

Estimativa da Irradiância Fotossinteticamente Ativa em Função da Irradiância Solar Global¹

Reinaldo Prandini Ricieri², Samuel Nelson Melegari de Souza², Thayana Duanne da Silva Almeida³, Anderson Miguel Lenz³

¹Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2015

²Professor Dr. na Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE, ricieri@unioeste.br, samuel.souza@unioeste.br

³Mestrando em Engenharia de Energia da Agricultura na Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE, andersomm25@gmail.com, thayana.almeida@gmail.com

Resumo

É visto no presente trabalho o modelo matemático para estimar a irradiância fotossinteticamente ativa (IPAR) em função irradiância global (IRG), para cada período sazonal. Foi utilizada uma série de dados compreendida no período de março de 2005 a março de 2007. As medidas foram realizadas na estação meteorológica experimental do *Campus* da UNIOESTE/Cascavel-PR. A irradiância solar global e a fotossinteticamente ativa, foram simultaneamente medidas por um piranômetro da Kipp & Zonen (modelo CM3) e um sensor quântico da marca LI-COR. Os dados de março de 2005 a março de 2006 foram utilizados no cálculo dos parâmetros das respectivas funções e o restante da série serviu para a validação dos modelos. O modelo encontrado juntamente com a média dos erros referentes ao período do outono, do inverno, da primavera e do verão, respectivamente foram: $IPAR_{est} = -8,11 + 0,82 \times IR_{glo}$ (-11,21%); $IPAR_{est} = -8,30 + 0,72 \times IR_{glo}$ (-5,44%); $IPAR_{est} = 11,01 + 0,22 \times IR_{glo}$ (7,59%) e $IPAR_{est} = 10,44 + 0,29 \times IR_{glo}$ (10,27%).

Palavras chaves: radiação solar fotossinteticamente ativa, radiação global, irradiância.

Abstract

It is seen in this study mathematical model to estimate the active photosynthetic irradiance (IPAR) in global irradiance function (IRG), for each seasonal period. A series of data ranging from march 2005 to march 2007. The measurements were performed on experimental meteorological station of the Campus UNIOESTE/Cascavel-PR was used. The global solar irradiance and photosynthetic active, were simultaneously measured by a pyranometer Kipp & Zonen of (CM3 model) and a quantum sensor LI-COR brand. Data from march 2005 to march 2006 were used in the calculation of the parameters of their duties and the rest of the series served to validate the models. The model found with the average errors for the autumn term, winter, spring and summer, respectively were: $IPAR_{est} = -8,11 + 0,82 \times IR_{glo}$ - (-11,21%); $IPAR_{est} = -8,30 + 0,72 \times IR_{glo}$ - (5,44%); $IPAR_{est} = 11,01 + 0,22 \times IR_{glo}$ - (7,59%) e $IPAR_{est} = 10,44 + 0,29 \times IR_{glo}$ - (10,27%).

Keywords: photosynthetically active solar radiation, global radiation, irradiance.

1 - Introdução

A radiação solar incidente na superfície da Terra é atenuada com a interação dos constituintes da atmosfera, sendo um dos fatores determinantes da produção de biomassa (Dengqiu Li *et al*, 2015).

A irradiância solar é determinada através da integral da curva de energia solar por metro quadrado em função do tempo, sendo expressa com a unidade W/m^2 (Ahmet T. *et al*, 2015).

Ao se propagar na atmosfera, a radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas (denominados aerossóis) e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação e das espécies de gases e aerossóis presentes na atmosfera (Danny H.W. Li *et al*, 2015). Do total de radiação solar incidente: 16% é absorvida pelo O_3 , vapor d'água e aerossóis, 3% é absorvida pelas nuvens, 51% absorvida pela superfície

terrestre, 6% espalhada pelo ar, 20% refletida pelas nuvens e 4% refletida pela superfície (MARTINS, PEREIRA & ECHER, 2004).

A radiação solar sofre efeitos complexos das nuvens, as quais podem ser caracterizadas segundo o processo de espalhamento e absorção como um fator de maior importância no aspecto quantitativo da energia, variando de acordo com o tipo de nuvem (M. Boulifa, A. *et al.* 2015). No verão, nuvens *cumulus* através de fenômeno de múltiplas reflexões podem aumentar o valor da radiação solar que atinge o solo, chegando muitas vezes a ser maior que a incidente no topo da atmosfera. Na presença de nuvens *stratus* baixa, a radiação solar incidente é reduzida, já nuvens *cirrus* altas possuem menor influência (VALIATI, 2001).

Ricieri (1998) determinou uma metodologia para obtenção do tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade (K_t), para cidade de Botucatu, por meio de comparação gráfica das irradiações global, direta e difusa na incidência horizontal. Neste estudo o autor encontrou o intervalo de $0,3 \leq K_t \leq 0,80$, mostrando que a radiação global incidente na superfície terrestre local é inferior a 80% da irradiação incidente no topo da atmosfera.

Quase toda energia solar é emitida sob a forma de irradiação luminosa: 42% no espectro visível, 55% no infravermelho e 3% no ultravioleta próximo. A terra capta um décimo de bilionésimo dessa energia, ou seja, um pouco mais de 15 bilhões de MW. A parte diretamente utilizável é a radiação luminosa ao nível do solo, cuja potência varia, aproximadamente entre 0 a 1100 W/m^2 numa superfície horizontal, conforme a latitude. Mais de 99% da radiação solar apresenta comprimento de onda inferior a $0,4 \mu\text{m}$ com pico de intensidade em $0,5 \mu\text{m}$, ou seja, praticamente toda a radiação proveniente do sol encontra-se na região de ondas curtas correspondendo a região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Em vista disso, a radiação proveniente do sol é muitas vezes denominada “radiação de ondas curtas” (TESSARO, 2006 *apud* MARTINS, 1996).

Uma das faixas da radiação global de importância na produção agrícola é a faixa de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Parte desta radiação é fonte primária de energia na fotossíntese, pois excita as moléculas de clorofila que resultam na liberação de oxigênio molecular e na captura de dióxido de carbono da atmosfera (FAGUNDES, 2006).

A radiação fotossinteticamente ativa conhecida como PAR – *Photosynthetically Active Radiation* – propaga pela atmosfera praticamente sem sofrer redução por absorção sendo esta a maior componente da radiação solar global incidente, podendo chegar a aproximadamente 50% de todo o espectro (PEREIRA, ANGELOCI & SENTELHAS, 2002) citado por

Fagundes (2006). A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) compreende a faixa espectral da radiação solar de comprimento de onda de 0,4 μm a 0,7 μm (MONTEITH, 1972).

A relação existente entre a produção de matéria seca e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida tem sido amplamente usada para definir a eficiência de uso da radiação pelas culturas (RADIN *et al.*, 2003 *apud*. SIVAKUMAR & VIRMANI, 1984).

Em plantas sadias supridas de água e nutrientes, a fotossíntese líquida e a produção de fitomassa são proporcionais à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida pelo dossel (Eduardo A. C., *et al.* 2015). Entretanto, cuidados são necessários quando se compara a produtividade da cultura em diferentes níveis de radiação, pois a taxa fotossintética e a densidade de fluxo de radiação não têm relação linear dentro do dossel, já que a maioria das folhas fica exposta a baixos níveis de radiação, além do que a absorção da radiação incidente pelas culturas depende do seu índice de área foliar (IAF), posição solar, geometria e tamanho da folha, ângulo de distribuição, idade, arranjo das plantas, época do ano, nebulosidade dentre outras condições (RADIN *et al.*, 2003 *apud* MONTEITH, 1977).

Através do conhecimento da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), incidente na superfície terrestre, é possível definir uma atividade agrícola adequada para cada região ou o próprio aumento de sua produtividade, considerando também as condições citadas anteriormente. Objetiva-se neste trabalho a divulgação de modelo matemático sazonal para estimar a irradiância fotossinteticamente ativa em função da irradiância solar global.

2 - Materiais e Métodos

Utilizou-se uma série de dados da radiação solar global e fotossinteticamente ativa, coletados na estação meteorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, município de Cascavel/PR, latitude 24°59'S, longitude 53°26'O-GR e altitude 760m.

Os dados foram coletados no período de março de 2005 a março de 2007, das 10 horas a 15 horas. Os valores referentes aos primeiros 12 meses, de 20 de março de 2005 a 19 de março de 2006, compreenderam os quatro períodos sazonais (outono, inverno, primavera e verão). Os valores, das componentes, referentes a cada período sazonal foram utilizados para calcular, através de regressão linear simples, os respectivos parâmetros relacionados aos modelos matemáticos. Os dados restantes foram utilizados na validação dos modelos.

As medidas da radiação solar global foram realizadas com um piranômetro da marca Kipp & Zonen (modelo CM3) e os da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram obtidos com um piranômetro de sensor quântico da marca LI-COR. Na aquisição de dados, foi utilizado um *datalogger* da Campbell *Scientific Inc* modelo CR10X operando em frequência de 1 Hz, realizando medidas a cada um segundo e armazenando as médias (em mV) de cada cinco minutos. Estas médias, através do respectivo fator de calibração, referente a cada instrumento de medida, foram transformadas em MJ/m² e plotadas em função do tempo, gerando gráficos com curvas diárias a cada período da estação do ano. Os valores diários das irradiâncias, em W/m², global e PAR, foram obtidos a partir da integral de cada curva de irradiação (MJ/m²).

Por meio dos valores diários das irradiâncias, foram calculados os parâmetros (a e b) da Equação 1 que estima, a irradiância fotossinteticamente ativa (IPAR_{est} – W/m²) em função da irradiância Global (IR_{glo} – W/m²), para cada dia da estação do ano.

$$\text{IPAR}_{\text{est}} = a + b \times \text{IR}_{\text{glo}} \quad (1)$$

Com as equações obtidas, estimou a irradiância (IPAR_{est}) e comparando-a com a medida (IPAR_{med}) obteve um erro médio diário, por meio da equação 2, para cada período sazonal.

$$\text{ERRO}(\%) = ((\text{IPAR}_{\text{med}} - \text{IPAR}_{\text{est}}) / \text{IPAR}_{\text{med}}) * 100 \quad (2)$$

3 - Resultado e Discussão

As Figuras 1, 2, 3 e 4 mostram as distribuições diárias das irradiâncias calculadas em torno de uma reta. Nas Figuras, verifica-se que o comportamento dos pontos em torno de suas respectivas retas é bem distribuído gerado pela equação 1 com erros baixos na estimativa da irradiância fotossinteticamente ativa, conforme os valores determinados na validação referentes a cada período sazonal e expostos na Tabela 1. No período do outono o modelo subestima a irradiância PAR (-11,21%), enquanto que, nos períodos de inverno, primavera e verão os modelos superestimam com erros respectivos a: 4,44%; 7,50% e 10,27%. Os maiores erros médios encontrados, foram nos períodos de outono e verão, devido a chuvas e umidade relativa do ar.

Nas figuras 1 e 4, é possível constatar também que há um maior número de pontos distribuídos nos níveis mais altos de irradiação global, na faixa de 800 – 1200 W/m², característico destas épocas do ano, pois há a ocorrência de um maior número de dias com baixa nebulosidade. Para os períodos de outono e inverno figuras 2 e 3, observa-se que há uma distribuição mais uniforme da ocorrência de irradiações ao longo da distribuição dos dados na reta, e observa-se uma menor irradiação global na faixa de 800 – 1200 W/m² característico do período que apresenta níveis de irradiação menor natural para o clima de Cascavel-PR.

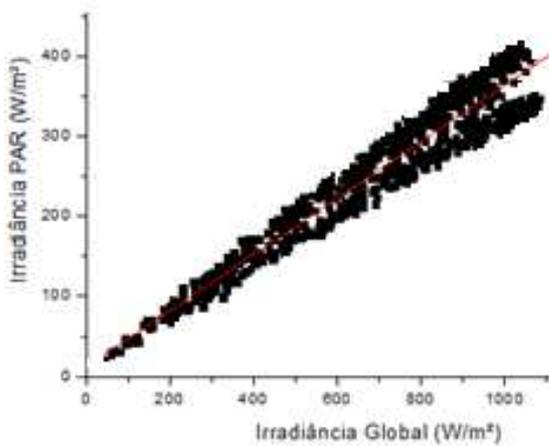


Figura 1. Verão

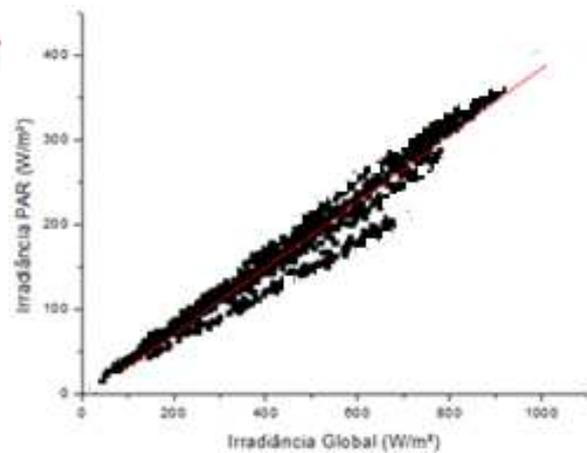


Figura 2. Outono

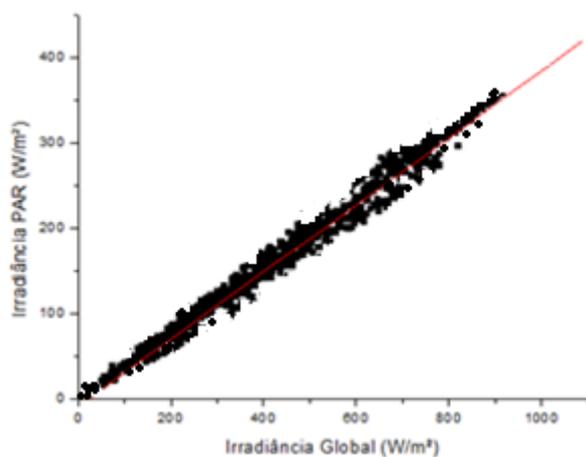


Figura 3. Inverno

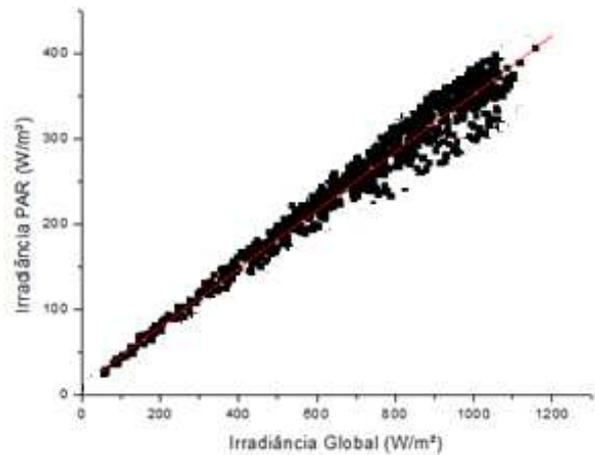


Figura 4. Primavera

A Tabela 1 mostra os períodos sazonais com suas respectivas equações e médias dos erros geradas nas estimativas da irradiância fotocinteticamente ativa, relacionadas a cada período da estação do ano.

Tabela 1. Equação da $IPAR_{est}$ em função da IR_{glo} e média dos erros referente aos períodos sazonais.

Estação do ano	Modelo	Erro médio %
Outono	$IPAR_{est} = -8,11 + 0,82 \times IR_{glo}$	-11,21
Inverno	$IPAR_{est} = -8,30 + 0,72 \times IR_{glo}$	5,44
Primavera	$IPAR_{est} = 11,01 + 0,22 \times IR_{glo}$	7,59
Verão	$IPAR_{est} = 10,44 + 0,29 \times IR_{glo}$	10,27

4. Conclusões

A partir das análises dos resultados apresentados, fizeram-se as seguintes considerações:

- O modelo subestima o valor da irradiância PAR no período de outono;
- O modelo referente ao inverno, primavera e verão, superestimam o valor da irradiância PAR;
- Em função das distribuições diárias dos valores medidos das irradiâncias PAR/Global juntamente com os respectivos erros médios calculados na validação de cada modelo, nos permite estimar a irradiância fotossinteticamente ativa com uma boa precisão em qualquer época do ano.

5. Referências Bibliográficas

Ahmet Teke, H. Başak Yıldırım, Özgür Çelik, **Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 50, October 2015, Pages 1097-1107, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.049>

Danny H.W. Li, S.W. Lou, Joseph C. Lam, **An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation**, Energy Procedia, Volume 75, August 2015, Pages 388-393, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.399>.

Dengqiu Li, Weimin Ju, Dengsheng Lu, Yanlian Zhou, Huimin Wang, **Impact of estimated solar radiation on gross primary productivity simulation in subtropical plantation in southeast China**, Solar Energy, Volume 120, October 2015, Pages 175-186, ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.033>.

Eduardo A. C., Maria L. C., Paula P. A., Mariana D. T., Aníbal da F. S., **Influence of solar radiation on nitrogen recovery by the biomass grown in high rate ponds**, Ecological Engineering, Volume 81, August 2015, Pages 140-145, ISSN 0925-8574, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.040>.

FAGUNDES, R.S. **Comportamento e Modelagem da Radiação Solar Fotossinteticamente Ativa para a Região de Santa Helena-PR**. 2006. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Cascavel, 2006.

MARTINS, F.R.; PEREIRA, E.B. ; ECHER, M.P.S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário - o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 02, p. 145-159, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172004000200010>=<pt>. Acesso em: 30 out. 2010.

M. Boulifa, A. Adane, A. Rezagui, et Z. Ameer, **Estimate of the Global Solar Radiation by Cloudy Sky Using HRV Images**, Energy Procedia, Volume 74, August 2015, Pages 1079-1089, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.747>.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 1972, 747-766.

RADIN, B. *et al* Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Porto Alegre, v. 38, n. 9, p. 1017-1023, set. 2003. Mensal. Disponível em: <<http://webnotes.sct.embrapa.br/pdf/pab2003/setembro/v38n9a01.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2010.

RICIERI, R. P. **Modelos de Estimativa e Avaliação dos Métodos de Medida da Radiação solar Difusa**. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho”, *campus* de Botucatu, São Paulo, 1998. p. 81.

TESSARO, A.R., SOUZA, S. N. M., RICIERI, R.P. *et al*. Performance of a panel fotovoltaico connected to a solar dredge.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Proceedings online** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100046&lng=en&nrm=abn>. Acessado em: 30 out. 2010.

VALIATI, M.I. **Estimativa da Radiação Solar Global com Diferentes Partições para Região de Cascavel**. 2001. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Unioeste, Cascavel, 2001.