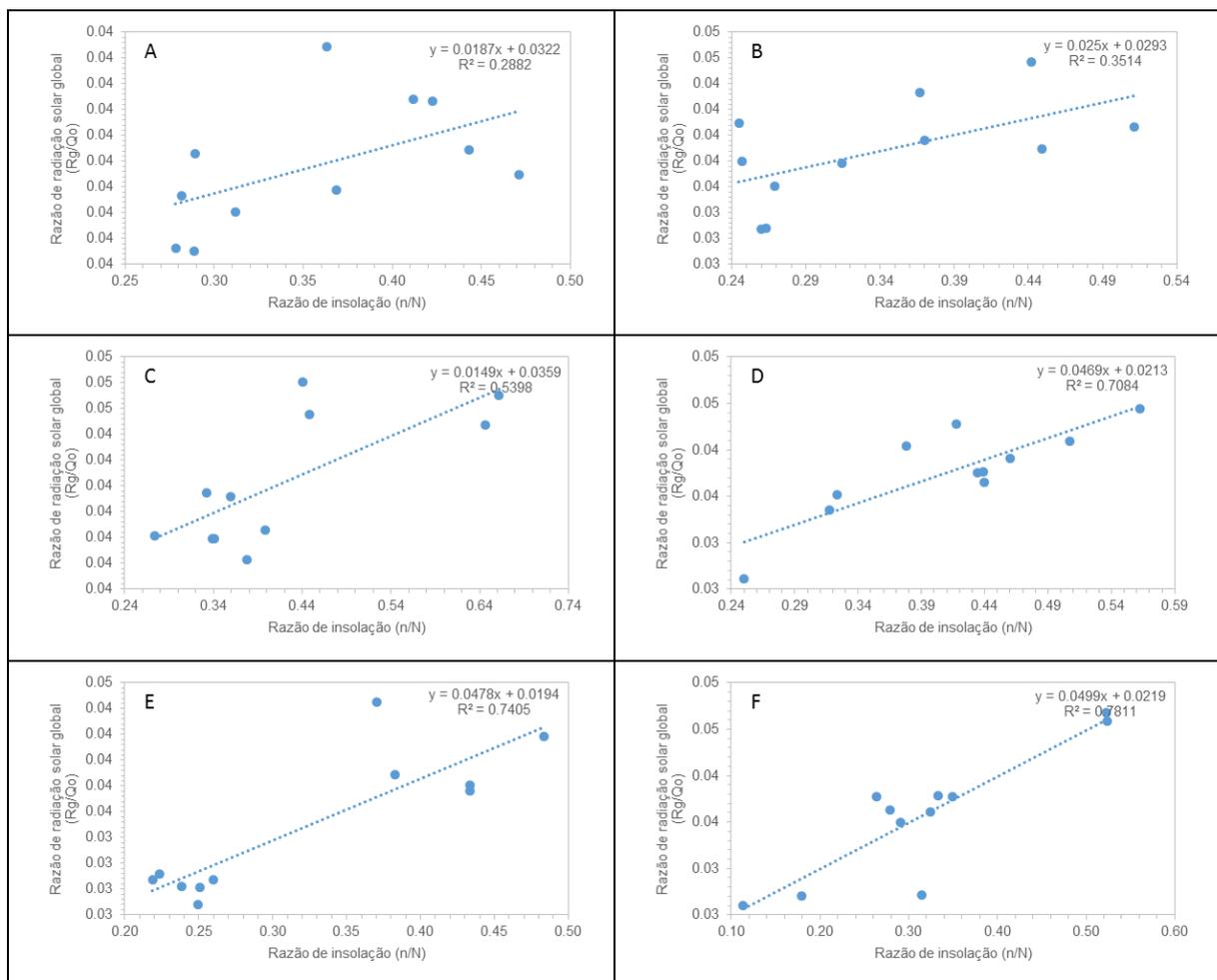


Figura 2. Dispersão dos valores mensais da relação entre a razão de radiação solar global ( $R_g/Q_o$ ) e razão de insolação ( $n/N$ ) para os meses de janeiro (A), fevereiro (B), março (C), abril (D), maio (E) e junho (F), no período de 2006 a 2012, em Garanhuns/PE, 2010-2020.

Para os meses de janeiro (A), fevereiro (B) e março (C) os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variaram de 0,28 (janeiro) a 0,53 (março), sendo este o mês menos chuvoso na cidade (Figura 2). Estes resultados mostraram associação moderada para os meses entre esses dois elementos meteorológicos ( $h$  e  $T_g$ ). O mês que apresentou maior  $R^2$  foram os meses mais chuvosos, abril (D) com coeficiente com valor de 0,70, maio (E) com valor de 0,74, junho (F) apresentou maior  $R^2$  (0,78). De julho a dezembro, meses também entendidos como período menos chuvoso, os valores de  $R^2$  variaram de 0,18 (novembro) a 0,58 (dezembro), conforme a Figura 3.

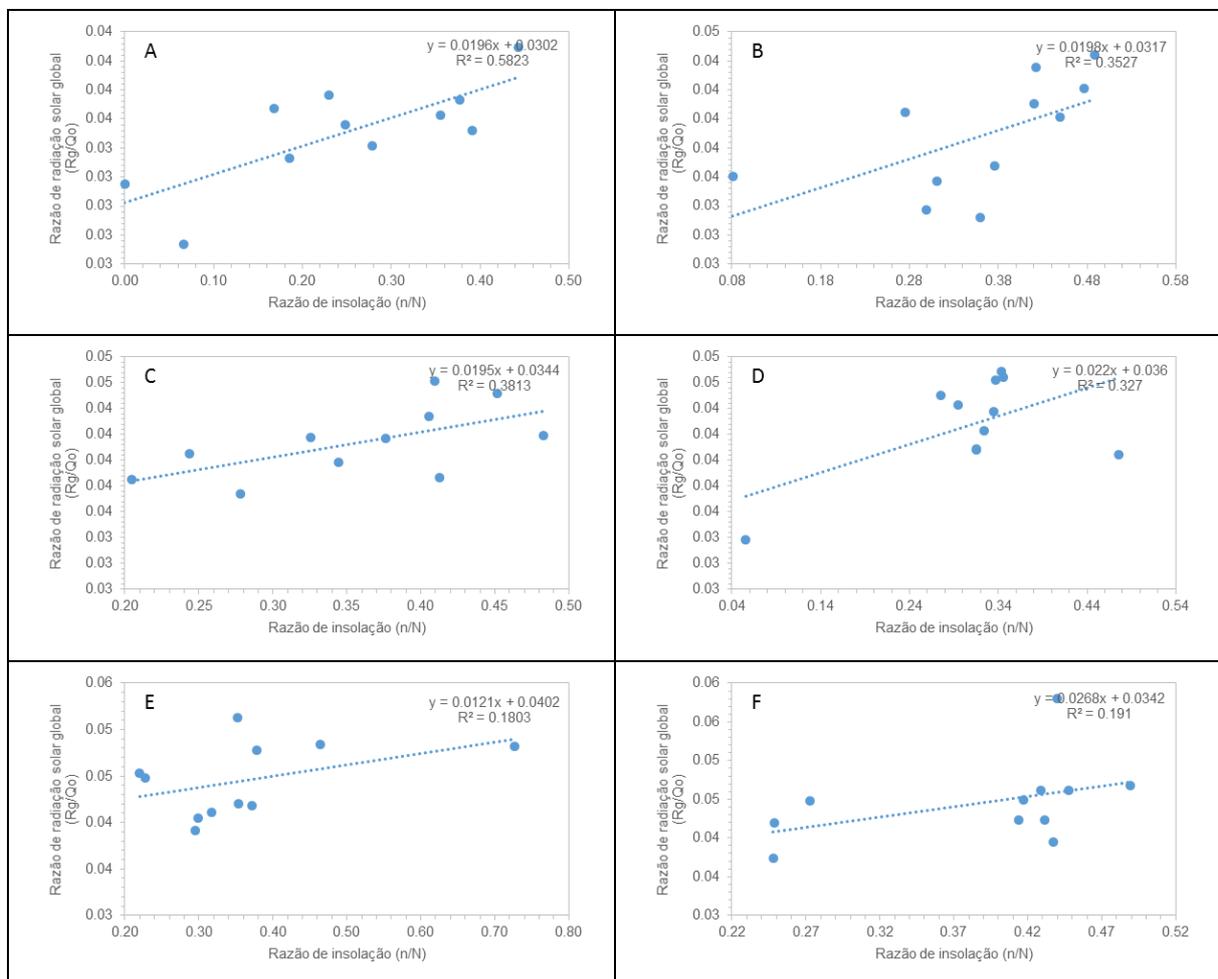


Figura 3. Dispersão dos valores mensais da relação entre a razão de radiação solar global ( $R_g/Q_o$ ) e razão de insolação ( $n/N$ ) para os meses de julho (A), agosto (B), setembro (C), outubro (D), novembro (E) e dezembro (F), no período de 2006 a 2012, em Garanhuns/PE, 2010-2020.

Nos meses do período chuvoso os coeficientes angulares “b” das equações de regressão variaram entre 0,046 mês de abril (D) e 0,049 em junho (F) (Figura 2), enquanto que nos meses do período menos chuvoso variaram entre 0,014 mês de abril (Figura 2C) e 0,026 no mês de dezembro (Figura 3F), indicando que na região existe uma quantidade significativa de radiação que é transmitida pelas partículas na atmosfera. Segundo Belúcio et al. (2014) e Silva et al. (2014), esses coeficientes do modelo empírica de Angström-Prescott, desempenham um papel de importância significativa na relação entre a radiação global e a duração de horas de brilho solar, que são variáveis meteorológicas importantes para o cálculo da evapotranspiração de referência e conseqüentemente, para a estimativa de consumo de água das lavouras e dimensionamento de sistemas de irrigação.

De acordo com Mendonça et al. (2020), o valor do coeficiente linear “a” que expressa a fração da radiação no topo da atmosfera que atinge a Terra em dias totalmente nublados, correspondente à fração difusa, e o valor coeficiente angular “b” expressa o total de radiação solar global. Segundo os mesmos autores, os valores de “a” e “b” variam de acordo com a localidade, sendo ambos dependentes da composição atmosférica de cada local e em cada época do ano, bem como da latitude e a altitude, que por sua vez, interferem na espessura da camada da atmosfera a ser coberta pela radiação solar, e locais ou horários com maior umidade no ar terão valores menores de “a” e “b”.

Nos meses do período chuvoso os coeficientes lineares “a” das equações de regressão variaram entre 0,019 no mês de maio (E) e 0,021 mês de junho (F) (Figura 2), enquanto nos meses do período menos chuvoso oscilaram entre 0,036 do mês de dezembro (Figura 3D) e 0,029 em janeiro (Figura 2B). Por estarem relacionados à radiação solar difusa, esses valores indicam que apesar de no período chuvoso ocorrerem elevados níveis de nebulosidade, é no período menos chuvoso que há maior dispersão de radiação solar em Garanhuns/PE. Segundo Silva (2014), os coeficientes “a” e “b” são fortemente afetados pela escala temporal em que estes são utilizados, podendo assim afetar a estimativa da  $Q_g$ .

Silva (2014) obteve valores mensais de “a”: 0,271, 0,288 e 0,269 (período chuvoso) e valores mensais de “b”: 0,313, 0,316 e 0,311 (período seco) para os meses de maio, junho e julho, respectivamente, com equações de regressão com  $R^2$  superiores a 0,60 para a região de Bebedouro em Petrolina/PE, obtidos no período de 01/08/1968 a 31/07/2011.

Analisando os valores da Tabela 1, verificam-se valores de  $R^2$  e  $r$  altos para os meses de abril, maio e junho, que coincidem com o período chuvoso da região, indicando que houve bom ajustamento e boa associação, ou seja, pouca dispersão entre as razão de radiação solar e a razão de insolação.

Tabela 1. Valores mensais dos parâmetros estatísticos e do índice de desempenho (c) entre valores mensais de radiação solar ( $WJ\ m^{-2}\ mês^{-1}$ ), no período de 2006 a 2012, em Garanhuns/PE, 2010-2020.

Mês	Coeficientes do modelo		Parâmetros de avaliação do modelo				Classificação do parâmetro “c”
	Linear “a”	Angular “b”	$R^2$	r	d	c	
Jan.	0,0322	0,0187	0,29	0,54	0,64	0,34	Péssimo
Fev.	0,0293	0,0250	0,35	0,59	0,70	0,42	Mal
Mar.	0,0359	0,0149	0,54	0,73	0,82	0,60	Sofrível
Abr.	0,0213	0,0469	0,74	0,86	0,91	0,77	Bom
Mai.	0,0194	0,0478	0,71	0,84	0,92	0,79	Bom

Jun.	0,0219	0,0499	0,78	0,89	0,94	0,83	Bom
Jul.	0,0302	0,0196	0,58	0,76	0,86	0,65	Mediano
Ago.	0,0317	0,0198	0,35	0,59	0,70	0,42	Mal
Set.	0,0344	0,0195	0,38	0,62	0,74	0,46	Mal
Out.	0,0360	0,0220	0,33	0,57	0,71	0,41	Mal
Nov.	0,0402	0,0121	0,18	0,42	0,49	0,21	Péssimo
Dez.	0,0342	0,0268	0,19	0,44	0,54	0,23	Péssimo

Para os meses janeiro-fevereiro, e julho a dezembro, períodos menos chuvosos os valores de  $R^2$  e  $r$  conforme classificação proposta por Camargo & Sentelhas (1997), foram péssimo, indicando mal ajuste e uma enorme dispersão dos pontos ao redor da linha de regressão, com exceção do mês maio. Isso reforça que para períodos menos chuvosos, o uso dos coeficientes do modelo empírico linear de Angström-Prescott "a" e "b" não é recomendado para estimar a radiação solar global para uma região a partir da insolação.

ANDRADE JÚNIOR et al. (2012), observaram valores de  $R^2$  de 0,714 e 0,515 para períodos chuvoso e seco respectivamente, para a estimativa da radiação solar com os coeficientes "a" e "b" na região de Parnaíba, PI. TORRES et al. (2010) obtiveram valores de "a" e "b" mensais com equações de regressão com  $R^2$  maiores que 0,90 para a região de Canavieiras, BA. DALLACORT et al. (2004) citado por Silva (2014), obtiveram valores de  $R^2$  acima de 0,80 para as equações de regressão mensais estudadas para a obtenção dos coeficientes "a" e "b" de Angström-Prescott para região de Petrolina.

Os coeficientes  $R^2$  e  $r$  fornecem apenas informações sobre a precisão do modelo matemático obtido, mas não revelam sobre a sua exatidão (acurácia) e desempenho do modelo. Assim, por meio da determinação do índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985), observou-se alta exatidão foi observada para a linha de regressão proposta por Angström-Prescott para estimar a radiação solar global em função da insolação para períodos chuvosos, que foi expressa pelo valor de "d" da ordem de 0,91 (abril), 0,92 (maio) e 0,94 (junho). O índice de desempenho "c", dado pelo produto entre  $r$  e  $d$ , foram 0,77 (abril), 0,9 (maio) e 0,83 (junho) para as condições climáticas da localidade estudada, o que reforça ótimo desempenho do modelo linear proposto, que coincide com trimestre mais chuvoso no município de Garanhuns e da região.

De acordo com Peixoto et al. (2014), para os índices EF, D, c e  $r$ , quanto mais próximos a 1, melhor o desempenho do método, isso indica que os valores obtidos na previsão do modelo são também similares aos resultados reais ou obtidos por meio de um método considerado como padrão. Para a classificação do índice de desempenho (c), os coeficientes de Pearson ( $r$ ) e do eficiência do modelo (EF), adotou-se a Tabela 1, seguindo os critérios indicados por Camargo e Sentelhas (1997), Bussab & Morettin (2010): Beskow et al. (2011).

Para o período menos chuvoso, o desempenho do modelo proposto para os meses de janeiro-fevereiro, e julho a dezembro, é muito pequeno, de modo que são poucos recomendáveis o uso para estimar a radiação solar global para fornecer os dados faltosos em locais dentro da mesma região climática, e de suprir dados de insolação onde carecem de instrumentos de medida de radiação solar, pois pelo coeficiente de desempenho apresentaram índices de desempenho inferiores a 0,51, exceto para os meses de março (0,60) e julho (0,65) que apresentou coeficiente moderado no período menos chuvoso da região para a série histórica de 2010 a 2020.

## CONCLUSÕES

i) A metodologia proposta mostrou-se eficaz na avaliação dos parâmetros da regressão empírica do modelo linear de Angström-Prescott de forma rápida e simplicidade, permitindo estimar a radiação solar global ( $Q_g$ ) para um período mais chuvoso, em nível mensal para cada mês da região do município de Garanhuns, a partir de dados de insolação ou número de horas de brilho solar ( $n$ ), em locais onde não existem instrumentos de medidas de radiação solar global.

ii) Na região, verifica-se uma enorme variabilidade inter-mensal dos coeficientes “a” e “b” da regressão do modelo linear de Angström. Os maiores valores de “b” ocorreram nos meses abril, maio e junho, no período de 2010 a 2020, quando coincide com o período mais chuvoso da região.

## REFERÊNCIAS

Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco - CONDEPE/FIDEM. (2017). Pernambuco em redes: caracterização das regiões de influência das cidades pernambucanas. Recife.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J. L.M., Sparovek, G., (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart, 22, 6, 711-728.

Andrade Júnior, A.S.; Noletto, D.H.; Silva, M.E.; Braga, D.L.; Bastos, E.A. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba, Piauí. (2012). *Comunicata Scientiae*, v.3 (1): 50-54.

Andrade, A.R.S.; Neto, A.H.G.; Cruz, A.F.S.; Andrade, E.K.P.; Santos, V.F.; Silva, T.N.P. (2018) Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, Pernambuco, Brazil. 3(1), 126-145.

Andrade, M.C., (2009). Geografia de Pernambuco: ambiente e sociedade. Grafset, João Pessoa. Barbosa, V.V.; Souza, W.M.S.; Galvíncio, J.D.; Costa, V.S.O. (2016). Análise da variabilidade climática do município de Garanhuns, Pernambuco – Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2), P.353-367.

Belúcio, L. P.; Silva, A. P. N.; Souza, L. R.; Geber Barbosa De Albuquerque Moura, G. B. A. (2014). Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(4), p.494-504.

Beskow, S.; Mello, C.R.; Norton, L.D.; Silva, A.M. (2011). Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. *Catena*, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 160-171.

Blanco, F. F.& Sentelhas, P. C. (2002). Coeficientes da equação de Angström – Prescott para a estimativa da insolação para Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 10(2), p.295-300.

Borges, V.P.; Oliveira, A.S.; Coelho Filho, M.A. (2010) Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG, 14 (1), p.74–80.

Buriol, G. A.; Estefanel, V.; Heldwein, A. B.; Prestes, S. D.; JoãoHorn, J. F. C. (2012). Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.9, p.1563-1567.

Bussab, W. De O.; Morettin, P.A. Estatística básica. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p

- Carmo, J. F. A.; Moura, M. S. B.; Guimarães, A. P. C. (2015). Duração do brilho solar por diferentes sensores. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Lavras, MG. Anais...COMBA, 2015, p.325-331. (CD-ROM).
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97.
- Dantas, A.A.A. et al. (2003). Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, 27(6), p.1260-1263.
- Garcia, A.D.B.; Mendonça, J.C.; Martins, C.A. (2017). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) no município de Santa Teresa, ES. Irriga, Botucatu, v. 22, n. 4, p. 701-714.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (2015.) Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat>>. Acesso em: 30/03/2021.
- Mendonça, J.C.; Garcia, A.D.B.; Franco, J.N. (2020). Coeficientes de Angström-Prescott para estimar a radiação Solar global em campos dos Goytacazes, RJ. Irriga, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 481-491, julho-setembro, 2020.
- Ometto, J.C. (1981). Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres, 425p.
- Peixoto, T.D. C.; Levien, S. L. A.; Bezerra, A.H.F.; Sobrinho, J.E. (2014). Avaliação de diferentes metodologias de estimativa da ET<sub>0</sub> baseadas no tanque classe A, em Mossoró, RN. Revista Caatinga, Mossoró, v. 27, n. 2, p. 58-65.
- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. Transactions of the Royal Society of Australia, Adelaide, v. 64, n. 1, p. 114-122.
- Raniero, M.R.; Calça, M.V.C.; Dal Pai, A. (2018) Automatização Do Processo De Contagem Das Horas De Brilho Solar. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, p.1-9.
- Santos, R.A. et al. (2003). Estimativa da radiação solar global diária em Ilha Solteira, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia, GO. Anais... Goiânia: COMBEA, 2003. (CD-ROM).
- Silva, A. O. (2014). Coeficientes de Angström-Prescott e sua influência na radiação solar e ET<sub>0</sub> no perímetro irrigado de bebedouro em Petrolina. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, 8(4), p.333-342.
- Souza, A. P. et al. (2011). Estimativa das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação solar global horizontal. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.3, p.277-288,
- Torres, C.J.F.; Silva, N.L.; Barros, F.M.; Rocha, F.A.; Silva, J.O. (2010). Determinação dos coeficientes do modelo de Angström-Prescott para a região de canavieiras, Estado da Bahia. Enciclopédia Biosfera, v.6 (11): 1-7.
- Varejão-Silva, Mario Adelmo. Meteorologia e Climatologia (2006). Versão Digital 2. Recife 449p.
- Vargas, M.C.; Siqueira, J.A.C.; Nogueira, C.E.C.; Zampiva, M.M.M.; Cunha, E.A.A.; Bohn, C. A. (2019). Métodos de determinação da radiação solar global em diferentes planos inclinados. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 8(4), p.698- 707.
- Vianello, R.L. & Alves, A.R. (1991). Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 449p.