

# Área foliar e interceptação de radiação solar pela copa de uma laranjeira

Felipe Gustavo Pilau (\*); Luiz Roberto Angelocci

Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Departamento de Engenharia de Biosistemas, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900 Piracicaba (SP), Brasil.

(\*): Autor correspondente: fgpilau@usp.br

Recebido: 26/mar./2015; Aceito: 25/maio/2015

## Resumo

Devido à importância de quantificar a radiação solar interceptada ( $K^*$ ) pela vegetação, determinou-se a interferência da área foliar da copa de uma laranjeira Pêra-Rio sobre a eficiência de interceptação ( $\epsilon_{int}$ ) e o coeficiente de extinção de radiação ( $k$ ). Para a medida da radiação solar transmitida foi instalado um piranômetro abaixo da copa. O sensor, distante 0,65m do tronco, girava horizontalmente em torno do mesmo (3 rpm), realizando uma medida espaço-temporal. O mesmo modelo teórico usado para determinar o coeficiente de extinção 'k' (Teoria de Monsi & Saeki) foi usado também para a estimativa de  $K^*$ . Os dados revelaram uma clara interferência dos ramos e galhos sobre a  $\epsilon_{int}$ , com valor mínimo de 0,52 com ausência completa de folhas. Os resultados também foram distintos em relação à obtenção do coeficiente de extinção 'k', mais uma vez por influência das estruturas lenhosas. A simulação de  $K^*$  a partir dos coeficientes de extinção ( $k$ ), obtidos por ajuste linear e quadrático, resultou, respectivamente, em classificações boa e ótima de acordo com o cálculo do índice de desempenho 'c'.

**Palavras-chave:** *Citrus sinensis* L. Osbeck, índice de área foliar, eficiência de interceptação, coeficiente de extinção.

## Leaf area and solar radiation interception by orange tree top

### Abstract

Leaf area changes affect solar radiation interception ( $K^*$ ), interception efficiency ( $\epsilon_{int}$ ) and extinction coefficient ( $k$ ) of an orange tree top (cv. Pêra-Rio). In order to measure radiation transmitted through the crown a mobile sensor was horizontally installed below the crown and 0.65 m from the trunk, moving around it at 3 rpm. The model used for  $k$  determination (Monsi & Saeki theory) was assessed with independent data to estimate  $K^*$ . With absence of leaves, it was detected an intense interference of trunk and branches on  $\epsilon_{int}$ , with a minimum value of 0.52. The results were also distinct in obtaining  $k$ , when the best fit was found with a quadratic rather than a linear equation, again influenced by woody structures. Simulation of  $K^*$  using extinction coefficient ( $k$ ) was statistically classified as good.

**Key words:** *Citrus sinensis* L. Osbeck, leaf area index, interception efficiency, extinction coefficient.

## 1. INTRODUÇÃO

A transpiração e fotossíntese de um vegetal, seu rendimento e a qualidade produtiva, e suas características microclimáticas, dependem fundamentalmente da radiação solar absorvida, condicionada pela área foliar e sua eficiência de interceptação da energia radiante.

A disponibilidade de radiação solar na superfície terrestre é primariamente função das variáveis associadas às relações Terra-Sol, enquanto que a magnitude da interceptação dessa radiação por uma árvore, por exemplo, depende adicionalmente da arquitetura e da densidade de folhagem da copa (associada à área foliar e porosidade da copa), bem como das propriedades ópticas da vegetação e da relação entre a radiação direta e difusa.

A fração transmitida, que atinge a superfície abaixo do dossel, é determinante para o estabelecimento dos fatores bióticos, de suas características e perturbações (Endler, 1993). Entretanto, poucos estudos têm focado o regime de radiação solar de espécies cuja folhagem sofre com perturbações naturais ou antropogênicas, que acabam promovendo acentuadas variações na densidade da folhagem, chegando até mesmo à ausência completa de folhas (Baldocchi et al., 1984; Federer, 1971; Wang & Baldocchi, 1989).

Inúmeros são os cultivos agrícolas que apresentam momentos de ausência ou redução da folhagem, em função de dormência natural, condições ambientais adversas, ou mesmo motivados por processos de condução, poda e

colheita. Nas lacunas causadas pela ausência da folhagem, a transmitância se eleva, gerando mudanças quali-quantitativas da energia radiante disponível para os estratos abaixo da copa ou à superfície do solo, capacitando ou intensificando a ocorrência natural de plantas nesses estratos e ocasionando até mesmo mudanças morfofisiológicas temporais (Buler & Mika, 2009; Cardoso et al., 2010; Machado et al., 2002; Pezzopane et al., 2002).

Neste trabalho o objetivo foi quantificar as mudanças na intercepção da radiação solar pela copa de laranja, cv. Pêra-Rio, causadas pela redução da área foliar e, em complemento, ajustar e validar um modelo de simulação da radiação solar interceptada pela copa.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no município de Piracicaba, SP (22°42' S; 47°30' W; 546 m), em um laranjal (*Citrus sinensis* L. Osbeck) cv. Pêra-Rio. O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho. A coleta de dados foi realizada em 19 dias, entre 6 de maio e 24 de junho de 2005. O espaçamento entre árvores era de 8,0 m x 4,0 m e a altura das plantas de 3,5 m. As linhas de plantio tinham orientação Noroeste-Sudeste, com azimute de 165°. Com geometria da copa aproximadamente esférica e diâmetro médio de 3,3 m, a área de projeção horizontal da copa (AP) era de 8,6 m<sup>2</sup>.

Para determinar a área foliar (AF) da laranja, inicialmente foi usado um medidor portátil de índice de área foliar (IAF) (modelo LAI-2000 Canopy Analyser, marca LI-COR). A partir do produto IAF x AP foi determinada a área foliar da copa.

A partir dessa determinação procederam-se sucessivamente quatro desfolhas manuais. A cada desfolha foram coletadas e contadas todas as folhas aleatoriamente retiradas da copa (Nf), medindo-se o comprimento (C) e largura máxima (L) de 100 delas. Os valores médios  $\bar{C}$  e  $\bar{L}$  foram então adotados para o cálculo da área foliar total da árvore (Equação 1), utilizando um fator de ajuste 'f' igual a 0,7 (Coelho et al., 2005), permitindo a estimativa do valor inicial de AF (sem desfolha) e a determinação dos demais valores pós-desfolhas.

$$AF = \bar{C} \cdot \bar{L} \cdot f \cdot Nf \quad (1)$$

Com os dados de AF e AP, foram determinados os valores de índice de área foliar inicial e pós-desfolhas (Equação 2):

$$IAF = \frac{AF}{AP} \quad (2)$$

A partir de fotografias digitais da silhueta (face lateral) da copa, e uso do software QUANT, foram determinadas as frações percentuais de porosidade ou espaços vazios (p%), folhagem (f%) e material lenhoso (m%) da copa.

Dados da radiação solar global 'Qg' (piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM-3) foram coletados no posto meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, distante cerca de 300 m do experimento. Para mensurar a fração de Qg transmitida pela copa da laranja ('τQg') um sensor piranométrico LI-200 (marca LI-COR) foi fixado a uma armação metálica circular, componente de um sistema móvel de medida, girante em torno da copa, similar ao descrito por Angelocci et al. (2004) e McNaughton et al. (1992). Pela movimentação de todo esse sistema em torno da árvore, o piranômetro girava horizontalmente em torno do tronco à distância de 0,65 m deste, a 3 rpm, realizando uma amostragem espaço-temporal da radiação solar transmitida para abaixo da copa. As médias de 15 minutos de Qg e τQg foram armazenadas por dataloggers (modelos CR1000 e CR23X marca Campbell).

Apenas dados coletados entre as 10 e 14 horas foram utilizados, evitando assim a incidência direta de Qg sobre o sensor de medida da transmissividade, sem que a energia radiante tivesse interagido com a folhagem e estruturas lenhosas da copa.

A radiação solar interceptada (K\*) pela copa da laranja foi calculada a partir das medições da radiação solar incidente (Qg) e a fração transmitida (τQg) através da copa (Equação 3):

$$K^* = Qg - \tau Qg \quad (3)$$

A eficiência de intercepção da radiação solar ( $\epsilon_{int}$ ) foi determinada a partir do quociente entre a radiação solar interceptada (K\*) e a total incidente (Qg) sobre a copa da laranja (Equação 4):

$$\epsilon_{int} = \frac{K^*}{Qg} \quad (4)$$

A partir de valores médios diurnos (10 às 14 horas) da eficiência de intercepção da radiação solar ( $\epsilon_{int}$ ), da porosidade da copa tomada no sentido da silhueta ou área lateral plana da copa (p%) e dos valores de índice de área foliar (IAF), foram determinados a eficiência de intercepção normalizada pela fração S preenchida da silhueta da copa (folhas+material lenhoso) (Equação 5) e o coeficiente de extinção (k) do dossel, estimado a partir da Teoria de Monsi & Saeki, com base nos pressupostos da lei de Beer, expressa pela Equação 6 (Hirose, 2005):

$$\epsilon_{int} / S = \frac{\epsilon_{int}}{\left(1 - \frac{p(\%)}{100}\right)} \quad (5)$$

$$\ln(1 - \epsilon_{int}) = -k \cdot IAF \quad (6)$$

Rearranjada, a Equação 6 foi usada para estimar a interceptação da radiação solar pela copa da laranjeira ( $K_{est}^*$ ). O modelo foi testado com medições realizadas em intervalos de 15 minutos, e seus valores integrados para parte do período diurno (10 às 14 horas). Um conjunto de dados independente de medidas de  $K^*$ , contemplando todos os IAFs (sem IAF zero), foi utilizado para avaliar o modelo:

$$K_{est}^* = Q_g(1 - e^{-k \cdot IAF}) \quad (7)$$

onde:  $Q_g$  é radiação solar global,  $k$  o coeficiente de extinção e IAF é o índice de área foliar.

Para a análise dos resultados foram adotados os indicadores estatísticos: coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de correlação ( $r$ ); índice de concordância ( $d$ ) (Willmott et al., 1985) e coeficiente de confiança ou desempenho ( $c$ ) (Camargo & Sentelhas, 1997). Os valores de “ $c$ ” foram classificados em ótimo (OT.) para valores maiores que 0,86; muito bom (MB.) entre 0,76 a 0,85; bom (B.) entre 0,66 a 0,75; regular (RG.) para valores entre 0,51 a 0,65; ruim (RM.) entre 0,41 a 0,50; e péssimo (PE.) para valores menores que 0,4. Ressalte-se que a classificação do desempenho baseou-se no indicador estatístico  $c$ , servindo os demais indicadores para dar suporte à classificação e à discussão dos resultados.

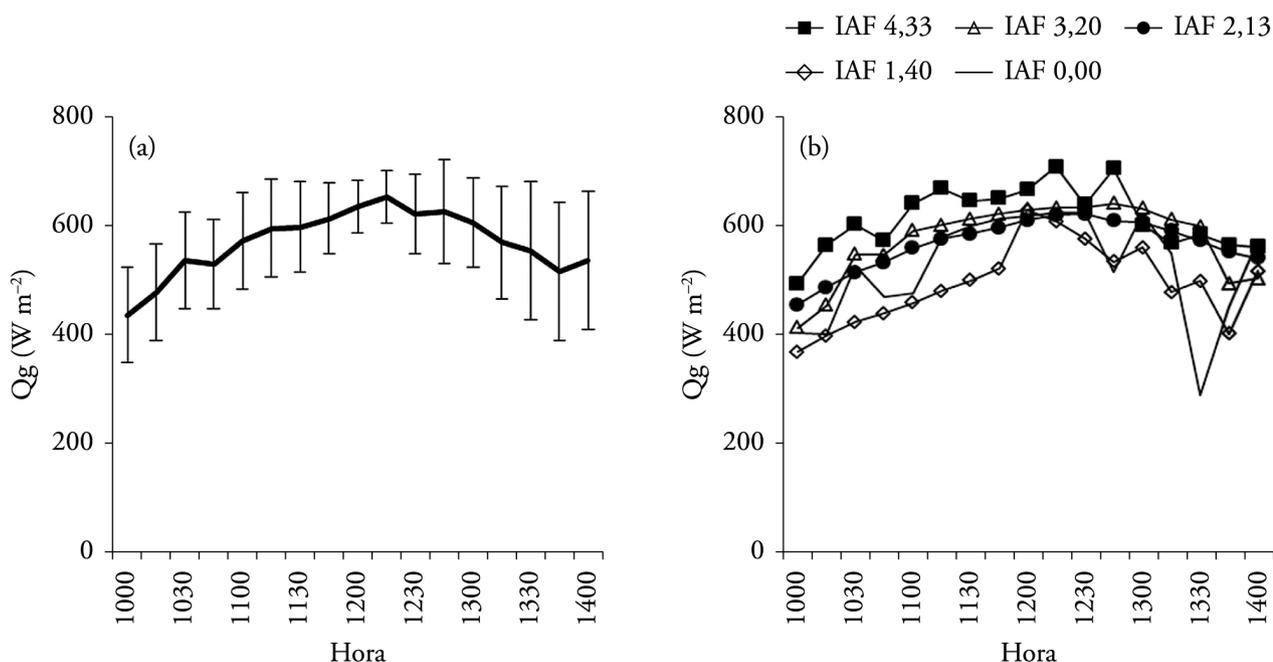
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da área foliar (AF) da copa da laranjeira, de  $37\text{m}^2$ , projetada horizontalmente sobre o solo (AP), tinha-se um índice de área foliar inicial (IAF) de 4,33. Com as remoções

de 26,2%, 51,03% e 67,6% da AF foram obtidos os IAFs de 3,20; 2,12 e 1,40. Após uma última desfolha que eliminou totalmente a folhagem (IAF zero), foi possível quantificar isoladamente a interceptação da radiação solar apenas por tronco e galhos.

Durante os dias de medida, entre 10 e 14 horas, a radiação solar global ( $Q_g$ ) apresentou consideráveis variações (Figura 1a). Para o horário de máxima radiação (12 horas) foram registrados valores de  $531,3\text{ W m}^{-2}$  a  $749,0\text{ W m}^{-2}$ , com média de  $635,5\text{ W m}^{-2}$  e desvio padrão de  $49,56\text{ W m}^{-2}$ . Como as medições prolongaram-se por aproximadamente 2 meses, iniciando com uma declinação solar ( $\delta$ ) de  $16,68^\circ\text{ N}$  e terminando com  $\delta$  de  $23,40^\circ\text{ N}$ , a redução da radiação solar global coincidiu com o decréscimo da área foliar da copa da árvore (Figura 1b), mas o período de medidas sem folhagem apresentou valores médios superiores aos dias com IAF = 1,40. Valores medidos de  $Q_g$ , quando o IAF da laranjeira era de 1,4, foram 20% inferiores aqueles medidos com IAF máximo. Variações quanti e qualitativas acabam por exercer ação sobre a interceptação e aproveitamento da radiação solar pela vegetação, inevitavelmente interferindo nos resultados (Federer, 1971; Rowland & Moore, 1992).

A variação da eficiência de interceptação ( $\epsilon_{int}$ ) em função do índice de área foliar da laranjeira, incluindo-se medidas com IAF zero (Figura 2a), possibilitou um ajuste exponencial entre as variáveis, a exemplo do padrão de ajuste estatístico também alcançado para cultivos de ciclo anual (Bergamaschi et al., 2010; Kunz et al., 2007; Lindquist et al., 2005; Müller & Bergamaschi, 2005; Radin et al., 2003). Adicionalmente, a morfologia da copa originou um valor característico de  $\epsilon_{int}$  (Figura 2), distinto



**Figura 1.** Variação média e barras de desvio padrão da radiação solar global ( $Q_g$ ) no período entre 10 e 14 horas, para todos os dias de medição (a) e valores médios de  $Q_g$  para os dias com diferentes IAFs (b).

do observado para cultivos anuais, definindo uma alta eficiência de intercepção da copa mesmo na ausência completa de folhagem.

Ao normalizar a  $\epsilon_{\text{int}}$  por S obteve-se correlação inversa com IAF (Figura 2c). O aumento da porosidade da copa intensifica a transmissividade da radiação solar através dela, elevando as multirreflexões e a intercepção da energia radiante por unidade de cobertura da silhueta. Enquanto  $\epsilon_{\text{int}}$  foi reduzida de 0,83 a 0,52 devido à total retirada da folhagem (Figura 2a), o preenchimento da silhueta da copa teve redução superior, de 0,912 a 0,502 (Figura 2b e Figura 3). Assim, na ausência das folhas, a exposição de material lenhoso escuro acaba contribuindo para redução da refletividade global da copa (Liakatas et al., 2002), elevando a  $\epsilon_{\text{int}}$  (Figura 2c).

O modelo de intercepção da radiação solar ( $Q_g$ ) em função da folhagem da copa (IAF) (Figura 2) assemelha-se com o obtido também para uma árvore isolada de palma (Awal et al., 2005). Para dosséis de espécies decíduas, na ausência completa de folhas, até 50% da energia radiante incidente no topo pode acabar interceptada (Federer, 1971; Liakatas et al., 2002; Zavitkovski, 1982), logicamente com variações expressivas em função das características da vegetação, da relação radiação direta/difusa, ângulo zenital e declividade da superfície (Federer, 1971; Rowland & Moore, 1992).

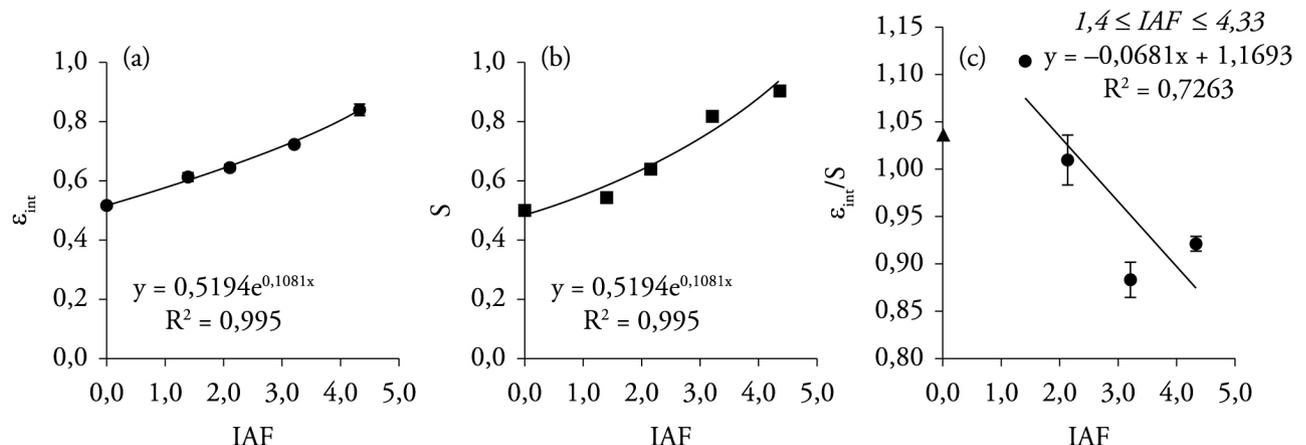
Esse resultado ratifica a dificuldade de estudo da distribuição da radiação solar incidente em dosséis de arbóreas ou florestas, face à rugosidade e não homogeneidade (proporção madeira/folhagem) do dossel (Figura 3), fazendo com que, na maioria das vezes, essas estruturas vegetais sejam simplificada e consideradas contínuas e homogêneas (Nerozzi et al., 1997; Ross, 1981), desconsiderando, de fato, a área total de folhagem e madeira, além da sua distribuição vertical, do ângulo de inclinação desses elementos e de suas propriedades óticas, que conjuntamente controlam a transferência de energia radiante no dossel (Hutchison et al., 1986).

Alterações na folhagem e aumento da exposição da matéria lenhosa em copa de arbóreas serão sempre fatores determinantes da transmitância (Figura 2) e da composição do balanço de radiação, ainda com interferência qualitativa da energia radiante incidente nos estratos inferiores dos dosséis, influenciando o estabelecimento e produção tanto de superfícies naturais (Floyd et al., 1978) quanto de sistemas agroflorestais (Caron et al., 2012).

Para cultivos anuais, o coeficiente de extinção da radiação solar global ou da fração fotossinteticamente ativa (PAR) corresponde ao parâmetro angular ( $a$ ) da função linear  $\ln(1-\epsilon_{\text{int}}) = -k \cdot \text{IAF}$  (Bergamaschi et al., 2010; Cardoso et al., 2010). Entretanto, para a laranjeira Pêra-Rio, a obtenção do coeficiente de extinção ( $k$ ) a partir da eficiência de intercepção da radiação solar global ( $\epsilon_{\text{int}}$ ) e do IAF exibiu resultado distinto. A partir da  $\epsilon_{\text{int}}$  registrada para IAF zero (Figura 2) e, conseqüentemente, de um valor negativo do termo  $\ln(1-\epsilon_{\text{int}})$  (Figura 4), o ajuste linear alcançado entre as variáveis gerou uma equação com coeficiente linear distinto, igual a  $-0,6298$  (Figura 4a). A correlação entre  $\ln(1-\epsilon_{\text{int}})$  e IAF acabou ainda melhor ajustada por uma equação quadrática (Figura 4b), com  $R^2$  muito próximo à unidade.

As estimativas da intercepção da radiação solar pela copa da laranjeira ( $K^*_{\text{est}}$ ), utilizando-se dos coeficientes de extinção ( $k$ ) obtidos por ajuste linear (Figura 4a) e quadrático (Figura 4b), foram superiores aos dados medidos ( $K^*$ ) para intervalos de 15 minutos. Embora os resultados estimados ( $K^*_{\text{est}}$ ) tenham sido similares, com superestimativas, a adoção do coeficiente de extinção  $k$  (ajust. Quadratic.) originou um melhor ajuste do modelo ( $R^2 = 0,8573$ ) (Figura 5a). Para períodos de 4 horas (10 às 14 horas), as estimativas ( $K^*_{\text{est}}$ ) mais uma vez foram maiores que os valores medidos ( $K^*$ ), entretanto com melhores ajustes ( $R^2$ ) (Figura 5b).

Dados estimados, quando confrontados às medições, independente do  $k$  adotado (Figura 4) apresentaram boa correlação ( $r$ ), mas quantitativamente mais próximos entre si ( $d$ ) quando utilizado o coeficiente de extinção obtido a



**Figura 2.** Eficiência de intercepção ( $\epsilon_{\text{int}}$ ) da radiação solar (a), porcentagem de preenchimento da silhueta da copa 'S' (b), e  $\epsilon_{\text{int}}$  normalizada por S ( $\epsilon_{\text{int}}/S$ ); (c), em função do IAF de uma laranjeira Pêra-Rio. As barras indicam o desvio padrão. Dados médios do período 10-14 horas.

partir de ajuste quadrático. Por isso o uso desse coeficiente  $k$  (Figura 4b) para a estimativa de  $K^*$  proporcionou os melhores resultados, obtendo classificação 'ótima' de acordo com o

índice  $c$  (Figura 5). A adoção do  $k$  (Ajust. Linear) culminou em um desempenho inferior, porém ainda assim com valores de ' $c$ ' classificados como 'bons'. Resultados satisfatórios dessa

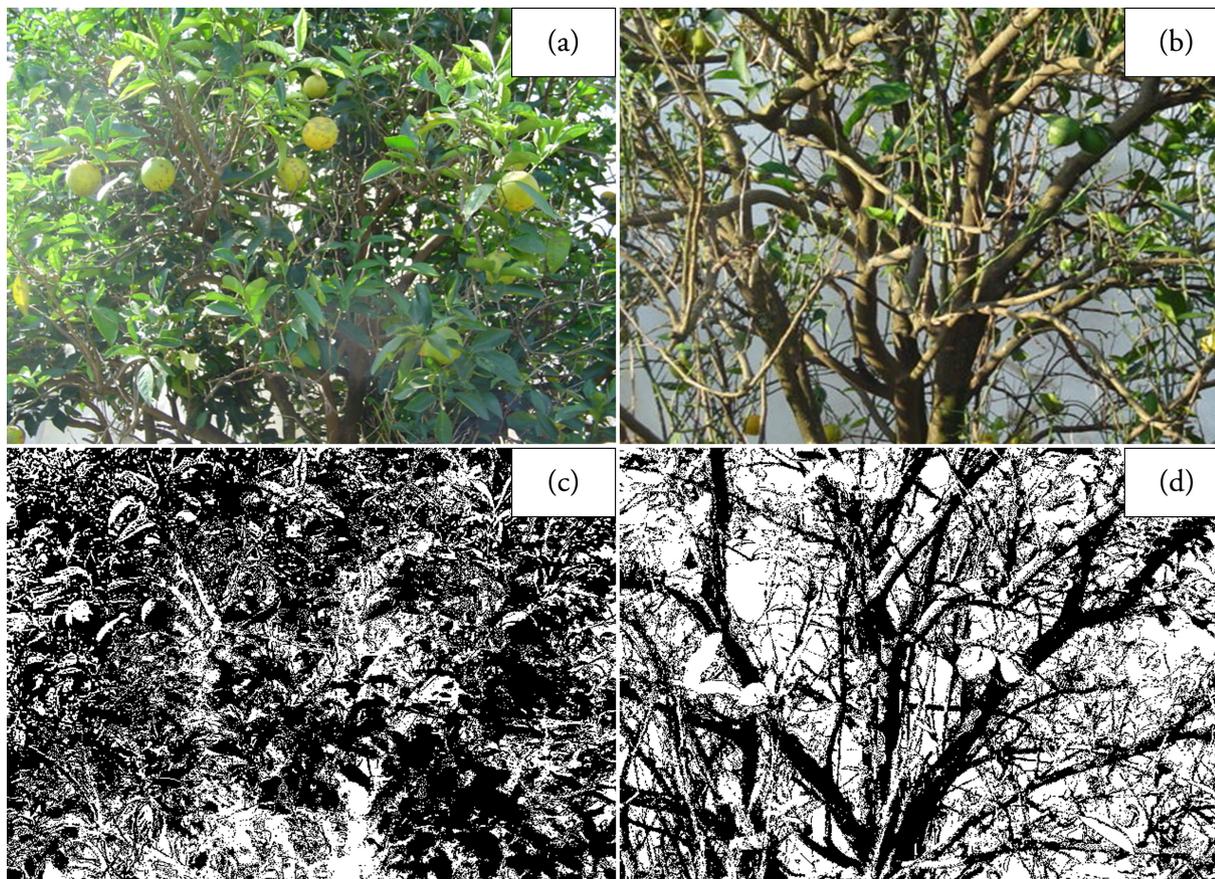


Figura 3. Vista parcial lateral da copa de uma laranjeira Pêra-Rio, com IAF = 4,33 (a) e IAF = 1,4 (b) e respectivas imagens tratadas, destacando-se em preto a área plana da silhueta coberta com folhagem (c), para IAF = 4,33, e com material lenhoso (d) para IAF = 1,4.

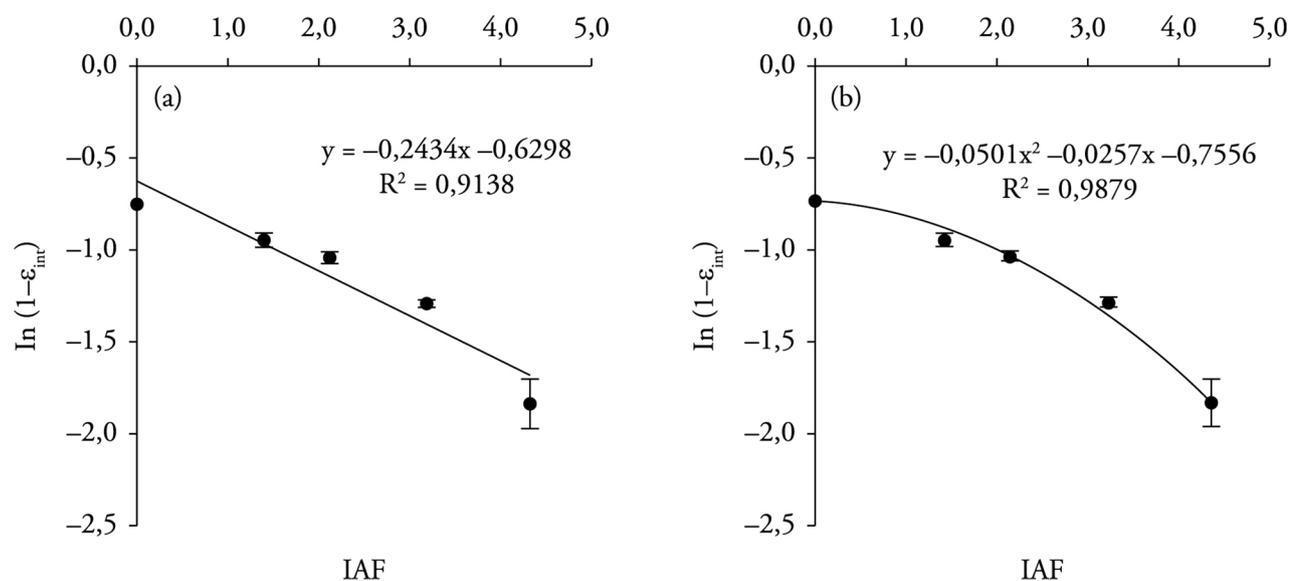
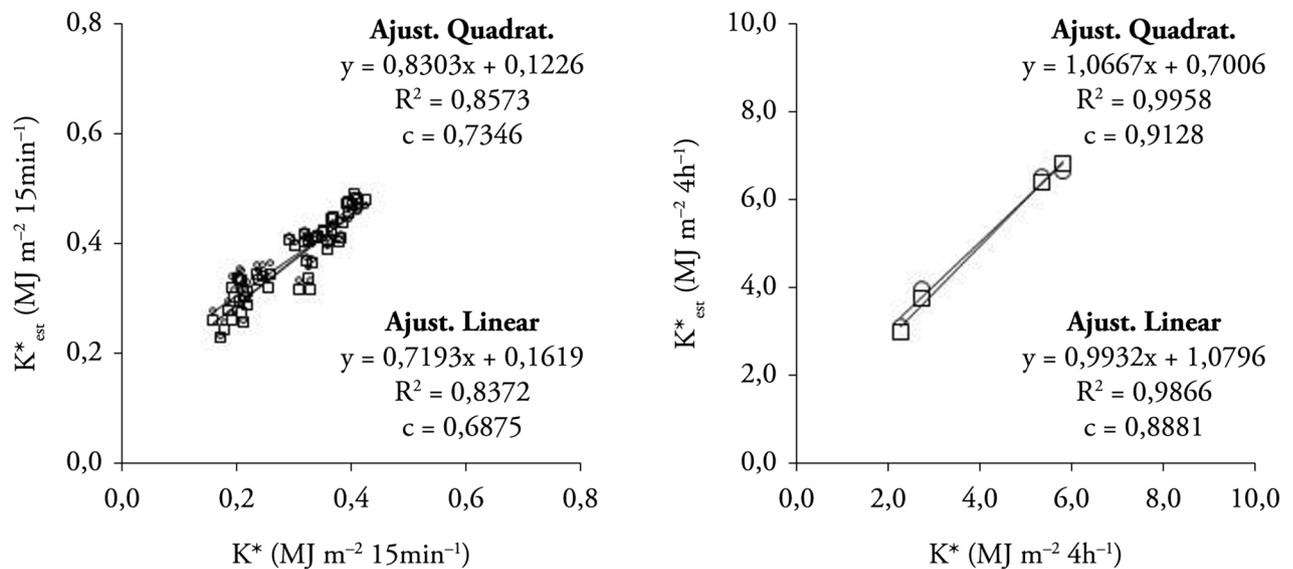


Figura 4. Coeficiente de extinção para radiação solar global em função do índice de área foliar (IAF) de uma laranjeira Pêra-Rio, por ajuste linear (a) e quadrático (b). As barras indicam o desvio padrão. Dados médios do período 10-14 horas.



**Figura 5.** Correlações entre valores integrados em 15 min e 4h da radiação solar interceptada estimada ( $K^*_{est}$ ) e da medida ( $K^*$ ) da copa de uma laranja Pêra-Rio com diferentes valores de IAF, a partir dos coeficientes  $k$  ajustados de forma quadrática ou linear.

proposta de estimativa de  $K^*$  para espécies arbóreas também foram obtidos por Jackson & Palmer (1979) para macieiras e Angelocci et al. (2008) para cafeeiros.

#### 4. CONCLUSÃO

O decréscimo da área foliar da copa, e consequente aumento da porosidade, determinou redução exponencial da eficiência de interceptação de radiação solar.

Mesmo na ausência de folhas, ramos e galhos da copa mantiveram uma eficiência de interceptação mínima de 0,5194, em comparação com o valor máximo de 0,8385 para o maior índice de área foliar observado.

O modelo baseado na Lei de Beer foi efetivo na simulação da interceptação da radiação solar pela copa da laranja entre 10 e 14 horas, no período de maio a julho.

Há diferenças entre o coeficiente de extinção para culturas arbóreas e anuais, explicável pelas diferenças morfológicas e de distribuição de plantas sobre o terreno.

#### REFERÊNCIAS

Angelocci, L. R., Marin, F. R., Pilau, F. G., Righi, E. Z., & Favarin, J. L. (2008). Radiation balance of coffee hedgerows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 274-281. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000300008>.

Angelocci, L. R., Villa Nova, N. A., Coelho, M. A., & Marin, F. R. (2004). Measurements of net radiation absorbed by isolated acid lime trees (*Citrus latifolia* Tanaka). *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79, 699-703.

Awal, M. A., Ismail, W. I. W., Harun, M. H., & Endan, J. (2005). Methodology and measurement of radiation interception by quantum sensor of the oil palm plantation. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27, 1083-1093.

Baldocchi, D. D., Matt, D. R., Hutchison, B. A., & Mcmillen, R. T. (1984). Solar radiation within an oak-hickory forest: an evaluation of the extinction coefficients for several radiation components during fully-leaved and leafless periods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 32, 307-322. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90056-X](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(84)90056-X).

Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Bergonci, J. I., Krüger, C. A. M. B., Heckler, B. M. M., & Comiran, F. (2010). Intercepted solar radiation by maize crops subjected to different tillage systems and water availability levels. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45, 1331-1341. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010001200001>.

Buler, Z., & Mika, A. (2009). The influence of canopy architecture on light interception and distribution in 'sampion' apple trees. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 17, 45-52.

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*, 5, 89-97.

Cardoso, L. S., Bergamaschi, H., Comiran, F., Chavarria, G., Marodin, G. A. B., Dalmago, G. A., Santos, H. P., & Mandelli, F. (2010). Padrões de interceptação de radiação solar em vinhedos com e sem cobertura plástica. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32, 161-171. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452010005000029>.

Caron, B. O., Souza, V. Q., Costa, E. C., Eloy, E., Behling, A., & Trevisan, R. (2012). Interceptação da radiação luminosa pelo dossel de espécies florestais e sua relação com o manejo das plantas daninhas. *Ciência Rural*, 42, 75-82. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000100013>.

Coelho, M. A., Fo., Angelocci, L. R., Vasconcelos, M. R. B., & Coelho, E. F. (2005). Estimativa da área foliar de plantas de lima ácida 'Tahiti'

- usando métodos não-destrutivos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 27, 163-167. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452005000100043>.
- Endler, J. A. (1993). The color of light in forests and its implications. *Ecological Monographs*, 63, 1-27. <http://dx.doi.org/10.2307/2937121>.
- Federer, C. A. (1971). Solar radiation absorption by leafless hardwood forests. *Agricultural Meteorology*, 9, 3-20. [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90003-3](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90003-3).
- Floyd, B. W., Burley, J. W., & Noble, R. D. (1978). Foliar developmental effects on forest floor light quality. *Forest Science*, 24, 445-451.
- Hirose, T. (2005). Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany*, 95, 483-494. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mci047>. PMID:15585544.
- Hutchison, B. A., Matt, D. R., Mcmilan, R. T., Gross, L. J., Tajchman, S. J., & Norman, J. M. (1986). The architecture of an east Tennessee deciduous forest canopy. *Journal of Ecology*, 74, 635-646.
- Jackson, J. E., & Palmer, J. W. (1979). A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*, 44, 381-383.
- Kunz, J. H., Bergonci, J. I., Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Heckler, B. M. M., & Comiran, F. (2007). Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, 1511-1520. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100001>.
- Liakatas, A., Proutsos, N., & Alexandris, S. (2002). Optical properties affecting the radiant energy of an oak forest. *Meteorological Applications*, 9, 433-436. <http://dx.doi.org/10.1017/S135048270200405X>.
- Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Walters, D. T., Cassman, K. G., & Dobermann, A. (2005). (2005) Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal*, 97, 72-78. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0072>.
- Machado, E. C., Medina, C. L., Gomes, M. M. A., & Habermann, G. (2002). Variação sazonal da fotossíntese, condutância estomática e potencial da água na folha de laranja 'Valência'. *Scientia Agricola*, 59, 53-58. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000100007>.
- McNaughton, K. G., Green, S. R., Black, T. A., Tynan, B. R., & Edwards, W. R. N. (1992). Direct measurement of net radiation and photosynthetically active radiation absorbed by a single tree. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62, 87-107. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90007-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(92)90007-Q).
- Müller, A. G., & Bergamaschi, H. (2005). Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 13, 27-33.
- Nerozzi, F., Rossi, F., Facini, O., & Georgiadis, T. (1997). Light transmittance and sunlit leaf area estimation in a peach canopy. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 72, 271-283.
- Pezzopane, J. E. M., Reis, G. G., Reis, M. G. F., Higuchi, P., & Polli, H. Q. (2002). Aspectos ecofisiológicos de algumas espécies arbóreas em uma floresta estacional semidecidual secundária. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10, 273-281.
- Radin, B., Bergamaschi, H., Reisser, C., Jr., Barni, N. A., Matzenauer, R., & Didoné, I. A. (2003). Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 1017-1023. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000900001>.
- Ross, J. (1981). The radiation regime and architecture of plant stands. London: The Hague Junk. 391 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-8647-3>.
- Rowland, J. D., & Moore, R. D. (1992). Modelling solar irradiance on sloping surfaces under leafless deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60, 111-132. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90078-I](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(92)90078-I).
- Wang, H., & Baldocchi, D. D. (1989). A numerical model for simulating the radiation regime within a deciduous forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 46, 313-337. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90034-8](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(89)90034-8).
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'donnell, J., & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995-9005. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.
- Zavitkovski, J. (1982). Characterization of light climate under canopies of intensively-cultured hybrid poplar plantations. *Agricultural Meteorology*, 25, 245-255. [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90077-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(81)90077-7).