

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA
ESTIMATIVA DA ÁREA FOLIAR DE UM
CAFEIRO POR MEIO DE ANÁLISE DE
IMAGENS**

MARLON MARCON

2009

MARLON MARCON

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA
ÁREA FOLIAR DE UM CAFEIEIRO POR MEIO DE
ANÁLISE DE IMAGENS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas, área de concentração Modelagem de Sistemas Biológicos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Roberto Alves Braga Jr.

Co-orientadores

Prof. Carlos Mauricio Paglis

Dra. Myriane Stella Scalco

Dr. Graham William Horgan

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Marcon, Marlon.

Modelos matemáticos para estimativa da área foliar de um
cafeeiro por meio de análise de imagens / Marlon Marcon. – Lavras
: UFLA, 2009.

79 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Roberto Alves Braga Júnior.

Bibliografia.

1. Índice de área foliar. 2. Processamento de imagens digitais. 3.
Lente olho-de-peixe. 4. Luxímetro digital 5. Metrologia ótica I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 621.367

MARLON MARCON

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA
ÁREA FOLIAR DE UM CAFEIEIRO POR MEIO DE
ANÁLISE DE IMAGENS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas, área de concentração Modelagem de Sistemas Biológicos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 19 de fevereiro de 2009

Prof. Carlos Maurício Paglis	UFLA
Dra. Myriane Stella Scalco	UFLA
Prof. André Vital Saúde	UFLA

Prof. Roberto Alves Braga Jr.
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

*Aos meus pais
Ao meu irmão
Aos meus amigos*

Ofereço

*À Natalia, meu amor
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente em cada passo dessa caminhada e pelo dom da vida.

Agradeço especialmente aos meus pais, Orides Marcon e Vera Lucia Capelli, por todo o amor, carinho, orgulho, incentivo e confiança depositada em mim.

Ao meu irmão, Camillo Marcon, por todo o amor, carinho, amizade, apesar da distância.

À minha colega, amiga e meu Amor, Natália Ramos Mertz, pela pessoa especial que é, por todo seu amor, carinho, apoio, compreensão, ajuda e companheirismo. Te Amo Muito!

Ao professor Roberto Alves Braga Jr. pelo auxílio e, principalmente, pela paciência, firmeza, amizade, apoio, experiência e incentivo na orientação deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso que me proporcionaram conhecimento no decorrer desses dois anos.

A todos os amigos que nos acolheram em Lavras e estiveram presentes tanto nos bons quanto nos maus momentos sempre dando apoio.

A todas as bandas de Heavy Metal do mundo.

Às secretárias de pós-graduação Daniela e Dayane, pela atenção e auxílio nas questões administrativas do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro na realização deste trabalho.

À pesquisadora Myriane Stella Scalco, por ceder as plantas utilizadas na realização deste trabalho, bem como pela aceitação do convite de participar na minha banca.

Ao Professor Carlos Maurício Paglis, pela idealização deste projeto e pela participação na banca.

Ao Dr. Graham William Horgan do Biomathematics & Statistics Scotland, pelo auxílio em decisões importantes do projeto bem como nas análises dos dados.

Ao setor de Engenharia de Água e Solo do DEG, pelos equipamentos Li-3100c e Lai-2000 cedidos.

Ao Professor André Saúde e à Dra. Fátima Conceição Rezende, pelo aceite em participar da banca.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

Obrigado a todos vocês!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 OBJETIVOS.....	03
2.1 Objetivo geral	03
2.2 Objetivos específicos	03
3 ÁREA FOLIAR.....	04
3.1 Determinação da área foliar.....	04
3.1.1 Medidor de área foliar LI-3100C.....	06
3.1.2 Analisador de dossel LAI-2000	06
3.2 Utilização do índice de área foliar na cafeicultura.....	08
4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	09
4.1 Imagem digital	09
4.2 Técnicas de processamento e análise de imagens.....	10
4.2.1 Quantização de imagens	11
4.2.2 Limiarização	11
4.2.3 Otsu Thresholding.....	13
4.2.4 Equalização de histograma	15
4.3 Processamento de imagens × área foliar.....	15
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
5.1 Introdução.....	18
5.2 Plantas.....	18
5.3 Medição da área foliar real	19
5.4 Modelos usando imagens laterais	19

5.4.1 Modelo $AF \times (A,L)$	22
5.4.2 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{projetada}}$	23
5.5 Modelos usando a lente olho-de-peixe	24
5.5.1 Modelos $AF \times \text{área}_{\text{superior}}$ e $AF \times \text{área}_{\text{inferior}}$	28
5.6 Modelo usando o índice de área foliar (IAF).....	28
5.7 Modelo usando a intensidade luminosa	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 Modelos utilizando imagens laterais.....	31
6.1.1 Modelo $AF \times (A,L)$	31
6.1.2 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{projetada}}$	33
6.2 Modelos utilizando lente olho-de-peixe.....	35
6.2.1 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{superior}}$	35
6.2.2 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{inferior}}$	37
6.5 Modelo $AF \times \text{IAF}$	40
6.6 Modelo $AF \times \text{Lux}$	46
6.7 Resumo dos resultados.....	50
7 CONCLUSÕES	51
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Exemplo de Histograma Bimodal	13
FIGURA 2	Configuração do anteparo utilizado para isolar as plantas	20
FIGURA 3	Distâncias definidas para a captura das imagens (visão superior da planta)	21
FIGURA 4	Esquema de medição na imagem lateral	22
FIGURA 5	Posicionamento vertical da câmera com a lente olho-de-peixe para a captura das imagens superiores e inferiores	24
FIGURA 6	Exemplo de uma imagem separada em canais e os respectivos resultados de limiarização Otsu.	26
FIGURA 7	Seleção da área de interesse nas imagens inferiores	27
FIGURA 8	Esquema utilizado para o cálculo da fração coberta por folhas	28
FIGURA 9	Posições de medição com o LAI-2000 em cada planta	29
FIGURA 10	Pontos de coleta das intensidades luminosas	30
FIGURA 11	Modelos correlacionando a altura e largura da planta com sua área Foliar	32
FIGURA 12	Modelos correlacionando a área lateral da planta projetada na imagem com a área foliar real das plantas.....	34
FIGURA 13	Modelos correlacionando a fração de área da imagem coberta pela planta com a área foliar real das plantas	36
FIGURA 14	Modelos correlacionando a fração de área coberta por folhas na imagem com a área foliar real das plantas.....	38

FIGURA 15	Modelos correlacionando o índice de área foliar com a área foliar real das plantas.....	40
FIGURA 16	Plantas 14 (esquerda) e 21 (direita) que demonstram que o índice de área foliar não está diretamente relacionado à área foliar	41
FIGURA 17	Utilização das medidas unidimensionais obtidas através das imagens laterais em conjunto com o IAF para estimar a área foliar	43
FIGURA 18	Modelo que relaciona a área do retângulo sobrescrito juntamente com o IAF à planta e a área foliar	44
FIGURA 19	Utilização da área lateral e do IAF para estimar a área foliar	45
FIGURA 20	Modelos correlacionando o valor de intensidade luminosa no interior com a área foliar real das plantas.....	47
FIGURA 21	Modelos correlacionando o valor de intensidade luminosa abaixo com a área foliar real das plantas	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Cobertura nominal angular de cada anel e seu respectivo ponto central07
TABELA 2	Modelos desenvolvidos e seus respectivos R^2 , obtidos para os melhores casos50

RESUMO

MARCON, Marlon. **Modelos Matemáticos para estimativa da área foliar de um cafeeiro por meio de análise de imagens**. 2009. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Uma característica da maioria das culturas, biologicamente relevante para produção e produtividade, é a área foliar total. Contudo, métodos diretos de estimação desse parâmetro causam danos às plantas e consomem muito tempo, enquanto os métodos indiretos, apesar de não destrutivos, baseados em análise de imagens, demandam maior precisão na aquisição das medidas, o que pode ser de difícil obtenção. O desenvolvimento de ferramentas computacionais acessíveis auxiliam na busca de novas abordagens indiretas, que podem ser mais indicadas a produtores e pesquisadores, pois possuem boa relação com valores reais obtidos por meio de métodos diretos. Neste trabalho, objetivou-se a construção de um modelo baseado em medições indiretas para estimar a área foliar em cafeeiros, usando análise de imagens, medição da intensidade luminosa e do índice de área foliar (IAF) obtido por meio do equipamento LAI-2000. Os dados de referência foram valores de área foliar total obtidos por meio do método de medição destrutivo Li-3100c. Os experimentos foram conduzidos na Universidade Federal de Lavras (Minas Gerais / Brasil), usando plantas de cultivo experimental da cultivar Topázio, com altura de dossel, variando de 0,43 à 1,14m. Dois modelos foram desenvolvidos usando imagens, onde algumas características das plantas foram coletadas, tais como: altura e largura e área de projeção. Uma lente olho-de-peixe adaptada à câmera digital comercial foi utilizada para produzir visões distintas das plantas, sendo que dois modelos foram desenvolvidos, um usando uma imagem superior e outro usando quatro imagens inferiores da planta. Além disso, três modelos usando dados de luxímetro e do equipamento LAI-2000 foram desenvolvidos, onde as intensidades luminosas foram capturadas no interior e abaixo da planta. Comparações entre os modelos e os dados reais mostraram R^2 de 0,94 para o modelo utilizando a área de projeção, 0,82 para altura e largura e 0,83 para o modelo utilizando imagens superiores. Tais resultados sugerem que estes modelos podem ser utilizados para estimar a área foliar de um cafeeiro. Os outros modelos, obtidos por meio do luxímetro e do LAI-2000, apresentaram baixos valores e mais estudos são necessários para que estes sejam utilizados.

* **Comitê Orientador:** Roberto Alves Braga Jr. – UFLA (Orientador); Carlos Mauricio Paglis – UFLA (Co-orientador); Myriane Stella Scalco – UFLA (Co-orientadora); Graham William Horgan – BIOD, Escócia (Co-orientador); André Vital Saúde - UFLA.

ABSTRACT

MARCON, Marlon. **Estimation models of leaf area in a coffee tree using image analysis**. 2009. 79 p. Dissertation (Master in Systems Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.[†]

One feature of most horticultural crop plants that is biologically relevant to their yield and productivity is total leaf area. However, the direct methods of estimation of the leaf area cause damages to the plants and are time consuming, whereas the indirect methods based on image analysis, which are non-destructive, demand accuracy in the set up of the measurement procedure, which can be difficult to achieve. The development of computer tools and their accessible characteristics help the search for new indirect approaches which can be reliable for producers and researchers, with a good association with the real values produced by the direct methods. This work aims to build a model based on indirect measurements to estimate the leaf area in coffee trees using image analysis, light intensity measuring and the leaf area index (LAI) obtained by LAI-2000. The reference data were the total leaf area values obtained by destructive method of measuring area Li-3100c. The experiments were conducted at the Federal University of Lavras (Minas Gerais / Brazil) by using trees of an experimental crop of the Topazio cultivar with a canopy height ranging from 0.43 to 1.14 m. Two models were developed using images and some features from the trees were collected, such as the height and width and their projected area. Fisheye lens adapted to commercial digital camera were used to produce views from the plants, when two distinct models were created, one using an image captured above the plant and another using four images from below. In addition, three models were developed using data from a luximeter and from the LAI equipment (LAI 2000), where the light intensities were captured in the middle and in the bottom of the plant. Comparisons among the models and the actual figures showed R^2 of 0.94 for the model using the projected area, 0.82 to plant height and width and 0.83 when the model was created with the above images. These results suggest that these models can be used to estimate the leaf area of a coffee tree. The other models, obtained by using luximeters and the LAI, presented low values and further studies need to be done, so that they can be used.

[†]**Guidance Committee:** Roberto Alves Braga Jr. – UFLA (Supervisor); Carlos Mauricio Paglis – UFLA (Co-supervisor); Myriane Stella Scalco – UFLA (Co-supervisor); Graham William Horgan – BIOSS, Scotland (Co-supervisor); André Vital Saúde - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

Sendo a folha um importante órgão das plantas, o principal envolvido no processo fotossintético e na evapotranspiração, o monitoramento da área foliar é uma importante ferramenta no estudo de características fisiológicas relacionadas com o crescimento das plantas bem como é um importante índice na avaliação de danos causados por doenças e pragas. Além disso, a estimativa da área foliar é ponto chave na previsão de produtividade, melhorando ações de gerenciamento da produção, armazenamento e venda.

A determinação da área foliar pode ser feita por meio de métodos diretos, que envolvem a medição de todas as folhas, individualmente, ou indiretos, baseados na relação entre características da planta e a área foliar real obtida em testes destrutivos. Comparando métodos diretos e indiretos, nota-se que os indiretos geralmente apresentam alternativas não destrutivas, de forma a reduzir o tempo de remoção e preparação de todas as folhas. Além disso, alguns métodos indiretos apresentam resultados similares aos dos métodos diretos.

O café é um dos produtos agrícolas de maior importância no cenário mundial, e no seu cultivo é importante economicamente estimar a produtividade do plantio, que pode ser realizada por meio da área foliar. Sendo assim, é de grande importância desenvolver metodologias para realizar tal estimativa de forma rápida, com custo e de maneira eficiente.

Um dos resultados de métodos indiretos é o índice de área foliar (IAF), que tem sido amplamente utilizados em pesquisas. Medidas biométricas como o volume e a área lateral do dossel e, conseqüentemente a altura e o diâmetro inferior do dossel podem ser utilizados para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro, sendo que, os dois primeiros parâmetros apresentaram valores próximos aos dos métodos diretos considerados de referência.

Muitos métodos tradicionais de medição e equipamentos, têm sido substituídos por métodos computacionais usando a análise de imagens digitais, provendo assim medições indiretas e não destrutivas.

Neste trabalho, foram desenvolvidas equações para estimar a área foliar de cafeeiros usando análise digital de imagens. Os modelos propostos utilizaram diversas medidas provenientes das imagens das plantas em campo, bem como dados complementares como a intensidade luminosa no interior do dossel, o índice de área foliar por meio do equipamento LAI-2000 e o uso de lentes olho-de-peixe em câmera digital, tomando-se como parâmetro de comparação para os modelos, dados reais das áreas de todas as folhas do cafeeiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar modelos matemáticos para estimar a área foliar de um cafeeiro utilizando análise de imagens digitais e metrologia ótica.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo, utilizando a altura e a largura das plantas, obtidas por meio de imagens;
- Desenvolver um modelo, utilizando a área da projeção da planta em imagens do perfil da planta;
- Desenvolver um modelo, utilizando imagens da área de solo ocupada pela planta, obtidas por meio de lente olho-de-peixe.
- Desenvolver um modelo, utilizando a cobertura foliar, obtida por meio de imagens capturadas por lente olho-de-peixe;
- Desenvolver um modelo, utilizando o índice de área foliar, obtido por meio do LAI-2000;
- Desenvolver modelos, utilizando a intensidade luminosa no interior e abaixo da planta.
- Comparar todos os modelos com dados reais das medições das áreas de todas as folhas do cafeeiro usando o Li-3100c.

3 ÁREA FOLIAR

A área foliar das plantas em uma cultura é de grande importância por ser um parâmetro indicativo de produtividade, visto que, o processo fotossintético que ocorre nelas depende da captação de energia luminosa e de sua conversão em energia química (Favarin et al., 2002) . Esta está intimamente ligada ao Índice de Área Foliar (IAF), que é definido por Watson (1947) como o total de área foliar por área de solo ocupada pela planta ou cultura (m^2 folha. m^{-2} solo), o qual é resultado da disposição espacial das folhas, como consequência da distribuição espacial das plantas (Vieira Júnior et al., 2006).

O conhecimento do IAF e da área foliar também podem ser úteis na avaliação de diversas práticas culturais, tais como densidade de plantio, adubação, poda e aplicação de defensivos (Rey & Alvarez, 1991; Favarin et al., 2002; Tavares-Júnior et al., 2002). Além de ser uma medida amplamente utilizada em estudos agrônômicos e fisiológicos, envolvendo crescimento vegetal (Riano et al., 2004) . Em cultivo de café, por meio desses parâmetros pode-se estimar, dentre outras características, a perda de água pela planta, o que contribui para a utilização econômica da água, por meio de manejo adequado da irrigação (Favarin et al., 2002).

3.1 Determinação da área foliar

O conhecimento de métodos que determinem a área foliar é importante em estudos que envolvam a análise do crescimento de plantas, fotossíntese, propagação vegetativa, nutrição, competição, relações solo-água-planta, pragas e doenças entre outros (Benincasa et al., 1976; Gomide et al., 1977).

Para a determinação da área foliar, podem ser utilizados métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos utilizam medidas realizadas diretamente nas

folhas e, apesar de serem mais exatos, Caruzzo & Rocha (2000) afirmam que os métodos diretos não são de fácil utilização, pois necessitam de um trabalho dispendioso ou da destruição por completo ou de parte da planta. Os métodos indiretos que realizam uma estimativa do IAF a partir de informações da planta, apresentam uma forma muito mais prática de obtenção dos dados, além de produzir resultados próximos aos dos métodos diretos (Roberts et al., 1996).

Favarin et al. (2002), utilizando a abordagem indireta para avaliar a relação existente entre as medidas do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e o seu índice de área foliar e, concluíram que as medidas como o volume e a área lateral do dossel e, conseqüentemente a altura e o diâmetro inferior do dossel podem ser utilizados para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro, sendo que, os dois primeiros parâmetros apresentaram coeficiente de correlação $R^2 > 0,97$, em relação a dados de métodos diretos.

Em experimento para verificar as diferenças entre métodos de campo e de laboratório para determinação da área foliar, Huerta (1962) chegou à conclusão de que a diferença entre o método fotográfico, peso das folhas, comparação de superfície, gráfico e dimensões foliares, não foram significativas, o que possibilita a redução de tempo com medições foliares em condições de campo.

De acordo com Mielke et al. (1995), os métodos de determinação do IAF, sejam eles diretos ou indiretos, podem ser realizados de maneira destrutiva (ou de laboratório) e não-destrutiva (ou de campo). Os métodos destrutivos exigem a retirada da folha ou de outras estruturas, prática que muitas vezes limita o número de plantas a serem utilizadas em um experimento. Nos métodos não-destrutivos, as medidas foliares são tomadas diretamente na planta sem a necessidade de remoção de estruturas, o que possibilita experimentos de acompanhamento do crescimento (Adami et al., 2007).

Normalmente, quando se deseja avaliar a eficiência de um método não-destrutivo para determinar a área foliar, utiliza-se como referência o aparelho da marca LI-COR, modelo LI-3100C. Este estima a área pelo princípio de células de grade de área conhecida (LI-COR, 1996), entretanto, possui custo elevado e é destrutivo, uma vez que as folhas devem ser coletadas para a análise em laboratório com o aparelho (Adami et al., 2007). Para medir o IAF em campo de forma não destrutiva outro equipamento da marca LI-COR é amplamente utilizado, o analisador de dossel LAI-2000.

3.1.1 Medidor de área foliar LI-3100C

O LI-3100C é um medidor de área foliar que funciona em tempo real, ou seja, a área é retornada no momento em que a folha passa pelo sensor. Seu visor apresenta medidas de no mínimo 1mm^2 , resolução de até $0,1\text{mm}^2$, e apresenta uma precisão de $\pm 2,0\%$ para a resolução 1mm^2 e $\pm 1,0\%$ para a resolução $0,1\text{mm}^2$ (LI-COR, 1996).

3.1.2 Analisador de dossel LAI-2000

O cálculo do índice de área foliar é dado pela Equação 1, que calcula a fração de luz difusa incidente (T) para os ângulos θ .

$$LAI = -2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(T(\theta)) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1)$$

O sensor do LAI-2000 consiste de uma lente olho-de-peixe com abertura angular de visão de 148° que focaliza em um fotodiodo que possui cinco anéis concêntricos (Tabela 1). Cada anel captura os dados referentes a uma

porção diferente do dossel da planta, e o valor de T que passa em cada uma dessas porções é calculado para o ângulo de visão central de cada anel.

TABELA 1 - Cobertura nominal angular de cada anel e seu respectivo ponto central

Anel	Cobertura angular	Ponto central (θ)
1	0,0 – 12,3	7°
2	16,7 – 28,6°	23°
3	32,4 – 43,4°	38°
4	47,3 – 58,1°	53°
5	62,3 – 74,1°	68°

É realizada uma integração numérica, sendo que para cada valor de $\sin \theta d\theta$ dentre os cinco ângulos (θ) existentes é substituído pelo respectivo valor, representado por $w(\theta_i)$. O cálculo utilizado pelo LAI-2000 é representado pela Equação 2.

$$LAI = -2 \sum_{i=1}^5 \ln(T(\theta_i)) \cos \theta_i w(\theta_i) \quad (2)$$

O cálculo de $T(\theta)$ é realizado seguindo a Equação 3, a seguir:

$$T(\theta) = \frac{I_B(\theta)}{I_A(\theta)} \quad (3)$$

onde I_B representa a radiação que abaixo do dossel e I_A acima do mesmo.

3.2 Utilização do índice de área foliar na cafeicultura

Diversos trabalhos ressaltam a importância do índice de área foliar como fator qualitativo em culturas anuais ou perenes, e quando se fala de IAF a área foliar está diretamente relacionada, sendo que, ao se tratar da produção de lavouras cafeeiras, tal fato também é aplicável.

Valencia (1973) desenvolveu um trabalho com o objetivo de encontrar o IAF correspondente à máxima produtividade do cafeeiro, e descobriu um valor próximo a $8m^2.m^2$ em condições experimentais para a cultivar Caturra, sendo que quando a cultura atingir tal índice deve-se buscar mantê-lo por meio de técnicas de fertilização, poda etc.

Para analisar o crescimento do cafeeiro, aplicando várias intensidades de luz e doses de fertilizante, Castillo (1961), utilizou, dentre outros fatores, o IAF, concluindo que a produção de matéria seca depende da sua variação.

Diversos autores utilizam o IAF em ensaios, avaliando a qualidade do cafeeiro de diferentes variedades, como Favarin et al. (2003) e Rosa et al. (2007), e para comparar o crescimento das plantas submetidas a diferentes condições de irrigação por gotejamento, como no trabalho realizado por Santana et al. (2004) .

4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento de imagens digitais envolve procedimentos que normalmente são expressos na forma de algoritmos, e com algumas exceções a maioria destas funções podem ser implementadas em software. A aplicação das técnicas é caracterizada por soluções específicas, sendo que técnicas que funcionam muito bem para um tipo de aplicação podem ser totalmente inadequadas para outra (Gonzalez & Woods, 2007).

Um sistema de processamento de imagens admite como entrada uma imagem que, após processada, produz outra na saída, adequada às necessidades do problema abordado (Gomes & Velho, 2002) . O número de aplicações que utilizam técnicas de processamento digital de imagens no setor agrícola está aumentando rapidamente e em plantas, as imagens utilizadas são processadas a fim de identificar algumas características, tais como área lateral, perímetro, existência de buracos, altura e largura etc. (Cunha, 2003).

4.1 Imagem digital

O termo imagem é definido como sendo uma função bidimensional de intensidade de luz denotada por $f(x, y)$, onde o valor de f no ponto (x, y) corresponde ao brilho da imagem no ponto. Para que uma imagem possa ser processada computacionalmente, $f(x, y)$ deve ser discreta, e a representação mais comum para tal é utilizando matrizes bidimensionais, onde cada posição (x, y) é um valor amostral de um intervalo contínuo (Gonzalez & Woods, 2007). A representação de uma matriz f de $N \times M$ amostras, para intervalos igualmente espaçados é mostrada na Equação 4.

$$f(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & \cdots & f(0, M - 1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N - 1, 0) & \cdots & f(N - 1, M - 1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Outros dois fatores importantes acerca de imagens digitais são a resolução espacial e a resolução de cor, a primeira determina o nível de detalhes de uma imagem, ou seja, o tamanho da matriz utilizada para representar uma imagem, e a segunda, o número de cores possíveis que cada célula da matriz (também conhecidas por pixels) pode assumir. Este valor depende do número de bits utilizados para tal representação, sendo que varia na ordem de 2^b , onde b é o número de bits (Gomes & Velho, 2002; Gonzalez & Woods, 2007). As resoluções mais utilizadas são as de 24 (RGB, 16.777.216 de cores), 8 (escala de cinza, 256 cores) e 1 bit (monocromática, 2 cores).

4.2 Técnicas de processamento e análise de imagens

Existem diversas técnicas de processamento de imagens, que visam melhorar uma imagem para que esta seja mais inteligível para os procedimentos posteriores, contribuindo para que, ao final do processo, esta apresente características como um bom contraste, contornos nítidos e ausência ou redução de ruídos (Gonzalez & Woods, 2007).

Dentre as técnicas de processamento de imagens, algumas são muito importantes para o presente trabalho, como as que envolvem a quantização das imagens, o realce de contraste que pode ser realizado pela manipulação do histograma e a limiarização que é utilizada para segmentar os objetos de uma imagem do seu fundo.

4.2.1 Quantização de imagens

A quantização de uma imagem digital consiste em reduzir seu gamute¹ de cores, o que acarreta na alteração da informação de cor de cada *pixel* da mesma. Mais precisamente, para uma imagem $f(x, y)$ o resultado da quantização é uma imagem $f'(x, y)$ tal que, $f'(x, y) = q(f(x, y))$ onde q é a transformação de quantização que altera a resolução de cor da imagem.

O processo de quantização converte um valor amostral para uma intensidade de brilho, sendo que, a precisão do método está diretamente ligada ao número de bits utilizados para representar cada cor (Baxes, 1994). Entretanto, à medida que a resolução de cor aumenta o tempo de processamento e o tamanho da imagem também aumentam (Chanda & Dutta Majumber, 2006).

O número de bits utilizados para a quantização de uma imagem varia de acordo com o objetivo, porém, segundo Baxes (1994), uma imagem de 8 bits é suficiente para a maioria das aplicações.

Na literatura, podem-se encontrar diversos métodos de quantização, dentre eles a quantização uniforme e adaptativa, seleção direta, populosidade, corte mediano entre outros (Miano, 1999; Gomes & Velho, 2002; Brun & Trémeau, 2003; Jähne, 2004).

4.2.2 Limiarização

O processo de limiarização (do inglês, *thresholding*) é uma das mais importantes abordagens para a segmentação de imagens. É uma técnica de análise por região, útil em cenas com objetos que se contrastam com o fundo, e tem por objetivo a classificação dos pixels que constituem o objeto. O método consiste na varredura da imagem de origem, rotulando cada pixel como sendo pertencente ao fundo ou ao objeto. Para determinar tal transformação, um valor

¹ Corresponde ao espaço de cores possíveis em uma determinada imagem, por exemplo para uma imagem de 8 bits o gamute de cores corresponde aos valores entre 0 e 255.

limiar deve ser previamente definido para que todos os valores de cor maiores que ele corresponderão ao fundo e os menores ao objeto (Gonzalez & Woods, 2007). A Equação 5 representa tal operação.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) \leq L \\ 1 & \text{se } f(x, y) > L \end{cases} \quad (5)$$

onde:

- f é a imagem original;
- g a imagem resultante;
- L o limiar definido;
- 0 e 1 são os valores correspondente ao objeto e ao fundo respectivamente.

Uma boa maneira de determinar o valor limiar para separar um objeto do fundo é pela análise do histograma de frequências da imagem, quando este apresenta a característica bimodal, ou seja, um “vale” entre dois “picos”, onde os picos representam o objeto e seu fundo e os valores correspondentes as baixas frequências são tons de transição entre esses dois, sendo, portanto, candidatos a serem escolhidos como limiar de divisão entre eles (Jähne, 2005). Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de histograma bimodal.

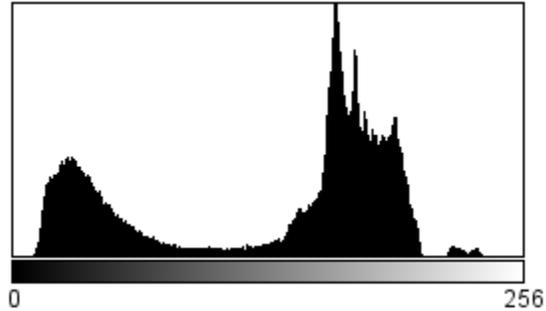


FIGURA 1 Exemplo de Histograma Bimodal

Um problema apresentado nesta técnica é a definição do valor limiar quando o histograma não é bimodal, pois tal valor deve ser condizente com as características da imagem. Para uma imagem escura o valor de limiar definido deve ser diferente do valor utilizado para uma imagem clara, visto que, se o valor da primeira for aplicado na segunda, objeto e fundo serão fundidos, dificultando a compreensão da imagem (Lucas et al., 2003).

4.2.3 Otsu Thresholding

Definido por Sahoo et al. (1988) como o melhor método de limiarização global dentre os testados, a limiarização de Otsu (1979) é definida como segue.

Dado um número L de níveis de cinza presentes em uma imagem $[1, 2, \dots, L]$, o número de pixels do nível i é denotado por n_i sendo que $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$. A probabilidade de cada nível de cinza acontecer na imagem é dada por:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (6)$$

Supondo que os níveis de cinza sejam divididos em duas classes C_1 e C_2 por um limiar k , onde C_1 corresponde aos níveis $[1, \dots, k]$ e C_2 aos níveis $[k + 1, \dots, L]$ a probabilidade (P) de cada classe ocorrer é dada por:

$$\omega_1 = P(C_1) = \sum_{i=1}^k p_i \quad (7)$$

$$\omega_2 = P(C_2) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega_1 \quad (8)$$

Sabendo que σ_i^2 e μ_i denotam a variância e a média respectivamente da classe i , tem-se:

$$\sigma_W^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (9)$$

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (10)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2 \quad (11)$$

O valor de *threshold* k^* será ótimo quando tiver o η maximizado, sendo que:

$$\eta = \frac{\sigma_W^2}{\sigma_T^2} \quad (12)$$

Resumindo, o método consiste em variar o limiar k entre as classes a fim de maximizar o valor de η , que representa a medida de separabilidade entre as classes resultantes em tons de cinza.

4.2.4 Equalização de histograma

Para um processo de reconhecimento de padrões ser eficiente é necessário que a imagem possua um alto contraste, caso contrário, há possibilidade de não ocorrer diferenciação entre um objeto e o fundo. Em imagens que apresentam características como distorções em razão da luminosidade mal controlada, ou ainda pouco contraste, torna-se necessário realizar a equalização do histograma, buscando uma disposição mais uniforme das suas cores.

A equalização do histograma, segundo Jin et al. (2001), consiste em tratar uma imagem escolhendo os níveis de quantização, de maneira que estes sejam utilizados por um número de pixels semelhantes, buscando substituir o histograma original por um que se aproxime de uma distribuição uniforme de intensidade dos pixels. Em outras palavras, após a equalização do histograma de uma imagem, esta apresentará tonalidades de cores mais distribuídas, aumentando assim o contraste da imagem.

Outras operações podem ser realizadas a partir do histograma de uma imagem, dentre elas podem-se citar as de realce de brilho e de contraste que consistem na modificação do histograma original, respeitando alguma regra. Para o contraste, o que se realiza é um esticamento ou uma compressão dos limites do histograma (Chanda & Dutta Majumder, 2006), já para o brilho, o ajuste é realizado deslocando o histograma para a direita (valores mais altos), aumentando assim seu brilho, ou de forma inversa, deslocando-o para a esquerda (Russ, 2006).

4.3 Processamento de imagens × área foliar

A presença de microcomputadores na agropecuária está assumindo grande importância, onde muitos equipamentos e métodos tradicionais estão sendo substituídos por sistemas de medição eletrônicos, e o processamento de

imagens é encarado como uma técnica sofisticada de obtenção e análise de dados (Vieira Júnior, 1998).

A utilização de imagens digitais contribui para o entendimento de eventos relacionados à fisiologia das plantas, pois, por meio delas pode-se obter medidas quantitativas e dinâmicas de variáveis distintas (Andrén et al., 1991).

O processamento de imagens pode, segundo Henten & Bontsema (1995), ser utilizado como um método indireto e não-destrutivo para se determinar medidas de interesse em plantas. Diversos trabalhos relacionaram o processamento de imagens com a área foliar, citando-se os trabalhos de Zhang et al. (2003) e Behrens & Diepenbrock (2006) que analisaram a cobertura foliar das culturas de Chicória (*Cichorium intybus* L.) e Nabo (*Brassica napus* L.), respectivamente, além de Macfarlane et al. (2000, 2007) que determinaram o IAF de *Eucalyptus globulus* L. Sherstha et al. (2004) e Vieira Junior et al. (2006), ambos trabalhando com milho, acompanharam o crescimento de milho e avaliaram os danos causados nas folhas e, estimaram a área foliar respectivamente.

O uso de técnicas de análise de imagens na cultura do café tem se limitado, principalmente, a aplicações em folhas. Guzman et al. (2003) utilizaram técnicas de processamento de imagens para medir a severidade de manchas de ferrugem em cafeeiro e, segundo estes autores, a adoção de tais técnicas permite conhecer com maior precisão e rapidez a área foliar de plantas de café e a área afetada por esta ou por outra enfermidade, permitindo obter resultados mais confiáveis para outras investigações.

Igathinathane et al. (2007) apresentaram um software de medição interativa para medição da folha, usando imagens, sendo que Ushada et al. (2007) utilizaram uma abordagem baseada em redes neurais artificiais para monitorar parâmetros do dossel, dentre eles o índice por meio da área foliar de imagens digitais. As amostras foram restritas a plantas imaturas monitoradas em

laboratório. Outra abordagem foi desenvolvida por Andersen et al. (2005) usando imagens para estimar a área foliar, utilizando a visão estéreo como ferramenta para obter parâmetros geométricos de 10 plantas jovens de trigo possuindo de 5 a 6 folhas cada.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Introdução

Com o objetivo de encontrar um método eficiente para estimar a área foliar (AF) de maneira não destrutiva, buscaram-se alternativas para realizar a correlação entre medidas de interesse e o valor real de AF, sendo a maioria delas baseada na análise de imagens além da utilização de parâmetros como o índice de área foliar (IAF) e a intensidade luminosa no interior da planta.

Todos os dados foram obtidos nos meses de Setembro e Outubro de 2008, sempre entre 8:00 e 10:00 horas da manhã.

A seguir são descritos os materiais e métodos utilizados neste trabalho. Na seção 5.2 são descritas as plantas utilizadas, a 5.3 explica como foi obtida a área foliar real das plantas que, posteriormente, foi utilizada nos modelos. As seções 5.4 e 5.5 mostram a utilização das imagens e as seções 5.6 e 5.7 respectivamente a utilização da intensidade luminosa e do IAF na construção dos modelos.

5.2 Plantas

As plantas utilizadas para realização do projeto foram obtidas em área experimental do Departamento de Agricultura (DAG) da UFLA.

Foram utilizados 30 plantas de cafeeiros jovens, da cultivar Topázio com altura de dossel variando de 0,43 à 1,14m e diâmetro de copa de 0,53 à 1,35m, com idade de 2 anos, espaçamento de 2,50 x 0,60m fertirrigado.

5.3 Medição da área foliar real

Para saber qual a área foliar real de cada planta para posterior utilização na construção dos modelos, utilizou-se o medidor de área foliar da marca LICOR modelo LI-3100c. Foi utilizada a escala de mm^2 para medição, a qual para a construção dos modelos foi convertida para a escala de m^2 .

5.4 Modelos usando imagens laterais

A captura das imagens foi realizada utilizando-se uma câmera da marca Canon do modelo SLR EOS Rebel XT_i com sensor CCD de 10,1 Mp². Acoplada à câmera utilizou-se uma lente da marca Canon, modelo EF-S 18 – 55mm f/3.5-5.6 USM, que possui distância focal variando de 18 a 55mm, ângulo de visão variando de 75°20' a 27°50' (diagonal) e distância mínima de foco de 28cm. A distância focal utilizada foi a de 18 mm que corresponde a maior abertura angular possível (75°20').

A câmera foi fixada em um tripé com aproximadamente 0,70 m de altura. Para isolar a planta, utilizou-se um anteparo com 1,60m de altura e 2,20m de largura. A parte central deste anteparo possuía 1,00m de largura e em cada lado havia uma aba de 0,60m de largura à 45° de angulação em relação ao centro. Uma faixa de 1,00m de comprimento foi fixada no anteparo e utilizada como fator de escala, como representado na Figura 2.

² Mp = Megapixel. Um megapixel equivale a 1.000.000 pixels. A resolução correspondente a 10,1 Mp é $3888 \times 2592 = 10.077.696$.

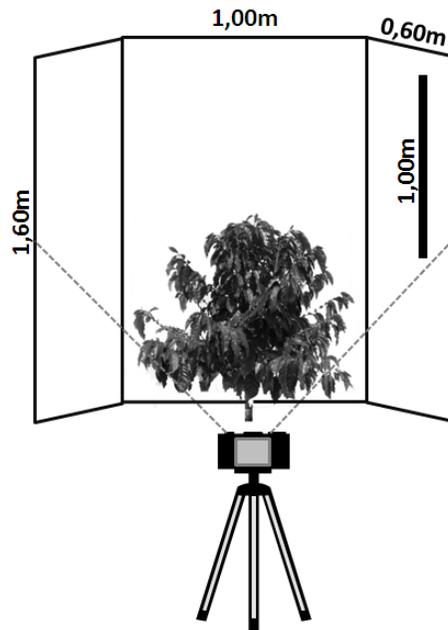


FIGURA 2 Configuração do anteparo utilizado para isolar as plantas.

A distância entre a câmera e a planta foi fixada em 2,00m e a distância entre a planta e o anteparo em 1,00m, o que mostra a Figura 3.

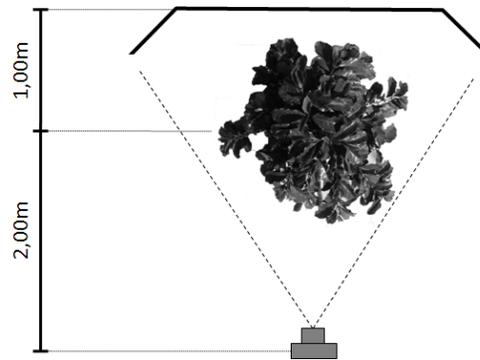


FIGURA 3 Distâncias definidas para a captura das imagens (visão superior da planta)

Das imagens laterais, foram obtidos os dados referentes à área lateral da planta projetada na imagem, sua largura e altura, utilizando-se como referência a faixa de 1,00m fixada no anteparo. Porém, como o anteparo estava a, aproximadamente 1,00m de distancia da planta, foi necessário corrigir a distorção nas medidas que tal distância trazia. Tal processo é explicitado detalhadamente no Anexo A.

Após estas correções, para facilitar o processo de medição, as imagens passaram por alguns tratamentos:

- Quantização para níveis de cinza;
- Equalização do histograma de frequências;
- Limiarização de *Otsu*.

Após o pré-processamento das imagens a extração das medidas foi realizada seguindo o esquema mostrado na Figura 4, quando o critério utilizado foram os extremos do dossel da planta.

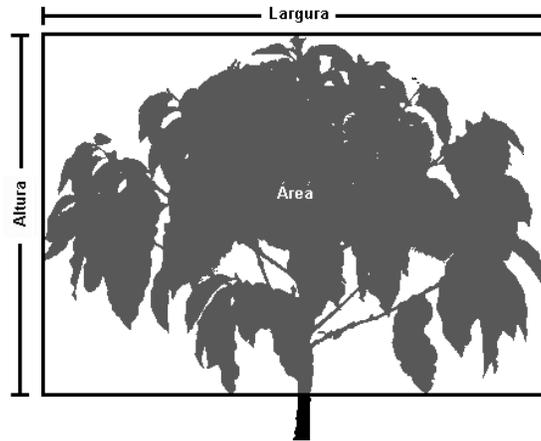


FIGURA 4 Esquema de medição na imagem lateral

5.4.1 Modelo $AF \times (A,L)$

A partir das medidas de altura e largura, por meio do método dos mínimos quadrados, foram propostos três modelos que seguem o padrão das Equações 13, 14 e 15.

$$f(x,y) = ax + by + c \quad (13)$$

$$f(x,y) = ax + by + cxy + d \quad (14)$$

$$f(x,y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (15)$$

onde $f(x,y)$ é a área foliar estimada e x e y são altura (A) e largura (L) respectivamente, sendo que os valores das constantes de a à f foram calculados de maneira a minimizar o erro quadrático da equação.

5.4.2 Modelo AF × área_{projetada}

A partir da medida da área lateral, por meio do método dos mínimos quadrados, foram propostos diferentes modelos que seguem o padrão das Equações de 16 à 21.

$$f(x) = ax + b \quad (16)$$

$$f(x) = ae^{bx} \quad (17)$$

$$f(x) = a \ln x + b \quad (18)$$

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (19)$$

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (20)$$

$$f(x) = ax^b \quad (21)$$

onde $f(x)$ é a área foliar estimada e x é a área lateral projetada da planta na imagem (AP). Os valores das constantes (de a à d) foram calculados de maneira a minimizar o erro quadrático da equação.

5.5 Modelos usando a lente olho-de-peixe

A captura das imagens foi realizada com a mesma câmera utilizada para as imagens laterais, porém com uma lente olho-de-peixe da marca *Sigma*, modelo 8mm F3.5 EX DG *Circular Fisheye*, que possui distância focal de 8mm, ângulo de visão de 180° e distância mínima de foco de 13,5cm.

Utilizando tal conjunto foram capturadas as imagens superiores e inferiores das plantas, sendo que para as primeiras, a câmera foi posicionada a uma altura de 1,60m, sobre a planta, onde o centro da lente e da planta eram coincidentes.

Para as inferiores, a câmera foi posicionada paralela ao caule, e, considerando a altura da câmera e lente, esta estava a 0,15m do solo. Na Figura 5 é mostrado tal posicionamento da câmera do eixo vertical.



FIGURA 5 Posicionamento vertical da câmera com a lente olho-de-peixe para a captura das imagens superiores e inferiores.

Utilizando-se as imagens capturadas com a lente olho-de-peixe, duas informações foram avaliadas, a área de solo ocupada pela planta e a distribuição da cobertura foliar da planta.

Para medir a área de solo, utilizou-se a imagem superior da planta, não levando em consideração a altura das folhas em relação ao solo, nem a deformação causada pela lente olho-de-peixe.

Para medir a cobertura foliar da planta, foram utilizadas quatro imagens inferiores que seguiam o mesmo posicionamento utilizado para a medição com o LAI-2000 (Figura 9). Este processo consistiu na avaliação do percentual de área coberta por folhas nas imagens, sendo que, para tal utilizaram-se os seguintes métodos:

- Separação das imagens em R, G e B e uso apenas do canal Azul (B). A escolha do canal azul se deu em razão da sua melhor adequação à coloração das folhas, e por apresentar resultados melhores para a limiarização de *Otsu* que os demais, como mostrad na Figura 6;
- Seleção da porção da imagem correspondente à abertura de 90° do sensor do LAI-2000 por meio de uma multiplicação ponto a ponto entre as imagens inferiores e uma imagem que representava tal abertura, como mostrado na Figura 7.
- Limiarização de *Otsu*.

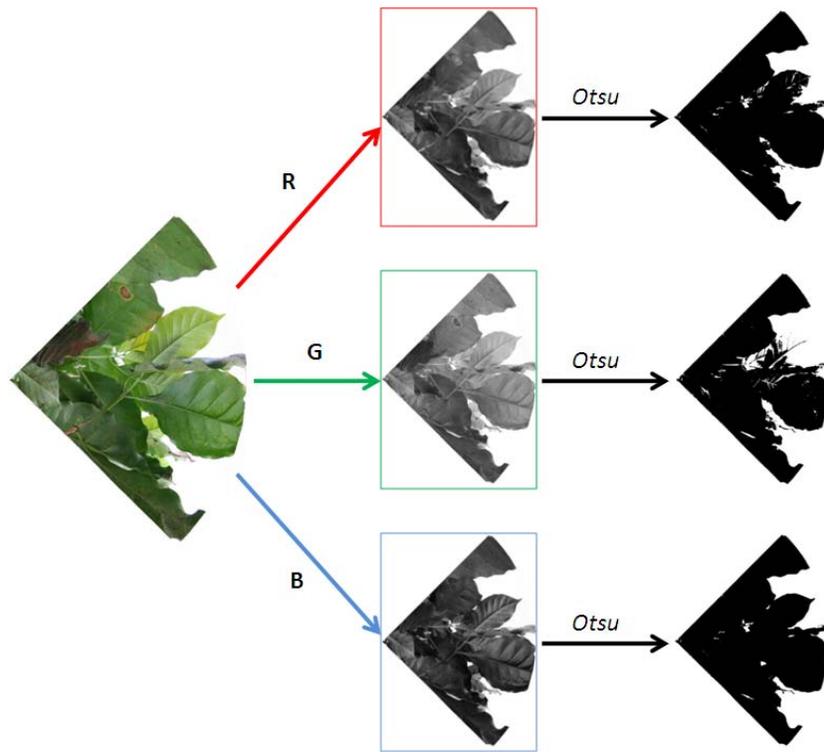


FIGURA 6 Exemplo de uma imagem separada em canais e os respectivos resultados de limiarização *Otsu*.

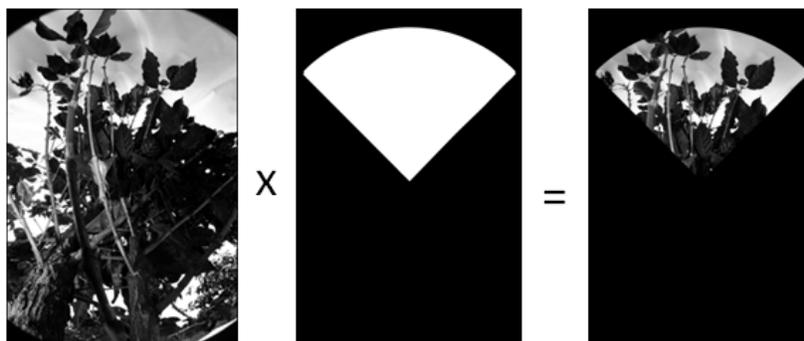


FIGURA 7 Seleção da área de interesse nas imagens inferiores.

Depois de realizado o processamento, avaliou-se a fração da imagem coberta por folhas. Para tal, avaliou-se a relação entre pixels brancos (fundo) e pretos (folhas) presentes nas imagens. O processo foi realizado como mostra a Figura 8, sendo realizado entre a imagem segmentada (processada pelos itens anteriores) e a imagem que corresponde a 100% de cobertura uma operação de XOR (ou exclusivo), denotada pelo símbolo \oplus . A partir da imagem resultado, contaram-se os pixels brancos e calculou-se o percentual de área coberta.

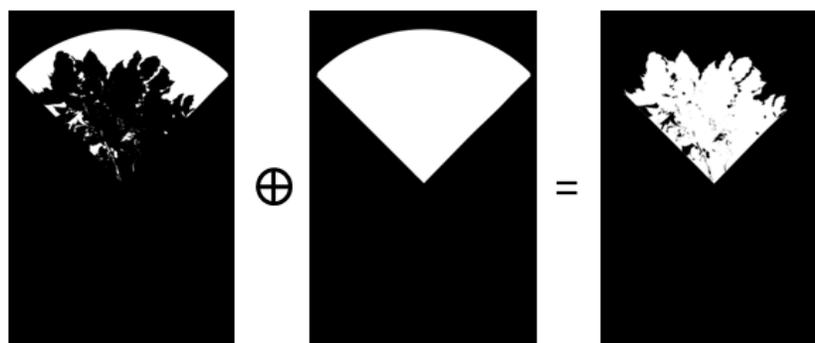


FIGURA 8 Esquema utilizado para o cálculo da fração coberta por folhas.

5.5.1 Modelos $AF \times \text{área}_{\text{superior}}$ e $AF \times \text{área}_{\text{inferior}}$

A partir da medida da área superior e da cobertura foliar obtidas por meio das imagens com a lente olho-de-peixe, por meio do método dos mínimos quadrados, foram propostos diversos modelos análogos aos mostrados na seção 5.4.2, seguindo as Equações de 16 à 21, onde $f(x)$ é a área foliar estimada e x é a área superior (AS) ou a cobertura foliar (ou área inferior, AI) da planta na imagem, sendo que os valores das constantes foram calculados de maneira a minimizar o erro quadrático da equação.

5.6 Modelo usando o índice de área foliar (IAF)

Para avaliar o Índice de Área Foliar (IAF) das plantas, foi utilizado o analisador de dossel da marca LICOR modelo LAI-2000, pertencente ao Setor de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia da UFLA. Foram realizadas oito medições alternadas de cada planta, sendo quatro acima (aproximadamente 1,50m de altura em relação ao solo) e quatro abaixo (aproximadamente 0,15m de altura em relação ao solo) com ângulo de 90°. O

posicionamento do equipamento nas quatro medições (acima e abaixo) seguiu o esquema mostrado na Figura 9.

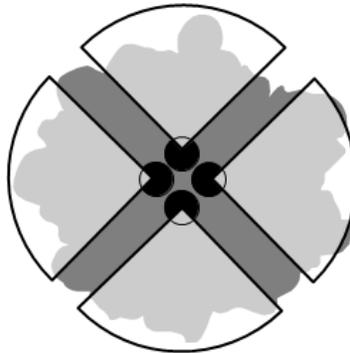


FIGURA 9 Posições de medição com o LAI-2000 em cada planta.

Como realizado anteriormente, para modelos com somente uma variável sendo relacionada à área foliar, a partir do valor de índice de área foliar da planta, foram realizadas comparações entre diversos modelos para avaliar a melhor solução para o caso. O método dos mínimos quadrados foi utilizado sobre as Equações de 16 à 21, onde $f(x)$ é a área foliar estimada e x é o IAF da planta, sendo que os valores das constantes foram calculados de maneira a minimizar o erro quadrático da equação.

5.7 Modelo usando a intensidade luminosa

A fim de verificar a relação existente entre a estrutura do dossel e a incidência luminosa em diferentes pontos deste, foram realizadas três medições da intensidade luminosa com um Luxímetro Digital da marca Minipa, modelo

MLM-1332, sendo uma acima (direcionada ao céu), uma no interior (na metade da altura) e outra abaixo (próxima ao solo) da planta, como mostra a Figura 10.

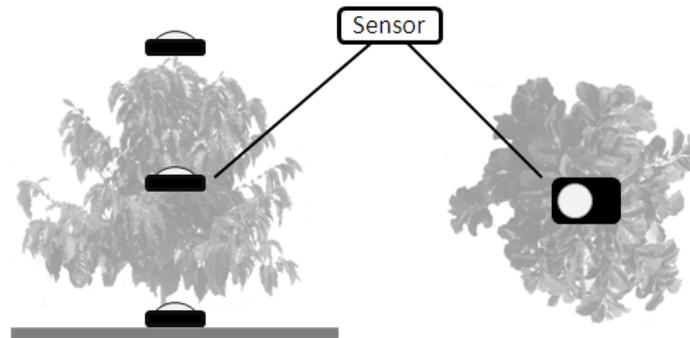


FIGURA 10 Pontos de coleta das intensidades luminosas.

A partir das medidas realizadas, foram construídos modelos utilizando diferentes operações, sempre relacionando a medida realizada acima com as outras medidas internas. A luminosidade era variável de uma planta para a outra e, portanto, tal medida serviu como calibração. Tais Equações são mostradas de 22 e 23.

$$x = Lux_H / Lux_A \quad (22)$$

$$x = Lux_B / Lux_A \quad (23)$$

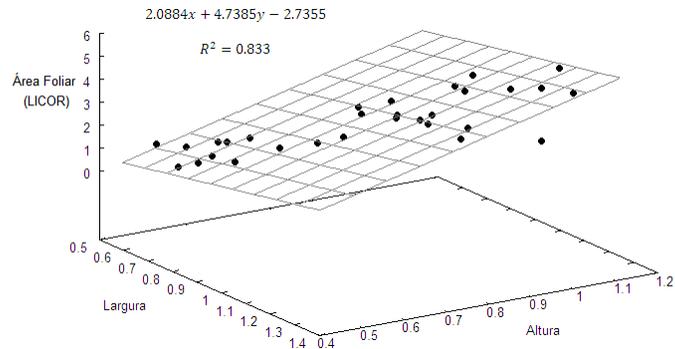
onde Lux_A corresponde à medida realizada acima, Lux_H à medida no meio e Lux_B abaixo da planta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

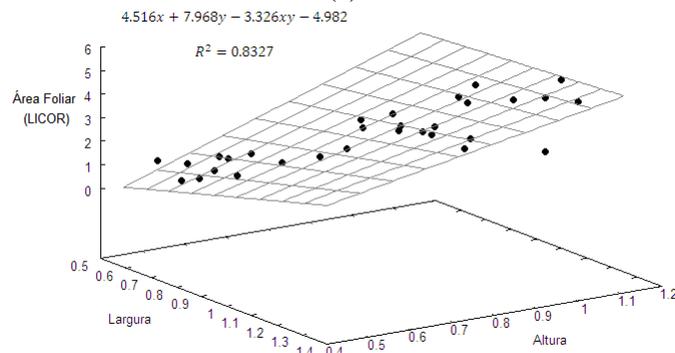
6.1 Modelos utilizando imagens laterais

6.1.1 Modelo $AF \times (A,L)$

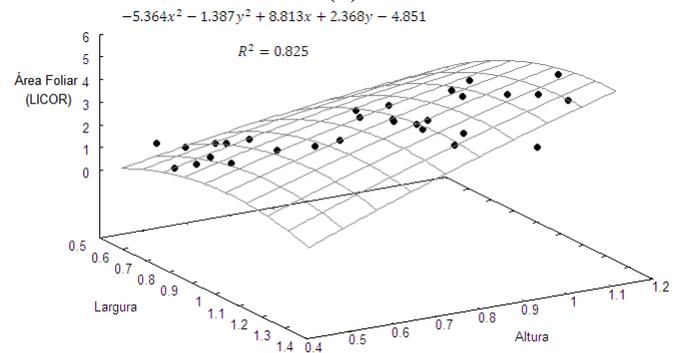
Por meio da análise das imagens de perfil das plantas, obtiveram-se os valores de altura e largura, os quais foram correlacionados com os dados de área foliar real obtidos por meio do Li-3100c, seguindo as Equações mostradas na seção 5.4.1. Os resultados das correlações são mostrados na Figura 11.



(a)



(b)



(c)

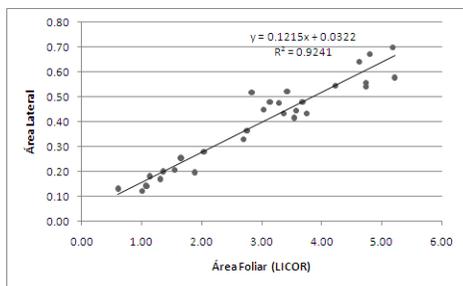
FIGURA 11 Modelos correlacionando a altura e largura da planta com sua área foliar.

Percebe-se por meio dos gráficos que os coeficientes de correlação (R^2) apresentados para os três casos foram muito semelhantes, em torno de 0,83. Apesar da maior capacidade de generalização de equações de mais alto nível, neste caso, à medida que se aumentou a complexidade, a correlação entre os dados e o modelo gerado praticamente se manteve, portanto, pode-se chegar a conclusão de que o modelo menos complexo (Figura 11-a) é o mais adequado.

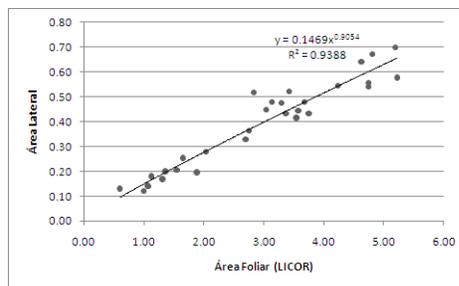
Uma grande vantagem apresentada por esse modelo é que apesar dos dados serem obtidos por meio de medições nas imagens, estas medições podem ser realizadas, desde que seguindo a metodologia da Figura 4, diretamente na planta sem a necessidade da utilização de imagens.

6.1.2 Modelo AF \times área_{projetada}

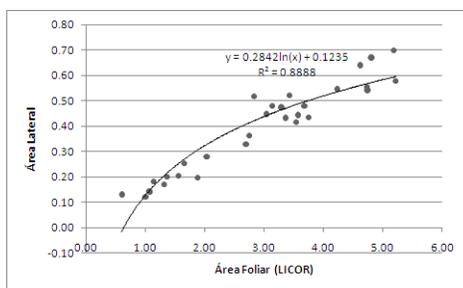
Outro modelo construído por meio de dados capturados a partir das imagens foi o que correlacionou a área lateral projetada com a área foliar real obtida usando o Li-3100c. Por meio do método dos mínimos quadrados, a partir dos modelos de equações descritos na seção 5.4.2, foram construídos seis gráficos representando cada um destes modelos, mostrados na Figura 12.



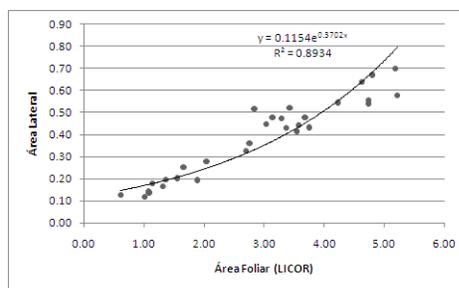
(a) Modelo Linear



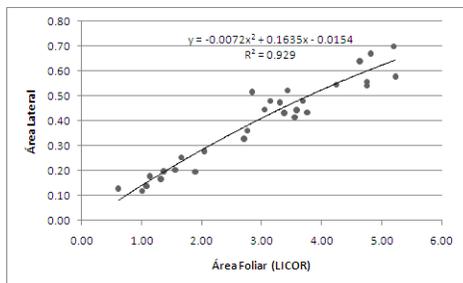
(b) Modelo de Potência



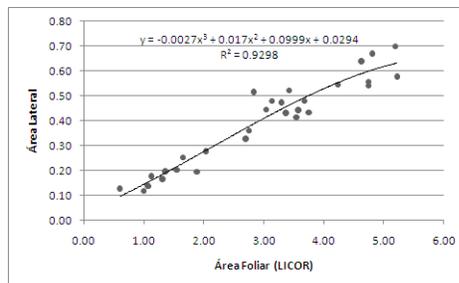
(c) Modelo Logarítmico



(d) Modelo Exponencial



(e) Modelo Quadrático



(f) Modelo Cúbico

FIGURA 12 Modelos correlacionando a área lateral da planta projetada na imagem com a área foliar real das plantas.

Nos gráficos nota-se que em todos os casos o índice de correlação foi maior que 0,88, chegando a quase 0,94 para o modelo de potência, o que faz

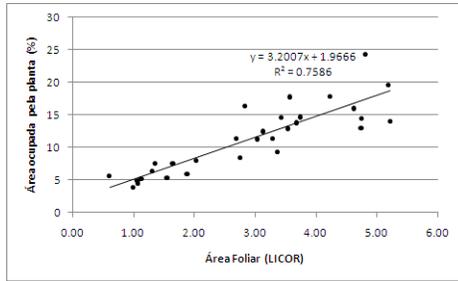
com que tal modelo seja fortemente indicado para realização da estimativa da área foliar.

6.2 Modelos utilizando lente olho-de-peixe

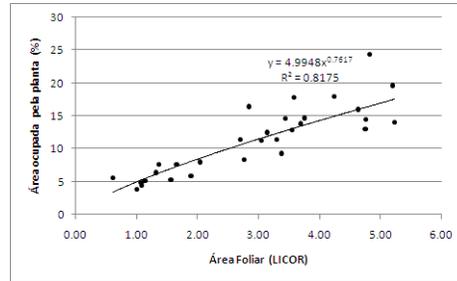
Utilizando se os dados obtidos com as imagens capturadas com a lente olho-de-peixe foram construídos dois modelos para estimativa da área foliar, usando o Li-3100c como referência. O primeiro modelo utilizou as imagens capturadas sobre a planta e o segundo utilizou imagens abaixo da planta.

6.2.1 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{superior}}$

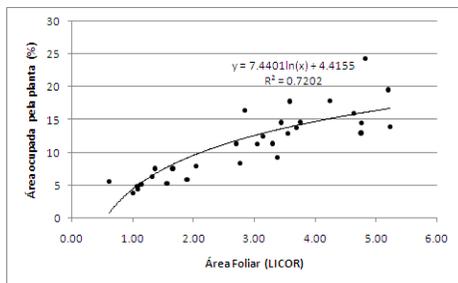
Por meio das imagens superiores da planta, é possível extrair informações relativas à estrutura da planta e a cobertura de solo que estas apresentam. Sendo assim, os modelos propostos, na tentativa de verificar se existe alguma relação entre tais características e a área foliar, são apresentados na Figura 13.



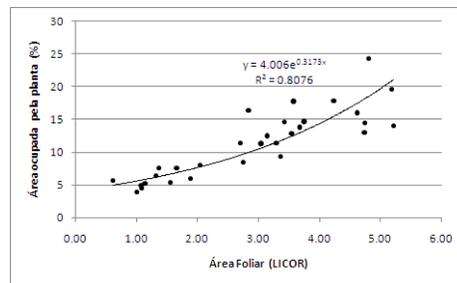
(a) Modelo Linear



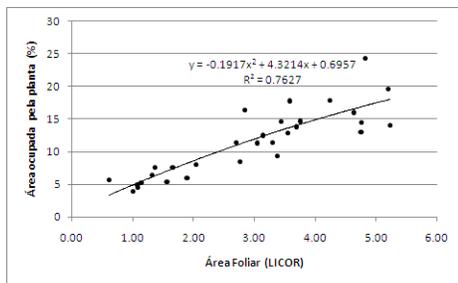
(b) Modelo de Potência



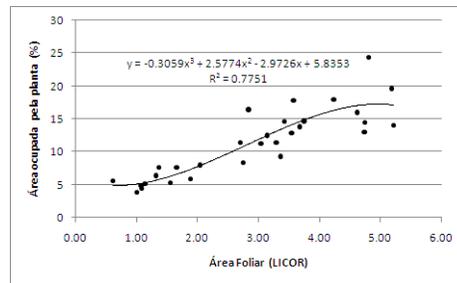
(c) Modelo Logarítmico



(d) Modelo Exponencial



(e) Modelo Quadrático



(f) Modelo Cúbico

FIGURA 13 Modelos correlacionando a fração de área da imagem coberta pela planta com a área foliar real das plantas.

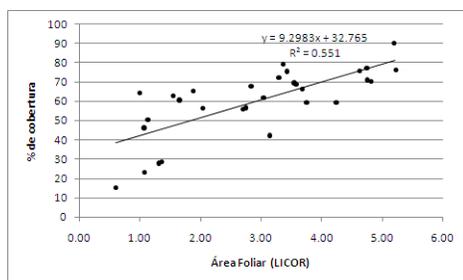
Os valores utilizados na construção dos modelos foram extraídos das imagens sem a correção da distorção causada pela lente olho-de-peixe, o que dificultou a medição da área ocupada pela planta, porém utilizou-se como variável a fração da imagem correspondente ao dossel da planta, tal operação foi possível em razão do fato de todas as imagens terem sido capturadas a uma altura padrão e sendo mantida assim a escala com o mundo real.

Por meio dos gráficos percebe-se que apesar da falta de correção da distorção, os valores de R^2 variaram entre 0,72 para o modelo logarítmico, chegando a 0,82 para o modelo de potência.

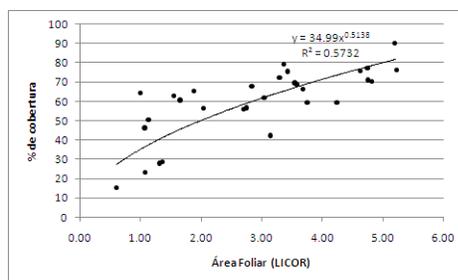
Os valores obtidos neste experimento encorajam maiores investigações objetivando a correção das distorções da lente e realização das medições com maior precisão, o que, provavelmente, melhorariam os resultados, e assim, fazendo com que este método possua grande aplicabilidade.

6.2.2 Modelo $AF \times \text{área}_{\text{inferior}}$

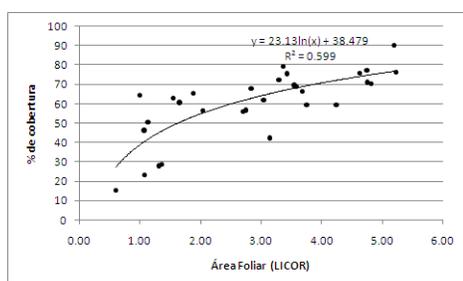
O segundo método desenvolvido utilizando-se da lente olho-de-peixe foi o que correlacionou os dados de cobertura foliar da planta com sua área foliar. Como no modelo que utilizou a área superior, este também utilizou a fração da imagem coberta pelas folhas, e o resultado da construção dos seis modelos desenvolvidos é apresentado na Figura 14.



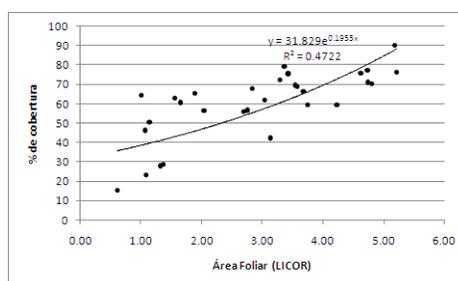
(a) Modelo Linear



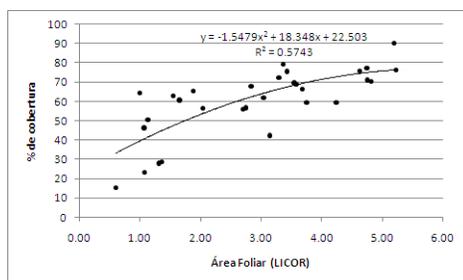
(b) Modelo de Potência



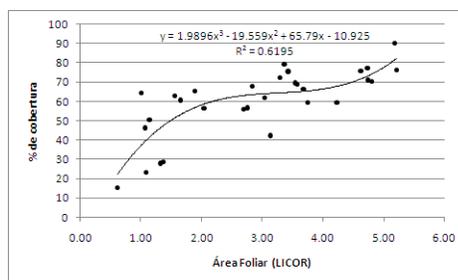
(c) Modelo Logarítmico



(d) Modelo Exponencial



(e) Modelo Quadrático



(f) Modelo Cúbico

FIGURA 14 Modelos correlacionando a fração de área coberta por folhas na imagem com a área foliar real das plantas.

Os resultados da Figura 14 mostram que a utilização da taxa de cobertura foliar da planta apresentou resultados menores que os modelos anteriores, sendo o maior índice 0,62 para o modelo cúbico.

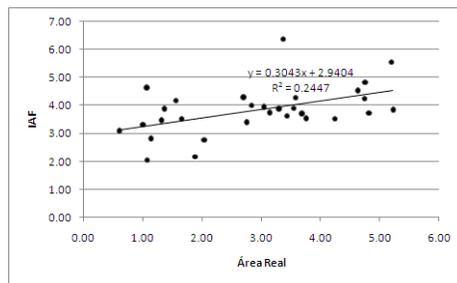
Técnica semelhante é apresentada por Simões et al. (2007), que relacionou as imagens inferiores com a lente olho-de-peixe e o índice de área foliar, obtendo correlação de 0,86 para plantas de oliveira, utilizando apenas uma imagem por planta. Porém, deve-se ressaltar que a oliveira é uma planta de grande porte se comparada ao cafeeiro, o que facilita a captura de todo o dossel da planta com uma única imagem.

Além disso, a utilização desta técnica também pode ser limitada pelo fato de que não existe um valor máximo de área foliar para que possa ser atribuído como referência. Nota-se, por meio dos gráficos, que o valor de AF de 5,19 m² possui uma taxa de cobertura de exatamente 90%, o que pode causar a saturação nos resultados quando a cobertura for de 100% ou próxima deste valor.

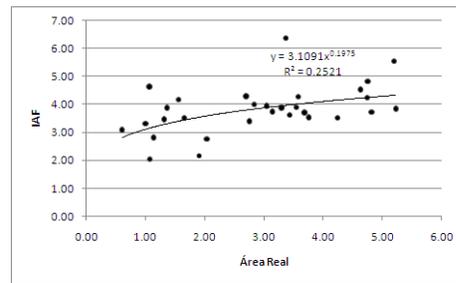
Outro ponto que pode ser responsável pelos baixos resultados do presente modelo é a utilização da limiarização como critério de identificação dos *pixels* nas imagens. Uma alternativa para contornar tal problema seria a análise das imagens, levando em consideração a cor dos *pixels* ou mesmo as intensidades de cinza apresentada pelas folhas, o que não é possível por meio da limiarização, que só apresenta duas cores em seu resultado. Com isso, pode-se adicionar ao modelo a luminosidade que passa pelas folhas e chega à imagem, ou seja, quanto mais escuras as folhas nas imagens a quantidade de luz que passa por estas é menor e, conseqüentemente, a planta possuirá uma área foliar maior.

6.5 Modelo AF × IAF

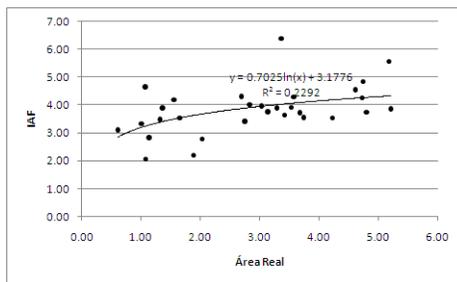
Para verificar a relação entre a área foliar (AF) real obtida pelos Li-3100c e o respectivo índice de área foliar (IAF) das plantas medido pelo LAI-2000, por meio da regressão verificaram-se seis diferentes equações exibidas na Figura 15.



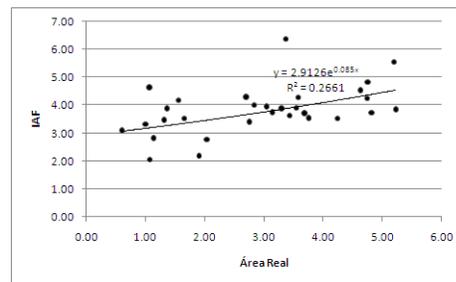
(a) Modelo Linear



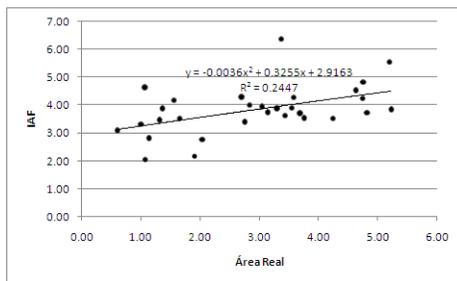
(b) Modelo de Potência



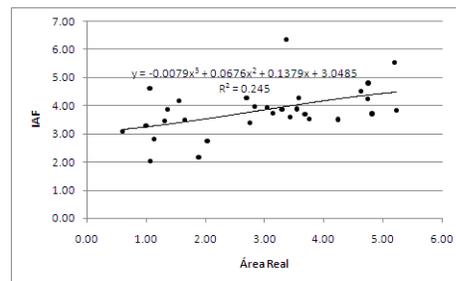
(c) Modelo Logarítmico



(d) Modelo Exponencial



(e) Modelo Quadrático



(f) Modelo Cúbico

FIGURA 15 Modelos correlacionando o índice de área foliar com a área foliar real das plantas.

Como pode-se perceber por meio da Figura 15, os modelos apresentaram resultados de correlação muito baixos em relação aos anteriores, sendo que o maior índice de correlação (R^2) obtido foi de aproximadamente 0,27 para o modelo exponencial.

Diversos fatores podem estar relacionados a tais resultados, primeiramente, o que se percebe é que uma planta com grande área foliar não tem necessariamente um valor de índice de área foliar alto, e o contrário também é verdadeiro. Para exemplificar tal problema, supondo que duas plantas possuam a mesma área foliar, porém, uma possua a largura maior que a altura e outra altura maior que a largura. Apesar da área foliar de ambas ser igual, isso não acontecerá com o IAF que na primeira planta será menor em razão da área de solo ocupada por esta.

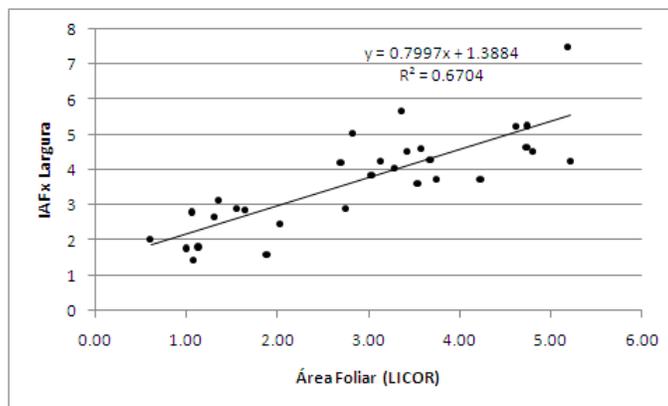
Outro caso que pode ocorrer é de duas plantas com área foliar diferente possuírem mesmo IAF em razão da proporção existente entre a área de solo e as respectivas áreas foliares. Esse fato pôde ser observado com as plantas 14 e 21 do conjunto de amostras (Tabelas 1B e 2B), utilizadas no presente trabalho que possuem IAF de $3,88\text{m}^2 \times \text{m}^{-2}$ e área foliar de 3,29 e $1,36\text{m}^2$ respectivamente, tais plantas são mostradas na Figura 16.



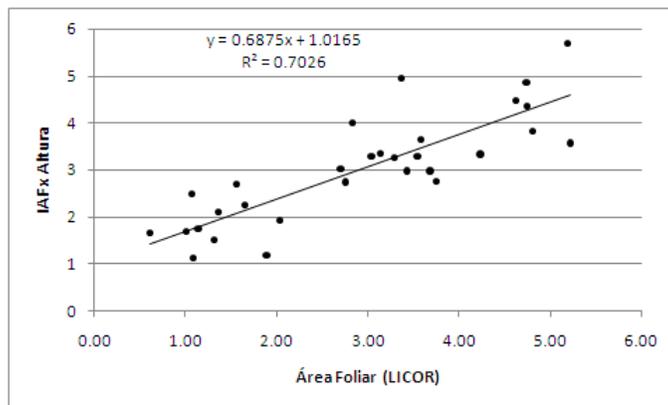
FIGURA 16 Plantas 14 (esquerda) e 21 (direita) que demonstram que o índice de área foliar não está diretamente relacionado à área foliar.

Em razão da à grande dependência do IAF aos fatores morfológicos da planta, tais como altura e largura, verificou-se uma maior correlação entre a combinação do IAF associado a esses fatores e à área foliar da planta. Para isso, foram realizados quatro testes utilizando a altura, a largura, o produto da largura e altura e a área lateral da planta, sendo todas as medidas obtidas por meio da análise das respectivas imagens laterais.

Os primeiros testes avaliaram a relação do produto entre IAF e as medidas unidimensionais altura e largura com a área foliar, os resultados podem ser vistos na Figura 17.



(a) IAF x Largura



(b) IAF x Altura

FIGURA 17 Utilização das medidas unidimensionais obtidas por meio das imagens laterais em conjunto com o IAF para estimar a área foliar. Em (a) tem-se a correlação entre a IAF e Largura e em (b) entre IAF e Altura.

Como se pode perceber por meio dos dois gráficos da Figura 17, em ambos os casos a utilização conjunta do IAF com uma dimensão da planta apresentou melhora significativa. O índice de correlação utilizando a largura foi de 0,67, e a altura, de 0,70.

Depois de realizados os testes com apenas uma dimensão da planta, verificou-se a dependência entre o IAF e as duas dimensões simultaneamente. Por meio da multiplicação das dimensões foi obtida a área do retângulo circunscrito à planta e utilizou-se tal valor associado ao IAF para realizar a correlação com a área foliar, sendo o resultado exibido na Figura 18, com a correlação subindo para 0,77.

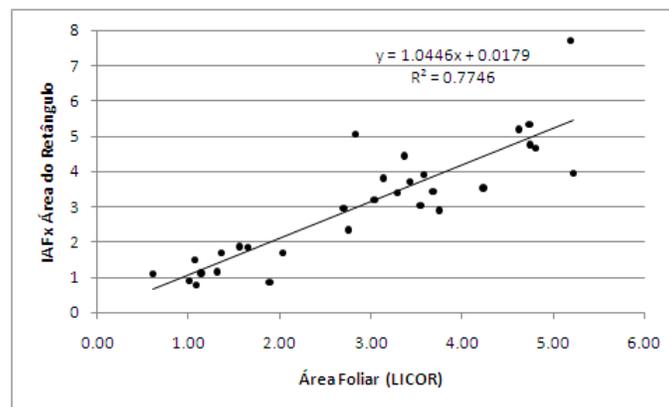


FIGURA 18 Modelo que relaciona a área do retângulo sobrescrito juntamente com o IAF à planta e a área foliar.

Outro teste realizado foi a utilização da área da planta projetada na imagem digital, juntamente com o IAF para a estimativa da área foliar e os resultados são exibidos na Figura 19.

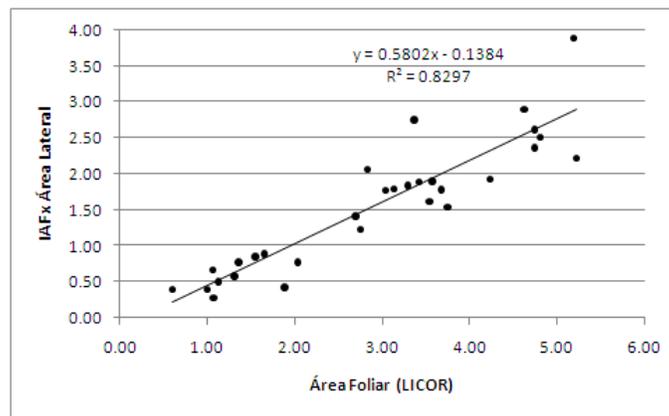


FIGURA 19 Utilização da área lateral e do IAF para estimar a área foliar.

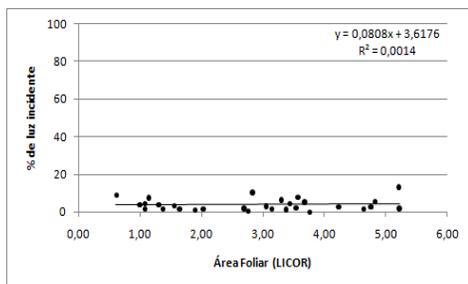
Na Figura 19, pode-se perceber que o valor de R^2 igual a 0,83 foi obtido provavelmente influenciado pela significativa correlação existente entre a área lateral e área foliar, que apresentou R^2 de 0,94 na Seção 6.1.1.

As melhorias apresentadas nos quatro modelos comprovam que à medida que características da estrutura da planta são adicionadas, de modo a especificar a estrutura do dossel com mais precisão, a correlação entre IAF e área foliar aumenta. Apesar do resultado da associação de duas técnicas ter melhorado os resultados, no caso o IAF de 0,27 para 0,83, talvez seja mais vantajoso, nesse caso, utilizar-se somente a área lateral para construção dos modelos.

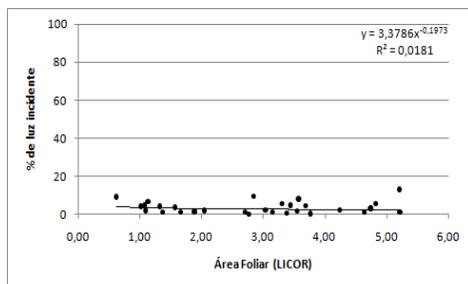
6.6 Modelo AF × Lux

A estimativa a área foliar total de uma planta por meio de um valor de intensidade luminosa no interior ou abaixo desta, comparados com os dados obtidos através do LI-3100c, podem ser observados nas Figuras 20 e 21.

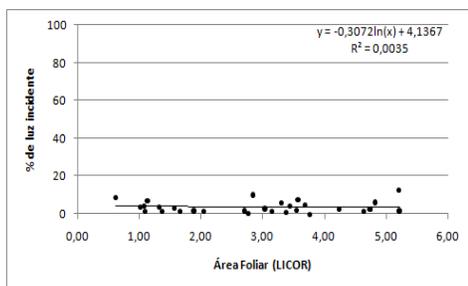
Primeiramente utilizou-se a intensidade no interior da planta à meia altura. A Figura 20 mostra os gráficos de correlação dos seis modelos utilizados.



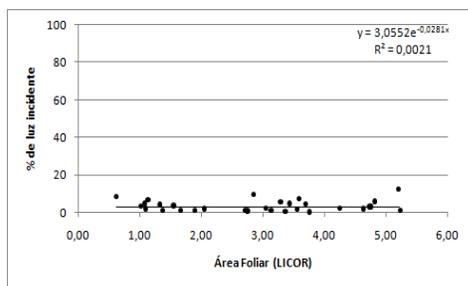
(a) Modelo Linear



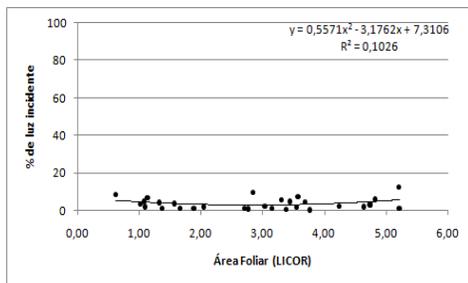
(b) Modelo de Potência



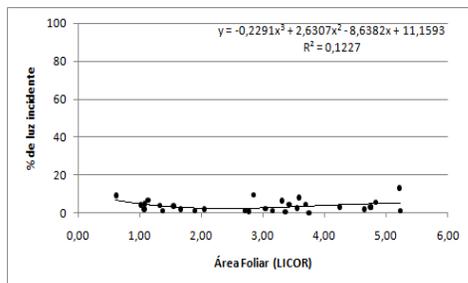
(c) Modelo Logarítmico



(d) Modelo Exponencial



(e) Modelo Quadrático



(f) Modelo Cúbico

FIGURA 20 Modelos correlacionando o valor de intensidade luminosa no interior com a área foliar real das plantas.

Outros modelos relacionando a luminosidade abaixo da planta também foram construídos. Na Figura 21 mostra-se, graficamente, tais modelos, que seguem o mesmo princípio mostrado na Figura 20.

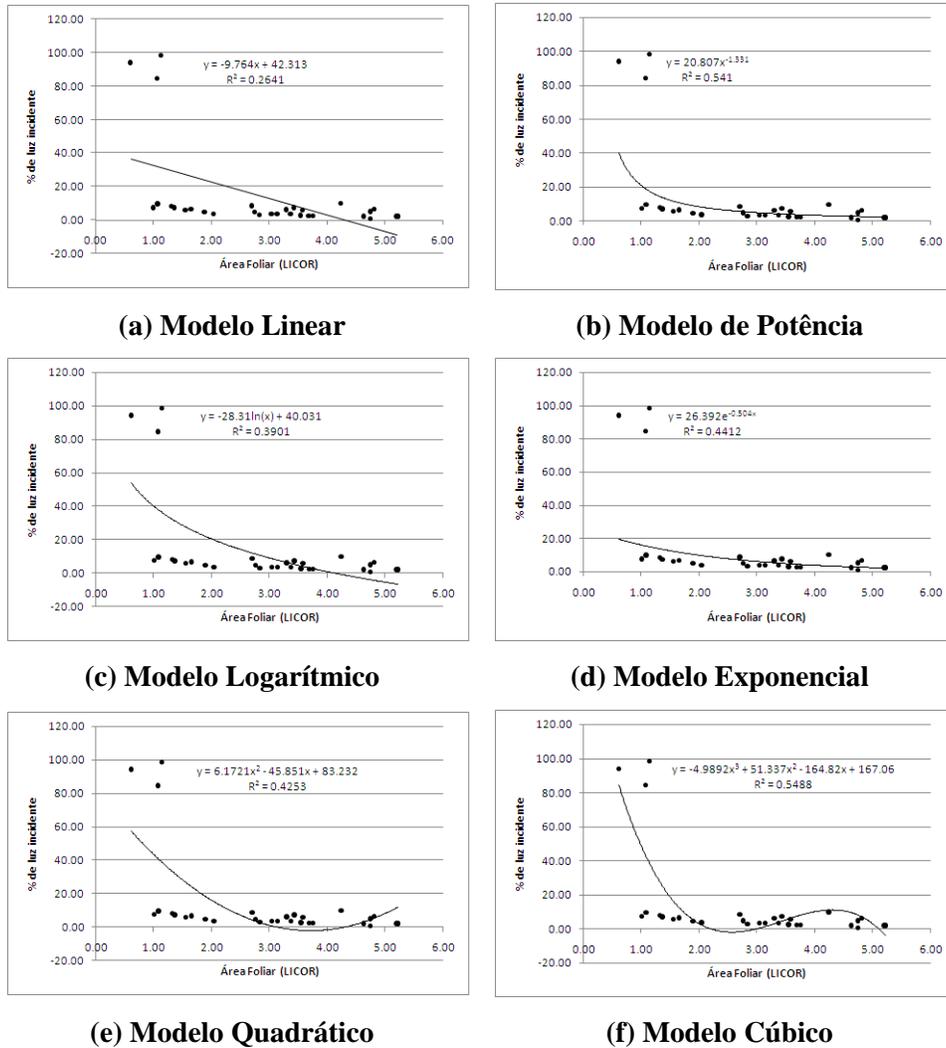


FIGURA 21 Modelos correlacionando o valor de intensidade luminosa abaixo com a área foliar real das plantas.

Observando-se os gráficos, percebe-se que os valores para o coeficiente de correlação (R^2) para o primeiro caso, não ultrapassaram o valor de 0,12 no modelo cúbico. Esses valores provavelmente devem-se ao comportamento constante dos valores, relativo a uma alta sensibilização do sensor independente das mudanças do número de folhas nas plantas, o que dificulta o ajuste de uma função que se adapte e, conseqüentemente, possa estimar os mesmos.

No segundo conjunto de dados, que relaciona a intensidade luminosa abaixo da planta, observou-se o mesmo fato, sendo que os valores seguem uma tendência uniforme, porém, os R^2 , nesse caso, são maiores, próximo a 0,55 no modelo cúbico, em razão dos três pontos isolados (*outliers*) que fazem com que as funções apresentem maior variabilidade e possam representar melhor o comportamento dos dados.

Esses *outliers* presentes nos gráficos da Figura 21 representam plantas que possuem uma baixa cobertura foliar, ou seja, pouca quantidade de folhas, e a intensidade luminosa abaixo da planta é praticamente igual a quando o sensor é posicionado acima da mesma, o que explica tais valores muito próximos de 100%.

O que fica muito claro com o presente experimento, é que o sensor do luxímetro comercial utilizado apresenta alta sensibilidade, sendo difícil detectar corretamente a quantidade de luz que passa pela planta tanto no interior quanto abaixo desta. O que leva a essa conclusão é a uniformidade apresentada pelos valores nas duas correlações realizadas e exibidas nas Figuras 20 e 21, onde plantas com área foliar próximas a 1,00 m² possuem valores idênticos de luminosidade quando comparadas com plantas de área próximas a 5,00 m².

6.7 Resumo dos resultados

De forma geral, dentre os melhores valores de R^2 para os modelos gerados (Tabela 2) pode-se notar que os modelos que mais se destacaram foram os que relacionam a área lateral da planta e a largura e altura, com valores de R^2 de 0,94 e 0,83 respectivamente.

TABELA 2 – Modelos desenvolvidos e seus respectivos R^2 , obtidos para os melhores casos.

Modelo Desenvolvido	Melhor R^2 obtido
$AF \times Area_{projetada}$	0,94
$AF \times (A,L)$	0,83
$AF \times (IAF * Area_{projetada})$	0,83
$AF \times Area_{superior}$	0,82
$AF \times Area_{inferior}$	0,62
$AF \times Lux_{abaixo}$	0,55
$AF \times IAF$	0,27
$AF \times Lux_{meio}$	0,12

7 CONCLUSÕES

Após a análise de todos os modelos de estimativa da área foliar desenvolvidos pode-se concluir que:

- O modelo utilizando as imagens do perfil da planta, levando em conta a altura e a largura da planta, pode ser utilizado para realizar a estimativa da área foliar, ressaltando sua possível aplicação com medição direta;
- O modelo, utilizando a área lateral das plantas, é o mais indicado para estimar a área foliar;
- O modelo que utiliza a imagem superior deve ser investigado mais profundamente para que os resultados possam ser considerados confiáveis, apesar de também ter apresentado valores aceitáveis;
- O modelo que utilizou dados de cobertura foliar obtidos por meio da lente olho-de-peixe necessita de estudos mais aprofundados para ser confiável.
- O modelo relacionando o índice de área foliar, obtido por meio do LAI-2000, não apresentou correlação que indique a sua utilização para estimar a área foliar.
- Os modelos que utilizaram as intensidades luminosas no interior e abaixo da planta obtidos por meio de luxímetro digital não apresentaram resultados favoráveis a sua aplicação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M.; HASTENREITER, F. A.; FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de. Estimativa de área foliar de soja usando imagens digitais e dimensões foliares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, SC. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 9-14.

ANDERSEN, H. J.; RENG, L.; KIRK, K. Geometric plant properties by relaxed stereo vision using simulated annealing. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 219-232, Nov. 2005.

ANDRÉN, O.; RAJKAI, K.; KATTERER, T. A non-destructive technique for studies of root distribution in relation to soil moisture. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 34, n. 1/4, p. 269-278, Feb. 1991.

BAXES, G. A. **Digital image processing: principles and applications**. New York: J. Wiley, 1994. 452 p.

BEHRENS, T.; DIEPENBROCK, W. Using digital image analysis to describe canopies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) during vegetative developmental stages. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 192, n. 4, p. 295-305, Aug. 2006.

BENINCASA, M. M. P.; BENINCASA, M.; LATANZE, R. J.; JUNQUETTI, M. T. G. Método não destrutivo para estimativa da área foliar de *Phaseolus vulgaris* L. (Feijoeiro). **Científica**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 43-48, 1976.

BRUN, L.; TRÉMEAU, A. Color quantization. In: SHARMA, G. (Ed.). **Digital color imaging handbook**. Boca Ratón: CRC, 2003. p. 589-638, 797 p.

CARUZZO, A.; ROCHA, H. R. da. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto ('gap fraction') durante o experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. p. 2478-2485.

CASTILLO, J. Z. Ensayo de análisis del crecimiento en café. **Cenicafe**, Bogotá, v. 12, n. 1, p. 1-16, 1961.

CHANDA, B.; DUTTA MAJUMDER, D. **Digital image processing and analysis**. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2006. 384 p.

CUNHA, J. B. Application of image processing techniques in the characterization of plant leafs. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, v. 1, p. 612-616, June 2003.

FAVARIN, J. L.; COSTA, J. D.; NOVEMBRE, A. D. C.; FAZUOLI, L. C.; FAVARIN, M. da G. G. V. Características da semente em relação ao seu potencial fisiológico e a qualidade de mudas de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v. 25, n. 2, p. 13-19, dez. 2003.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G. Y.; NOVA, N. A. V.; FAVARIN, M. G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, jun. 2002.

GOMES, J.; VELHO, L. **Computação gráfica: imagem**. 2. ed. Rio de Janeiro: IMPA, 2002. 424 p.

GOMIDE, M. B.; LEMOS, O. V.; TOURINO, D.; CARVALHO, M. M. de; CARVALHO, J. G. de; DUARTE, C. de S. Comparação entre métodos de determinação de área foliar em cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 118-123, jul./dez. 1977.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. 976 p.

GUZMAN, O. A. P.; GOMEZ, E. O. G.; RIVILLAS, C. A. O.; OLIVEROS, C. E. T. Utilización del procesamiento de imágenes para determinar la severidad de la mancha de hierro en hojas de café. **Cenicafe**, Bogotá, v. 54, n. 3, p. 258-265, 2003.

HENTEN, E. J. van; BONTSEMA, J. Non-destructive crop measurements by image processing for crop growth control. **Journal of agricultural engineering research**, London, v. 61, n. 2, p. 97-105, June 1995.

HUERTA, S. A. Comparación de métodos de laboratorio y de campo para medir el área foliar del cafeeiro. **Cenicafé**, Bogotá, v. 13, n. 1, p. 33-42, 1962.

IGATHINATHANE, C.; PRAKASH, V. S. S.; PADMAB, U.; RAVI BABUB, G.; WOMAC, A. R. Interactive computer software development for leaf area measurement. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 51, n. 1/2, p. 1-16, Jan. 2007.

JÄHNE, B. **Practical handbook on image processing for scientific and technical applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC, 2004. 610 p.

JÄHNE, B. **Digital image processing**. 6. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 608 p.

JIN, Y.; FAYAD, L. M.; LAINE, A. F. Contrast enhancement by multiscale adaptive histogram equalization. In: WAVELETS: APPLICATIONS IN SIGNAL AND IMAGE PROCESSING, 9., 2001, San Diego. **Proceedings...** San Diego: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001. p. 206-213.

LI-COR. **LI-3100 area meter instruction manual**. Lincoln, 1996. 34 p.

LUCAS, S. M.; PATOULAS, G.; DOWNTON, A. C. Fast lexicon-based word recognition in noisy index card images. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DOCUMENT ANALYSIS AND RECOGNITION, 17., 2003, Edinburgh, Scotland. **Proceedings...** Edinburgh, 2003. p. 462-466.

MACFARLANE, C.; ARNDT, S. K.; LIVESLEY, S. J.; EDGAR, A. C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A.; EAMUS, D. Estimation of leaf area index in eucalypt forest with vertical foliage, using cover and fullframe fisheye photography. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 272, n. 2/3, p. 756-763, Feb. 2007.

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 and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 100, n. 2/3, p. 155-168, Feb. 2000.

MIANO, J. **Compressed image file formats: JPEG, PNG, GIF, Xbm, BMP**. New York: A. Wesley, 1999. 288 p.

MIELKE, M. S.; HOFFMANN, A.; ENDRES, L.; FACHINELLO, J. C. Comparação de métodos de laboratório e de campo para a estimativa da área foliar em fruteiras silvestres. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, p. 82-88, jan./abr. 1995.

OTSU, N. A. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

REY, R.; ALVAREZ, P. Evaluación de diferentes ecuaciones de regresión en la estimación del área foliar del café en vivero a partir de sus medidas lineales. **Agrotecnia de Cuba**, v. 23, n. 3/4, p. 69-74, 1991.

RIANO, H. N. M.; ARCILA, P. J.; JARAMILLO, R. A.; CHAVES, C. B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. **Cenicafé**, Bogotá, v. 55, n. 4, p. 265-276, 2004.

ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; COSTA, J. P. da; McWILLIAM, A. L. C.; SÁ, T. D. de. An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: J. Wiley, 1996. p. 287-306.

ROSA, S. D. V. F. da; MELO, L. Q. de; VEIGA, A. D.; OLIVEIRA, S. de; SOUZA, C. A. S.; AGUIAR, V. de A. Formação de mudas de *Coffea arabica* L. cv. Rubi utilizando sementes ou frutos em diferentes estágios de desenvolvimento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 349-356, mar./abr. 2007.

RUSS, J. **The image processing handbook**. 5. ed. Boca Raton: CRC, 2006. 817 p.

SAHOO, P. K.; SOLTANI, S.; WONG, A. K. C. A survey of thresholding techniques. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, San Diego, v. 41, n. 2, p. 233-260, Feb. 1988.

SANTANA, M. S.; OLIVEIRA, C. A. da S.; QUADROS, M. Crescimento inicial de duas cultivares de café adensado influenciado por níveis de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 644-653, set./dez. 2004.

SHRESTHA, B. L.; STEWARD, B. L.; BIRRELL, S. J. Video processing for early stage maize plant detection. **Biosystems Engineering**, Kidlington, v. 89, n. 2, p. 119-129, Aug. 2004.

SIMÕES, M. P.; PINTO-CRUZ, C.; BELO, A. F.; FERREIRA, L. F.; NEVES, J. P.; CASTRO, M. C. Utilização de fotografia hemisférica na determinação do índice de área foliar de oliveiras jovens (*Olea europaea* L.). **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 30, n. 1, p. 527-534, jan. 2007.

TAVARES-JUNIOR, J. E.; FAVARIN, J. L.; DOURADO-NETO, D.; MAIA, A. de H. N.; FAZUOLI, L. C.; BERNARDES, M. S. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 199-203, maio/ago. 2002.

USHADA, M.; MURASE, H.; FUKUDA, H. Non-destructive sensing and its inverse model for canopy parameters using texture analysis and artificial neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 149-165, July 2007.

VALENCIA, G. A. Relación entre el índice de área foliar y la productividad del cafeto. **Cenicafé**, Bogotá, v. 24, n. 4, p. 79-89, 1973.

VIEIRA JÚNIOR, P. A. **Emprego da técnica de análise de imagens na determinação do comprimento e da largura de sementes de milho**. 1998. 153 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; CICERO, S. M.; CASTRO JORGE, L. A. de; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N. Estimativa da área foliar em milho através de análise de imagens. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 58-66, 2006.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I., variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 41-76, Jan. 1947.

ZHANG, M.; BAERDEMAEKEN, J. de; SCHREVEN, E. Effects of different varieties and shelf storage conditions of chicory on deteriorative color changes using digital image processing and analysis. **Food Research International**, Oxford, v. 36, p. 669-673, Jan. 2003.

ANEXOS

	Página
ANEXO A	
FIGURA 1A Exemplo do experimento de calibração da perspectiva.....	58
FIGURA 2A Distribuição das medidas na perspectiva, variando-se a distância entre a câmera e a linha	59

ANEXO A: Metodologia para cálculo da influência da perspectiva na escala.

Como as imagens laterais das plantas utilizadas nos experimentos possuíam um anteparo ao fundo que se distanciava destas em 1,00m a partir do centro da planta, foi necessário realizar uma correção para evitar os problemas decorrentes da perspectiva nas imagens.

Para verificar a influência da distância nas medidas realizou-se um experimento que consistiu em uma placa de 3,00m de comprimento e 0,50m de largura, dividida em intervalos de 0,10m. Um esquema da placa utilizada pode ser visto na Figura 1A, sendo que à esquerda é apresentada uma imagem superior e à direita uma imagem da mesma em perspectiva.

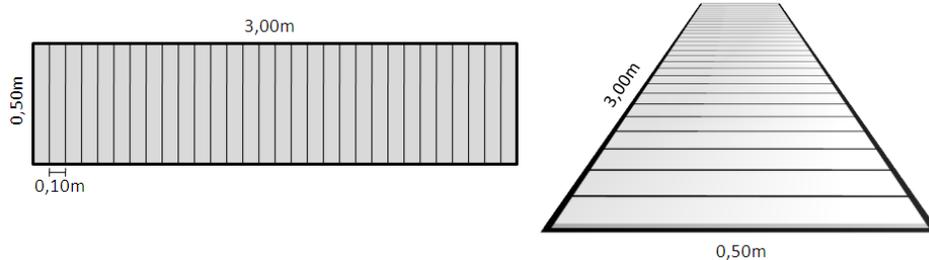


FIGURA 1A Exemplo do experimento de calibração da perspectiva.

Admitindo o valor inicial de 0,50m para o primeiro intervalo que estava a 1,00m de distância da câmera (mais próximo), as medidas subseqüentes foram relacionadas com a primeira, que assumiu o valor 100%. O gráfico que mostra o

comportamento da distância de 0,50 a medida que se aumenta a distância pode ser visto na Figura 2A, juntamente com a linha de tendência e o coeficiente de correlação (R^2) da distribuição.

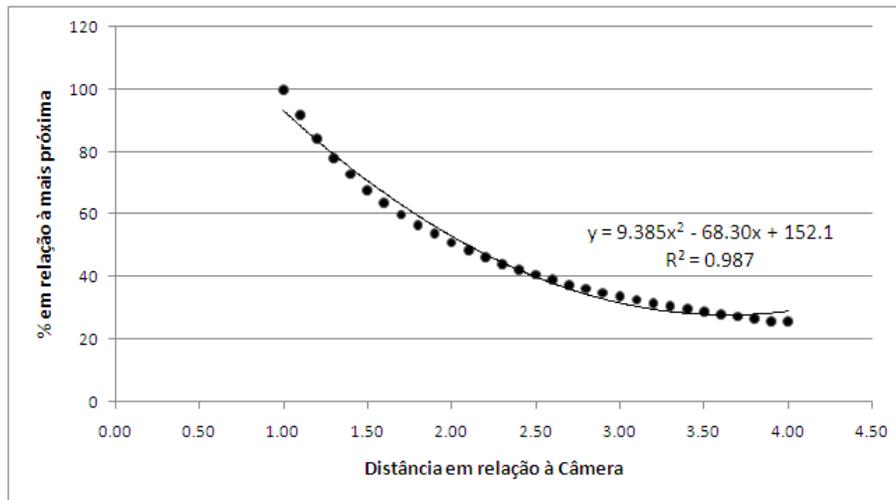


FIGURA 2A Distribuição das medidas na perspectiva, variando-se a distância entre a câmera e a linha.

A distância entre o anteparo e a câmera era de 3,00m e a distância entre o retângulo de escala e a câmera pode ser calculada sabendo-se que o ângulo entre a parte reta do anteparo e as extremidades era de 45° ($\alpha = 45^\circ$) e sabendo também que a escala está exatamente no centro de uma destas extremidades ($c = 0,30m$), conclui-se usando a Equação 26 que a distância entre a câmera e o fator de escala é de aproximadamente 2,79m ($3,00m - b$), como mostra a Equação 3A.

onde:

$$b = \text{sen}(\alpha) \cdot c \quad (1A)$$

$$b = 30 \quad (2A)$$

$$b = 30 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 21 \quad (3A)$$

Para calcular a distorção da escala que se encontra a 2,79m de distância da câmera para a distância correspondente à planta (2,00m), deve-se contar a quantidade de pixels (n_{pix}) no comprimento da escala na imagem original e transformar o valor para a distância de 2,00m. Usando-se a Equação 4A pode-se calcular o valor correspondente (n'_{pix}), como mostra a Equação 5A.

$$f(x) = 9,385x^2 - 88,30x + 152,1 \quad (4A)$$

$$n'_{pix} = \frac{n_{pix} \cdot f(2,00)}{f(2,79)} = \frac{53,04}{34,60} n_{pix} = 1,53 n_{pix} \quad (5A)$$

ANEXO B	Página
TABELA 1B	Dados de área foliar, área lateral, altura e largura das plantas.....62
TABELA 2B	Dados de IAF e luminosidade acima, no meio e abaixo das plantas.....63

TABELA 1B - Dados de área foliar, área lateral, altura e largura das plantas.

Planta	Largura (m)	Altura (m)	Área Foliar (m²)	Área Lateral (m²)
1	1.27	1.00	2.83	0.52
2	1.10	1.14	4.74	0.56
3	1.14	0.90	3.14	0.48
4	1.35	1.03	5.19	0.70
5	1.08	0.85	3.58	0.44
6	1.22	1.03	4.81	0.67
7	1.25	0.82	3.43	0.52
8	1.06	0.94	4.24	0.55
9	1.15	0.80	3.68	0.48
10	1.06	0.78	3.75	0.43
11	1.11	0.93	5.22	0.58
12	1.16	0.99	4.63	0.64
13	1.09	0.90	4.75	0.54
14	1.05	0.84	3.29	0.47
15	0.93	0.84	3.54	0.42
16	0.97	0.83	3.04	0.45
17	0.90	0.78	3.37	0.43
18	0.89	0.69	2.04	0.28
19	0.98	0.70	2.70	0.33
20	0.86	0.81	2.75	0.36
21	0.81	0.54	1.36	0.20
22	0.66	0.54	0.61	0.13
23	0.82	0.64	1.65	0.25
24	0.77	0.43	1.31	0.17
25	0.70	0.55	1.08	0.14
26	0.74	0.54	1.89	0.20
27	0.70	0.64	1.55	0.20
28	0.64	0.62	1.14	0.18
29	0.61	0.54	1.07	0.14
30	0.54	0.51	1.00	0.12

TABELA 2B - Dados de IAF e luminosidade acima, no meio e abaixo das plantas.

Planta	IAF (m²/m²)	Acima (×10Lux)	Meio (×10Lux)	Abaixo (×10Lux)
1	3.99	1102	110	35
2	4.25	1173	34	11
3	3.74	1207	20	43
4	5.55	495	64	11
5	4.28	430	34	26
6	3.73	680	40	45
7	3.62	469	22	35
8	3.53	559	16	56
9	3.71	795	40	20
10	3.54	860	2	23
11	3.84	808	12	18
12	4.53	791	14	18
13	4.82	1080	32	55
14	3.88	1007	62	64
15	3.90	824	19	23
16	3.95	893	23	33
17	6.36	1056	11	40
18	2.77	880	16	34
19	4.29	1120	17	97
20	3.40	1265	8	63
21	3.88	827	14	61
22	3.09	829	75	780
23	3.51	757	13	51
24	3.47	815	34	67
25	2.05	840	15	82
26	2.18	852	12	41
27	4.18	1000	35	59
28	2.82	1060	77	1042
29	4.63	1202	56	1015
30	3.31	1275	51	96

ANEXO C

1 Dados de IAF coletados

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
1	25 Jan	09:55:22		5		5		3.99	1.33
	0.032	40	6	3					
ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	2.739	3.455	3.420	2.154	1.100				
STDDEV	1.052	1.532	2.292	1.177	0.697				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.064	0.024	0.014	0.028	0.054				
A	1	10:01:04		7.6E-3	0.025	0.030	0.031	0.017	
B	2	10:01:27		4.7E-3	0.036	0.059	0.032	0.030	
A	3	10:03:37		9.7E-3	0.035	0.041	0.038	0.022	
B	4	10:04:03		1.6E-3	4.6E-3	0.012	0.013	0.011	
A	5	10:05:32		0.089	0.425	2.391	0.300	0.174	
B	6	10:05:48		1.3E-3	1.1E-3	6.3E-4	8.0E-4	8.6E-4	
A	7	10:06:58		0.014	0.051	0.064	0.059	0.037	
B	8	10:07:09		1.4E-3	1.9E-3	1.9E-3	1.5E-3	2.4E-3	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
2	25 Jan	10:26:45		6		6		4.25 0.77
		0.027 0	27	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.227	4.527	3.079	1.948	1.233			
STDDEV	1.570	2.222	0.838	0.520	0.295			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.015	7.3E-3	0.021	0.040	0.038			

A	1	10:27:15		9.7E-3	0.031	0.034	0.033	0.020
B	2	10:27:31		1.5E-3	5.7E-3	0.017	0.042	0.031
A	3	10:27:53		0.011	0.036	0.042	0.034	0.021
B	4	10:28:04		2.9E-4	1.2E-3	1.9E-3	3.1E-3	1.7E-3
A	5	10:28:15		0.117	2.614	0.515	0.273	0.162
B	6	10:28:26		1.8E-4	6.3E-4	2.3E-3	3.3E-3	2.1E-3
A	7	10:28:36		0.012	0.043	0.053	0.049	0.031
B	8	10:28:49		7.2E-4	2.1E-3	2.0E-3	2.6E-3	1.4E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
3	25 Jan	10:43:17						3.74 0.94
		0.043 0	0	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.025	4.079	2.900	1.935	0.893			
STDDEV	0.813	2.094	1.242	0.899	0.640			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.018	0.012	0.026	0.041	0.093			

A	1	10:43:24		0.011	0.034	0.037	0.035	0.023
B	2	10:43:32		3.9E-4	1.5E-3	2.1E-3	7.4E-3	8.1E-3
A	3	10:43:51		0.011	0.038	0.042	0.038	0.023
B	4	10:43:56		4.0E-4	3.4E-3	5.1E-3	3.8E-3	9.5E-3
A	5	10:44:11		0.125	2.845	0.471	0.265	0.155
B	6	10:44:17		6.0E-4	7.4E-4	8.9E-4	1.1E-3	9.5E-4
A	7	10:44:36		0.017	0.066	0.074	0.064	0.041
B	8	10:44:42		2.5E-4	1.2E-3	2.3E-3	1.9E-3	3.0E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
4	08 Jan	14:35:05		0		0		5.55 0.59
		0.008 39	2	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.609	4.265	4.161	3.216	1.697			
STDDEV	0.724	0.988	0.501	0.499	0.595			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	9.6E-3	9.7E-3	5.1E-3	4.8E-3	0.011			

A	1	14:35:20		0.025	0.097	0.141	0.128	0.076
B	2	14:35:34		6.0E-4	2.1E-3	8.6E-4	6.4E-4	1.6E-3
A	3	14:35:45		0.022	0.081	0.105	0.077	0.038
B	4	14:35:49		3.0E-4	2.9E-3	1.2E-3	1.4E-3	3.9E-3
A	5	14:36:00		0.023	0.086	0.102	0.092	0.051
B	6	14:36:06		1.6E-4	2.9E-4	4.9E-4	2.5E-4	1.5E-4
A	7	14:36:15		0.025	0.092	0.135	0.141	0.084
B	8	14:36:21		8.6E-5	3.1E-4	2.6E-4	2.9E-4	1.8E-4

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
5	08 Jan	14:43:06		1		1		4.28 0.43
		0.024 22	12	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.144	3.808	3.075	2.453	1.212			
STDDEV	1.044	1.047	0.773	0.397	0.205			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.016	0.016	0.021	0.017	0.040			

A	1	14:43:28		0.026	0.101	0.130	0.134	0.071
B	2	14:43:44		4.4E-4	2.5E-3	8.1E-3	2.1E-3	2.7E-3
A	3	14:43:58		0.023	0.084	0.099	0.085	0.039
B	4	14:44:07		2.4E-4	1.2E-3	1.6E-3	1.6E-3	1.2E-3
A	5	14:44:23		0.021	0.073	0.087	0.076	0.046
B	6	14:44:29		8.1E-5	2.0E-4	4.0E-4	5.0E-4	9.9E-4
A	7	14:44:49		0.025	0.091	0.135	0.127	0.057
B	8	14:44:56		1.8E-3	5.6E-3	4.9E-3	5.4E-3	5.4E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
6	08 Jan	14:13:26		8		8		3.73 0.52
		0.038 12	20	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.741	3.223	3.007	1.947	1.046			
STDDEV	0.456	0.565	1.149	0.662	0.308			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.024	0.031	0.023	0.040	0.062			

A	1	14:13:52		0.076	0.347	1.373	0.316	0.148
B	2	14:14:02		1.1E-3	4.2E-3	3.3E-3	5.9E-3	5.0E-3
A	3	14:14:14		0.023	0.080	0.089	0.085	0.043
B	4	14:14:19		1.1E-3	5.4E-3	0.013	0.019	0.011
A	5	14:14:32		0.024	0.075	0.094	0.092	0.058
B	6	14:14:38		4.4E-4	2.6E-3	2.7E-3	4.3E-3	2.8E-3
A	7	14:14:52		0.032	0.124	0.168	0.164	0.088
B	8	14:14:58		6.8E-4	3.7E-3	4.0E-3	2.1E-3	3.0E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
7	08 Jan	14:56:27		2		2		3.62 0.36
		0.042 26	7	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.709	2.836	2.429	2.027	1.167			
STDDEV	0.641	0.763	0.663	0.365	0.213			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.024	0.046	0.046	0.035	0.045			

A	1	14:56:39		0.023	0.089	0.113	0.115	0.069
B	2	14:56:43		6.3E-4	4.5E-3	3.7E-3	4.8E-3	4.5E-3
A	3	14:56:51		0.021	0.069	0.082	0.071	0.034
B	4	14:56:55		3.9E-4	3.9E-3	2.2E-3	1.0E-3	1.1E-3
A	5	14:57:12		0.022	0.078	0.090	0.076	0.044
B	6	14:57:19		2.2E-4	9.7E-4	2.2E-3	2.2E-3	8.9E-4
A	7	14:57:28		0.025	0.101	0.137	0.133	0.076
B	8	14:57:36		1.5E-3	0.013	0.027	0.011	6.6E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
8	08 Jan	14:27:25		9		9		3.53
		0.047	0	22	4			0.26

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.621	3.325	2.867	1.689	0.978			
STDDEV	0.479	0.302	0.439	0.411	0.280			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.027	0.028	0.027	0.061	0.074			

A	1	14:28:01		0.040	0.160	0.224	0.210	0.103
B	2	14:28:07		2.2E-3	6.2E-3	0.012	9.5E-3	5.3E-3
A	3	14:28:22		0.030	0.104	0.127	0.103	0.042
B	4	14:28:26		6.4E-4	2.7E-3	4.9E-3	0.015	8.2E-3
A	5	14:28:37		0.028	0.095	0.105	0.102	0.059
B	6	14:28:41		4.1E-4	1.5E-3	2.2E-3	8.9E-3	6.2E-3
A	7	14:28:53		0.033	0.128	0.166	0.165	0.093
B	8	14:28:58		8.9E-4	4.1E-3	2.0E-3	3.9E-3	2.5E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
9	11 Jan	10:11:36		7		7		3.71
		0.043	0	37	4			0.79

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.424	3.909	2.981	1.927	0.917			
STDDEV	1.400	1.438	1.122	0.874	0.509			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.032	0.015	0.023	0.041	0.087			

A	1	10:11:48		0.014	0.049	0.060	0.060	0.040
B	2	10:11:54		2.0E-3	4.3E-3	5.8E-3	0.016	0.026
A	3	10:12:11		0.020	0.088	0.138	0.109	0.054
B	4	10:12:16		1.2E-3	1.1E-3	3.5E-3	1.4E-3	2.0E-3
A	5	10:12:33		0.142	2.803	0.489	0.325	0.182
B	6	10:12:40		4.6E-4	3.6E-3	1.1E-3	2.5E-3	3.4E-3
A	7	10:12:51		0.027	0.094	0.110	0.075	0.048
B	8	10:12:58		9.4E-4	2.9E-3	5.3E-3	8.1E-3	6.1E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
10	13 Jan	09:32:39		35		35		3.54 1.26
		0.046 0	0	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.904	3.365	2.785	1.728	0.978			
STDDEV	1.634	1.759	2.037	1.119	0.604			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.020	0.026	0.030	0.057	0.074			

A	1	09:32:58		8.1E-3	0.031	0.029	0.027	0.022
B	2	09:33:03		1.0E-3	3.7E-3	6.5E-3	0.018	0.029
A	3	09:33:27		0.013	0.042	0.049	0.066	0.048
B	4	09:33:33		5.3E-4	4.3E-3	6.0E-3	6.4E-3	5.6E-3
A	5	09:33:46		0.076	0.308	2.744	0.300	0.185
B	6	09:33:53		1.5E-4	5.3E-4	2.1E-3	1.4E-3	1.6E-3
A	7	09:34:09		9.1E-3	0.035	0.038	0.038	0.028
B	8	09:34:15		8.0E-4	3.3E-3	9.6E-3	0.015	0.011

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
11	13 Jan	08:30:12		29		29		3.84 1.26
		0.035 0	20	4				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.939	3.577	2.819	2.044	1.083			
STDDEV	1.598	1.671	1.550	1.744	0.847			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.019	0.021	0.028	0.034	0.056			

A	1	08:30:56		6.6E-3	0.027	0.030	0.028	0.022
B	2	08:31:04		6.1E-4	2.9E-3	6.8E-3	0.013	8.1E-3
A	3	08:31:20		7.5E-3	0.030	0.040	0.032	0.023
B	4	08:31:26		1.9E-4	7.6E-4	1.3E-3	2.8E-3	1.9E-3
A	5	08:31:46		0.040	0.142	0.265	1.804	0.227
B	6	08:31:56		5.1E-5	1.4E-4	3.1E-4	4.5E-4	2.8E-4
A	7	08:32:12		6.8E-3	0.024	0.032	0.034	0.025
B	8	08:32:20		2.9E-4	1.5E-3	2.3E-3	4.1E-3	5.9E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
12	11 Jan	09:55:52		26		26		4.53 0.65
		0.020 0	11	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.797	4.174	3.487	2.366	1.246			
STDDEV	0.971	0.884	0.807	0.485	0.422			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	8.0E-3	0.011	0.012	0.020	0.036			

A	1	09:56:18		0.022	0.076	0.062	0.056	0.036
B	2	09:56:23		3.9E-3	0.023	0.064	0.058	0.036
A	3	09:56:44		0.020	0.077	0.079	0.070	0.044
B	4	09:56:50		2.5E-4	1.6E-3	2.1E-3	2.4E-3	2.3E-3
A	5	09:57:02		0.124	0.676	1.142	0.368	0.195
B	6	09:57:08		2.5E-4	1.9E-3	3.2E-3	2.3E-3	1.5E-3
A	7	09:57:24		0.027	0.096	0.106	0.075	0.039
B	8	09:57:29		5.0E-4	2.1E-3	2.4E-3	2.6E-3	4.3E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
13	23 Jan	09:22:53		56		56		4.82 1.35
		0.015 29	9	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.544	3.992	3.801	2.546	1.417			
STDDEV	1.566	1.959	2.048	1.208	0.711			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.011	0.014	8.0E-3	0.015	0.023			

A	1	09:23:15		7.0E-3	0.024	0.029	0.027	0.015
B	2	09:23:23		1.4E-3	5.5E-3	0.013	0.040	0.027
A	3	09:23:41		0.012	0.044	0.059	0.059	0.038
B	4	09:23:49		4.6E-4	5.5E-3	3.0E-3	1.7E-3	3.0E-3
A	5	09:24:03		0.096	0.395	2.746	0.290	0.169
B	6	09:24:09		1.1E-4	3.0E-4	5.6E-4	2.8E-4	2.6E-4
A	7	09:24:30		8.3E-3	0.029	0.036	0.036	0.026
B	8	09:24:36		1.9E-4	6.8E-4	1.7E-3	4.0E-3	2.4E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
14	23 Jan	09:11:49		55		55		3.88
		0.034	20	16	3			1.48

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.864	3.123	3.227	1.938	1.141			
STDDEV	1.926	1.837	2.267	1.453	0.753			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.021	0.034	0.017	0.040	0.048			

A	1	09:11:58		6.5E-3	0.023	0.026	0.017	0.014
B	2	09:12:03		1.5E-3	7.3E-3	0.027	0.031	0.015
A	3	09:12:18		0.011	0.042	0.058	0.059	0.038
B	4	09:12:23		5.3E-4	5.2E-3	3.4E-3	2.3E-3	2.6E-3
A	5	09:12:37		0.068	0.261	2.627	0.319	0.180
B	6	09:12:46		9.3E-5	5.2E-4	8.2E-4	6.7E-4	6.2E-4
A	7	09:12:58		7.7E-3	0.026	0.032	0.033	0.025
B	8	09:13:03		9.2E-4	3.9E-3	8.0E-3	0.026	0.012

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
15	13 Jan	09:54:46		37		37		3.90
		0.037	0	0	3			1.40

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.292	3.855	3.276	1.798	1.020			
STDDEV	1.677	1.741	2.019	1.302	0.765			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.014	0.016	0.016	0.051	0.066			

A	1	09:54:54		7.4E-3	0.021	0.022	0.024	0.018
B	2	09:55:00		9.1E-4	3.0E-3	6.4E-3	0.017	0.028
A	3	09:55:15		0.012	0.045	0.046	0.041	0.030
B	4	09:55:21		4.8E-4	3.1E-3	5.6E-3	7.1E-3	7.1E-3
A	5	09:55:43		0.102	0.531	1.047	0.297	0.170
B	6	09:55:50		1.2E-4	5.6E-4	4.4E-4	7.2E-4	6.3E-4
A	7	09:56:04		9.5E-3	0.033	0.039	0.039	0.027
B	8	09:56:10		4.4E-4	1.6E-3	2.8E-3	0.012	8.4E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
16	13 Jan	09:08:39		32		32		3.95 1.22
		0.033 29	11	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.688	3.186	3.388	2.148	1.069			
STDDEV	1.498	1.275	2.254	1.165	0.559			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.025	0.032	0.014	0.029	0.058			

A	1	09:08:48		0.014	0.042	0.042	0.037	0.023
B	2	09:08:55		6.4E-3	0.032	0.057	0.090	0.052
A	3	09:09:12		0.016	0.096	0.132	0.134	0.068
B	4	09:09:19		7.0E-4	4.2E-3	3.0E-3	3.5E-3	3.5E-3
A	5	09:09:37		0.066	0.281	2.368	0.402	0.216
B	6	09:09:42		2.0E-4	1.4E-3	7.7E-4	1.1E-3	2.1E-3
A	7	09:10:02		0.013	0.052	0.054	0.043	0.031
B	8	09:10:08		1.3E-3	7.2E-3	0.019	0.014	0.012

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
17	23 Jan	09:03:39		54		54		6.36 1.58
		0.005 35	6	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	5.424	5.445	5.234	3.320	1.818			
STDDEV	1.650	2.093	2.153	1.313	0.957			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	4.2E-3	2.7E-3	1.3E-3	4.0E-3	7.8E-3			

A	1	09:03:55		6.7E-3	0.023	0.027	0.025	0.014
B	2	09:04:02		7.7E-4	2.7E-3	4.7E-3	0.018	0.020
A	3	09:04:31		0.012	0.048	0.078	0.069	0.047
B	4	09:04:37		5.5E-5	1.5E-4	1.7E-4	3.3E-4	3.5E-4
A	5	09:04:54		0.060	0.270	2.736	0.294	0.177
B	6	09:05:07		3.2E-5	4.2E-5	1.0E-4	7.5E-5	6.2E-5
A	7	09:05:22		7.5E-3	0.026	0.033	0.034	0.026
B	8	09:05:28		2.3E-4	1.0E-3	8.8E-4	1.8E-3	4.6E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
18	11 Jan	09:23:29		23		23		2.77 1.00
		0.094 0	33	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.065	2.214	2.630	1.428	0.673			
STDDEV	0.941	0.988	1.745	0.967	0.524			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.046	0.091	0.036	0.094	0.167			

A	1	09:24:42		0.016	0.046	0.042	0.045	0.023
B	2	09:24:48		1.3E-3	5.6E-3	9.6E-3	0.016	0.027
A	3	09:25:04		0.034	0.122	0.127	0.078	0.047
B	4	09:25:09		1.5E-3	0.023	5.0E-3	5.8E-3	7.0E-3
A	5	09:25:20		0.085	0.343	2.536	0.382	0.200
B	6	09:25:25		1.2E-3	6.8E-3	5.7E-3	5.6E-3	6.3E-3
A	7	09:25:38		0.015	0.044	0.053	0.055	0.034
B	8	09:25:43		2.2E-3	8.8E-3	0.027	0.041	0.033

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
19	23 Jan	09:32:19		57		57		4.29 1.05
		0.027 0	32	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.434	3.703	3.770	2.266	1.076			
STDDEV	1.367	1.170	2.176	0.829	0.464			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.012	0.018	8.4E-3	0.024	0.057			

A	1	09:32:33		7.6E-3	0.025	0.028	0.020	0.015
B	2	09:32:37		1.2E-3	5.8E-3	7.6E-3	0.026	0.017
A	3	09:33:16		0.011	0.043	0.056	0.050	0.032
B	4	09:33:20		2.6E-4	1.0E-3	1.8E-3	2.1E-3	5.6E-3
A	5	09:33:47		0.088	0.377	2.811	0.288	0.167
B	6	09:33:53		1.5E-4	1.3E-3	5.0E-4	1.0E-3	1.7E-3
A	7	09:34:07		8.8E-3	0.031	0.037	0.036	0.025
B	8	09:34:13		3.3E-4	2.2E-3	3.8E-3	3.1E-3	2.5E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
20	23 Jan	10:08:50		61		61		3.40 1.25
		0.058 0	0	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.050	4.057	2.125	1.631	0.932			
STDDEV	1.815	2.225	1.671	1.010	0.649			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.017	0.013	0.068	0.067	0.084			

A	1	10:09:08		8.8E-3	0.029	0.033	0.028	0.017
B	2	10:09:14		2.7E-3	0.021	0.035	0.028	0.013
A	3	10:09:27		0.013	0.047	0.054	0.047	0.029
B	4	10:09:32		1.1E-3	4.6E-3	0.035	0.011	6.4E-3
A	5	10:09:44		0.134	3.186	0.451	0.260	0.154
B	6	10:09:53		1.8E-4	1.3E-3	1.8E-3	1.6E-3	1.1E-3
A	7	10:10:03		0.011	0.036	0.042	0.040	0.027
B	8	10:10:08		4.3E-4	1.6E-3	5.0E-3	8.2E-3	9.4E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
21	13 Jan	08:15:49		28		28		3.88 0.93
		0.036 31	8	2				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.735	3.399	2.223	2.411	1.215			
STDDEV	0.883	0.525	0.751	1.195	0.413			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.024	0.025	0.060	0.019	0.040			

A	1	08:16:13		5.5E-3	0.019	0.025	0.026	0.019
B	2	08:16:19		4.7E-3	0.023	0.070	0.103	0.059
A	3	08:16:49		7.0E-3	0.029	0.027	0.033	0.029
B	4	08:16:57		4.0E-4	1.3E-3	4.1E-3	4.3E-3	3.4E-3
A	5	08:17:14		0.037	0.136	0.231	1.785	0.201
B	6	08:17:20		3.5E-4	1.9E-3	5.3E-3	4.5E-3	2.6E-3
A	7	08:17:40		6.0E-3	0.022	0.028	0.032	0.023
B	8	08:17:46		3.3E-3	0.017	0.048	0.067	0.039

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
22	13 Jan	09:43:47		36		36		3.09	0.00
		0.066	34	3					

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	2.921	2.424	2.177	1.633	1.020				
STDDEV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.053	0.072	0.064	0.067	0.066				

A	1	09:44:12		0.019	0.040	0.038	0.034	0.019	
B	2	09:44:31		7.7E-3	0.022	0.044	0.083	0.052	
A	3	09:44:44		0.013	0.029	0.021	0.023	0.019	
B	4	09:44:49		7.1E-3	0.025	0.033	0.026	0.017	
A	5	09:45:02		0.134	0.966	0.867	0.322	0.186	
B	6	09:45:09		7.0E-3	0.070	0.055	0.022	0.013	
A	7	09:45:26		0.011	0.034	0.038	0.038	0.026	
B	8	09:45:32		4.1E-3	0.022	0.046	0.048	0.028	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
23	13 Jan	09:20:45		33		33		3.51	0.87
		0.050	0	0					

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	4.010	3.417	2.868	1.620	0.940				
STDDEV	1.100	1.250	1.343	0.730	0.442				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.018	0.025	0.027	0.068	0.082				

A	1	09:21:14		8.8E-3	0.028	0.035	0.026	0.019	
B	2	09:21:20		1.2E-3	4.5E-3	0.013	0.023	0.020	
A	3	09:21:41		0.020	0.105	0.108	0.123	0.069	
B	4	09:21:46		5.3E-4	3.6E-3	4.3E-3	7.3E-3	5.9E-3	
A	5	09:22:08		0.079	0.292	2.140	0.319	0.169	
B	6	09:22:16		3.0E-4	1.2E-3	5.9E-3	5.3E-3	3.2E-3	
A	7	09:22:39		0.013	0.030	0.037	0.043	0.029	
B	8	09:22:48		6.4E-4	3.1E-3	6.1E-3	0.014	9.6E-3	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
24	13 Jan	08:52:34		31		31		3.47	0.65
		0.047	10	16	2				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	3.571	2.943	2.664	1.785	1.028				
STDDEV	0.921	0.637	0.748	0.514	0.272				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.028	0.041	0.035	0.052	0.065				

A	1	08:52:54		0.014	0.033	0.034	0.032	0.022	
B	2	08:53:00		5.8E-3	0.038	0.050	0.074	0.038	
A	3	08:53:35		0.030	0.103	0.115	0.102	0.068	
B	4	08:53:41		2.1E-3	8.4E-3	0.011	0.013	9.0E-3	
A	5	08:53:58		0.055	0.213	0.514	0.417	0.184	
B	6	08:54:03		5.9E-4	4.4E-3	6.8E-3	9.1E-3	5.7E-3	
A	7	08:54:20		0.017	0.042	0.040	0.043	0.030	
B	8	08:54:27		1.7E-3	6.9E-3	0.016	0.042	0.033	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
25	11 Jan	09:41:30		24		24		2.05	0.85
		0.172	0	25	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	2.508	1.531	1.952	0.945	0.544				
STDDEV	1.007	0.977	1.514	0.704	0.423				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.080	0.190	0.085	0.209	0.235				

A	1	09:42:14		0.015	0.047	0.058	0.058	0.032	
B	2	09:42:20		6.4E-3	0.033	0.096	0.114	0.075	
A	3	09:42:36		0.026	0.092	0.075	0.049	0.036	
B	4	09:42:40		3.7E-3	0.047	0.023	0.028	0.016	
A	5	09:42:50		0.100	0.484	2.050	0.341	0.184	
B	6	09:42:55		1.9E-3	0.022	0.012	0.014	8.8E-3	
A	7	09:43:05		0.015	0.056	0.070	0.082	0.040	
B	8	09:43:10		2.7E-3	0.018	0.025	0.032	0.024	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
26	13 Jan	08:40:41		30		30		2.18	0.84
		0.148 0	0	4					

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	2.683	2.209	1.610	1.139	0.556				
STDDEV	1.105	0.849	1.413	1.104	0.541				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.068	0.091	0.130	0.151	0.228				

A	1	08:41:24		7.5E-3	0.029	0.043	0.037	0.023	
B	2	08:41:30		1.9E-3	7.4E-3	0.031	0.026	0.022	
A	3	08:41:59		0.017	0.082	0.126	0.083	0.055	
B	4	08:42:05		1.5E-3	8.2E-3	9.5E-3	0.012	7.6E-3	
A	5	08:42:19		0.036	0.148	0.235	0.583	0.131	
B	6	08:42:27		4.1E-4	3.0E-3	2.0E-3	4.6E-3	3.5E-3	
A	7	08:42:55		0.020	0.049	0.041	0.040	0.032	
B	8	08:43:00		1.6E-3	6.2E-3	0.025	0.029	0.024	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP	
27	23 Jan	08:53:21		53		53		4.18	0.47
		0.028 39	3	3					

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00				
CNTCT#	3.775	2.760	3.292	2.237	1.378				
STDDEV	0.976	0.783	0.593	0.429	0.221				
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670				
GAPS	0.023	0.050	0.016	0.025	0.026				

A	1	08:53:36		6.6E-3	0.022	0.027	0.024	0.013	
B	2	08:53:45		1.5E-3	6.7E-3	0.024	0.025	0.022	
A	3	08:54:09		0.011	0.043	0.062	0.065	0.045	
B	4	08:54:17		3.1E-4	3.5E-3	1.4E-3	3.3E-3	1.8E-3	
A	5	08:54:34		0.055	0.204	0.510	0.392	0.200	
B	6	08:54:44		3.2E-4	3.1E-3	2.7E-3	3.6E-3	2.2E-3	
A	7	08:55:06		7.2E-3	0.025	0.031	0.032	0.024	
B	8	08:55:14		4.5E-4	2.5E-3	9.2E-4	9.7E-4	8.4E-4	

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
28	23 Jan	09:43:28		58		58		2.82 1.03
		0.084 0	19	3				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	2.937	2.522	2.202	1.386	0.818			
STDDEV	1.330	1.461	1.334	0.882	0.616			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.052	0.065	0.062	0.101	0.113			

A	1	09:43:37		8.3E-3	0.028	0.029	0.019	0.014
B	2	09:43:42		3.1E-3	0.015	0.057	0.054	0.046
A	3	09:43:57		0.013	0.048	0.061	0.052	0.033
B	4	09:44:02		1.9E-3	0.014	8.3E-3	0.014	6.7E-3
A	5	09:44:16		0.105	0.628	0.766	0.294	0.168
B	6	09:44:21		8.3E-4	4.5E-3	4.4E-3	3.7E-3	2.0E-3
A	7	09:44:34		9.6E-3	0.032	0.037	0.036	0.025
B	8	09:44:44		1.1E-3	4.0E-3	0.011	0.011	0.015

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
29	23 Jan	09:53:44		59		59		4.63 0.69
		0.022 0	31	2				

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	4.476	5.189	3.676	2.165	1.183			
STDDEV	1.462	1.685	0.557	0.340	0.207			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.012	3.6E-3	9.4E-3	0.028	0.043			

A	1	09:53:54		8.3E-3	0.027	0.030	0.017	0.013
B	2	09:54:00		2.4E-3	7.9E-3	0.016	0.071	0.048
A	3	09:54:13		0.012	0.042	0.053	0.043	0.028
B	4	09:54:18		2.0E-3	6.2E-3	0.016	0.048	0.036
A	5	09:54:35		0.121	1.683	0.533	0.282	0.164
B	6	09:54:43		3.0E-4	9.6E-4	2.5E-3	4.4E-3	4.0E-3
A	7	09:55:00		9.3E-3	0.032	0.038	0.038	0.025
B	8	09:55:06		4.5E-4	7.0E-4	7.2E-4	1.8E-3	1.8E-3

FILE	DATE	TIME	LAI	SEL	DIFN	MTA	SEM	SMP
30	23 Jan	10:00:14		60	60	3.31	1.07	0.065
	0	3						0

ANGLES	7.000	23.00	38.00	53.00	68.00			
CNTCT#	3.948	4.141	2.278	1.612	0.787			
STDDEV	1.652	2.315	1.377	0.704	0.537			
DISTS	1.008	1.087	1.270	1.662	2.670			
GAPS	0.019	0.012	0.056	0.069	0.123			

A	1	10:00:28		8.5E-3	0.028	0.027	0.023	0.017
B	2	10:00:33		2.4E-3	0.020	0.031	0.025	0.034
A	3	10:00:56		0.012	0.048	0.051	0.038	0.027
B	4	10:01:00		4.1E-4	1.7E-3	5.0E-3	2.5E-3	3.6E-3
A	5	10:01:17		0.135	3.226	0.457	0.267	0.158
B	6	10:01:22		2.6E-4	1.1E-3	2.4E-3	4.4E-3	3.1E-3
A	7	10:01:35		9.7E-3	0.033	0.039	0.038	0.026
B	8	10:01:40		9.6E-4	3.8E-3	0.014	0.011	0.017