

Calibração de dois métodos indiretos para estimativa do índice de área foliar em plantações de *Eucalyptus*Calibration of two indirect methods for estimating the leaf area index in *Eucalyptus* plantationsCarmeni João Giunti Neto¹, Rodrigo Eiji Hakamada²,
Marina Shinkai Gentil Otto², Sergio Ricardo Silva³ e José Luiz Stape⁴

Resumo

O índice de área foliar (IAF) tem sido utilizado como ferramenta de manejo florestal, uma vez que pode ser usado como referência do desempenho de processos biofísicos e fisiológicos. Diversos métodos indiretos de determinação de IAF têm sido usados, porém poucos estudos abordam a calibração dessas metodologias em diferentes idades do ciclo da cultura florestal. O LAI-2000 é um método indireto de mensuração do IAF cujo princípio de uso consiste no balanço entre a radiação que atinge o interior do dossel e a radiação que chega no topo do mesmo. Outro método muito utilizado são as fotos hemisféricas, que capturam os padrões de obstrução e penetração da luz no dossel, pela qual a arquitetura da copa e a área de folhagem podem ser quantificadas. O objetivo desse trabalho foi comparar os métodos indiretos LAI-2000 e fotos hemisféricas com o método direto de IAF obtido através da amostragem destrutiva da biomassa de folhas (IAF real), e avaliar as configurações e condições de uso dos aparelhos utilizados por ambos os métodos. As avaliações foram realizadas em plantios clonais de *Eucalyptus urophylla x grandis* em diferentes idades e localizados no extremo sul da Bahia, Brasil. O controle da exposição das fotos foi um fator decisivo para a utilização das fotos hemisféricas. Já a abertura da capa do aparelho de 270° e 360° e as condições de radiação difusa de nebulosidade foram essenciais para o adequado uso do LAI-2000. Ambos os métodos apresentaram correlações positivas com IAF real, porém, houve uma subestimativa de 68% das fotos hemisféricas e 51% do LAI-2000 em relação aos valores obtidos através do método direto. Dessa forma, quando o interesse é o valor absoluto do IAF, a calibração utilizando métodos destrutivos de biomassa foliar é necessária.

Palavras-chave: índice de cobertura de dossel, LAI-2000, fotos hemisféricas.

Abstract

The leaf area index (LAI) has been used as a forestry management tool, since it can be used as a reference for the performance of biophysical and physiological processes. Several indirect methods used to determine LAI have been used, but few studies address the calibration of these methodologies at different ages of the forest crop cycle. The LAI-2000 is an indirect method of LAI measurement whose principle is based on the balance between the radiation reaching inside of the canopy and the radiation on the top of it. Another widely used indirect method is the hemispherical photographs that capture the patterns of obstruction and light penetration in the canopy in which the canopy architecture and the foliage area can be quantified. The objective of this study was to compare the indirect methods LAI-2000 and hemispheric photos with the direct method of LAI obtained by destructive sampling of leaf biomass (real LAI), and to evaluate settings and use conditions of the equipments used by both methods. The evaluations were performed in clonal plantations of *Eucalyptus grandis x urophylla* at different ages and located in southern Bahia, Brazil. The control of the photos exposure was a decisive factor for the use of hemispheric photos. Moreover the opening of the device cover between 270° and 360° and the diffuse cloudy radiation conditions were essential for the proper use of LAI-2000. Both methods showed positive correlations with real LAI, however, there was an underestimation of 68% of the hemispheric photos and 51% of the LAI-2000 in relation to the values obtained by the direct method. Thus, when the interest is the absolute value of LAI, the calibration using destructive methods of leaf biomass is required.

Keywords: canopy coverage index, LAI-2000, hemispheric photos.

¹Pesquisador - Fibria – E-mail: carmeni.neto@fibria.com.br

²Doutorando(a) em Recursos Florestais. USP - Universidade de São Paulo - ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Av. Pádua Dias, 11 - 13418-900 - Piracicaba, SP - E-mail: rodrigo_hakamada@yahoo.com.br; mshgentil@usp.br

³Pesquisador Doutor. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária - Caixa Postal, 3081 - Rodovia BR 285, Km 294 – Zona Rural – 99001-970 – Passo Fundo, RS. E-mail: sergio.ricardo@embrapa.br

⁴Gerente de Pesquisa - Suzano – E-mail: stape@suzano.com.br

INTRODUÇÃO

O índice de área foliar (IAF) definido como área total formada por uma das faces das folhas por unidade de área projetada no solo (CHEN et al., 1991), está associado com muitos processos biofísicos e fisiológicos, incluindo fotossíntese, respiração, transpiração, ciclo do carbono, produtividade primária líquida e trocas energéticas (BONAN, 1995). Além disso, o IAF é um importante componente dos modelos de crescimento baseados em processos e uma variável essencial para a determinação da produtividade primária líquida de ecossistemas florestais através de ferramentas de sensoriamento remoto (RUNNING; GOWER, 1991; GOWER et al., 1999; ALMEIDA et al., 2003; WEISS et al., 2003). Morataya et al. (1999) demonstraram que o IAF pode ser utilizado como ferramenta de tomada de decisão para o manejo florestal de *Tectona grandis* e *Gmelina arborea* na Costa Rica.

O IAF pode ser mensurado direta ou indiretamente (GOWER et al., 1999; MUSSCHE et al., 2001; SONNENTAG et al., 2007; BEHERA et al., 2010; QI et al., 2013; OLIVAS et al., 2013). Medições diretas para a determinação do IAF apresentam procedimentos confiáveis (BRENNER et al., 1995, WHITFORD et al., 1995), mas envolvem amostragem destrutiva das plantas, e portanto, é um método laborioso para ser realizado.

Em comparação com o método direto, os métodos indiretos são mais rápidos, e são usualmente baseados em métodos óticos que medem a fração de abertura da copa. Os principais instrumentos utilizados atualmente são: LAI-2000 (Licor Inc., Nebraska, EUA), Ceptômetro (Decagon Devices Inc., Pulman, EUA), Demon (CSIRO, Canberra, Austrália), Trac (3Rd Wave Engineering, Ontário, Canadá) e fotos hemisféricas (CHEN; CIHLAR, 1995, DUFRENE; BREDA, 1995, KEANE et al., 2005, ARIAS et al., 2007, MACFARLANE et al., 2007). No entanto, como são métodos indiretos para a estimativa do IAF, a calibração dessas metodologias é fundamental para a confiabilidade dos resultados (GOWER, et al., 1999; LEBLANC et al., 2005; ARIAS et al., 2007; OLIVAS et al., 2013).

Poucos trabalhos realizaram a calibração dos métodos indiretos para povoamentos de *Eucalyptus* em diversas idades ao longo do ciclo (MONTE et al., 2007; WHITFORD et al., 1995). Sendo assim, este estudo teve como objetivo calibrar os métodos indiretos de determinação de IAF, fotos hemisféricas e o LAI-2000, em florestas clonais de *Eucalyptus* de diferentes idades e avaliar as configurações e condições de uso dos aparelhos utilizados por ambos os métodos.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

As avaliações foram realizadas em plantios comerciais clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* próximos ao município de Eunápolis, Bahia, Brasil (16° 22' 40" S, 39° 34' 48" W).

Foram instaladas 34 parcelas retangulares de 480 m² em arranjo espacial de 5 x 2,4 m (48 árvores parcela⁻¹, sendo 5 linhas com 8 árvores), com idades de 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 anos (Tabela 1). O incremento médio anual dos talhões avaliados foi de 56 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, sendo o diâmetro à altura do peito (DAP) e altura média (H) de 17,7 cm e 26,7 m, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Média de diâmetro à altura do peito (DAP), altura (H) e incremento médio anual (IMA) das florestas avaliadas.

Table 1. Mean diameter at breast height (DBH); height (H) and mean annual increment (MAI) of evaluated forests.

Idade anos	Número de parcelas	DAP (cm)	H (m)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
2	9	12,2	18,7	43,6
3	2	16,3	24,6	64,5
4	5	17,6	26,4	63,7
5	5	18,3	27,6	58,3
6	1	18,6	28,0	48,7
7	1	20,6	30,8	59,4
8	11	20,7	30,9	54,9
Média		17,7	26,7	56,1

Amostragem destrutiva para determinação direta de IAF

As amostragens destrutivas foram realizadas no mesmo dia de medição dos métodos indiretos para garantir que não houvesse variação temporal de IAF.

Para a seleção das árvores a serem avaliadas, mediu-se o DAP de todas as árvores e selecionaram-se 4 árvores por parcela, obedecendo os seguintes critérios: DAP dominante; DAP médio; DAP médio -1x desvio padrão, DAP médio +1x desvio padrão. Assim, um total de 136 árvores foram amostradas para as avaliações.

Após o abate das árvores selecionadas, todas as folhas verdes da copa foram retiradas e pesadas para obtenção da massa úmida total. Para determinação da área foliar específica (AFE, m² kg⁻¹) (NOUVELLON et al, 2010), foram coletadas 100 folhas por árvore, que foram armazenadas em caixa de isopor com gelo e, no laboratório, foram obtidas a massa úmida (massa úmida_amostra) e superfície foliar, utilizando um aparelho integrador óptico de área foliar (LI-3100). Em seguida, as folhas foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60° C e quando apresentadas massas constantes, as amostras foram pesadas novamente para determinação da massa seca (massa seca_amostra).

A partir da relação (massa seca_amostra / massa úmida_amostra) foi calculado o teor de umidade e a massa seca total de folhas de cada árvore amostrada. Por meio de correlações entre DAP e massa seca total de folhas das árvores amostradas, foram desenvolvidas relações alométricas para estimativa da massa seca total de folhas de todas as árvores das parcelas.

$$\ln \text{Massa seca folhas}_{\text{árvore}} = a + b * \ln \text{DAP} \quad (\text{Eq. 1})$$

O IAF foi determinado através da AFE média da parcela, área da parcela e somatória da massa seca das folhas de todas as árvores da parcela (Eq. 2).

$$\text{IAF} = \frac{\sum \text{Massa seca folhas}_{\text{árvore}} * \text{AFE}}{\text{Área da parcela}} \quad (\text{Eq. 2})$$

O IAF obtido pela amostragem destrutiva foi considerado como o IAF real.

Estimativa do índice de cobertura de dossel com lentes hemisféricas

Como a maioria dos métodos indiretos de determinação de IAF não é capaz de fazer uma diferenciação entre elementos verdes (folhas, acículas e brotos) e elementos não verdes (galhos, troncos, flores, frutos e folhas senescentes) (WEISS et al., 2003), termos alternativos mais apropriados vêm sendo propostos na literatura e, portanto, todas as estimativas de IAF feitas através de métodos indiretos neste trabalho serão denominadas índice de cobertura de dossel (ICD) (MONTE et al., 2007).

As avaliações de ICD com fotos hemisféricas foram realizadas com uma máquina fotográfica digital modelo Cyber-shot® Sony DSC F828, acoplada com uma lente do tipo Fisheye Opteka® 0.22X AF. Para a obtenção de visão ortogonal das imagens, utilizou-se um tripé com plataforma à altura de 1,3 m, bússola para orientação Norte e nível de bolha para garantir que as fotos estivessem perpendiculares ao zênite.

A máquina foi estacionada em nove pontos distintos, sempre alternando linha e entrelinha de plantio e formando duas diagonais na parcela, distantes aproximadamente 3,5m entre pontos (Figura 1). Em cada ponto foram tiradas sete fotos com diferentes exposições fotográficas, no período das 7h da manhã às 15h da tarde, totalizando 63 fotos por parcela.

Como a exposição da imagem pode interferir na estimativa do índice de cobertura de dossel (BREDA, 2003), foram avaliadas sete configurações da máquina fotográfica, variando os seguintes parâmetros: diâmetro de abertura das lentes (F); valor da exposição (EV); sensibilidade da câmera à luz (ISO) e grau de exposição da foto (Tabela 2).

Todas as fotos foram analisadas no software Hemisfer®, que classifica o céu que está acima ou atrás do dossel (pixels brancos) e a biomassa vegetal (pixels negros) em classes de , ou seja, em anéis de largura definida. Para que isso ocorra, o brilho de cada pixel da foto é calculado em função de uma média de três canais de cores (vermelho, verde e azul) e transformado em uma escala de cinza. O limiar desta escala de cinza e qualquer pixel com valor de brilho acima deste limiar foram transformados em pixel branco e, conseqüentemente, valores menores foram transformados em pixel preto.

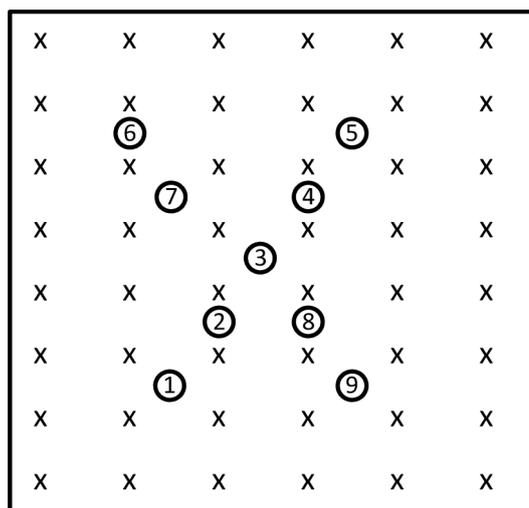


Figura 1. Localização dos nove pontos de medições de fotos hemisféricas dentro da parcela.
Figure 1. Location of nine points of the hemispherical photograph measurements in the plot.

Tabela 2. Sete configurações da máquina, variando os parâmetros: F: diâmetro de abertura da lente; EV: valor de exposição; ISO: sensibilidade da câmera à luz e grau de exposição.

Table 2. Seven camera configurations, with varying parameters: F: diameter of the lens opening; EV: exposure value; ISO: camera's sensitive to light and exposure degree.

Configuração da máquina	F	EV	ISO	Grau de exposição
C1	3,2	1	800	Alta superexposição
C2	5,6	1	Auto	Superexposição
C3	5,6	1	100	Superexposição
C4	5,6	0	Auto	Exposição automática
C5	5,6	0	100	Exposição automática
C6	5,6	-1	Auto	Subexposição
C7	5,6	-1	100	Alta subexposição

*Todas as configurações foram obtidas com a velocidade do obturador (S) no automático e o modo de foco da câmera (AF) contínuo.

Foram testados os cinco métodos de cálculo do ICD disponíveis pelo software Hemisfer®: Método de Miller (1967) (M1); Método de Miller (1967) implantado no Li-Cor LAI-2000 (M2); Método de Lang (1987) (M3); Método de Norman e Campbell (1989) (M4); Método Elipsoidal Ponderado (HEMISFER, 2006) (M5).

Dessa forma, foram avaliadas sete configurações da máquina e cinco métodos de cálculo do software Hemisfer, totalizando 35 combinações.

Estimativa de ICD com o aparelho LAI-2000

As medições de ICD com o LAI-2000 foram realizadas utilizando o método do sensor único, ou seja, o mesmo sensor foi usado para coletar as leituras fora e sob o dossel, sendo que o tempo médio entre as medições foi de aproximadamente 2 minutos. Em cada parcela coletou-se uma leitura fora e nove pontos de leitura abaixo do dossel, nos mesmos pontos em que foram coletadas as fotos hemisféricas (Figura 1). Em cada ponto de leitura avaliaram-se três aberturas do campo de visão do aparelho: (1) visão total (360°), (2) 270° e (3) 11,25°.

Realizaram-se as leituras sem restrições de horário e condição de tempo (céu aberto e nublado), para que as limitações do aparelho fossem capturadas.

Análises Estatísticas

Foram realizadas análises de regressão através do software SAS® (SAS, 2008) para comparar as medidas de ICD dos métodos indiretos com as medidas de IAF obtido pelo método direto, bem como para avaliar as 35 combinações da configuração da máquina x método de cálculo do Hemisfer® e as três aberturas de capa do aparelho LAI-2000. A análise dos resíduos foi realizada para verificação do comportamento dos dados e correspondente atendimento dos pressupostos do modelo de regressão linear.

A comparação entre os métodos IAF e ICD foi feita mediante a aplicação de testes de significância dos parâmetros da equação de regressão linear, pois a comparação envolvia amostras pareadas, cujas médias em termos absolutos não poderiam ser comparadas entre si. Desta forma, para avaliar a aderência das estimativas em cada ponto e o comportamento dessas estimativas nas 34 parcelas, foi realizada a aplicação de teste de significância (teste F) dos coeficientes das equações de regressão linear, considerando-se as hipóteses de $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$, ou seja, que no estabelecimento da regressão linear entre os valores dos dois métodos (IAF e ICD), se $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$, os valores de IAF observados em cada parcela seriam exatamente os mesmos, pois a reta resultante passaria pela origem dos eixos x e y e a inclinação dessa reta seria de 45° (tangente de $45^\circ = 1$).

Para avaliar a performance preditiva das regressões lineares, foi realizada a validação cruzada pelo método "Leave-one-out cross validation - LOOCV" (KOHAVI, 1995). A validação LOOCV utiliza o conjunto de dados de treinamento (parcelas experimentais) deixando uma das observações de fora (n-1) para ajustar um novo modelo e prever o valor removido da amostra (n é o tamanho da amostra). Esse ajuste ocorre para que todas as observações sejam excluídas uma única vez. A análise da validação cruzada dos modelos de regressão foi realizada com o auxílio das funções cvFolds e cvFit do pacote de nome cvTools (ALFONS, 2012), disponível no software para computação estatística R (R CORE TEAM, 2014). Para avaliar o resultado da validação cruzada e das previsões sobre as parcelas de validação utilizou-se a raiz do quadrado médio do erro (RMSE) e a média dos coeficientes de determinação com a omissão de uma parcela (R^2_{vc}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Índice de área foliar obtido pelo método direto

A área foliar específica (AFE) variou de 7 a $10 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ folha e o índice de área foliar (IAF) variou de 1,0 a $5,3 \text{ m}^2 \text{ folha m}^{-2}$ solo, sendo os maiores valores de ambos obtidos nas idades mais jovens (Figura 2). Esses valores são condizentes com outros estudos que avaliaram a variação temporal do IAF e da AFE (MARSDEN et al., 2010; NOUVELLON et al., 2010). Dessa forma, foi possível capturar uma grande amplitude de variação desses índices para calibração dos métodos indiretos.

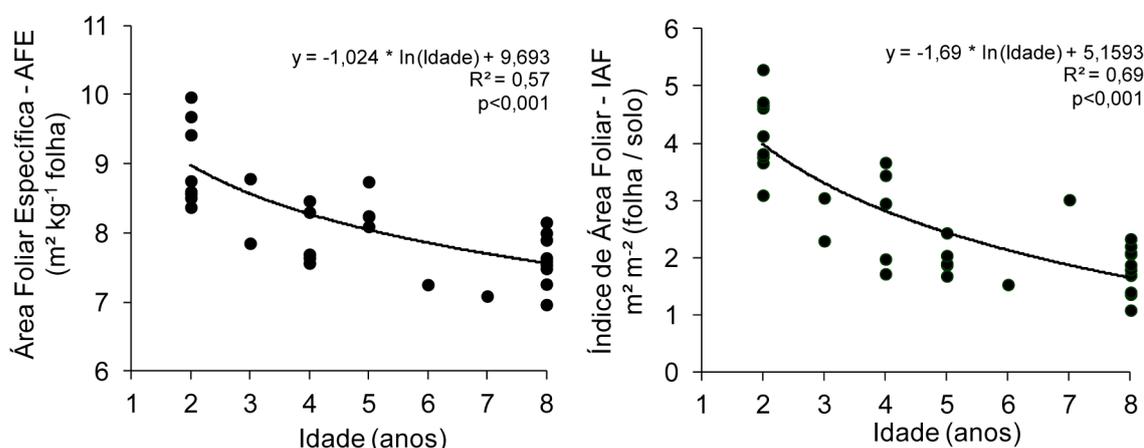


Figura 2. Área foliar específica (AFE) e índice de área foliar (IAF) obtidos através da amostragem destrutiva de *Eucalyptus* nas idades entre 2 e 8 anos (n=34).

Figure 2. Specific leaf area (AFE) and leaf area index (IAF) measured through destructive sampling on 34 *Eucalyptus* plots aged between 2 and 8 years (n=34).

Comparação entre estimativa de índice de cobertura de dossel (ICD) obtido por lentes hemisféricas e método direto

Houve grande variação das imagens geradas pelo programa Hemisfer® em função das configurações da câmera (Figura 3). A configuração C2 da máquina apresentou uma superexposição da imagem e maior sensibilidade à luz automática, ou seja, nas situações de ambiente escuro, a máquina aumentou a sensibilidade à luz e resultou em um clareamento da foto. Já nas situações de ambientes mais claros, houve uma redução da sensibilidade à luz automática, evitando uma superexposição da imagem à claridade.

A partir da configuração C4 houve um escurecimento da foto, resultando em elevados valores de ICD. As configurações C4 a C7, por exemplo, geraram valores de ICD quatro vezes superiores aos valores gerados com as configurações C1 a C3. A Figura 3 ilustra imagens de uma parcela com 96 meses de idade, com os valores de ICD obtidos para as sete configurações da máquina fotográfica. Neste caso, os valores de ICD foram obtidos pelo método de Norman e Campbell (NORMAN; CAMPBELL, 1989), sendo que o IAF real (obtido através do método direto) desse povoamento era de 2,1 m² folha m⁻² solo.

O efeito do controle da exposição das fotos hemisféricas sobre o ICD foi destacado em diversos trabalhos (CHEN, et al., 1991; MACFARLANE et al., 2000; ZHANG et al., 2005; MACFARLANE et al., 2007). Como os valores de ICD são significativamente afetados pelo grau de exposição das fotos, a máquina deve ser corretamente configurada de acordo com as condições de dias nublados ou céu aberto (CHEN et al, 1991).

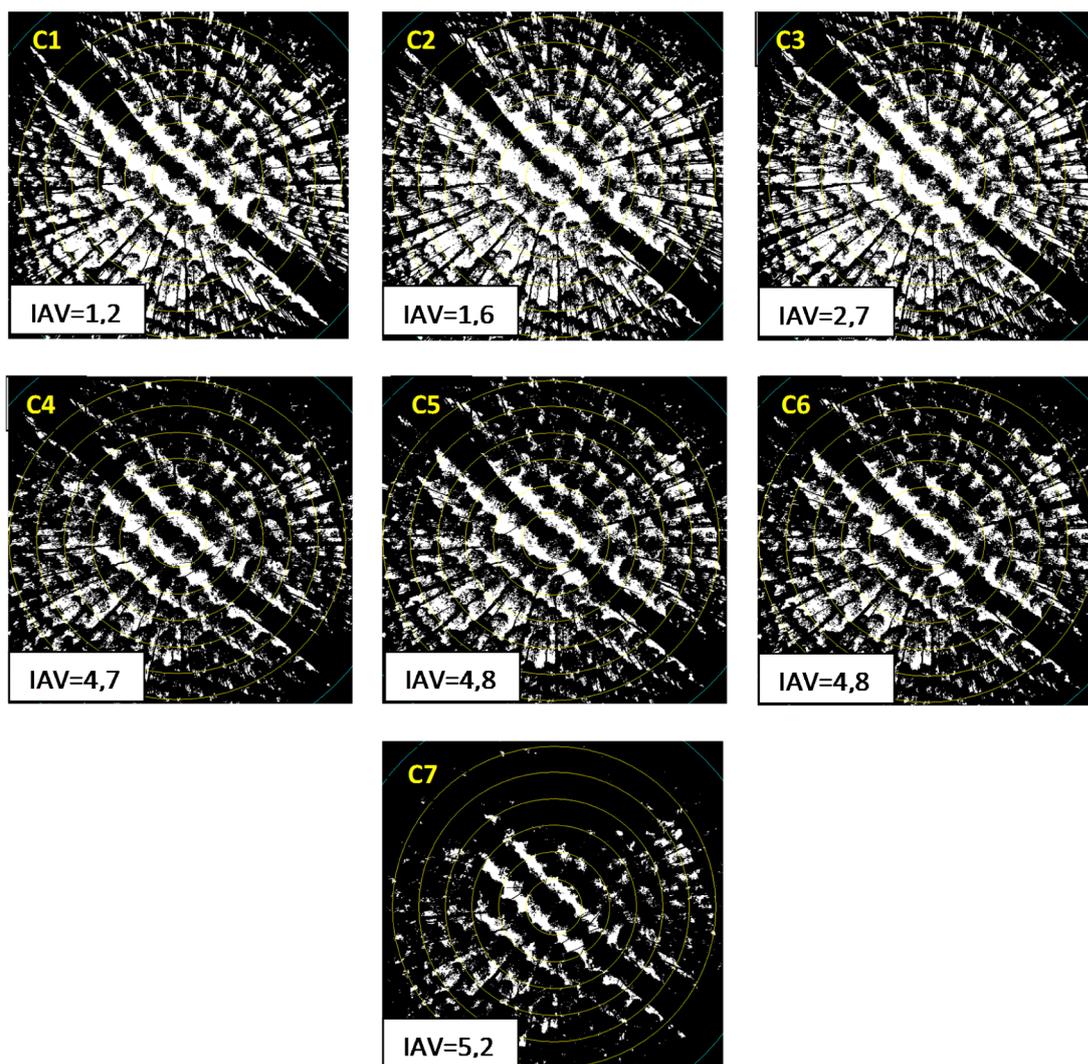


Figura 3. Exemplo de imagens geradas pelo programa Hemisfer® em um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* com 96 meses de idade para sete configurações da câmara fotográfica.

Figure 3. Images generated by the Hemisfer® program in *Eucalyptus urophylla* x *grandis* clones aged 96 months old, for the seven camera settings.

A combinação C2M4 obteve o maior coeficiente de determinação gerado pelo ajuste de ICD em relação aos valores obtidos pelo método direto ($R^2 = 0,736$). Além disso, essa combinação apresentou boa performance preditiva para estimar o IAF a partir de ICD, já que não houve diferença entre R^2 e R^2_{vc} (Tabela 3).

As configurações C5M2, C5M3, C5M4 e C5M5 também apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,69$; $0,69$; $0,74$; $0,69$, respectivamente). Sendo que essas combinações também foram validadas pelo método LOOCV (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros das equações de regressão de ICD das 35 configurações da câmara fotográfica para a obtenção das fotos hemisféricas (n=34).

Table 3. Regression equation parameters of ICD of 35 hemispherical photos settings (n=34).

Conf	R ²	β ₀	β ₁	F	P > F	R ² _{vc}	RMSE	Conf	R ²	β ₀	β ₁	F	P > F	R ² _{vc}	RMSE
C1M1	0,476	0,336	0,457	24,0	0,0001	0,476	0,3	C5M1	0,651	-0,8852	1,2655	47,6	0,0001	0,650	0,25
C1M2	0,519	0,297	0,488	28,9	0,0001	0,519	0,29	C5M2	0,698	1,3492	-0,1032	61,0	0,0001	0,698	0,23
C1M3	0,490	0,316	0,472	25,6	0,0001	0,491	0,3	C5M3	0,693	-0,9332	1,3028	56,9	0,0001	0,693	0,23
C1M4	0,547	0,2787	0,5140	33,2	0,0001	0,548	0,28	C5M4	0,740	-0,7476	1,2023	84,4	0,0001	0,740	0,22
C1M5	0,542	0,2794	0,5072	32,3	0,0001	0,543	0,28	C5M5	0,694	-0,7225	1,1690	66,9	0,0001	0,695	0,23
C2M1	0,199	-0,097	0,672	7,0	0,0125	0,200	0,4	C6M1					ns		
C2M2	0,417	-0,6685	1,0685	19,7	0,0001	0,417	0,33	C6M2					ns		
C2M3	0,350	-0,5501	0,9851	14,6	0,0002	0,351	0,35	C6M3					ns		
C2M4	0,736	-1,034	1,3783	90,7	0,0001	0,735	0,22	C6M4	0,402	-0,9512	0,8720	22,2	0,0001	0,403	0,33
C2M5	0,603	-0,9496	1,2928	47,6	0,0001	0,603	0,27	C6M5	0,197	-0,3806	0,5896	6,4	0,0163	0,198	0,38
C3M1	0,069	1,2944	-0,1467	2,6	0,1173	0,070	0,4	C7M1	0,286	1,3977	-0,1042	12,1	0,0015	0,287	0,36
C3M2					ns			C7M2	0,239	1,4998	-0,1382	8,1	0,0077	0,240	0,37
C3M3					ns			C7M3	0,257	1,4055	-0,1104	9,5	0,0042	0,256	0,36
C3M4	0,417	-1,1395	0,9186	29,7	0,0001	0,418	0,32	C7M4					ns		
C3M5					ns			C7M5					ns		
C4M1	0,273	1,3814	-0,094	12,4	0,0013	0,274	0,36								
C4M2	0,274	1,3814	-0,094	9,2	0,0048	0,252	0,36								
C4M3	0,260	1,4049	-0,1037	10,8	0,0024	0,261	0,37								
C4M4					ns										
C4M5	0,151	1,3492	-0,1032	4,1	0,0518	0,152	0,39								

*Equação IAF real = β₀ + β₁*ICD; R² é o coeficiente de determinação; β₀ e β₁ são os estimadores dos coeficientes linear e angular, respectivamente; F é o resultado do teste F e P > F é o nível de significância de ambos os coeficientes, R²_{vc} é o coeficiente de determinação para validação cruzada e RMSE é raiz do quadrático médio do erro.

O método M4 (NORMAN; CAMPBELL, 1989) disponível no software Hemisfer[®], resultou nos melhores valores de ICD, especialmente quando usados nas configurações C2 e C5 (Tabela 2). Este método considera que a orientação espacial das folhas (ângulo foliar) e o IAF são parâmetros interdependentes. Esta proposta baseia-se no modelo elipsoidal de distribuição do ângulo foliar (ELAD) (NORMAN; CAMPBELL, 1989; DAUGHTRY, 1990; LANG; XIANG, 1986). O algoritmo deste modelo alcança, para uma combinação de IAF e ângulo foliar, valores de transmitância do dossel tão próximos quanto à transmissão de luz medida pela foto, levando em conta que a transmissão de luz varia com o zênite do ângulo de incidência de luz. O método elipsoidal ponderado (M5) é semelhante ao M4, com a única diferença de que o M5 pondera os cálculos de acordo com o quanto cada anel de divisão das imagens gerado pelo software Hemisfer (Figura 3) representa na área total ocupada pela imagem.

Apesar da correlação positiva obtida entre IAF real e ICD através de fotos hemisféricas para a configuração C2M4 (melhor ajuste obtido) (Tabela 3), observamos que, enquanto a média de IAF real foi de 2,7 m² folha m⁻²solo, a média de ICD através de fotos hemisféricas nesta configuração foi de 1,8 m² folha m⁻²solo, ou seja, houve uma subestimativa de 68% do valor de IAF obtido na amostragem destrutiva (Figura 4).

Alguns trabalhos mostraram que esse método subestimou o ICD em 50% (SOMMER; LANG, 1994; BRENNER, 1995) e 53% (QI et al., 2013). Olivas et al., (2013) verificaram que esses valores podem variar de acordo com o programa utilizado para processar as fotos, sendo que, quando utilizaram o programa Gap Light Analyzer (GLA v2), (FRAZER et al., 2000), os valores foram subestimados em 38%. Já o programa WinSCANOPY reduziu essa subestimativa entre 3 a 21%. No entanto, Whitford et al. (1995) encontraram valores maiores em aproximadamente 73% das fotos hemisféricas com relação ao método direto de determinação de IAF em uma floresta de *Eucalyptus marginata* na Austrália.

Macfarlane et al. (2007) mostraram que as fotos hemisféricas somente geram boas estimativas de IAF para florestas de *Eucalyptus* se for corrigida a função gamma da câmara digital, através dos métodos propostos por Chen e Cihlar (1995); Lang e Xiang (1986). No presente trabalho a função gamma utilizada foi fixada em 2,2.

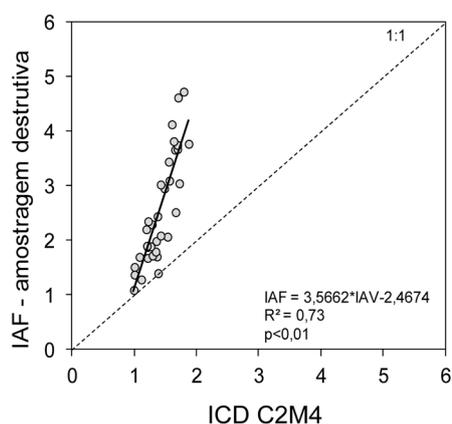


Figura 4. Relação entre o ICD estimado por fotos hemisféricas na configuração C2M4 e o IAF real obtido pela amostragem destrutiva (n=34).

Figure 4. Relationship between ICD estimated by hemispherical photographs in C2M4 configuration and IAF real measured by destructive sampling (n=34).

O elevado valor do coeficiente angular ($\beta_1 = 1,3783$) para a configuração C2M4 (Tabela 3) evidencia a importância da calibração para esse método, já que uma pequena variação no valor obtido pela foto hemisférica resulta em uma significativa alteração do valor do IAF real.

Calibração da estimativa do índice de cobertura de dossel (ICD) utilizando LAI-2000

Inicialmente foram realizadas correlações entre as estimativas de ICD obtidas com o aparelho LAI-2000 e o IAF real correspondente, sem considerar as diferentes condições de nebulosidade e aberturas do aparelho para as leituras fora do dossel. Nesta análise inicial, as correlações entre o valor obtido pelo LAI-2000 e o IAF real foram baixas, pois quando houve radiação direta incidindo no dossel (céu aberto) o aparelho superestimou suas leituras de transmitância da copa e subestimou o ICD. Além disso, quando a abertura da lente foi de 11,25° nas leituras realizadas fora do dossel, a transmitância desta abertura foi muito pequena e, portanto, o coeficiente de determinação foi baixo ($R^2 = 0,126$) (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros das equações de regressão para estimar o IAF a partir de três aberturas do campo de visão do LAI-2000 sem separar as condições de nebulosidade (n=34).

Table 4. Parameters of the regression equations to estimate LAI from three LAI-2000 vision openings without separating cloudy conditions (n=34).

Capa de Abertura	R ²	β_0	β_1	F	P > F	R ² _{vc}	RMSE
1 (360°)	0,482	1,243	1,009	34,8	0,0001	0,481	0,82
2 (270°)	0,441	1,541	0,864	29,7	0,0001	0,441	0,86
3 (11,25°)	0,126	2,154	0,428	5,5	0,0241	0,127	1,09

**Equação IAF real = $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ICD}$; R² é o coeficiente de determinação; β_0 e β_1 são os estimadores dos coeficientes linear e angular, respectivamente; F é o resultado do teste F e P > F é o nível de significância de ambos os coeficientes, R²_{vc} é o coeficiente de determinação para validação cruzada e RMSE é raiz do quadrático médio do erro.

Em uma segunda análise, excluíram-se as leituras com aberturas de 11,25°, e as regressões foram separadas em duas condições de nebulosidade: céu aberto e nublado (Tabela 5).

Observou-se que somente quando o LAI-2000 foi utilizado sem radiação direta nas copas (céu nublado) obteve-se melhor correlação do ICD com o IAF real (Tabela 5). Este resultado confirmou que para uma leitura correta desse método, seu uso deve ser restrito aos dias totalmente nublados. Se este critério não for seguido, há a possibilidade das leituras resultarem em valores imprecisos.

Além do uso desse aparelho somente em dias de radiação difusa (PEDUZZI et al., 2012; OLIVAS, et al., 2013), alguns autores optaram por utilizar esse aparelho apenas no início da manhã (BEHERA et al., 2010) ou fixaram horários pressupostos de céu nublado. Por exemplo, em um estudo de calibração do LAI-2000 para 6 espécies florestais nativas da Costa Rica, os horários de medições foram realizados das 6:30 às 7:30h da manhã, horário do dia em que as condições de nebulosidade do céu eram mais uniformes para essa região (ARIAS et al., 2007).

Com relação às capas de abertura do aparelho, a abertura de 270° apresentou resultados seme-

lhantes à abertura de 360° ($R^2 = 0,54$ e $R^2 = 0,55$, respectivamente) em dias de céu nublado (Tabela 5). Aberturas de 270° são recomendadas quando há possibilidade do operador que está utilizando o aparelho estar fora do campo de visão do aparelho. Fatores como altura das árvores, tamanho e inclinação das parcelas, influenciam na escolha da capa de abertura do aparelho, já que interferem no campo de visão do mesmo (LI-COR, 1992). Além disso, aberturas menores que 180° são mais recomendadas para parcelas pequenas ou no caso de plantas isoladas (LI-COR, 1992).

Tabela 5. Parâmetros das equações de regressão para estimar o IAF obtido em diferentes condições de nebulosidade e com aberturas do campo de visão do LAI-2000 de 360° e 270°.

Table 5. Parameters of the regression equations to estimate LAI obtained under different conditions of cloudiness and with LAI-2000 vision openings of 360° and 270°.

Condição de nebulosidade	Capa de Abertura	R ²	β_0	β_1	F	P > F	R ² _{vc}	RSME
Céu aberto	360°	0,478	0,640	1,385	5,0	0,0448	0,480	0,9
Céu aberto	270°	0,268	1,204	1,223	7,9	0,0146	0,276	1,16
Nublado	360°	0,542	1,284	0,953	26,1	0,0001	0,541	0,81
Nublado	270°	0,554	1,497	0,819	28,8	0,0001	0,553	0,81

***Equação IAF real = $\beta_0 + \beta_1 * ICD$; R² é o coeficiente de determinação; β_0 e β_1 são os estimadores dos coeficientes linear e angular, respectivamente; F é o resultado do teste F e P > F é o nível de significância de ambos os coeficientes, R²_{vc} é o coeficiente de determinação para validação cruzada e RMSE é raiz do quadrático médio do erro.

Em termos de valores absolutos, no entanto, os valores obtidos com abertura de 270° e em dias de céu nublado, foram subestimados em 51% em relação ao IAF real (Figura 5). Trabalhos anteriores evidenciaram que o LAI-2000 subestima o ICD em 10 a 40% (MACFARLANE et al., 2000); 14% (RHOADS et al., 2004); 26% (CUTINI et al., 1998), 17 a 40% (KALACSKA et al., 2005a,b) e 18% (OLIVAS et al., 2013). Arias et al. (2007) obtiveram resultados muito semelhantes entre ICD estimado por LAI-2000 e método direto e destrutivo, para monoculturas de 4 espécies florestais. Dovey e Toit (2006) observaram uma subestimativa entre o valor real e o estimado pelo LAI-2000 em povoamentos jovens de *Eucalyptus grandis*. Nesse caso, a estrutura da copa e a quantidade de tronco e galho, podem ter interferido na estimativa, pois em idades mais jovens a quantidade de folhas em relação às partes não-verdes é relativamente maior, quando comparado a povoamentos mais velhos.

Os métodos que se baseiam na chamada fração de abertura ("gap-fraction") para estimar o ICD supõe que, dentre outras características, a copa esteja bem distribuída horizontalmente (DOVEY; TOIT, 2006). No presente estudo, o largo espaçamento de 5m entre linhas de plantio das florestas de eucalipto pode ter contribuído para aumentar a subestimativa de ICD nos dois métodos.

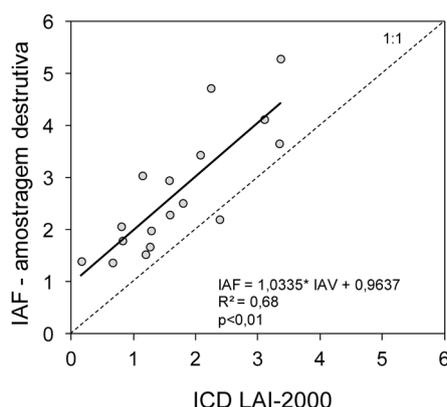


Figura 5. Correlação entre o ICD estimado através do LAI-2000, na configuração de céu nublado + abertura 270°, e IAF obtido através de amostragem destrutiva (n=17).

Figure 5. Correlation between ICD estimated by the LAI-2000 with configuration of cloudy sky + 270° opening, and LAI measured through destructive sampling (n=17).

CONCLUSÕES

Os dois métodos avaliados para a estimativa de ICD apresentaram correlações positivas com o IAF real, porém, em relação ao valor absoluto, houve uma subestimativa média de 68% das fotos hemisféricas e 51% do LAI-2000.

Para o método das fotos hemisféricas, a configuração C2 (F= 5,6; EV=0; ISO=auto; grau de exposição=automática) e o método M4 (Método de Norman e Campbell (1989) apresentaram melhores resultados. Já o aparelho LAI-2000 pode ser usado com capa de abertura de 270° ou 360° e somente em dias de céu nublado.

Dessa forma, embora ambos os métodos tenham apresentado relação positiva com o IAF real, quando há um interesse no valor absoluto do IAF, a calibração através de métodos destrutivos se torna necessária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONS, A. *Cross-validation tools for regression models v. 0.3.2*. Vienna, 2012.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre o uso da água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica). *Revista Árvore*, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ARIAS, D.; CALVO-ALVARADO, J.; DOHRENDUSCH, A. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assesment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 247, n. 1-3, p. 185-193. 2007.

BEHERA, S. K.; SRIVASTAVA, P.; PATHRE U. V.; TULLI, R. As indirect method of estimating leaf area index in *Jatropha curcas* L. using LAI-2000 plant canopy Analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.150, n. 2, p. 307-311, 2010.

BONAN, G.B. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 43, n. 3, p. 303-314, 1995.

BREDA, N. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

BRENNER, A. J.; ROMERO, M. C.; HARO, F. G.; GILABERT, M. A.; INCOLL, L. D.; FERNANDEZ, J. M.; PORTER, E.; PUGNAIRE, F. I.; YOUNIS, M. T. A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface areas of individual bushes. *Plant, Cell and Environmental*, Oxford, v. 18, p. 1332-1340, 1995.

CHEN, J. M.; BLACK, T. A.; ADAMS, R. S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 56, n. 1-2, p. 129-143, 1991.

CHEN, J. M.; CIHLAR, J. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 3, p. 777-787, 1995.

CUTINI, A.; MATTAEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Estimation of leaf area index with the Li-cor LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 105, n. 1-3, p. 55-65, 1998.

DAUGHTRY, C. S. T. Direct measurements of canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, v. 5, n. 1, p. 45-60, 1990.

DOVEY, S. B.; DU TOIT, B. Calibration of lai-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, New York, v. 20, n. 3, p. 273-277, 2006.

DUFRENE, E., BREDA, N. Estimating of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, Berlin, v. 104, n. 2, p. 156-162, 1995.

FRAZER, G. W., TROFYMOW, J. A., LERTZMAN, K. P. Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests. *Canadian Journal Forest Research*, Ottawa, v. 30, n. 2, p. 239-256, 2000.

- GOWER, S. T.; KUHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fApar, and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 1, p. 29-51, 1999.
- KALACSKA, M.; CALVO-ALVARADO, J. C.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Calibration and assessment of seasonal changes in leaf area index of a tropical dry forest in different stages of succession. **Tree Physiology**, Victoria, v. 25, n. 6, p. 733-744, 2005a.
- KALACSKA, M. E. R.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CALVO-ALVARADO, J. C.; RIVARD, B.; QUESADA, M. Effects of season and successional stage on leaf area index and spectral vegetation indices in three Mesoamerican tropical forests. **Biotropica**, Lawrence, v. 37, n. 4, p. 486-496, 2005b.
- KEANE, R. E.; REINHART, E. D.; SCOTT, J.; GRAY, K.; REARDON, J. Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 3, p. 724-739, 2005.
- KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 14, 1995. Quebec. **Proceedings...** San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995. p. 1137-1145.
- LANG, A. R. G.; XIANG, Y. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 229-243, 1986.
- LEBLANC, S. G.; CHEN, J. M.; FERNANDES, R.; DEERING, D. W.; CONLEY, A. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 129, n. 3-4, p. 187-207, 2005.
- LI-COR Inc. **LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Instruction/Operating manual**. Lincon, 1992.
- MACFARLANE, C.; COOTE, M.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A. Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globulus* Labill. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v.100, n. 2-3, p. 155-168, 2000.
- MACFARLANE, C.; HOFFMAN, M.; EAMUS, D.; KERP, N.; HIGGINSON, S.; MCMURTRIE, R.; ADAMS, M. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.143, n. 3-4, p. 176-188, 2007.
- MARSDEN, C.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; SEEN, D. L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A. M. N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1741-1753, 2010.
- MORATAYA, R.; GALLOWAY, G.; BEMINGER, F.; CANINE, M. Foliage biomass-sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L.F. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 113, n. 2-3, p. 231-239, 1999.
- MUSSCHE, S.; SAMSON, R.; NATCHTERGALE, L.; DE SCHRIJVER, A.; LEMEURE, R.; LUST, N. A comparison of optical and direct methods for monitoring the seasonal dynamics of leaf area index in deciduous forests. **Silva Fennica**, Vantaa, v. 35, n. 4, p. 373-384, 2001.
- NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. S. Canopy structure. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (Eds), **Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation**, London: Chapman and Hall, 1989. p. 301-325.
- NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal eucalyptus plantation in the Republic of Congo. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1796-1807, 2010.

OLIVAS, P. C.; OBERBAUER, S. F.; CLARK, D. B.; CLARK, D. A.; RYAN, M. G.; O'BRIEN, J. J.; ORDOÑEZ, H. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 177, p. 110-116, 2013.

PEDUZZI, A.; WYNNE, R. H.; FOX, T. R.; NELSON, R. E.; THOMAS, V. A. Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 270, p. 54-65, 2012.

QI, Y.; JIN, G.; LIU, Z. Optical and litter collection methods for measuring leaf area index in an old-growth temperature forest in northeastern China. **Journal Forest Research**, Tokyo, v. 18, n. 5, p. 430-439, 2013.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: < <http://www.R-project.org/> >. Acesso em 10 jan. 2015.

RHOADS, A. G.; HAMBURG, S. P.; FAHEY, T. J.; SICCAMA, T. G.; KOBE, R. Comparing direct and indirect methods of accessing canopy structure in a northern hardwood forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, n. 3, p. 589-591, 2004.

RUNNING, S. W.; GOWER, S. T. FOREST-BGC: a general model of forest ecosystems process for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree Physiology**, Victoria, v. 9, n. 1-2, p. 147-160, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**, version 9.2. 6 ed. New York: SAS Institute, 2008.

SOMMER, K. J.; LANG, A. R. G. Comparative analysis of 2 indirect methods of measuring leaf area index as applied to minimal and spur pruned grape vines. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 21, n. 2, p. 197-206, 1994.

SONNENTAG, O.; TALBOT, J.; CHEN, J. M.; ROULET, N. T. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in a ombrotrophic peatland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 144, n. 3-4, p. 200-212, 2007.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G. J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, n. 1-2, p. 37-53, 2003.

WHITFORD, K. R.; COLQUHOUN, I. J.; LANG, A. R. G.; HARPER, B. M. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, n. 3-4, p. 237-249, 1995.

ZHANG, Y.; CHEN, J. M.; MILLER, J. R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf index estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 133, n. 1-4, p. 166-181, 2005.

Recebido em 09/08/2014

Aceito para publicação em 16/05/2015