

RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA, PAR-GLOBAL E PAR-DIFUSA EM AMBIENTE PROTEGIDO COM POLIETILENO

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Eduardo Nardini Gomes – engomes@fca.unesp.br

Felipe Luís Petrini – flpetrini@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais/ FCA/ UNESP / Botucatu / SP / Brasil

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Jacyra Soares – jacyra@usp.br

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG / USP / São Paulo / SP / Brasil

1.1 Radiação Solar

Resumo: O trabalho apresenta quatro equações de estimativa diária para radiações global, PAR-global e quatro equações para as radiações difusa e PAR-difusa para um ambiente protegido com polietileno em função das medidas em meio externo das radiações global, PAR-global, difusa e PAR-difusa. As medidas foram realizadas, dentro e fora de uma estufa tipo arco, coberta com filme de polietileno transparente de 100 μm de espessura no período de junho de 1999 a agosto de 2000. As equações de estimativa foram obtidas por meio de regressão linear, e mostram que as radiações interna e externa apresentam alto índice de correlação. Os coeficientes de correlação (R^2) para ambas as radiações global, PAR-global e radiações difusa, PAR-difusa foram maiores que 0.98 e 0.85 respectivamente. Equações para as radiações global, PAR-global e radiação difusa, PAR-difusa obtidas em meio externo apresentaram coeficientes de determinação $R^2 = 0,9923$ e $R^2 = 0,9843$ respectivamente. Os indicativos estatísticos MBE, RMSE, e “d” na validação mostraram que as equações para estimar as radiações global e PAR-global internas apresentaram melhor desempenho do que as equações para estimar as radiações difusa e PAR-difusa internas.

Palavras-chave: radiação solar, radiação fotossintética, ambiente protegido.

1. INTRODUÇÃO

Ambiente protegido com polietileno tem se tornado muito frequente em cultivo agrícola. A vantagem da utilização desse micro sistema consiste no aumento de produção de hortaliças e flores, principalmente nos períodos de entressafra, permitindo maior regularização de oferta e melhor qualidade dos produtos. Além disso, as estufas permitem a obtenção de produtos de alta qualidade, precocidade de culturas, possibilidade de utilização de menor consumo de mão-de-obra, aumento de produtividade e menor índice de lixiviação do solo. Através do manejo correto destes microambientes, o produtor pode alcançar aumento significativo do rendimento e produtividade das culturas. A literatura tem mostrado que países que dependiam de volumosas importações, passaram a ocupar lugares de destaque tanto na produção agrícola interna quanto na exportação (Hasson, 1991).

Os fatores fundamentais que favorecem o melhor desenvolvimento da cultura são: diminuição de efeitos adversos como fortes ventos que normalmente provocam danos às plantas, não só fisiológicos como mecânicos; diminuição de pragas; obtenção de temperaturas ideais que permitam maior velocidade de crescimento, e o aumento da fração da radiação difusa em relação à global ($K_d = H_d/H_G$), que é considerada a componente mais eficiente para a fotossíntese por atingir área foliar mais homogeneamente (Weiss & Norman, 1985). Modificações climáticas em ambientes protegidos no Brasil foram estudadas por Farias et al. (1993), Souza & Escobedo (1997).

A radiação fotossintética global (PAR), situada na faixa espectral entre 0,4 e 0,7 μm , é a responsável pela conversão da energia solar em matéria orgânica, que desempenha um importante papel em estudos de simulação e modelagem na produção de biomassa e produtividade dentro das á-

reas biológicas, agrônomicas e florestais. As irradiações diárias (em MJ/m²) da PAR global podem ser representadas matematicamente pela equação: $H_{Gp} = H_{dp} + H_{Dp}$, onde: H_{Gp} = PAR global, H_{dp} = PAR difusa e H_{Dp} = PAR direta. Dentre as três componentes, H_{Gp} é a mais conhecida por meio de medidas ou modelos estatísticos de estimativa da PAR global H_{Gp} em relação à radiação global H_G , como mostrado nos trabalhos de Rao, 1984, Blackburn & Proctor, 1983, Meek et al., 1984, Ting & Giacomelli, 1987, Papaioannou et al, 1996, Alados & Alados-Arboledas, 1999. No Brasil, é conhecido o trabalho de Assis & Mendez, 1989.

As componentes PAR difusa (H_{dp}) e PAR direta (H_{Dp}) ainda são pouco estudadas, muito provavelmente devido a restrições instrumentais. A medida de H_{Dp} exige um mecanismo de rastreamento solar de alto custo e manutenção permanente, enquanto que a medida de H_{dp} é dependente da limitação do método do anel de sombreamento o qual utiliza fatores de correção geométricos e geográficos e não considera a anisotropia da radiação difusa. Alguns trabalhos utilizando essas componentes são mostrados por Weiss & Norman, 1985, Alados-Arboledas et al., 2000, Gomes, 2003. As informações sobre radiação solar difusa principalmente em estufas no Brasil, são resultantes dos trabalhos de Escobedo et al., 1994 e 2000, e Frisina et al., 2000.

Dada a importância atual dos ambientes protegidos para agricultores e pesquisadores, é de fundamental importância o conhecimento da radiação solar e das modificações climáticas para um melhor planejamento do cultivo nas estufas, câmaras climáticas e viveiros. Este trabalho teve por objetivo efetuar a medida das radiações global, difusa, PAR global e PAR difusa, dentro e fora de estufas e obter por meio de regressão linear, equações de estimativa das radiações internas a partir das radiações externas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Clima e Instrumental

O experimento foi realizado no período de Junho de 1999 a Setembro de 2000, na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, da UNESP (latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m). O clima do município de Botucatu é classificado, segundo o Sistema Köppen, como Cwa, ou seja, clima temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno. O ambiente protegido é constituído por uma estufa tipo arco 7 x 40, coberta com filme de polietileno transparente (100 µm de espessura) e laterais de tela de nylon (sombreamento de 50%) com as seguintes dimensões: 7 m largura, 20 m comprimento e 3,5 m de altura.

As irradiâncias global I_G^{in} e I_G^{ex} foram medidas por meio de piranômetro Eppley PSP ($k_1 = 8,13 \mu Vm^2/W$) e Kipp-Zonen CM 3 ($k_2 = 24,10 \mu Vm^2/W$), enquanto que as irradiâncias PAR global (I_{Gp}^{in} e I_{Gp}^{ex}) por detectores quânticos Li-Cor ($k_1 = 4,66 \mu A/1000 \mu mol.s^{-1}.m^{-2}W$ e $k_2 = 5,29 \mu A/1000 \mu mol.s^{-1}.m^{-2}W$).

As irradiâncias difusas (I_d^{in} , I_d^{ex} , I_{dp}^{in} e I_{dp}^{ex}) foram monitoradas por meio de anéis de sombreamento ME (Melo & Escobedo, 1994) nas seguintes especificações: 80cm de diâmetro, 10cm de largura e 1mm de espessura, usando os piranômetro Kipp-Zonen ($k = 21,16 \mu Vm^2/W$) e Eppley PSP ($k = 8,17 \mu Vm^2/W$) para a medida das irradiâncias I_d^{in} e I_d^{ex} e sensores quânticos Li-Cor ($k = 4,89 \mu A/1000 \mu mol.s^{-1}.m^{-2}W$ e $k = 5,04 \mu A/1000 \mu mol.s^{-1}.m^{-2}W$) para a medida de I_{dp}^{in} e I_{dp}^{ex} . O fator FC usado para compensar a irradiação difusa barrada pelo anel foi determinado pela expressão: $FC = [1 - (H'_d / H_d)]^{-1}$, onde H_d é a irradiação difusa e H'_d , a irradiação difusa interceptada durante o dia. A razão H'_d / H_d foi calculada pela equação:

$$H'_d / H_d = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(z) d\omega$$

onde: b e R são a largura e raio do anel; δ é a declinação solar; ϕ é a latitude; z é o ângulo zenital e ω é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol.

Para a aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 5 minutos. As leituras dos detectores quânticos Li-Cor, em mV, foram convertidas para W/m^2 utilizando-se o valor de $4,6 \mu mol s^{-1} W^{-1}$, determinado pelo manual da Li-Cor (1991).

A base de dados para a obtenção dos modelos de estimativa é constituída de irradiações (em MJ/m^2) obtidas a partir da integração diária da irradiância (em W/m^2), dentro e fora da estufa, no período de 01/06/1999 a 31/05/2000 e a validação, no período de 01/06/2000 a 31/08/2000.

3. RESULTADOS

3.1 Equações de Estimativa para as Radiações Global e PAR Global Interna.

Para estimativas das radiações global (H_G^{in}) e PAR-global (H_{Gp}^{in}) no interior da estufa foram ajustadas quatro equações em função das radiações PAR-global externa (H_{Gp}^{ex}), global externa (H_G^{ex}), global interna (H_G^{in}), as quais são mostradas na Fig. 1 (a, b, c, d).

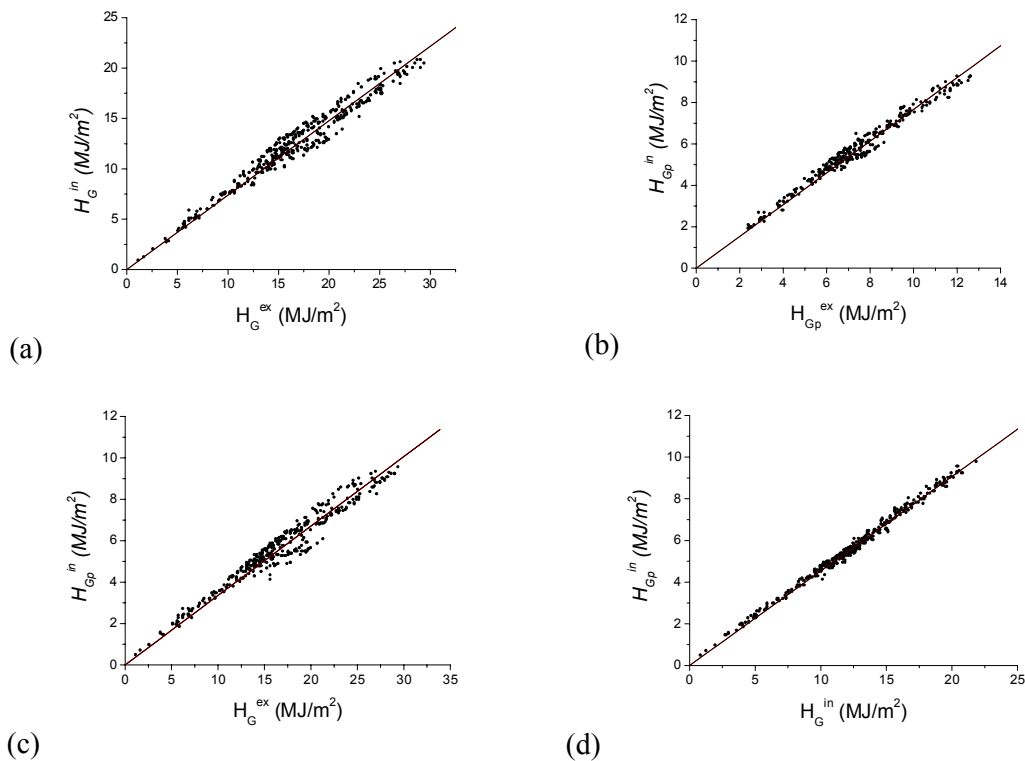


Figura 1 - Correlações das radiações H_G^{in} e H_{Gp}^{in} em função de H_{Gp}^{ex} , H_G^{ex} e H_G^{in} .

A Tab. 1 apresenta as quatro equações de estimativa com seus respectivos coeficientes de determinações obtidas a partir de regressões lineares simples passando pela origem.

As funções são lineares e com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,9750. Os coeficientes mostram que as variações das radiações H_{Gp}^{in} estão altamente correlacionadas com as variações das radiações H_{Gp}^{ex} , H_G^{ex} e H_G^{in} . A mesma qualidade de ajuste ocorreu entre as radiações global interna H_G^{in} e a global externa H_G^{ex} .

O melhor ajuste foi obtido para a equação (4) com $R^2 = 0,9965$ a qual relaciona duas radiações H_{Gp}^{ex} e H_G^{in} no interior da estufa, as quais passaram pelos mesmos efeitos de difusão e espalhamento durante a transmissão na cobertura de polietileno. Nas demais correlações (equações 1, 2 e 3), as radiações são de meios diferentes onde apenas uma das radiações interagiu com a cobertura de polietileno. Os coeficientes de determinação são inferiores e nessa situação, as correlações foram melhores de acordo com a sequência: $H_{Gp}^{in} \times H_{Gp}^{ex}$ com $R^2 = 0,9882$ (equação 2), $H_G^{in} \times H_G^{ex}$ com $R^2 = 0,9508$ (equação 1) e $H_{Gp}^{in} \times H_G^{ex}$ com $R^2 = 0,9751$ (equação 3).

Tabela 1 - Equações de estimativa para H_{Gp}^{in} , H_G^{in} e H_{Gp}^{ex} em função de H_G^{ex} , H_{Gp}^{ex} e H_G^{in}

Equação 1	$H_G^{in} = 0,7390 H_G^{ex}$	$R^2 = 0,9800$
Equação 2	$H_{Gp}^{in} = 0,7668 H_{Gp}^{ex}$	$R^2 = 0,9882$
Equação 3	$H_{Gp}^{in} = 0,3854 H_G^{ex}$	$R^2 = 0,9751$
Equação 4	$H_{Gp}^{in} = 0,4936 H_G^{in}$	$R^2 = 0,9965$
Equação 5	$H_{Gp}^{ex} = 0,4953 H_G^{ex}$	$R^2 = 0,9923$

A radiação PAR-global interna (H_{Gp}^{in}) nas equações (2) e (3) esta relacionada a duas radiações do meio externo (Fig. 1 b e c) : PAR-global (H_{Gp}^{ex}) e global externa (H_G^{ex}). Os coeficientes de correlação mostram que a dispersão para a correlação $H_{Gp}^{in} \times H_{Gp}^{ex}$ é maior que a dispersão para $H_{Gp}^{in} \times H_G^{ex}$. A maior dispersão é explicada devido ao fato que a radiação global H_G^{ex} é mais difundida na cobertura de polietileno e espalhada no vapor d' água sob a cobertura plástica (Geoola et al., 1994 e Hasson, 1991) do que a radiação PAR-global H_{Gp}^{ex} . A radiação H_G^{ex} inclui no seu espectro de 0,7 a 4,0 μ m a fração do infravermelho de ondas curtas, cuja energia é mais baixa. A radiação PAR global H_{Gp}^{ex} , cujo espectro é limitado entre 0,4 e 0,7 μ m, não possui o infra vermelho.

A correlação entre as radiações global interna H_G^{in} e global externa H_G^{ex} (fig. 1a) define para o meio protegido a transmissividade da radiação global na cobertura de polietileno. O resultado obtido de 0,7390 para o coeficiente angular encontra-se em concordância com vários pesquisadores em Botucatu, que obtiveram transmissividade da ordem de 74% para ambientes protegidos com cobertura de polietileno de mesma espessura (Farias, et al., 1993 ; Escobedo, et al., 1994).

A Fig. 2 mostra a correlação da radiação PAR-global externa H_{Gp}^{ex} em função da radiação global externa H_G^{ex} . A relação entre H_{Gp}^{ex} e H_G^{ex} com coeficiente de determinação = 0,9923 (equação 5) expressa alta correlação entre as duas radiações. A fração PAR da radiação global $H_{Gp}^{ex}/H_G^{ex} = 0,495$ para Botucatu, mostra que 49,5% da radiação global que atinge a superfície local é fotossinteticamente ativa.

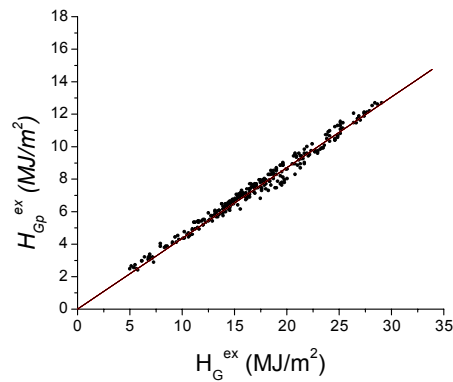


Figura 2 - Correlação da radiação H_{Gp}^{ex} em função de H_G^{ex} .

A fração H_{Gp}^{ex}/H_G^{ex} depende de fatores climáticos e geográficos como latitude, declinação solar e ângulo de incidência porém, o resultado obtido encontra-se no intervalo de variação citado na literatura, para vários locais dos continentes tais como: 49% de Stanhill & Fuchs (1977); 47% de Blackburn & Proctor (1983); 45% de Meek et al. (1984); 45,7% de Rao (1984); 43,6% de Papaioannou et al. (1996). Os seguintes valores foram encontrados no Brasil: Assunção (1994) 44%, Assis & Mendez (1989) 47% e França et al. (1997) 42%.

As equações foram validadas comparando-se as medidas e as estimativas por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e “d” apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Índices estatísticos obtidos na validação das equações de estimativa.

Equações de Estimativa	MBE%	RMSE%	d
(1) $H_G^{in} = 0,73901 H_G^{ex}$	-4,33	7,39	0,9522
(2) $H_{Gp}^{in} = 0,76684 H_{Gp}^{ex}$	-2,38	4,65	0,9796
(3) $H_{Gp}^{in} = 0,38540 H_G^{ex}$	-2,78	4,97	0,9770
(4) $H_{Gp}^{in} = 0,49358 H_G^{in}$	4,33	5,68	0,9893
(5) $H_{Gp}^{ex} = 0,49532 H_G^{ex}$	-0,62	2,23	0,9957

Os sinais negativos de MBE mostram que a estimativa de H_{Gp}^{in} a partir de H_{Gp}^{ex} e H_G^{ex} , por meio das equações (1, 2 e 3) subestimam a medida de H_{Gp}^{in} , enquanto que o sinal positivo de MBE mostra que a estimativa de H_{Gp}^{in} a partir de H_G^{in} , na equação (4), superestima H_{Gp}^{in} . Quantitativamente, MBE inferior a +5,0% mostra que o erro da estimativa se encontra na mesma ordem de grandeza do erro experimental o qual é considerado um bom resultado.

O indicativo RMSE inferior a 5,0% das equações (2, 3 e 5) mostra que espalhamento ou a dispersão H_{Gp}^{in} em função de H_{Gp}^{ex} , H_G^{ex} ou H_G^{in} é aproximadamente igual e portanto podem ser estimados com mesma eficiência por meio das três radiações. A escolha da equação deve ser opcional, em função da disponibilidade dos equipamentos de medida no local. Como a maioria dos laboratórios de rotina mede as radiações na sequência H_G^{ex} , H_{Gp}^{ex} e H_G^{in} , a equação(2) é a mais indicada. O resultado menos favorável foi o da equação (1) cujo RMSE igual a 7,5% é quase o dobro dos demais. No entanto, esse percentual de espalhamento é considerado um bom resultado. O resultado mais favorável foi o da equação (5) com RMSE igual a 2,2% o qual é quase a metade dos demais.

O indicativo de ajustamento “d” de Willmott obtido para as cinco equações, superior a 0,9500 foi considerado um bom resultado e reflete o nível de exatidão entre a medida e a estimativa das equações. Para o meio protegido, a radiação H_G^{in} só pode ser estimada por H_G^{ex} com nível de ajustamento de 0,95. Entretanto, a radiação H_{Gp}^{in} pode ser estimada por meio das radiações H_{Gp}^{ex} , H_G^{ex} ou H_G^{in} , com elevados índices de ajustamento. A opção está na disponibilidade do instrumento de medida, considerando-se que a diferença entre os índices de ajustamento é muito pequena. Para o meio exterior, o ajustamento entre a radiação H_{Gp}^{ex} por meio de H_G^{ex} foi o mais elevado ($d=0,9960$) e mostra que a equação (5) pode ser utilizada com precisão (MBE e RMSE baixos) e exatidão (“d” de Willmott elevados).

3.2 Equações de Estimativa para as Radiações Difusa e PAR-Difusa Interna.

Para estimativa das radiações difusa (H_d^{in}) e PAR-difusa (H_{dp}^{in}) no interior da estufa foram ajustadas quatro equações em função das radiações difusa externa (H_d^{ex}), PAR-difusa externa (H_{dp}^{ex}), difusa interna (H_d^{in}), as quais são mostradas na Fig. 3 (a, b, c, d). A Tab. 3 apresenta as quatro equações de estimativa com seus respectivos coeficientes de determinação a partir de regressões lineares simples.

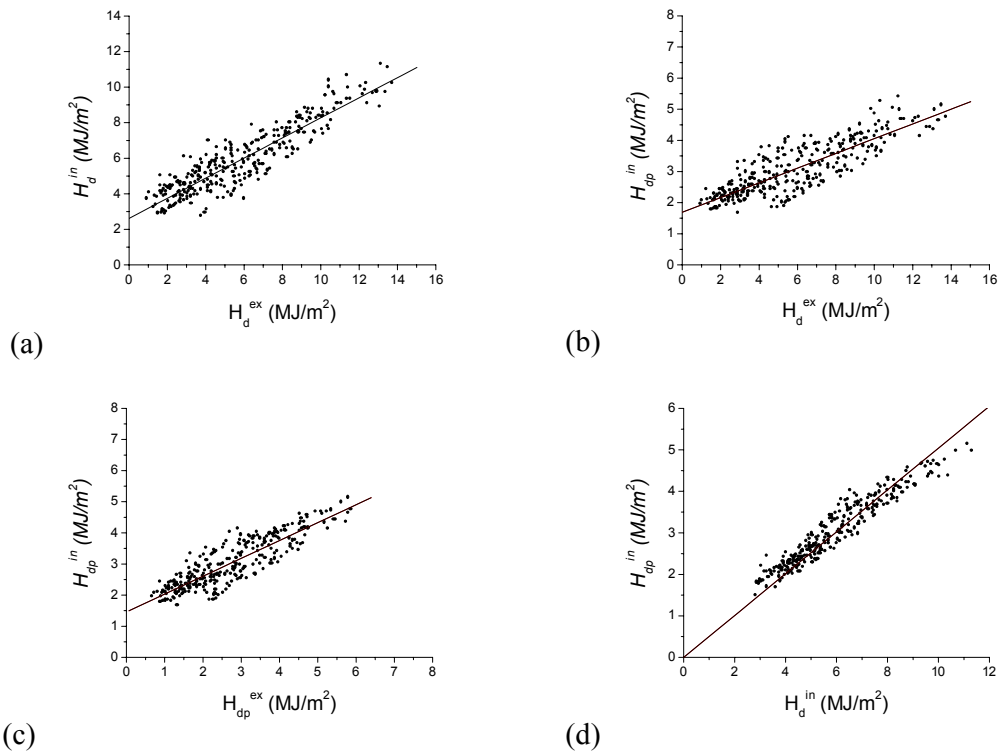


Figura 3 - Correlações das radiações H_d^{in} e H_{dp}^{in} em função de H_d^{ex} , H_{dp}^{ex} e H_d^{in}

Em comparação às correlações das radiações global e PAR-global mostradas na secção anterior, as correlações com as radiações difusa e PAR-difusa apresentam duas características bem diferentes quanto à dispersão e ao tipo de equação linear. Na primeira, as correlações das radiações em meios diferentes como $H_d^{in} \times H_d^{ex}$; $H_{dp}^{in} \times H_{dp}^{ex}$ e $H_{dp}^{in} \times H_d^{ex}$, possuem uma dispersão ou espalhamento das medidas, bem maiores que as correlações das radiações em um mesmo meio $H_{dp}^{in} \times H_d^{in}$ e

$H_{dp}^{ex} \times H_d^{ex}$. Na segunda, quando o par das radiações são de meios diferentes, como as equações das correlações $H_d^{in} \times H_d^{ex}$; $H_{dp}^{in} \times H_{dp}^{ex}$ e $H_{dp}^{in} \times H_d^{ex}$ não passam pela origem. Como consequência as equações lineares (1,2 e 3), com radiações de meios diferentes, possuem coeficientes linear ou de intercepto, com valores bastante significativos em relação aos coeficientes angulares.

O motivo desta singularidade está na complexidade do processo de interação da radiação global na cobertura de polietileno. A transmissão da radiação global, a qual é a soma da direta mais a difusa, na cobertura do polietileno depende da cobertura do céu. Para céu totalmente nebuloso, a radiação direta é praticamente igual a zero e a radiação global é totalmente difusa. Nesse caso, a radiação difusa é isotrópica (a incidência não tem uma direção preferencial), e a cobertura de polietileno não possui nenhum poder de difusão da radiação solar, apenas ocorre uma diminuição de energia devido à absorção. Ou seja, no interior da estufa, as radiações global e difusa diminuem, mas a relação entre a radiação solar difusa e a radiação global no interior da estufa é a mesma da radiação difusa e a radiação global do meio externo.

Para a cobertura de céu aberto, a radiação global apresenta uma maior parcela da radiação direta, entre 70,0% a 80,0%, e uma menor parcela, entre 20,0 a 30,0%, da radiação difusa.

Tabela 3 - Equações de estimativa de H_{dp}^{in} em função das radiações H_{dp}^{ex} , H_d^{ex} e H_d^{in}

Equação 6	$H_d^{in} = 2,6193 + 0,5652 H_d^{ex}$	$R^2 = 0,9105$
Equação 7	$H_{dp}^{in} = 1,4580 + 0,5739 H_{dp}^{ex}$	$R^2 = 0,8799$
Equação 8	$H_{dp}^{in} = 1,6911 + 0,2363 H_d^{ex}$	$R^2 = 0,8465$
Equação 9	$H_{dp}^{in} = 0,5042 H_d^{in}$	$R^2 = 0,9594$
Equação 10	$H_{dp}^{ex} = 0,4599 H_d^{ex}$	$R^2 = 0,9843$

Assim, a interação da radiação global com a cobertura de polietileno consiste nas interações das componentes da radiação direta e difusa, onde a primeira é anisotrópica e a segunda é isotrópica. Na transmissão da radiação difusa ocorre uma diminuição de energia devido à absorção do polietileno, enquanto que na transmissão da radiação direta ocorre uma diminuição de energia devido à absorção pelo polietileno e uma difusão ou conversão da radiação direta em difusa dentro da estufa. No interior da estufa a radiação global diminui em função do decréscimo da radiação direta e aumento da radiação difusa oriunda da conversão da radiação direta em difusa. Nesse caso, a relação entre a radiação solar difusa pela radiação global no interior da estufa é maior que a relação da radiação difusa e a radiação global do meio externo.

As equações (9) e (10), que relacionam radiações do mesmo meio, passam pela origem e apresentam as dispersões menores. A razão desse resultado está no fato em que as duas radiações internas são medidas após a interação com o polietileno ou, que as duas radiações são medidas no meio externo sem a presença da estufa (Fig. 3).

As equações de estimativas apresentam coeficientes de determinação entre 0,85 e 0,98. Os melhores resultados ocorreram para as equações (9) e (10) em que as radiações são do mesmo meio, enquanto que, os resultados menos favoráveis foram na ordem das equações (8), (7) e (6), em que as radiações são de meios diferentes.

A Fig. 4 mostra a correlação entre as radiações PAR-difusa externa H_{dp}^{ex} em função da radiação difusa externa H_d^{ex}

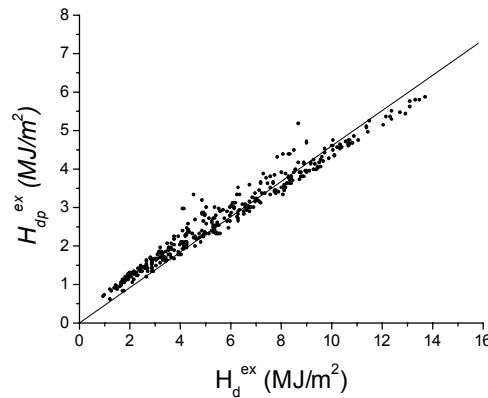


Figura 4 - Correlação da radiação H_{dp}^{ex} em função de H_d^{ex} .

As variações das radiações H_{dp}^{ex} estão altamente correlacionadas às variações das radiações H_d^{ex} e mostram que 46,0% da radiação difusa é fotossinteticamente ativa (difusa). O percentual é um pouco inferior à fração fotossintética da global de 49,5%.

A Tab. 4 mostra os indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d” de Willmott, obtidos da comparação entre a estimativa e a medida. O indicativo MBE variou de -1,4% a 5,0%, onde as estimativas das equações (7), (8) e (9) superestimam a medida. As equações (6) e (10) subestimam a medida.

Tabela 4 - Indicativos Estatísticos MBE, RMSE e d.

	Equações de Estimativa	MBE%	RMSE%	d
(6)	$H_d^{in} = 2,61931 + 0,56519 H_d^{ex}$	-0,41	8,09	0,8990
(7)	$H_{dp}^{in} = 1,45803 + 0,57392 H_{dp}^{ex}$	2,92	8,94	0,7968
(8)	$H_{dp}^{in} = 1,69109 + 0,23631 H_d^{ex}$	4,88	12,03	0,7202
(9)	$H_{dp}^{in} = 0,5042 H_d^{in}$	5,02	8,91	0,9403
(10)	$H_{dp}^{ex} = 0,45994 H_d^{ex}$	-1,39	6,87	0,9847

Para o indicativo MBE, o melhor desempenho foi obtido na ordem das equações (6), (10), (7), (8) e (9). O limite de 5,0% para MBE é considerado um bom resultado.

O indicativo RMSE variou de 6,8% a 12% onde o melhor desempenho foi na ordem das equações (10), (6), (9), (7) e (8). O espalhamento observado é uma consequência da dispersão das correlações entre os pares de radiações medido dentro e fora da estufa. A equação (10), com o melhor coeficiente de correlação, apresentou o menor espalhamento, enquanto que a equação (8) com o menor coeficiente de correlação, apresentou o pior desempenho com maior espalhamento. O indicativo RMSE inferior a 12,0% é considerado um bom resultado.

O índice de ajustamento entre a estimativa e a medida para as 6 (seis) equações da Tab. 4 variou de 0,72 a 0,99 e mostra que o ajuste para as correlações de pares de radiações do mesmo meio é consideravelmente superior às correlações de pares de radiações de meios diferentes. Os melhores ajustes foram das equações (10) e (9), que relacionam os pares de radiação externa e interna à estufa. Os ajustes das equações (6), (7) e (8), o qual relacionam pares de meios diferentes, decrescem de 0,9 a 0,72, com vantagem para as correlações com a mesma radiação, $H_d^{in} \times H_d^{ex}$, como na equa-

ção (6). O segundo resultado é para as correlações menos sensíveis à interação com a cobertura de polietileno e vapor d'água, como no caso das relações $H_{dp}^{in} \times H_{dp}^{ex}$ e $H_{dp}^{in} \times H_d^{ex}$.

4. CONCLUSÕES

A variação das radiações global, PAR-global, difusa e PAR-difusa dentro da estufa está bem correlacionada à variação das radiações global, PAR global, difusa e PAR difusa, externas à estufa. As correlações para as radiações global e PAR-global, foram mais elevadas que das radiações difusa e PAR-difusa. As equações de estimativa para as radiações interna global e PAR global, com coeficientes de determinação foram: $H_G^{in}=0,74 H_G^{ex}$ ($R^2=0,9800$); $H_{Gp}^{in}=0,77 H_{Gp}^{ex}$ ($R^2=0,9882$); $H_{Gp}^{in}=0,38 H_G^{ex}$ ($R^2=0,9751$) e $H_{Gp}^{in}=0,49 H_G^{in}$ ($R^2=0,9965$). Para as radiações difusa e PAR difusa: $H_d^{in}=2,62+0,56 H_d^{ex}$ ($R^2=0,9015$); $H_{dp}^{in}=1,46+0,57 H_{dp}^{ex}$ ($R^2=0,8800$); $H_{dp}^{in}=1,69+0,24 H_d^{ex}$ ($R^2=0,8465$) e $H_{dp}^{in}=0,50 H_d^{in}$ ($R^2=0,9594$). Especificamente para o meio externo, outras equações foram obtidas com alto coeficientes de determinação para radiações global e PAR global, $H_{Gp}^{ex}=0,495 H_G^{ex}$ ($R^2=0,9923$) e radiação difusa e PAR difusa, $H_{dp}^{ex}=0,46 H_d^{ex}$ ($R^2=0,9843$). A validação das equações de estimativa por meio dos indicadores estatísticos: MBE inferior a 5,0% para as radiações global, PAR-global, difusa e PAR-difusa; RMSE inferiores a 8,0% para as radiações global, PAR-global e 12,0% para as radiações difusa e PAR-difusa, e “d” de Willmott superiores a 0,95 para as radiações global, PAR-global e 0,72 para as radiações difusa e PAR-difusa, mostram que as equações de estimativa podem ser utilizadas com precisão e exatidão.

REFERÊNCIAS

- ALADOS, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.*, v.93, p.27-38, 1999.
- ALADOS-ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J., ALADOS, I., PÉREZ, I. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain *Agric. and For. Meteorol.*, v.101, p.187-201, 2000.
- ASSIS, F.N., MENDEZ, M.E.G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.24, n.7, p.797-800, 1989.
- ASSUNÇÃO, H.F. da. *Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP*. Piracicaba, 1994. 57p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- BLACKBURN, W.J., PROCTOR, J.T.A. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Sol. Energy*, v.31, p.233-4, 1983.
- ESCOBEDO, J.F., MELO, J.M.D., FRISINA, V.A. Radiações solar global e fração da global refletida em estufa tipo túnel em cobertura de polietileno. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7, 1994. *Energias Limpas em Progreso...* Vigo, 1994. v.1, p.53-58.
- ESCOBEDO, J.F., GALVANI, E., OLIVEIRA, A.P., CHAVES, M.A. Models to estimate daily diffuse irradiation inside polyethylene greenhouse lined east-west and north-south. *World Renewable Energy Congress VI*, v. IV, p. 2481-2484, 2000.
- FARIAS, J.R.B., BERGAMASCHI, H., MARTINS, S.R., BERLATO, M.A. Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.1, p.31-6, 1993.
- FRANÇA, S., ROSA, L.M.G., BERGAMASCHI, H., NABINGER, C., SPANENBERG, P. Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa, em função do índice de área foliar. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.5, n.2, p. 147-153, 1997.
- FRISINA, V.A., ESCOBEDO, J.F., GOMES, E.N. Instantaneous estimates of global, diffuse and reflected photosynthetically active radiation (PAR) inside a polyethylene greenhouse. *World Renewable Energy Congress VI*, v. IV, p. 2394-2397, 2000.

- GEOOLA, F., PEIPER, U.M., GEOOLA, F. Outdoor testing of the condensation characteristics of plastic film covering materials a model greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* v.57, p.167-72, 1994.
- HASSON, A.M. A study of solar energy and its components under a plastic greenhouse. *Energy Convers. Manag.*, v.31, n.1, p.1-5, 1991.
- LI-COR INSTRUMENTS. Radiation measurement instruments: radiometers, PAR sensors, dataloggers, spectroradiometers, photometers. Lincoln, 1991, 24p.
- MEEK, D.W., HATFIELD, J.L., HOWELL, T.A., IDSO, S.B., REGINATO, R.J. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and Solar Radiation. *Agron. J.*, v.76, p.939-45, 1984.
- MELO, J.M.D.; ESCOBEDO, J.F. Medida da radiação solar difusa. In: *Energias Limpas em Progresso, VII Congresso Ibérico de Energia Solar*, Vigo, Espanha. *Anais do Internacional Solar Energy Society*, v.1, 1994.
- PAPAIIOANNOU, G., NIKOLIDAKIS, G., ASIMAKOPOULOS, D., RETALIS, D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agric. and For. Meteorol.*, v.81, p.287-98, 1996.
- RAO, C.R.N. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol.*, v.B 34, p.353-364, 1984.
- SOUZA, J.L., ESCOBEDO, J.F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.32, n.1, p.1-15, 1997.
- STANHILL, G., FUCHS, M. The relative flux of density photosynthetically active radiation. *J. Appl. Ecol.*, v.14, p.317-22, 1977.
- TING, K.C.; GIACOMELLI, G.A. Availability of solar photosynthetically active radiation. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v. 30, n.5, p.1453-57, 1987.
- WEISS, A., NORMAN, J.M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agric. and For. Meteorol.*, v.34, p.205-13, 1985.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physic. Geogr.* v.2, p.184-94, 1981.

Agradecimento: À FAPESP, e ao CNPq pelo apoio financeiro.

GLOBAL, DIFFUSE, GLOBAL-PAR AND DIFFUSE-PAR RADIATIONS IN A POLY-ETHYLENE GREENHOUSE

ABSTRACT: *This paper presents four (4) daily estimative equations for global, global PAR radiations and four (4) daily estimative equations for diffuse and diffuse PAR radiations in a greenhouse as a function of global, global PAR, diffuse and diffuse PAR radiations measured outside the greenhouse. Measures were carried out inside and outside a 100µm thick transparent Polyethylene film greenhouse from June 1999 to August 2000. The estimate equations were obtained by linear regression and showed that both external and internal radiations present high correlation index. The determination coefficient (R^2) for both global, global PAR radiations and diffuse, diffuse PAR radiations was higher than 0.98 and 0.85 respectively. Other relationships were obtained outside the greenhouse for global and global PAR ($R^2=0.9923$), diffuse and diffuse PAR ($R^2=0.9843$) radiations. MBE, RMSE and "d" statistical indicators in the validation showed that the equations to estimate global and global PAR radiations presented better performance than the equations to estimate diffuse and diffuse PAR radiations inside the greenhouse.*

Keywords: solar radiation, photosynthetic radiation, greenhouse.