

MODELAGEM E VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE IRRADIAÇÃO PAR E IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Chigueru Tiba e Sergio da S A Leal
Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU - CEP 50.740-540, Recife, PE, Brasil
Tel.:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250
Email: tiba@ufpe.br ou tibasol@aol.com

RESUMO. No Brasil e particularmente no Nordeste do Brasil, as medidas da radiação PAR não fazem parte da rotina de medidas das estações meteorológicas e assim, são ainda mais raras do que medidas sobre irradiação solar. Neste contexto duas estações foram instaladas em Pernambuco, uma em Recife (clima tropical marítimo) em abril de 2003 e outra em Pesqueira (semi-árido) em setembro de 2004 para realizar medidas simultâneas da irradiação solar diária e irradiação PAR que permitissem a modelagem e a validação estatística da relação entre esses dois parâmetros e com isso possibilitar a estimativa da radiação PAR onde houvesse somente informações sobre irradiação solar. Foram analisados os modelos de Alados et al. com coeficientes de regressão múltipla original e o calculado localmente e Perez et al. com coeficientes locais. O modelo de Perez et al. com coeficientes locais mostrou um desempenho estatístico superior produzindo um viés da ordem de -2% e 4% e desvios médios quadráticos de 14% e 8% respectivamente para Recife e Pesqueira.

Palavras Chaves: Irradiação PAR, Regressão múltipla, Modelagem e Relação entre irradiação solar global e PAR

INTRODUÇÃO

Um dos fatores críticos no crescimento das plantas é o processo de conversão da energia solar luminosa compreendida na faixa do espectro de 400-700nm, em energia química, no processo conhecido como fotossíntese. A denominação específica desse espectro solar parcial como radiação fotossinteticamente ativa, mais conhecida pelo seu acrônimo na língua inglesa como PAR (Photosynthetically active radiation), decorre desse fato. O crescimento e a produtividade das plantas estão regulados pela fotossíntese que por sua vez depende da quantidade da radiação PAR incidente e absorvida. Além disso, a quantidade da radiação PAR absorvida pelas plantas influencia também a troca de energia e água entre a superfície terrestre e a atmosfera e, portanto também impacta o processo regenerativo da atmosfera.

Infelizmente, apesar da sua grande importância, nas estações meteorológicas tradicionais a radiação PAR não faz parte das medidas de rotina. Assim, as informações sobre a radiação PAR são ainda mais escassas do que sobre a irradiação solar, conforme apontado por Tiba et al. (2004).

A alternativa para essa situação é a estimação mediante o uso de outras variáveis meteorológicas mais comuns e disponíveis na localidade de interesse. Na literatura existem dois tipos de modelagem para a radiação PAR:

- Modelo de transferência radiativa e
- Modelos empíricos

O primeiro tipo de modelagem é uma abordagem física do problema de transferência radiativa na atmosfera terrestre. Trata-se da interação da radiação solar na banda de 400-700 nm com a atmosfera terrestre: espalhamento de Rayleigh, absorção pelo de ozônio, vapor de água e aerossóis (Gueymard 1989; Olseth e Skartveit, 1993). A relação dos valores medidos da radiação PAR e do espectro solar total (290-2700nm) é a base dos modelos empíricos (Alados et al. 1996; Perez et al. 1990) desenvolveu um modelo para iluminância cujos parâmetros tem bastante similaridade com o modelo empírico de Alados et al. (1996).

A relação entre a radiação PAR e a irradiação solar em todo o espectro depende das condições climáticas locais como: pressão atmosférica, ângulo de elevação solar, turbidez e água precipitável. O modelo empírico proposto por Alados et al. (1996) foi testado e validado para Almeria-Espanha, um local situado no Hemisfério Norte em clima temperado (36,83° N, 2,41° L). Existe uma diferença significativa do ponto de vista climatológico entre Almeria e os locais do Nordeste onde estão sendo realizadas as medidas. Por exemplo, a quantidade de vapor de água precipitável é muito maior no NE (em algumas épocas do ano chega a ser várias vezes maior), o que pode afetar de forma significativa a faixa infravermelha do espectro total. Nesse sentido não só é necessário verificar cuidadosamente o funcionamento do modelo proposto, como também é necessária uma calibração local do modelo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Estações de medidas e parâmetros

Na Tabela 1 são mostradas as estações de medidas da radiação PAR e irradiação solar global, suas coordenadas geográficas, caracterização climática e período de medidas.

Estações	Coordenadas geográficas			Clima	Período
	Lat.	Long.	Alt.(m)		
Recife-PE	8 ^o 3'	34 ^o 55'	7	Equatorial–Marítimo Continental	Abril03/Maio05
Pesqueira -PE	8 ^o 24'	36 ^o 46'	639	Equatorial – Semi-árido	Setembro04/Maio05

Tabela 1 – Estações de medidas simultâneas da radiação PAR e Irradiação solar

As medidas foram realizadas no plano horizontal, em escala de minuto. Os sensores utilizados para as medidas da radiação PAR e irradiação solar total foram os modelos LI-190SA e LI-200SA ambos fabricados pelo LICOR. Conforme informações da LI-COR (2005) esses sensores tem um erro de calibração de $\pm 5\%$ e uma deriva máxima anual de $\pm 2\%$ assim podemos esperar um erro experimental da relação entre a radiação PAR horária e irradiação solar horária da ordem de 10%, após um ano da instalação dos sensores. Os sensores foram acoplados a um sistema de aquisição de dados da CAMPBELL, modelo CR-10X.

A caracterização do céu foi feita conforme Perez et al. (1990) onde se define ε (índice de transparência atmosférica) e Δ (índice de brilho do céu) como:

$$\varepsilon = \left[(I_d + I_b) / I_d + kZ^2 \right] / (1 + kZ^2) \quad (1)$$

$$\Delta = I_d m / I_0 \quad (2)$$

I_d , I_b e I_0 são respectivamente irradiação solar difusa, direta e extraterrestre, Z o ângulo zenital em radianos, k constante igual a 1,041 e m a massa de ar.

A quantidade de água precipitável W (cm) foi estimada mediante:

$$W = \exp(0,07T_d - 0,075) \quad (3)$$

onde, T_d é a temperatura de orvalho e foi estimada conforme ParoScientific (2004) mediante o conhecimento da temperatura ambiente e umidade. As temperaturas ambientes e umidades obtidas de estações meteorológicas próximas com intervalos de 3 horas foram completadas mediante interpolação horária com splines cúbicos.

A relação entre a irradiação solar difusa e total foram obtidas para Recife com medidas feitas com dois piranômetros sendo um deles munido de uma banda de sombra. Para o caso da estação de Pesqueira essa relação foi calculada mediante a correlação de Erbs et al. (1982).

Metodologia e comparação estatística

As séries de medidas horárias para Recife e Pesqueira foram divididas em dois períodos distintos conforme a Tabela 2. O primeiro período foi utilizado para a obtenção dos parâmetros locais da regressão múltipla e o segundo para a aferição dos modelos.

Local	Período	
	Modelagem	Validação
Recife	abril 2003 - abril 2004	maio 2004 - maio 2005
Pesqueira	setembro 2004 - dezembro 2004	janeiro 2005 - maio 2005

Tabela 2–Séries horárias para modelagem e aferição

A acurácia dos modelos foi determinada usando indicadores estatísticos clássicos como viés ou desvio médio (DM) e desvio médio quadrático (DMQ).

MODELOS PARA A RELAÇÃO ENTRE IRRADIAÇÃO PAR E IRRADIAÇÃO GLOBAL

Modelo de Perez et al. adaptado à PAR

Trata-se de um modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) para iluminância. Como a irradiação PAR e a Iluminância compreendem a mesma faixa espectral foram utilizados os mesmos parâmetros para a modelagem da relação entre a irradiação PAR horária e irradiação solar global horária, assim:

$$Q_p = I[a + bW + c \cos(Z) + d \ln(\Delta)] \quad (4)$$

onde Q_p é a irradiação PAR, I é a irradiação solar global e a , b , c e d são constantes a serem determinadas por uma regressão múltipla.

Modelo de Alados et al.

O modelo empírico proposto por Alados et al. (1996) foi testado e validado para Almeria-Espanha, um local situado no Hemisfério Norte em clima temperado ($36,83^\circ$ N, $2,41^\circ$ L).

$$Q_p = I(1,786 - 0,192 \ln \epsilon - 0,202 \ln \Delta + 0,005T_d + 0,032\text{sen}^2 \alpha) \quad (5)$$

onde Q_p é a irradiação PAR horária, I é a irradiação solar global horária, T_d é a temperatura de orvalho e α é a altitude solar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Medidas experimentais

A radiação PAR, I_p é definida como a densidade de fluxo de fótons, isto é a quantidade de fótons no espectro de 400-700 nm que incide sobre uma superfície unitária por unidade de tempo. A unidade desse fluxo radiométrico é definida como:

$$1 \mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 6,022 \times 10^{17} \text{ fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

A integração de I_p ao longo de uma hora resulta Q_p , quantidade de fótons incidente sobre uma superfície unitária ao longo de uma hora. As medidas experimentais da radiação PAR, Q_p e irradiação solar horária, I , em função da altitude solar, para todas as condições do céu e no período de abril de 2003 a dezembro de 2004 para Recife e de setembro de 2004 a dezembro de 2004 para Pesqueira podem ser vistas nas Figuras 1 e 2.

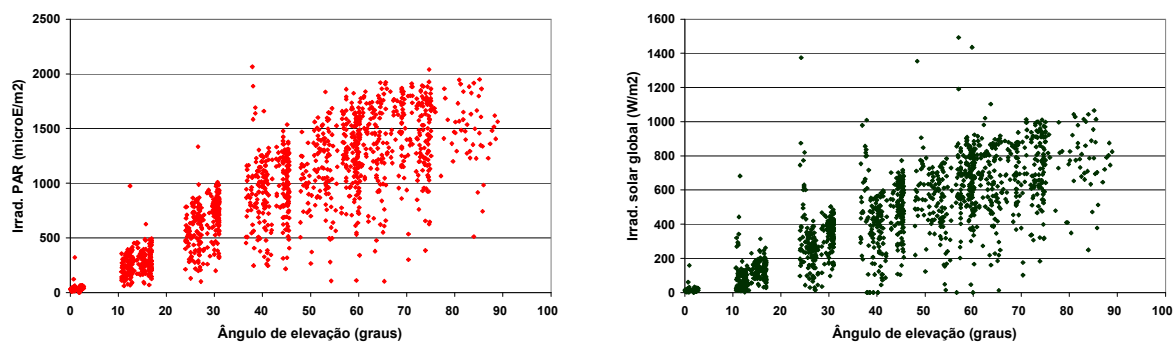


Figura 1 – Irradiação PAR horária e irradiação solar horária sobre uma superfície horizontal em função do ângulo de elevação solar em Recife no período abril 2003 a dezembro de 2004 para todas as condições do céu.

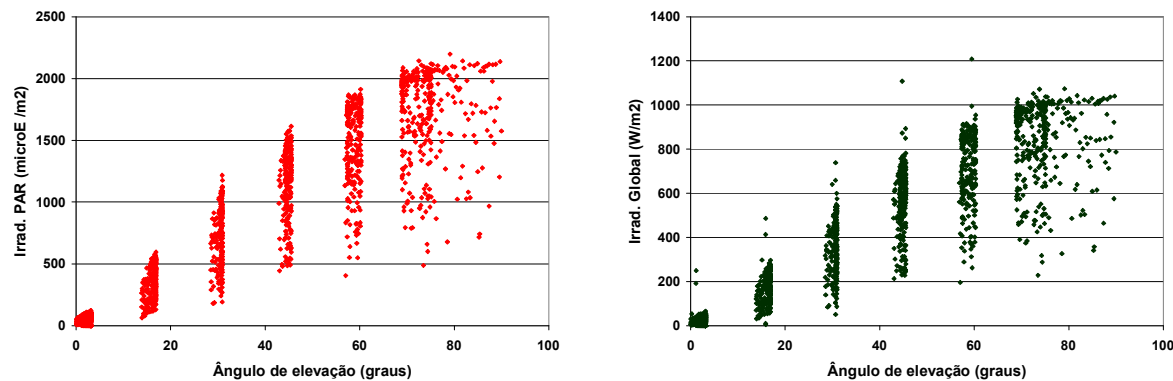


Figura 2 – Irradiação PAR horária e irradiação solar horária sobre uma superfície horizontal em função do ângulo de elevação solar em Pesqueira no período de setembro 2004 a dezembro de 2004 para todas as condições do céu.

Resultado da modelagem da relação entre a radiação PAR e irradiação solar para todas as condições do céu

Por razões de simplicidade os modelos serão denominados da seguinte forma: o modelo de Alados et al. com coeficientes originais de Almeria como Alados 1, o mesmo modelo com coeficientes locais Alados 2 e Perez et al. simplesmente de Perez. As expressões resultantes são:

Alados 1 (Coeficientes de Almeria)

$$q_p = I(1,786 - 0,192 \ln \epsilon - 0,202 \ln \Delta + 0,005T_d + 0,032\text{sen}^2 \alpha) \tag{5}$$

Alados 2 (Coeficientes Locais)

$$\text{(Recife)} q_p = I(2,66 - 0,16 \ln \epsilon - 0,24 \ln \Delta + 0,02T_d + 0,36\text{sen}^2 \alpha) \tag{6}$$

$$\text{(Pesqueira)} q_p = I(2,53 - 0,12 \ln \epsilon - 0,17 \ln \Delta - 0,018T_d - 0,37\text{sen}^2 \alpha) \tag{7}$$

Perez (Coeficientes Locais)

$$\text{(Recife)} q_p = I(2,24 - 0,01W - 0,36 \cos Z - 0,11 \ln \Delta) \tag{8}$$

$$\text{(Pesqueira)} q_p = I(2,23 - 0,03W - 0,11 \cos Z - 0,01 \ln \Delta) \tag{9}$$

As Figuras 3 e 4 mostram o desempenho dos modelos de Alados et al. e Perez et al. para Recife e Pesqueira respectivamente. Cabe ressaltar novamente que os modelos foram testados com séries temporais independentes (que não foram utilizados na obtenção dos coeficientes locais) conforme discriminados na Tabela 2.

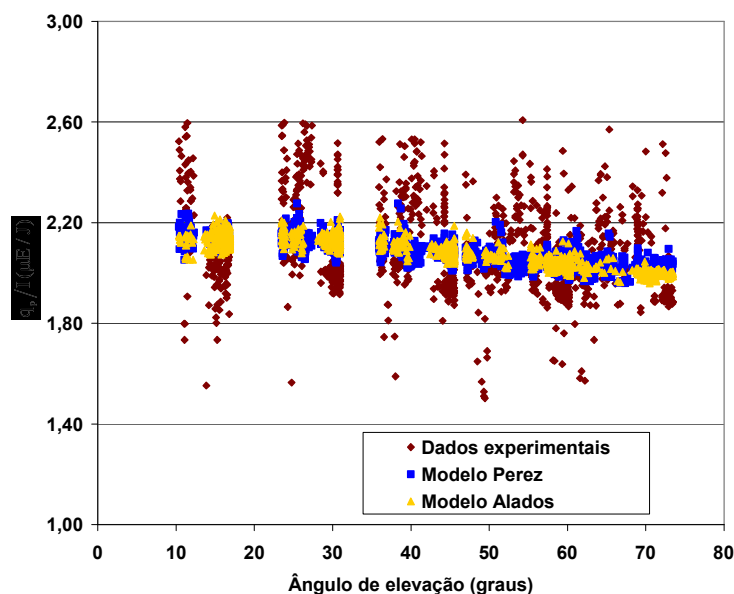


Figura 3 – Desempenho dos modelos de Alados et al. e Perez et al. para Recife

Para uma melhor apreciação do desempenho estatístico dos modelos citados, foram calculados os desvios médios (viés) e desvios médios quadráticos que podem se vistos na Tabela 3.

Local	Desvio médio (DM)			Desvio médio quadrático (DMQ)		
	Alados 1	Alados 2	Perez	Alados 1	Alados 2	Perez
Recife	4%	-9%	-2%	32%	20%	14%
Pesqueira	3%	3%	4%	38%	12%	8%

Tabela 3 – Desvios médio e quadrático dos modelos apresentados

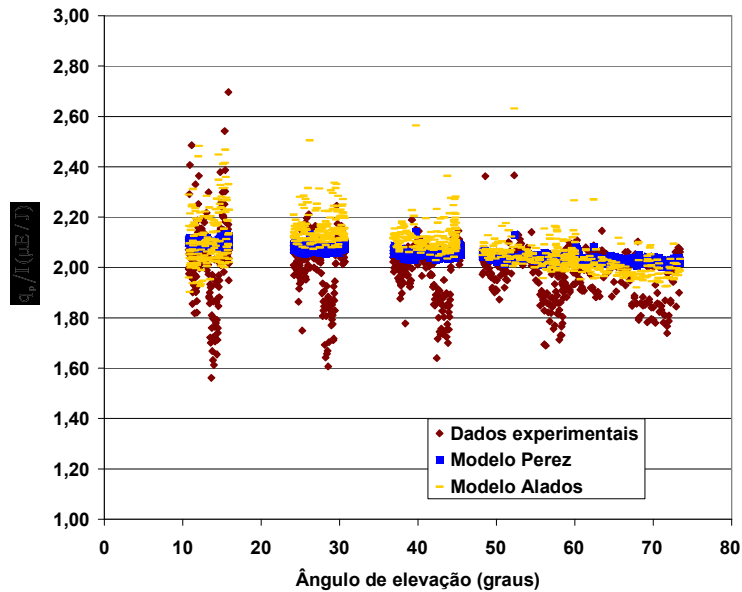


Figura 4 – Desempenho dos modelos de Alados et al. e Perez et al. para Pesqueira

CONCLUSÕES

O modelo de Perez et al. (originariamente elaborado para iluminância e adaptado para radiação PAR neste trabalho) mostrou um acurácia de predição da radiação PAR horária em nível bastante **aceitável na medida que estão dentro do intervalo de erros das medidas experimentais. Os sensores de Pesqueira estão completando um ano de operação e portanto considerando uma deriva anual de $\pm 2\%$ os erros experimentais na relação q_p/I seria de 10% e no caso de Recife considerando uma deriva de $\pm 4\%$ em 2,0 anos de operação os erros experimentais resultaria em 13%**. Para duas regiões climaticamente bastante distintas um tropical úmido (Recife) e outro tropical semi-árido (Pesqueira) o modelo de Perez et al. previu a irradiação PAR com DM de -2% e 4% e DQM de 14% e 8% respectivamente. A utilização desse modelo com a irradiação solar horária seja medida ou estimada permitirá conhecer o valor correspondente da radiação PAR em uma região vizinha (com similaridades climáticas e fitogeográficas) a Recife e Pesqueira (num raio aproximado de 200 Km) ampliando desta foram de modo significativo e o conhecimento da radiação PAR na região.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico, CNPq.

REFERÊNCIAS

- Alados I., Foyo-Moreno I. y Alados-Arboledas, L. (1996). Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 1-2, 121-131.
- Erbs D. G., Klein, S. A. and Duffie, J. A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly – average global radiation, *Solar Energy* 28, 4, 293-302.
- Gueymard C. (1989). A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically-active radiation at the Earth's surface. *Solar Energy* 43, 5, 253-265.
- LI-COR Biosciences (2005). www.licor.com/env/Products/envproductlist.jsp
- Olseth J. A. and Skartveit A. (1993). Luminous efficacy models and their application for calculation of photosynthetically-active radiation. *Solar Energy* 52, 5, 391-399.
- Paroscientific, Inc. (2004). Met3A calculation of dew point, www.paroscientific.com/dewpoint.htm.
- Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J. and Stewart R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct, and global irradiance, *Solar Energy* 44, 5, 271-289.
- Tiba C., Fraidenraich N., Grossi Gallegos H. and Lyra F. J. M. (2004). CD ROM Atlas Solarimétrico do Brasil, *Renewable Energy* 29, 6, 991-1001.

ABSTRACT

In Brazil and particularly in the Northeast of Brazil, PAR radiation measures are not part of routine meteorological station measures, and therefore they are still rare than solar irradiation measures. In this context, two stations were installed in Pernambuco: one in Recife (maritime tropical climate) in April 2003 and the other in Pesqueira (tropical and semi-arid) in September 2004 for carrying out simultaneous measurements of hourly solar irradiation and PAR irradiation which permit the modeling and the statistic validation of the relationship between these two parameters and with this, makes possible the estimation of PAR irradiation where there existed only information on solar irradiation. The models of Alados et al. with

original coefficients and those calculated locally and the Perez et al. with local coefficients were analyzed. The Perez et al. model with local coefficients showed a superior statistical performance, producing a mean bias deviation in the order of -2% and 4% and root mean quadratic deviation of 14% and 8% respectively for Recife and Pesqueira.

Keywords: PAR irradiation, Modeling, Multiple regression, and Ratio of PAR to broadband solar irradiation