

**VIABILIDADE DE MÉTODOS ÓTICOS PARA  
IDENTIFICAÇÃO DE CONTEÚDO DE ÁGUA  
DE FOLHA DE CAFEEIROS**

**JULIANA VILELA LOURENÇONI BOTEGA**

**2009**

**JULIANA VILELA LOURENÇONI BOTEGA**

**VIABILIDADE DE MÉTODOS ÓTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
CONTEÚDO DE ÁGUA DE FOLHA DE CAFEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Roberto Alves Braga Júnior

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2009

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

Botega, Juliana Vilela Lourençoni.  
Viabilidade de métodos óticos para identificação de  
conteúdo de água de folha de cafeeiros / Juliana Vilela Lourençoni  
Botega. – Lavras: UFLA, 2009.  
99 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.  
Orientador: Roberto Alves Braga Júnior.  
Bibliografia.

1. Biospeckle. 2. Café. 3. Laser. 4. Déficit hídrico. I. Universidade  
Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.3  
630.72

**JULIANA VILELA LOURENÇONI BOTEGA**

**VIABILIDADE DE MÉTODOS ÓTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
CONTEÚDO DE ÁGUA DE FOLHA DE CAFEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 1º de julho de 2009

Prof. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA
Prof. Luiz Antônio Lima	UFLA
Prof. Inácio Maria Dal Fabro	UNICAMP
Prof. Willian Soares Lacerda	UFLA

Prof. Roberto Alves Braga Júnior  
UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

## **DEDICO**

À Ana Luiza, Lili e ao Beto.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Fapemig, pelo apoio financeiro, através do Edital Universal 07.

Ao Núcleo de Inovação Tecnológica - Nintec/UFLA, em especial á Andréia Lima.

Ao Prof. Roberto Alves Braga Júnior, pela excelente orientação, confiança, dedicação e incentivo, que foram fundamentais para a execução deste estudo e pelos ensinamentos no curso e na minha vida profissional.

Aos Profs. Giovanni Francisco Rabelo e Luís Antônio Lima, pela co-orientação, pelas sugestões e contribuições.

Aos demais membros da banca examinadora, professores Inácio Maria Del Fabro e Willian Lacerda Soares, pela presença e sugestões que enriqueceram este trabalho.

Ao amigo Maurício Machado, pela valiosa parceria e colaboração na execução deste trabalho.

À Prof. Fátima Conceição Rezende, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos colegas Carlinhos, pela ajuda no experimento da câmara de Scholander e Rafael Faria pela parceria no projeto das gotas.

À minha família, aos meus pais, ao Beto, Lulu, pelo constante apoio nas horas mais difíceis.

Aos funcionários do DEG, pelo imprescindível apoio, em especial Dani e Zé Luís.

Enfim, obrigada a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	ii
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1 O agronegócio brasileiro.....	4
2.2 Modernização do agronegócio brasileiro.....	5
2.3 O café.....	5
2.4 Café arabica .....	6
2.5 Irrigação.....	7
2.5.1 Irrigação do café .....	8
2.6 Potencial hidrico de uma planta.....	9
2.7 Medição do potencial hidrico na planta .....	11
2.8 Laser .....	13
2.9 <i>Speckle</i> dinâmico .....	14
2.9.1 Aplicações do <i>speckle</i> dinâmico .....	16
2.10 Laser aplicado ao estudo do material biológico.....	17
2.11 Métodos de análise do <i>speckle</i> dinâmico.....	18
2.11.1 Momento de Inércia.....	19
2.11.2 Fujii.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	23
3.1 Considerações iniciais.....	23

3.2 Correlacionamento da transmissão da luz pela folha, com a perda de água ao longo do tempo .....	24
3.3 Interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica .....	28
3.3.1 Aquisição de imagens .....	28
3.3.2 Processamento de imagens .....	29
3.4 Determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação laser incidindo na folha .....	31
3.5 Viabilidade do uso do Momento de Inércia.....	32
3.6 Comparação das metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com metodologia padrão .....	32
3.7 Comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo .....	35
3.7.1 Aquisição de imagens .....	36
3.7.2 Processamento de imagens .....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
4.1 Correlacionamento da transmissão da luz pela folha, com conteúdo de água ao longo do tempo .....	37
4.2 Interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica .....	41
4.2.1 Processamento de imagens .....	41
4.2.1.1 Primeira abordagem sem a adição da luz não coerente .....	41
4.2.1.2 Segunda abordagem com a adição da luz não coerente .....	42
4.2.2 Análise do nível de cinza e da área ao longo do tempo nas duas abordagens .....	43
4.3 Determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação pelo laser incidindo na folha .....	45
4.4 Viabilidade do uso do Momento de Inércia .....	48



4.5 Comparação de metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com metodologia padrão .....	50
4.6 Comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo .....	53
5 CONCLUSÕES .....	66
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS .....	76

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
TABELA 1 Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) .....	40
TABELA 2 Comparação dos coeficientes de variação .....	43
TABELA 3 Valores de área e níveis de cinza das 14 diferentes posições de iluminação .....	47
TABELA 4 Pressões lidas pelo tensiômetros .....	50
TABELA 5 Quadro da análise da variância para as regressões.....	63
TABELA 6 Equação ajustada e o coeficiente de determinação( $R^2$ ).....	64

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
FIGURA 1 Padrão de um speckle de alta e baixa atividade, respectivamente .....	19
FIGURA 2 Matriz de ocorrência de alta e baixa atividade, respectivamente .....	20
FIGURA 3 Arranjo experimental para a iluminação da folha de Café arábica .....	25
FIGURA 4 Imagem Fujii e imagem digitalizadas, respectivamente .....	25
FIGURA 5 Imagem Fujii, 3 <sup>a</sup> metodologia <i>Binary</i> , respectivamente .....	26
FIGURA 6 Imagem Fujii, 1 <sup>a</sup> metodologia <i>Threshold</i> .....	26
FIGURA 7 Imagem Fujii, 2 <sup>a</sup> metodologia <i>Threshold</i> .....	26
FIGURA 8 Imagem digitalizada, 3 <sup>a</sup> metodologia <i>Binary</i> , respectivamente .....	27
FIGURA 9 Imagem digitalizada, 1 <sup>a</sup> metodologia <i>Threshold</i> .....	27
FIGURA 10 Imagem digitalizada, 2 <sup>a</sup> metodologia <i>Threshold</i> .....	27
FIGURA 11 Procedimentos para o cálculo de área na abordagem com adição de luz .....	30
FIGURA 12 Procedimentos para o cálculo de área na abordagem sem adição de luz.....	30
FIGURA 13 Imagem Fujii e imagem binarizada, respectivamente.....	32
FIGURA 14 Configuração experimental utilizando laser .....	34
FIGURA 15 Configuração experimental da bomba de Scholander .....	34
FIGURA 16 Imagem STS e imagem Fujii, respectivamente .....	35
FIGURA 17 Imagens Fujii e imagens digitalizadas da planta A, respectivamente .....	38

FIGURA 18	Imagens Fujii e imagens digitalizadas da planta B, respectivamente .....	38
FIGURA 19	Áreas das imagens digitalizadas ao longo do tempo.....	40
FIGURA 20	Áreas das imagens Fujii ao longo do tempo .....	41
FIGURA 21	Etapas de visualização da imagem Fujii e binarizadas, respectivamente .....	42
FIGURA 22	Etapas de transformação da imagem após Fujii, após função Find Edjes, binarização e uso da função Dilate, respectivamente. ....	42
FIGURA 23	Gráfico de comparação de área ao longo do tempo com e sem adição de luz coerente.....	44
FIGURA 24	Gráfico de comparação de níveis de cinza e área ao longo do tempo com e sem adição de luz coerente.....	45
FIGURA 25	Imagens Fujii e binarizadas da Faces A e Face B .....	46
FIGURA 26	Classificação das nervuras .....	46
FIGURA 27	Imagens STS de folhas amarelas e folhas verdes.....	49
FIGURA 28	Histograma do máximo e mínimo nível de cinza de cada imagem STS.....	49
FIGURA 29	Resultados dos valores dos níveis de cinza, área e bomba de Scholander, no 3º dia .....	51
FIGURA 30	Resultados dos valores do Momento de Inércia, e bomba de Scholander no 4º dia.....	51
FIGURA 31	Imagens STS, sendo a da esquerda com maior atividade, consequentemente maior Momento de Inércia .....	53
FIGURA 32	Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas 5 plantas com saturação salina ao longo do tempo .....	54
FIGURA 33	Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda	

	de água pelas 5 plantas, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.....	55
FIGURA 34	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 1, com saturação salina ao longo do tempo .....	56
FIGURA 35	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 2, com saturação salina ao longo do tempo .....	56
FIGURA 36	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 3, com saturação salina ao longo do tempo .....	57
FIGURA 37	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 4, com saturação salina ao longo do tempo .....	57
FIGURA 38	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 5, com saturação salina ao longo do tempo .....	58
FIGURA 39	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 1, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo .....	59
FIGURA 40	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 2, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo .....	59
FIGURA 41	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 3, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo .....	60
FIGURA 42	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 4 sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo .....	60
FIGURA 43	Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 5, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo .....	61
FIGURA 44	Imagens STS do 1° e 5° dias de iluminação .....	62

FIGURA 45 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas 5 plantas, com saturação salina ao longo do tempo .....	64
FIGURA 46 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas 5 plantas, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.....	65

## RESUMO

BOTEGA, Juliana Vilela Lourençoni. **Viabilidade de métodos óticos para identificação de conteúdo de água de folha de cafeeiros**. 2009. 99p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.\*

A cafeicultura é uma das mais importantes atividades agrícolas do Brasil, com relevante influência nos aspectos socioeconômicos e no agronegócio do país. A necessidade de avaliar o déficit hídrico em vegetais vem sendo cada vez maior entre pesquisadores do mundo todo. Nesse contexto, objetivou-se com este trabalho contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia com o intuito de viabilizar métodos óticos para a identificação da umidade da folha de café. Várias etapas foram seguidas visando dominar a técnica. De forma específica, folhas de plantas de Café arábica foram iluminadas e suas atividades acompanhadas pelo fenômeno do biospeckle. A escolha de trabalhar com plantas de Café arábica se deu em razão da necessidade de melhoria das metodologias existentes e criação de novas técnicas que permitem a análise do déficit hídrico em plantas. O biospeckle configura-se como uma valiosa ferramenta no auxílio a estudos de diversas áreas do conhecimento e tem sido desenvolvida como uma ferramenta para análise da atividade de materiais biológicos. Pelos resultados, verificou-se que a tecnologia possibilita determinar o status hídrico das plantas e apresenta-se como uma contribuição sólida e inovadora para manejo de irrigação.

---

\*Comitê Orientador: Roberto Alves Braga Júnior - UFLA (Orientador),  
Giovanni Francisco Rabelo - UFLA, Luiz Antônio Lima - UFLA

## ABSTRACT

BOTEGA, Juliana Vilela Lourençoni. **Viability of optical methods to identify the content of water of Coffee leaves.** 2009. 99p. Thesis (Doctor Program in Agricultural Engineering) - Federal University of Lavras, Lavras.\*

Coffee culture is one of the most important agricultural activities in Brazil, and it exerts relevant influence the social-economical aspects and on agrobusiness in the world. The need of evaluating the water deficit in vegetables has enlarged among researchers world wide. In this context, the purpose of this work was to contribute for the development of a methodology to viability of optical methods to identify the humidity of coffee leavis. Several steps have been made in attempt to overlook the technique. In a specific way, leaves of plants of arabie varienties were illuminated and its activity followed by the phenomenon of biospeckle. The choice of working with plants of arabie varienties is due to the necessity of improvement on methodologies and creation of new techniques to allow the analysis of water deficit in plants. Biospeckle is configured as a valuable tool to aid the studies of diverse knowledgement areas and has been developed for analysis of activity of biological materials. The results have shown that this technology trun possible to determine the water status of plants e and this is presented as a solid, and innovative contribution irrigation water managment.

---

\* Guidance Committee: Roberto Alves Braga Júnior - UFLA (Major Professor), Giovanni Francisco Rabelo - UFLA, Luiz Antônio Lima - UFLA.



## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das mais importantes atividades agrícolas do Brasil, com relevante influência nos aspectos socioeconômicos e no agronegócio do país.

A produção agrícola baseia-se fundamentalmente nas inter-relações entre água, solo, planta e atmosfera, sendo que o equilíbrio dessas relações depende do rendimento e a eficiência dessa produção.

A disponibilidade hídrica assume um papel importante quanto ao rendimento e a qualidade dos produtos, podendo levar a perdas significativas em razão da deficiência hídrica em fases críticas ou em todo o período do desenvolvimento das culturas.

Devido à importância do sistema de irrigação na produção agrícola, é imprescindível seu planejamento adequado, tendo como base a necessidade de conhecimento de parâmetros edafoclimáticos locais, assim como características inerentes à cultura, de modo a minimizar os riscos de perda de produção por deficiência hídrica e promover o uso racional da água. Desse modo, para que se garanta o sucesso na utilização das técnicas de irrigação, é indispensável o conhecimento da quantidade e da frequência de aplicação da água.

A ineficiência de alguns projetos de irrigação, em razão do dimensionamento inadequado dos sistemas de aplicação de água com relação aos recursos hídricos disponíveis e ao consumo de energia, tem inviabilizado a agricultura irrigada em algumas regiões. Torna-se importante a realização de estudos para definir quando e quanto irrigar, visando a atender as necessidades hídricas das plantas de maneira racional.

O potencial de água na folha, ou potencial hídrico foliar, caracteriza seu estado energético e influencia o fluxo de água no sistema solo- planta-atmosfera,

que caracteriza o estado hídrico das plantas. Em algumas culturas, como a do café, o balanço de água no sistema solo-planta tem direta relação com a sua produtividade, o que implica a necessidade do acompanhamento do estado hídrico da cultura para a garantia de um correto e eficiente manejo de irrigação.

A necessidade de avaliar o déficit hídrico em vegetais vem sendo cada vez maior entre pesquisadores do mundo todo. Uma das técnicas de determinação do potencial hídrico é a câmara de Scholander, que se baseia em uma metodologia que demanda uma grande especialização do analista, além de exigir o transporte para o campo de equipamento pesado e de manuseio delicado. Essa técnica é considerada também como uma técnica destrutiva, o que abre espaço para a busca de outras abordagens que evitem danos à cultura. Nesse sentido, o uso de metodologias óticas tem sido uma alternativa não destrutiva da análise, além de permitir, em alguns casos, a independência da análise subjetiva do especialista.

A técnica do biospeckle é uma técnica ótica de medição de atributos físicos e/ou químicos de materiais biológicos, sendo conhecida especialmente pela sua capacidade de obtenção da atividade biológica de tecidos, por meio da iluminação desses pela luz coerente de um laser.

Na agricultura, o uso de um laser de baixa potência e o fenômeno produzido por ele, o biospeckle, é base para muitas aplicações. O material biológico muda sua constituição ou a posição espacial de seus constituintes ao longo do tempo e, ao ser iluminado pelo laser, provoca a formação, em um ponto do espaço utilizado para observação, de um padrão de interferência, produzindo o *speckle* dinâmico. Essa alteração do padrão pode ser comparada a um fervilhamento, sendo que quanto mais rápidas as mudanças na amostra, mais intenso o fervilhamento da imagem, que é quantificado por meio de diversas técnicas estatísticas e matemáticas.

Dentro desse contexto, com o presente trabalho objetivou-se apresentar uma metodologia para uso da técnica do biospeckle como instrumento de correlação da atividade biológica com o nível do conteúdo de água na folha do cafeeiro, que é uma cultura de grande importância econômica. Neste trabalho, pretendeu-se avaliar a melhor metodologia para viabilizar a obtenção da inferência do teor de água na folha.

Este presente trabalho está registrado no INPI: PI 0301926-8, protocolo 014090001090. No anexo A, encontra-se um modelo de protótipo.

### **1.1 Objetivos**

Desenvolver metodologia de viabilidade de métodos óticos para a identificação de conteúdo de água de folha de cafeeiros, utilizando o fenômeno do biospeckle laser.

Especificamente:

- a) Correlacionar a transmissão da luz pela folha com a perda de água ao longo do tempo;
- b) Determinar a interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica;
- c) Determinar a interferência nas diferentes posições de iluminação pelo laser incidido na folha;
- d) Verificar a viabilidade do uso do momento de inércia;
- e) Comparar metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com metodologia padrão;
- f) Determinar o comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O agronegócio brasileiro

Apesar das crises que o país tem enfrentado nos últimos anos, somadas ao protecionismo das nações mais desenvolvidas, a agricultura brasileira produz cada vez mais ultrapassando frequentemente seus próprios recordes. Os resultados práticos do desempenho da agricultura têm sido uma contribuição marcante para a manutenção de baixas taxas de inflação no país e geração de divisas (Barros, 2002).

A economia brasileira desenvolve-se rapidamente e o setor agropecuário passa a ser cada vez mais importante. Há que se enfatizar a significância crescente do agronegócio, que produz alimentos, gera alguns milhões de empregos, além de diversificar e aumentar consideravelmente as exportações brasileiras.

Moderno, eficiente e competitivo, o agronegócio brasileiro é uma atividade próspera, segura e rentável. Com um clima diversificado, energia solar abundante e quase 13% de toda a água doce disponível no planeta, o Brasil tem 388 milhões de hectares de terras agricultáveis férteis e de alta produtividade, dos quais 90 milhões ainda não foram explorados. Esses fatores fazem do país um lugar de vocação natural para a agropecuária e todos os negócios relacionados à sua cadeia produtiva.

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários. É o primeiro produtor e exportador de café, açúcar, álcool e sucos de frutas (Brasil, 2009).

A balança comercial do agronegócio registrou saldo de US\$ 49,69 bilhões, em 2007, resultado 16,3% superior em relação ao verificado no ano de 2006. Uma análise sob o ponto de vista da perspectiva histórica mostra que o

desempenho da balança comercial do agronegócio foi recorde no ano. Desde o início da década, o ritmo de crescimento das exportações, de 183,4%, supera o aumento das importações, que é de 46,5%. O saldo apresentou aumento recorde de 226%, nos últimos oito anos, demonstrando a contribuição crescente do setor agropecuário ao desempenho positivo da balança comercial brasileira (Conselho Nacional de Agricultura e Desenvolvimento Rural, 2009).

## **2.2 Modernização do agronegócio brasileiro**

O bom desempenho das exportações do setor e a oferta crescente de empregos na cadeia produtiva não podem ser atribuídos apenas à vocação agropecuária brasileira. O desenvolvimento científico-tecnológico e a modernização da atividade rural, obtidos por intermédio de pesquisas e da expansão da indústria de máquinas e implementos, contribuíram igualmente para transformar o país em uma das mais respeitáveis plataformas mundiais do agronegócio (Brasil, 2009).

## **2.3 O café**

Da Etiópia, no nordeste da África, ao Brasil, o café fez um longo percurso. Primeiro, migrou para a Península Arábica, entre 600 e 700 d.C, conquistando mouros e cristãos. Durante a Idade Média, chegou à Europa, onde era conhecido como a "vinha da Arábia". No início do século XVIII, as primeiras sementes do produto chegaram ao território brasileiro trazidas da Guiana Francesa. Depois de tentativas frustradas de desenvolver a cultura no norte, a cafeicultura fixou-se no Sudeste do país e, mais tarde, expandiu-se pelo Paraná e Bahia, transformando o Brasil no maior produtor e exportador mundial de café.

O ciclo de vida do cafeeiro está dividido em três grandes períodos: 1º: de crescimento, que vai da germinação à maturidade sexual; 2º: de produção; e 3º:

de decadência fisiológica, que termina com a morte da planta. Cada uma dessas fases é influenciada, em maior ou menor intensidade, por fatores ambientais, como temperatura, radiação, precipitação e características do solo (Evanoff, 1994).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, apresentando como principais produtores os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia (Agrianual, 2007). A safra de café, 2005/2006, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2007), fechou em 32,94 milhões de sacas. A produção brasileira, como também a mundial, poderia ser bem mais significativa, caso condições desfavoráveis ao cultivo, que reduzem a sua produtividade, não ocorressem, particularmente o suprimento limitado de água (Dias et al., 2005).

A cafeicultura é uma das mais importantes atividades agrícolas do Brasil, com relevante influência nos aspectos socioeconômicos e no agronegócio do país.

#### **2.4 Café arábica**

O Café arábica (*Coffea arábica*, Lineu), planta perene de porte arbustivo, pertencente à família Rubiaceae e produtora de frutos tipo baga, contém, normalmente, duas sementes, que representam o seu produto econômico e que depois de convenientemente processadas, são consumidas na forma de infusão.

O café arábica é originário de áreas florestais elevadas da Etiópia, próximas à linha equatorial, em latitudes variáveis de 6° a 9° N e altitudes médias de 1600 a 2000 metros, onde a temperatura média anual do ar oscila entre 15° e 20° C e as chuvas são da ordem de 1600 a 2000 milímetros anuais (Carr, 2001). Temperaturas médias anuais entre 18° e 22° parecem ser os limites mais indicados ao café arábica (Alfonsi, 2000).

A espécie café arábica produz cafés de qualidade, finos e requintados, e possui aroma intenso e os mais diversos sabores, com inúmeras variações de corpo e acidez.

## **2.5 Irrigação**

Mundialmente, a agricultura irrigada consome cerca de 69% de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos (Christofidis, 1997). Apesar do grande consumo de água, a irrigação representa uma das maneiras mais eficientes de aumento da produção de alimentos. Pesquisas que visam desenvolver tecnologias para melhorar as práticas de manejo de irrigação têm sido apontadas como indispensáveis para a produção sustentável de alimentos e liberação de volumes de água para atender outros fins, como o consumo humano.

A irrigação é uma tecnologia que permite reduzir o risco de deficiência hídrica em culturas, possibilitando a exploração agrícola em áreas antes inaptas devido à escassez de precipitações.

Técnicas que aumentem a eficiência do uso da água na agricultura irrigada, são necessárias para otimizar o recurso hídrico e evitar a degradação ambiental. A irrigação pode contribuir de forma importante para o eficiente desempenho do agronegócio nacional.

Uma vez que a irrigação é a principal atividade humana consumidora de água, torna-se necessário definir quando e quanto irrigar, não proporcionando condições para que as plantas sofram por déficit hídrico. O momento exato de efetuarem-se as irrigações, associado ao volume de água a ser aplicado na cultura, são fundamentais para o uso eficiente da água na cafeicultura irrigada. Entretanto, o principal problema na irrigação do cafeeiro é quantificar adequadamente o volume de água a ser aplicado por determinado método de irrigação nos períodos críticos da cultura (Sousa et al., 1999).

### **2.5.1 Irrigação do café**

O sucesso do agronegócio do café no âmbito nacional e internacional está alicerçado em diversos fatores, tais como a escolha da cultivar, o local adequado, os tratamentos culturais, a colheita e a pós-colheita e, mais recentemente, o manejo sustentável da cultura. Dentre os principais fatores da sustentabilidade da cafeicultura moderna, a utilização de modo racional dos recursos naturais, principalmente da água, é fundamental, pois ela é um bem limitado.

Vários autores constataram os efeitos benéficos da irrigação em relação ao aumento significativo da produtividade em cafeeiros irrigados, quando comparados a não irrigados (Antunes et al., 2000; Fernandes et al., 1998; Njoroge, 1989; Reis et al., 1990; Martins et al., 2002).

No Brasil, a cafeicultura foi introduzida em regiões propícias à sua adaptação, como a Região Sudeste, devido à disponibilidade hídrica favorável. Em seguida, expandiu-se para regiões limitadas pela deficiência hídrica ou distribuição irregular das chuvas, sendo necessária a adoção de novas tecnologias de cultivo, como a irrigação. A irrigação, então, passou a ser utilizada não só em regiões com déficit hídrico, mas também em regiões tradicionais, por oferecer a garantia de produção em anos de baixa precipitação.

A irrigação passou a ser necessária para a garantia da produtividade e qualidade do cafeeiro. Entretanto, a quantificação adequada do volume de água a ser aplicado por determinado método de irrigação nos períodos críticos da cultura, que se situa na fase de máximo crescimento vegetativo e produtivo, tem sido um desafio para os profissionais da área. Para precisa quantificação do fornecimento de água às plantas, é necessário conhecer a relação funcional entre a umidade do solo e o seu potencial matricial no momento da irrigação, conhecida como curva de retenção de água no solo entre outros.

A irrigação do cafeeiro pode ter objetivo de eliminar o déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura ou em fases específicas, quando em condição de



demanda hídrica média ou baixa. O suprimento de água em quantidades e intervalos corretos pode ocasionar grandes aumentos de produtividade na lavoura cafeeira, além de menores perdas para a planta (Soares et al., 2003).

Estimativas precisas da necessidade de água para o café são essenciais, pois a falta de água pode reduzir substancialmente o crescimento da planta, sem que, com isso, ela mostre sinais de murchamento ou outros sintomas visíveis de baixa umidade no solo (Gutiérrez & Meinzer, 1994).

Vários fatores podem afetar o cafeeiro, mas o fator hídrico pode ser um dos mais importantes para o desenvolvimento vegetativo, além de interferir na produtividade da cultura. Entretanto, há necessidade de investigações sobre o volume e a frequência de aplicação de água adequada, abordando o sistema de produção e suas peculiaridades. O déficit hídrico não deve ser muito acentuado, pois refletirá em um desenvolvimento lento e baixa produtividade. Dessa forma, conhecendo-se qual a quantidade de água a ser fornecida para as plantas e qual a frequência que deve ser aplicada, pode-se garantir um manejo eficiente da irrigação, reduzindo custos e evitando excessos desnecessários (Vieira et al., 2000).

## **2.6 Potencial hídrico de uma planta**

De um modo geral, o nível de hidratação das plantas pode ser estimado por meio de sintomas visuais, ou medido quantitativamente em termos do conteúdo ou estado de energia da água na planta. A razão do interesse da medida do conteúdo de água na planta difere conforme as necessidades e objetivos dos usuários, que requerem diferentes tipos de informações, quais sejam (Kramer, 1988):

- a) determinação da frequência ou momento de irrigação;
- b) estabelecimento de condições apropriadas de disponibilidade hídrica para os procedimentos de seleção em populações de plantas;

- c) estudos dos efeitos do estresse de água no crescimento e produtividade de uma cultura;
- d) avaliação dos efeitos do estresse hídrico nos processos fisiológicos e bioquímicos.

Em vários tipos de vegetação encontrados na natureza, a produtividade está fortemente relacionada com a água disponível para as plantas (Salisbury & Ross, 1978). Entre os vários fatores limitantes da produção vegetal, o déficit hídrico ocupa posição de destaque, pois além de afetar diretamente as relações hídricas nas plantas, alterando-lhes o metabolismo, é fenômeno que ocorre em grandes extensões de áreas cultiváveis (Righi, 2005). Entretanto, Boyer (1982) observou que as plantas podem desenvolver mecanismos que diminuem os efeitos da falta de água, capazes de ser transmitidos geneticamente. No entanto, Mazzafera & Carvalho (1987) observaram que é importante correlacionar a produtividade dos cafeeiros com condições de deficiência hídrica, uma vez que muitas progênies tolerantes à seca apresentam baixas produções.

O potencial hídrico foliar é uma medida do grau de hidratação de uma planta e, assim, fornece um índice relativo do estresse hídrico a que a planta está submetida (Taiz & Zeiger, 2004). O potencial hídrico foliar antemanhã, medido antes do nascer do sol, quando a planta não estiver transpirando, é um parâmetro indicativo do armazenamento da água no solo, uma vez que há tendência de equilíbrio entre as condições hídricas da planta e solo (DaMatta & Rena, 2001; Silva et al., 2001).

O estado de água nos diversos órgãos das plantas é uma propriedade dinâmica afetada pelo balanço entre a perda do vapor d'água pelas folhas para a atmosfera e a absorção de água pelas raízes. As taxas de transpiração, de fotossíntese e de crescimento são afetadas pelas alterações no estado hídrico das plantas. Um dos meios para caracterizar o estado hídrico nas plantas é a avaliação do potencial de água (Angelocci, 2002).

Segundo Tobin et al. (1999), o potencial hídrico de uma planta varia amplamente conforme a espécie, a época do ano e o horário do dia, sendo menor na época seca e em torno do meio dia, quando a transpiração é mais intensa. O potencial da água na folha, medido antes do nascer do sol, é um parâmetro indicativo do armazenamento de água no solo, uma vez que há tendência de equilíbrio entre as condições hídricas da planta e do solo (Silva et al., 2003).

## **2.7 Medição do potencial hídrico da planta**

Uma grande diversidade de procedimentos é utilizada para a medida do potencial da água em tecidos vegetais. A maioria dos métodos para estimativa do potencial da água envolve determinações da pressão de vapor da água em equilíbrio, ou o uso de câmara de pressão. Os sensores utilizados na técnica de medida da pressão de vapor da água em equilíbrio, comumente psicrômetros, são adequados para a maioria dos materiais vegetais, e são considerados precisos. No entanto, requerem equipamentos complementares de difícil acesso, necessitam de longo tempo de equilíbrio, e geralmente são inadequados para uso no campo. O método da câmara de pressão é apropriado para medição do potencial da água, mas é necessário tomar precauções para que seja confiável (Marur, 1993).

Na planta, a avaliação do potencial hídrico é feita geralmente com base na medição do potencial hídrico foliar. Entretanto, nesse método, algumas limitações vêm sendo observadas, como o grande número de amostragens (método gravimétrico) e observações pontuais (potencial de água na folha).

Segundo Cairo (1995), a metodologia mais simples e tradicional é a descrita por Scholander et al. (1965), conhecida como método da bomba de pressão. Nesse método, uma folha, após destacada da planta, é imediatamente colocada em um recipiente constituído de material com resistência suficiente para suportar pressões de gás bastante elevadas. A posição da folha no cilindro

deve ser invertida, de maneira que apenas o pecíolo fique para fora, atravessando um pequeno orifício revestido de borracha na tampa, a qual deve ser vedada e impermeável. Um gás, como o nitrogênio, é introduzido lentamente na câmara, onde o aumento de pressão do gás faz aparecer o primeiro sinal de expulsão da seiva na extremidade cortada do pecíolo. Essa metodologia é bastante difícil e restrita devido às grandes dimensões físicas e peso da aparelhagem, dependência de gás nitrogênio, subjetividade, além de ser um método destrutivo. Canny (1995) considera que a bomba de Scholander gera valores de tensão de água demasiadamente elevados e que, na verdade, tensões de água de magnitude superior a 1000kPa simplesmente não ocorreriam de maneira estável ao menos nos vasos do xilema das plantas, razão pela qual o autor sugere que os resultados obtidos com a bomba de Scholander seriam, em geral, superestimados.

As medições do potencial da água na folha requerem alguns cuidados, a fim de que os dados obtidos reflitam o verdadeiro estado hídrico da planta. No caso do uso da câmara de Scholander, a pressurização deve ser lenta e deve-se evitar a perda de água após a coleta da folha, acondicionando-a em saco plástico. Além disso, o tempo entre a retirada da folha e a medição deve ser o menor possível. A determinação do ponto de equilíbrio, isto é, quando a seiva inicia a saída do xilema é, por vezes, difícil de ser feita, e depende do tipo de planta, o que pode induzir a erros.

Novos estudos desenvolvidos pela Embrapa Cerrados tratam da suspensão da irrigação durante o período seco do ano, o que possibilita sincronização das floradas do café e proporciona maior uniformidade de maturação da lavoura, aumentando a qualidade do produto. Além disso, estudos apontam que essa suspensão de irrigação promove maior crescimento do cafeeiro e ainda economia de aproximadamente 30% de água. Todo esse trabalho envolve controle de déficit hídrico das plantas, que nada mais é do que manutenção do potencial hídrico foliar, até então determinado pela bomba de

Scholander. Para atacar esse problema, uma sonda de pressão inicialmente utilizada para medir a pressão no interior das células passou a ser inserida no interior dos vasos do xilema para estimar a tensão da água.

Segundo Wei et al. (1999), apesar das enormes dificuldades tecnológicas causadas pela necessidade de inserir tubos capilares no interior de vasos de xilema, sem causar cavitação, conseguiu-se medir tensões de água na planta de até cerca de 600 kPa . No entanto, métodos de aplicação dessa sonda de pressão ou da sonda termoelástica, conforme descrito no documento de patente PI 9906212, são trabalhosos e quase que exclusivamente laboratoriais.

Outro método utilizado na determinação do potencial hídrico foliar é o da determinação do potencial da água por psicrômetros de termopar.

Basicamente, esse aparelho mede a umidade relativa de uma câmara que se encontra em equilíbrio com o potencial da água numa amostra de solo interna a ela, estimando o potencial pela relação termodinâmica da umidade relativa com potencial matricial da água no solo. Seu uso é laboratorial por requerer ambiente controlado para uma correta utilização, porém, é pouco usado devido a limitações que o equipamento apresenta.

## **2.8 Laser**

A descoberta do laser, no final da década de 50, é um marco na história da humanidade. Essa fonte de luz, que permite associar características, como a coerência, a elevada intensidade e o grande direcionamento do feixe emitido, possibilitou avanços nas telecomunicações, na indústria, na medicina, nas operações militares e na pesquisa científica das mais diversas áreas do conhecimento.

A palavra LASER é a sigla de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que significa "ampliação de luz por meio da emissão à radiação estimulada". O laser é formado por um feixe de luz coerente que se

concentra numa área pequena e bem definida. Praticamente não existe dispersão – espalhamento, possibilitando um certo controle, além de ser quase-monocromática, o que o torna um excelente instrumento de uso científico e tecnológico.

A luz laser é monocromática, já que a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido são as mesmas. Portanto, se verificar o espectro da luz laser, vê-se apenas uma linha, mostrando que ela é composta de apenas um comprimento de onda, enquanto uma fonte de luz incandescente é formada por vários comprimentos de onda.

O feixe resultante, que é constituído de ondas caminhando na mesma direção, é bastante estreito ou seja, todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão. Essa característica é extremamente importante para uma série de aplicações.

O laser é coerente, pois a radiação é espacialmente coerente, se as ondas sucessivas da radiação estão em fase, e temporalmente coerente, se os trens de onda têm todos a mesma direção e o mesmo comprimento de onda.

Por suas propriedades especiais, o laser é hoje utilizado nas mais diversas aplicações: médicas (cirurgias), regenerador e analgésico, industriais (cortar metais, medir distâncias), pesquisa científica (pinças ópticas, hidráulica, física atômica, óptica quântica, resfriamento de nuvens atômicas, informação quântica), comerciais (comunicação por fibras ópticas, leitores de códigos de barras), e mesmo em nossas casas (aparelhos leitores de CD e DVD).

## **2.9 Speckle Dinâmico**

A descoberta do laser e as inúmeras aplicações daí decorrentes deram novo impulso às pesquisas no campo, pois, se por um lado temos a coerência, por outro, temos, de maneira inevitável, o surgimento do *speckle*. O *speckle*, que é um granulado luminoso, foi interpretado como mero ruído óptico indesejável.

Todavia, pesquisas dirigidas no sentido de minimizá-lo logo demonstraram que ele era portador de informações sobre a superfície.

Caso os elementos espalhadores da superfície estejam em movimento, o padrão *speckle* resultante também evolui no tempo, dando origem ao *speckle* dinâmico.

*Speckle* dinâmico é uma expressão temporal do padrão de *speckle*, em que os dispersores responsáveis pela formação da figura de interferência, na situação estática, passam a ser responsáveis pelas mudanças dessa figura, com os grãos variando o nível de intensidade (nível de cinza), bem como sua forma. A figura estática passa a ter mudanças que, se analisadas no tempo, representam o nível de atividade do material iluminado. O efeito visual é um fervilhamento.

Em materiais biológicos, o *speckle* dinâmico é também conhecido como biospeckle, permitindo a análise da atividade biológica ou mapeamento dessa em diversas aplicações, como em sementes, fungos, frutos, fluxo sanguíneo, parasitos, filmes biológicos, sorvetes, raízes e sêmen, entre outros. As aplicações do *speckle* dinâmico em materiais não biológicos também são muitas, entre elas na análise de secagem de pinturas, de monitoramento de géis e espumas, e de corrosão.

Apesar de haver uma tradução tanto para *speckle* (granulado) como para *speckle* dinâmico (fervilhamento), os termos originais são notórios e, portanto, adotados também neste trabalho.

O fenômeno biospeckle ou *speckle* dinâmico é o resultado da observação da atividade biológica de um material iluminado pelo laser. O material biológico muda sua constituição ou posição ao longo do tempo e, ao ser iluminado pelo laser, ocorre a formação, em qualquer ponto do espaço, de um padrão de interferência, produzindo o *speckle*. Com uma câmera, os pesquisadores capturam esse padrão em mudança, que pode ser correlacionado com o nível de atividade biológica do material iluminado.

### **2.9.1 Aplicações do *speckle* dinâmico**

São várias as aplicações da utilidade do *speckle* dinâmico (Rabal & Braga Júnior, 2008). Entre elas, pode-se destacar os trabalhos de Braga Júnior (2000), que verificou a possibilidade do uso da técnica de biospeckle em sementes, para monitorar a atividade biológica, e de Rodrigues et al. (2002), que verificaram a possibilidade de diferenciar sementes de diferentes espécies em um mesmo grau de umidade.

Nascimento (2005) trabalhou com três espécies de sêmen: ovino, equino e canino, com a finalidade de desenvolver uma metodologia para sua análise.

Rodrigues (2007) trabalhou com a quantificação do Padrão de *biospeckle* por modelos baseados na entropia probabilística em sementes de feijão com diferentes teores de água.

Silva (2000) estudou o processo de secagem de pinturas baseado no fenômeno do *speckle* dinâmico, buscando medir o tempo de secagem de pinturas utilizando algoritmos computacionais distintos operando sobre as intensidades contidas nos arquivos de padrão digitalizados de *speckle* dinâmico.

Enes et al. (2004) procuraram diferenciar, em suas pesquisas, tecidos vivos de tecidos mortos em sementes de feijão.

Shimabukuro et al. (2005) verificou a possibilidade do uso do laser para determinar a umidade do solo. Pelos resultados, verifica-se um potencial significativo em usar a técnica do biospeckle como mais um parâmetro indicador de umidade do solo.

Arizaga et al. (1999) propuseram a utilização de outro método para caracterizar a evolução temporal do *speckle*, baseado no número de ocorrências da transição de intensidades de elementos (pixels) vizinhos na imagem do *speckle*.

Silva et al. (2005) avaliaram padrões do *speckle* em função da textura da madeira de três espécies nativas.



Outros pesquisadores trabalharam com a atividade microbiológica, fluxo sanguíneo (Dainty, 1970; Asakura & Takai, 1981; Oulamara et al., 1999; Ruth, 1987) e corrosão de metais (Muramatsu et al., 1997). Seitz (1979) afirmou que o efeito da luz em algumas faixas de frequência não afeta a velocidade das correntes citoplasmáticas, nem a atividade dos cloroplastos.

O laser pode também ser utilizado como ferramenta de intervenção e provocação do tecido iluminado em trabalhos como os de Vasilenko (1992), Toth et al. (1993), Drozd (1994) e Dudin et al. (1995), que mostraram a viabilidade de uso do laser como agente capaz de influenciar o metabolismo de sementes, entre outros.

Trabalhos como monitoramento da atividade da semente, Braga Júnior et al. (2003); presença e fungos em sementes, Braga Júnior et al. (2005); danos em frutos Pajueto et al. (2003); e manutenção de laranjas, Rabelo et al. (2005), são exemplos do uso dessa metodologia, sempre com a consideração da não influência do laser nos resultados.

## **2.10 Laser aplicado ao estudo de material biológico**

Segundo Rabal et al. (1998), o *speckle* pode ser notado quando se ilumina, com luz laser, material biológico, como, por exemplo, sementes, folhas ou fenômenos não biológicos, como a secagem de pintura, entre outros. O biospeckle deve ser analisado com técnicas de processamento de imagens e tratamento estatístico, já que a observação visual permite apenas a identificação da existência do fenômeno, mas não permite quantificá-la.

A introdução do *speckle* dinâmico como fenômeno capaz de mensurar a atividade biológica em tecidos animais e vegetais tem referido um grande avanço desde a década de 1970, quando Briers (1975) propôs a medição da microcirculação do sangue em tecido humano. Nos trabalhos que se seguiram buscou-se dominar a técnica, além de descobrir novas aplicações para o uso do

laser e do *speckle* dinâmico como instrumento de medição da atividade biológica.

A combinação, atualmente disponível, de sistemas de aquisição e processamento digital de imagens, constitui uma ferramenta importante para os pesquisadores desenvolverem novas técnicas de avaliação não destrutivas.

Segundo Bergkvist (1997), os materiais biológicos apresentam uma característica peculiar em relação aos outros materiais, uma vez que eles, apresentam-se como meios de grande dispersão da luz. Esses materiais apresentam uma grande complexidade no que se refere à interação da luz com seus diversos constituintes, o que é amplificado pela complexa movimentação interna. Essa movimentação, proveniente da atividade metabólica, pode ser maior ou menor, dependendo do estágio de maturação, crescimento ou deterioração do material biológico, bem como da quantidade de água, temperatura e iluminação. A água é um constituinte básico de materiais biológicos, não absorve a luz do laser de HeNe a 632nm. Em experimentos, e de forma intuitiva, observa-se que a umidade está relacionada com a transmissão da luz pelo material biológico.

### **2.11 Métodos de Análise do *Speckle* dinâmico**

São vários os métodos de análise do *speckle* dinâmico, entre eles podem-se destacar o Momento de Inércia, o Método do Contraste, e o da Autocorrelação, como ferramentas que apresentam resultados numéricos. Entre os métodos que apresentam resultados visuais, podem ser destacados os de Fujii, e Diferenças Generalizadas. Porém, o mais utilizado pelos pesquisadores é o Momento de Inércia quando se deseja uma quantificação das informações requeridas da mudança do padrão de *speckle* formado durante uma observação.

### 2.11.1 Momento de Inércia

O Momento de Inércia é um método estatístico de segunda ordem que classifica a atividade do material, por meio de um número adimensional. Assim, o que importa é correlacionar os valores do Momento de Inércia em um material que varia sua atividade. Na Figura 1 verificaram-se imagens secundárias que são formadas com o conjunto de padrões de *speckle* no tempo.

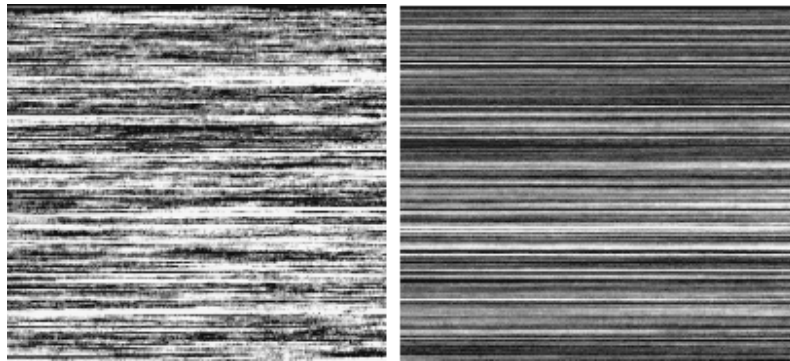


FIGURA 1 Padrão de um *speckle* de alta e baixa atividade, respectivamente.

O Momento de Inércia é obtido pela transformação das imagens do biospeckle em uma matriz de ocorrência (MOC) espaço por tempo, constituída pelo conjunto de imagens coletadas em instantes diferentes, denominada de STS (“Spatial Temporal *Speckle*”), proposta por Oulamara et al. (1989) e Xu et al. (1995), citado por Rabelo (2000). Esse método forma uma matriz com as ocorrências de intensidades sucessivas, definida pela Equação 2.1.

$$\text{MOC} = [ N_{ij} ] \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que:

MOC – matriz de ocorrência

$N_{ij}$  - número de ocorrências de intensidades

$i, j$  – valores de intensidades sucessivas

Nessa equação,  $N_{ij}$  representa uma lógica que identifica quantas vezes ocorreu a intensidade  $i$ , seguida da intensidade  $j$ , e em uma matriz de  $256 \times 256$  (em que de 0 a 256, tem-se a faixa de intensidade codificadas em 8 bits), faz-se o cômputo de todas as ocorrências. Uma vez montada a MOC, observa-se que a diagonal principal está relacionada com intensidades que não variaram no tempo, enquanto fora dela aparecem as ocorrências que caracterizam uma mudança no tempo. Dessa forma, quanto mais afastado da diagonal principal estiver a ocorrência, maior a mudança na intensidade do pixel  $i$  para o pixel  $j$ . Assim, com a matriz de ocorrência, é possível analisar o nível de alteração do *speckle* observado no tempo (Figura 2).

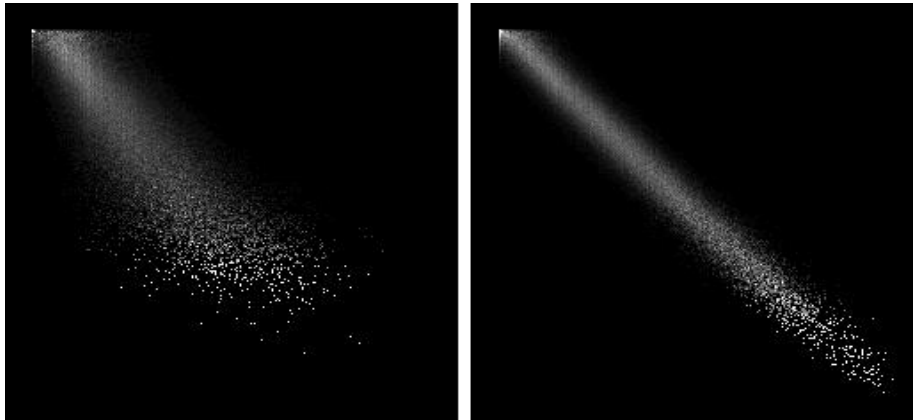


FIGURA 2 Matriz de ocorrência de alta e baixa atividade, respectivamente.

Como o interesse é quantificar a mudança do padrão de *speckle*, a MOC é utilizada para obter o momento de segunda ordem, denominado de Momento de Inércia (MI). A quantificação consiste no somatório dos produtos dos valores de intensidade da matriz pelo quadrado da distância entre cada elemento da matriz e a diagonal principal (Arizaga et al., 1999b). Numericamente, pode ser avaliado, segundo pela Equação 2.2:

$$MI = \sum N_{ij} (i - j)^2 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Em que:

MI – momento de inércia

i – intensidade luminosa (linha)

j – intensidade luminosa (coluna)

$N_{ij}$  – número de ocorrência, valor da matriz na posição (linha i, coluna j)

Exemplo prático para uso ou entendimento do Momento de Inércia pode ser encontrado em Rabelo (2000).

### **2.11.2 Fujii**

A metodologia utilizada pelo Método de Fujii baseia-se na mesma filosofia adotada para o Método de Diferenças Generalizadas, apenas com uma mudança no tratamento do padrão, na qual ocorre uma ponderação das diferenças (Fujii et al., 1985; Aizu & Azakura, 1991).

O método de Fujii baseia-se no cálculo da visibilidade entre os pixels de imagens gravadas ao longo do tempo. Nesse método, o que se faz é realizar uma soma das diferenças de intensidade entre uma imagem e a sua subsequente como Arizaga et al. (1998) apresentaram na proposta do método de diferença generalizadas. O resultado será uma nova imagem com um clareamento dos

pixels que apresentarem mudanças de intensidade. Matematicamente, o procedimento para a construção do mapa de Fujii é descrito pela Equação 2.3:

$$I(x,y) = \sum_{K=1}^N \left| \frac{I_K(x,y) - I_{K+1}(x,y)}{I_K(x,y) + I_{K+1}(x,y)} \right| \quad (\text{Equação 2.3})$$

Em que  $I(x,y)$  é a matriz que representa em níveis de cinza o resultado da soma das diferenças das imagens  $I_k$  e sua subsequente  $I_{k+1}$  até completar o número  $N$  de imagens coletadas.

A partir do cálculo da Equação 2.3, uma nova imagem é construída. Assim, os pixels de regiões onde não houve alterações de intensidade ao longo do tempo assumem valor nulo no mapa final, enquanto zonas em que os pixels sofreram grandes alterações assumem valores mais altos. Dessa maneira, a imagem resultante apresenta pontos claros nas zonas de grande atividade e pontos escuros naquelas de baixa atividade.

Exemplo prático para uso ou entendimento do método Fujii pode ser encontrado em Braga Júnior (2000).

### 3 MATERIAL E METÓDOS

#### 3.1 Considerações iniciais

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Laser e Ótica no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

Muitos experimentos foram conduzidos com o intuito de conhecer o comportamento da folha de Café arábica, e estabelecer uma linha básica de conduta. Os experimentos foram realizados na seguinte ordem: correlacionamento da transmissão da luz pela folha com a perda de água ao longo do tempo, interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica, determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação laser incidido na folha, investigação da viabilidade do uso do Momento de Inércia, comparação de metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro, comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água na folha do Café arábica ao longo do tempo.

Foram utilizados um microcomputador com 128 MB de memória ram, processador AMD Duron de 1,7 GHz e sistema operacional Microsoft Windows Millenium, aplicativos computacionais para processamento de imagens, como o ImageJ.1.37, Scilab 4.0, uma fonte de laser He-Ne, com potência de saída do feixe de 10 mW e comprimento de onda de 632.8 nm, uma câmara CCD (“Charge Coupled Device”) de 640 x 480 pixels, câmara de Scholander e plantas de Café arábica, variedade Mundo Novo.

### **3.2 Correlacionamento da transmissão da luz pela folha com o conteúdo de água ao longo do tempo**

Essa etapa foi de fundamental importância para o início dos trabalhos, em que se procurou conhecer o comportamento da área do *speckle* dinâmico com relação à perda de água ao longo do tempo.

Definiu-se também uma configuração experimental que serviria de base para os outros experimentos com pequenas modificações (Figura 3), sendo que a iluminação artificial do laboratório ficava sempre apagada, com exceção do experimento, que utilizou como atributo luz coerente e não coerente. Uma das grandes vantagens do biospeckle é a simplicidade e baixo custo de sua montagem experimental. Essencialmente, os equipamentos requeridos consistem em um laser (cuja potência, em geral, não necessita ser elevada), uma câmara CCD e um computador.

Foram selecionadas duas mudas de Café arábica e essas foram saturadas com água e deixadas por 20 dias abrigadas da chuva e sem irrigação. As mudas de café ficaram abrigadas da chuva dentro de um laboratório.

Escolheu-se uma folha para ser iluminada, conforme a Figura 3. A folha não foi retirada da planta. A iluminação foi realizada em torno de 11:30 h durante os 20 dias. De cada iluminação, foram captados dois tipos diferentes de imagem, Fujii e imagens digitalizadas apresentadas na Figura 4. Com base nessas imagens, fez-se o cômputo de área do *speckle* dinâmico por meio do programa ImageJ.1.37, utilizando 3 abordagens distintas, sendo utilizadas a ferramenta *Binary* e 2 metodologias de *Thershold*, conforme Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Obtiveram-se 3 valores de área do *speckle* dinâmico para cada tipo de imagem a cada dia, totalizando 240 áreas para as 2 plantas. O comportamento do valor de área ao longo dos 20 dias foi agrupado em função do tipo de imagem e abordagem utilizadas.



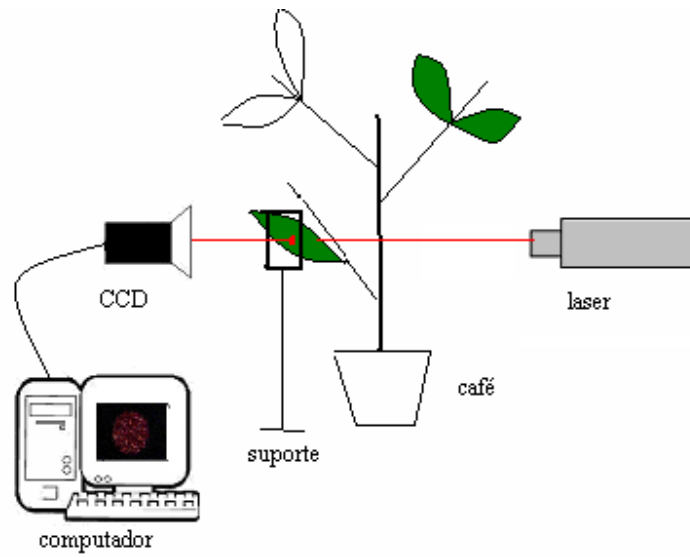


FIGURA 3 Arranjo experimental para a iluminação da folha de Café arábica.

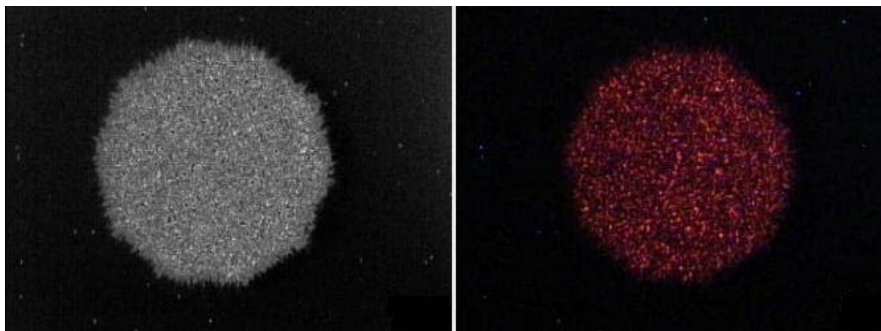


FIGURA 4 Imagem Fujii e imagem digitalizada, respectivamente.

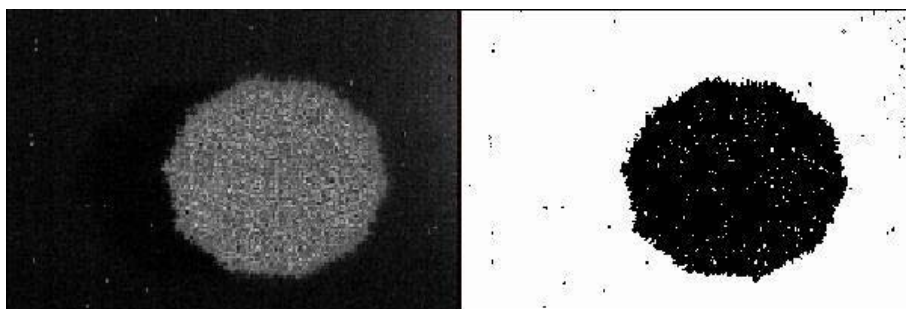


FIGURA 5 Imagem Fujii, 3<sup>a</sup> metodologia *Binary*, respectivamente.

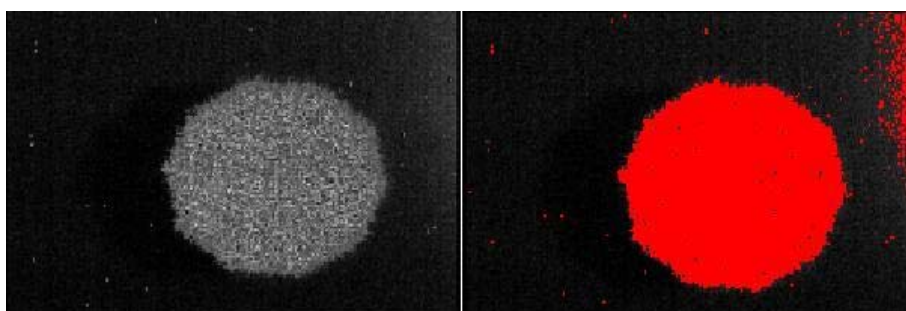


FIGURA 6 Imagem Fujii, 1<sup>a</sup> metodologia *Threshold*.

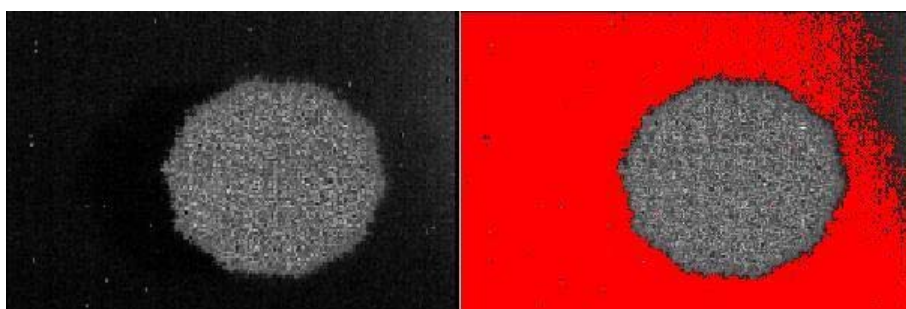


FIGURA 7 Imagem Fujii, 2<sup>a</sup> metodologia *Threshold*.

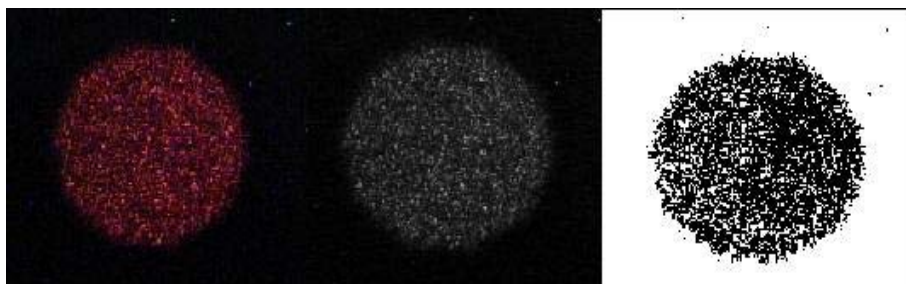


FIGURA 8 Imagem digitalizada, 3ª metodologia *Binary*, respectivamente.

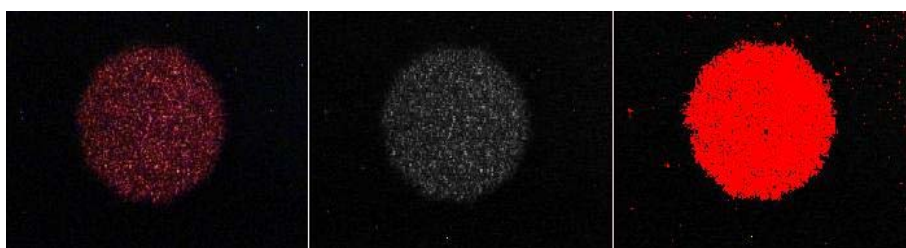


FIGURA 9 Imagem digitalizada, 1ª metodologia *Threshold*.

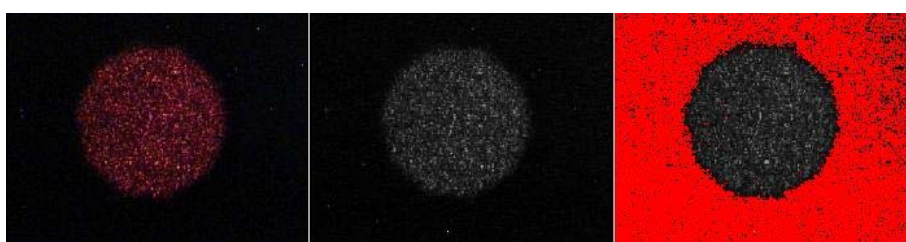


FIGURA 10 Imagem digitalizada, 2ª metodologia *Threshold*.

### **3.3 Interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica**

A influência da luz coerente e não coerente ao longo do tempo de iluminação na folha do Café arábica foi verificada por meio de duas abordagens, sendo a primeira adotando o laser como a única fonte de iluminação direcionada na folha, e a segunda utilizando o laser e uma fonte de luz não coerente que ilumina todo o ambiente. Utilizou-se como luz não coerente 4 lâmpadas fluorescentes de 40W, totalizando 160W. As configurações experimentais dessas duas abordagens diferenciaram-se na presença ou ausência de luz não coerente no laboratório e no processamento de imagens. A configuração experimental utilizada é a mesma da Figura 3, com apenas uma diferença - presença de luz não coerente.

#### **3.3.1 Aquisição de imagens**

Foi selecionada uma folha do cafeeiro que foi fixada em um suporte sem ser retirada da planta. Uma face da folha foi iluminada com o laser e na face oposta foi colocada a câmera CCD, que capturou as imagens, formando os padrões do *speckle*. As imagens foram processadas pelo método proposto por Fujii et al. (1985).

O laser foi ligado uma hora antes do início da iluminação. Foram utilizados 20 pontos de análise no tempo em abordagem, sendo o primeiro ponto foi captado depois de 30 segundos do início da iluminação, e o segundo após 3 minutos; e a partir desse ponto, até o décimo sexto ponto, utilizaram-se intervalos de 3 minutos entre cada avaliação; do décimo sexto ponto até o vigésimo ponto, os intervalos foram de 15 minutos, totalizando 105 minutos de iluminação. Para cada ponto, as imagens foram processadas pelo método de Fujii et al. (1985).

#### **3.3.2 Processamento de imagens**

Para cada abordagem, foram adquiridas 20 imagens processadas pelo método Fujii. De cada imagem, fez-se o cálculo da área do *speckle* dinâmico e o cálculo dos níveis de cinza, totalizando 40 resultados para cada abordagem. Como foram realizados 2 abordagens, obtiveram-se 80 resultados.

Foram utilizados o método de somatório dos níveis de cinza das imagens provenientes do processamento pelo método de Fujii utilizando o software Scilab 4.0<sup>TM</sup> e o método do cálculo de área do *speckle* pelo *software* ImageJ1.37 para processar as vinte imagens de cada abordagem.

Através do *SIP, toolbox* instalado no Scilab 4.0<sup>TM</sup>, foi possível o cálculo do somatório dos níveis de cinza nas imagens .BMP por meio da função *gray\_imread*.

Para o cálculo da área do *speckle* dinâmico utilizando a abordagem com adição da luz não coerente, foi utilizada a seguinte estratégia: transformação da imagem para 8 bits, utilização da função *Find Edjes*, proporcionando um bom contraste das bordas do *speckle*, binarização e uso da função *Dilate*. O processo pode ser observado na Figura 11.

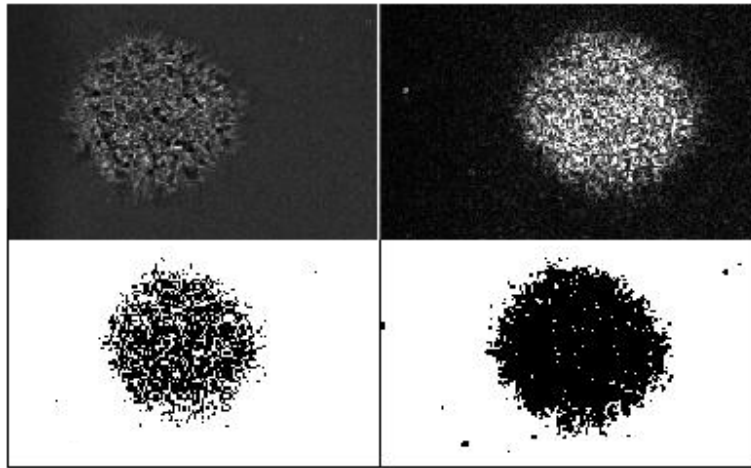


FIGURA 11 Procedimentos para o cálculo de área na abordagem com adição de luz.

Já no cálculo da área do *speckle* dinâmico utilizando a abordagem sem adição da luz não-coerente, foi utilizada apenas a ferramenta *Binar,y* que limiariza a imagem segmentando-a do fundo e permitindo o cálculo da área do *speckle* dinâmico ( Figura 12).

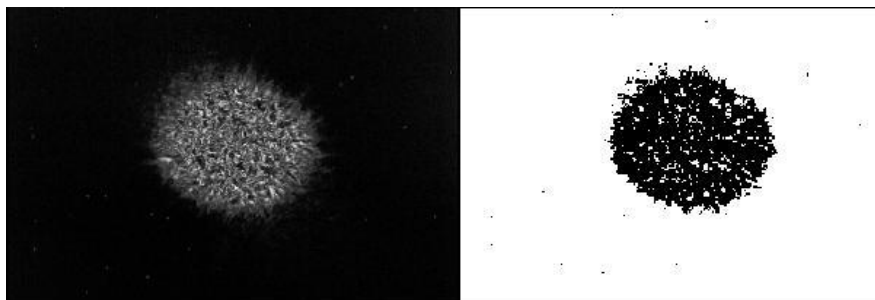


FIGURA 12 Procedimentos para o cálculo de área na abordagem sem adição de luz.

### **3.4 Determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação laser incidindo na folha**

Dada a grande variabilidade das características fisiológicas na superfície das folhas de Café arábica, foi necessário verificar a interferência nas diferentes posições de iluminação laser incidindo na folha.

Neste experimento, foi utilizado um cafeeiro instalado em um vaso e desse foi selecionada uma folha. As duas faces dessa folha foram iluminadas utilizando a configuração experimental da Figura 3. Neste experimento, as iluminações foram direcionadas em 5 locais específicos da folha. A face superior (ventral) foi representada pela letra A e face inferior (dorsal), pela letra B. O critério de seleção desses locais foi em função da diferenciação do tecido, isto é, do sistema vascular visível. Com o auxílio de uma lupa, escolheu-se um ponto onde não era possível a visualização de nervuras primárias e secundárias na folha e 4 pontos sob nervuras de diferentes espessuras. Foi estipulado um nome para cada ponto, sendo esses, sem nervura, mininervura, subnervura, nervura média e nervura grossa. As faces A e B foram iluminadas em 7 pontos cada uma. De cada ponto, foi coletada uma imagem do tipo Fujii, que foi binarizada, formando outra imagem. Essas duas imagens estão apresentadas na Figura 13.

Das imagens Fujii fez-se o somatório dos níveis de cinza e das binarizadas, o cômputo da área do *speckle* dinâmico. Para o cálculo dos níveis de cinza, foi utilizando o *software* Scilab 4.0<sup>TM</sup> e, para o método do cálculo de área do *speckle* dinâmico, o *software* ImageJ1.37, totalizando 28 resultados.

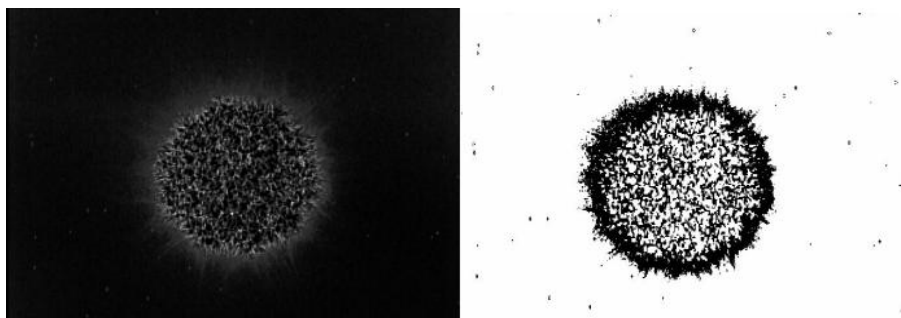


FIGURA 13 Imagem Fujii e imagem binarizada, respectivamente.

### **3.5 Viabilidade do uso do Momento de Inércia**

Visando avaliar a viabilidade do uso do Momento de Inércia, escolheram-se mudas de café com folhas de vários tipos de tonalidade.

O experimento foi conduzido utilizando duas mudas de Café arábica, sendo que de cada uma foi iluminada uma folha verde e uma folha amarela. Em cada folha, foram captadas imagens STS em 5 pontos diferentes, totalizando 10 imagens STS provenientes de folhas verdes e 10 imagens provenientes de folhas amarelas. Na Figura 3 representa-se a configuração experimental utilizada.

### **3.6 Comparação das metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com metodologia padrão**

Neste experimento utilizaram-se 40 plantas de Café arábica. A fim de permitir um controle de umidade, essas plantas foram colocadas em uma estufa coberta de plástico semitransparente.

As plantas foram separadas em 2 conjuntos de 5 grupos, cada grupo com 4 plantas. Em cada grupo, foi instalado um sensor matricial (Watermark), buscando manter a tensão de água no solo dos vasos dentro de um limite pré-



determinado para cada grupo. Foram registradas as leituras do sensor de cada grupo.

As tensões de água foram escolhidas de forma que cada conjunto representasse tensões próximas do ponto de murcha permanente (PMP) até a capacidade de campo (CC). Sendo assim, fez-se um controle diário de irrigação até conseguir um equilíbrio. Através de uma estação meteorológica, foi controlada a temperatura do ambiente.

O experimento foi realizado em 4 dias, nos dois primeiros dias coletaram-se folhas das plantas de um conjunto e nos dias restantes folhas do outro conjunto. A coleta iniciou-se às 5h30 (horário de verão) e foram coletada 3 folhas por planta por dia, totalizando 60 folhas. As folhas de cada planta foram colocadas em envelopes de alumínio classificados quanto ao grupo das tensões e quanto ao número de cada planta dentro do grupo.

Os envelopes foram armazenados em uma caixa de isopor com gelo para manter inalteradas as propriedades das folhas por mais tempo. As folhas foram transportadas para o laboratório de laser, onde foram iluminadas (Figura 14) e, em seguida, levadas ao laboratório ao lado onde o potencial hídrico de cada folha era determinado utilizando-se uma bomba de pressão PMS 1003 (PMS.Instruments.Co) segundo Scholander et al. (1965) Figura 15. No Anexo F, encontram-se fotos desses experimentos.

Nas análises com o laser, utilizaram-se três atributos diferentes: o cálculo de área do *speckle* dinâmico, o somatório dos níveis de cinza e o Momento de Inércia. O cálculo de área *speckle* dinâmico e o somatório dos níveis de cinza foram executados no 1º e 3º dias do experimento, quando se obtiveram imagens do tipo Fujii na iluminação. No 2º e 4º dias, foram adquiridas imagens do tipo STS e, com base nelas foram calculados os Momentos de Inércia. As imagens Fujii e STS estão apresentadas na Figura 16. Para o cálculo dos níveis de cinza, foi utilizado o *software* Scilab 4.0<sup>TM</sup> e, para o

método do cálculo da área do *speckle* dinâmico, o *software* ImageJ1.37. Para o cálculo do Momento de Inércia, foi utilizadas as imagens STS.

Nesse experimento foram adquiridos 240 resultados do potencial hídrico foliar, 120 resultados da área do *speckle* dinâmico, 120 resultados dos níveis de cinza e 120 resultados do Momento de Inércia.

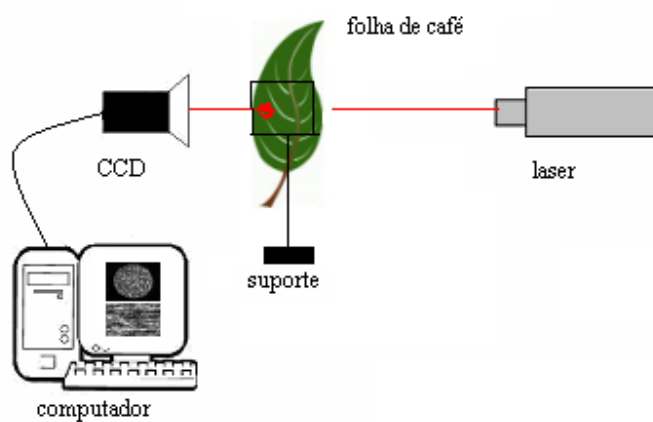


FIGURA 14 Configuração experimental utilizando laser.

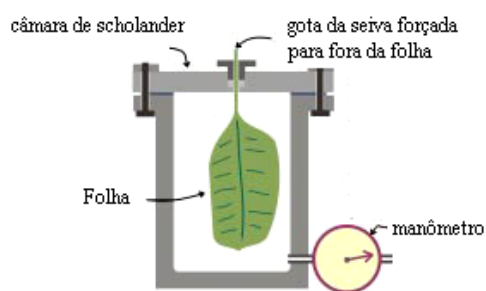


FIGURA 15 Configuração experimental da câmara de Scholander.

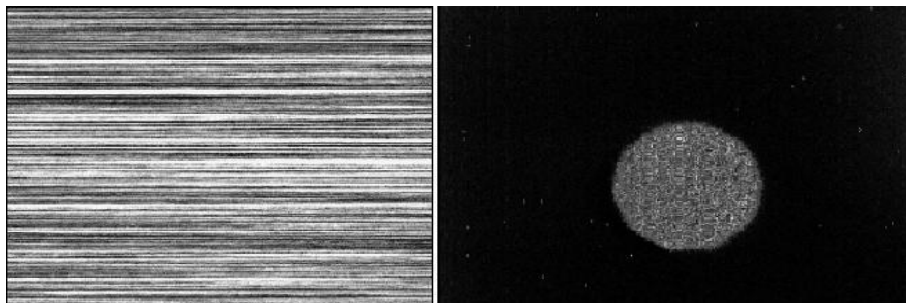


FIGURA 16 Imagem STS e imagem Fujii, respectivamente.

### **3.7 Comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo**

Neste experimento, objetivou-se avaliar a influência do Momento de Inércia diante da perda de água ao longo do tempo e foi de fundamental importância para os resultados finais do trabalho. A configuração experimental utilizada nesta etapa foi a mesma da Figura 3.

Neste experimento, utilizaram 10 mudas de Café arábica. Sendo essas plantas divididas em 2 grupos. Um grupo foi saturado com uma concentração salina de 6 dS e no outro grupo não houve acompanhamento de saturação, o qual foi apenas molhado com água. De cada planta, foram selecionadas 3 folhas, e de cada folha foram iluminados 3 pontos distintos, totalizando 45 pontos. O experimento foi realizado em 5 dias consecutivos, totalizando 225 pontos iluminados do grupo utilizando a concentração salina e 225 pontos sem acompanhamento de saturação.

O experimento foi realizado no período noturno, tendo início às 19 horas. As mudas ficaram durante todo o experimento numa estufa, salvo nos horários de iluminação, as quais eram encaminhadas ao laboratório de laser. O objetivo de colocar as mudas na estufa era para permitir o controle da umidade.

### **3.7.1 Aquisição de imagens**

As folhas iluminadas foram fixadas em um suporte, sem serem retiradas das plantas. Uma face das folhas foi iluminada com o laser e na face oposta foi colocada na câmera CCD, que capturou as imagens no formato STS (Spatial Temporal Speckle). O laser foi ligado uma hora antes do início da iluminação.

### **3.7.2 Processamento de imagens**

Com base nas imagens STS adquiridas, fez-se o cálculo do Momento de Inércia para cada imagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados do estudo. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Laser e Ótica da Universidade Federal de Lavras, e a configuração experimental básica utilizada no primeiro experimento foi sofrendo alterações, conforme a natureza de cada experimento. O número de amostras, e o tipo de tratamento foi definido a cada experimento conforme o resultado de cada um. Os experimentos foram divididos em etapas, as quais foram:

- Correlacionamento da transmissão da luz pela folha, com a perda de água ao longo do tempo;
- Interferência do laser da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica;
- Determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação laser incidido na folha;
- Verificação da viabilidade do uso do momento de inércia;
- Comparação da metodologia de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com uma metodologia padrão;
- Comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo.

### **4.1 Correlacionamento da transmissão da luz pela folha com o conteúdo de água ao longo do tempo**

Nesta etapa foram analisados os resultados das imagens Fujii e imagens digitalizadas das duas folhas selecionadas. (Figura 17 e Figura 18).

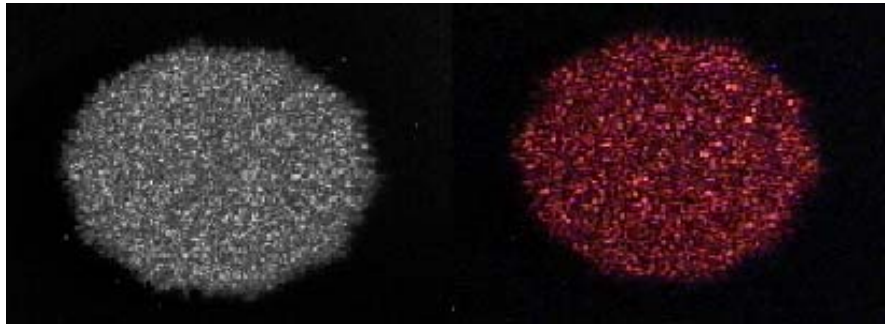


FIGURA 17 Imagens Fujii e imagens digitalizadas da planta A respectivamente.

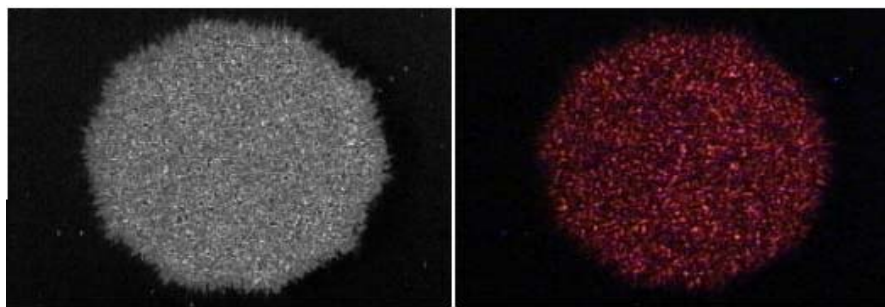


FIGURA 18 Imagens Fujii e imagens digitalizadas da planta B respectivamente.

Foi verificado um decréscimo quase linear na área do speckle dinâmico, conforme a perda de água na folha ao longo do tempo. Como a área do speckle dinâmico é resultado apenas da transmitância da luz laser pela folha, não foi possível estabelecer uma boa correlação dessa com a atividade biológica. Todavia, foi possível correlacionar *speckle* dinâmico com diminuição de água na folha.

Foram analisadas todas as linhas de tendência das curvas de área em função do tempo e todas mostraram um decréscimo do valor da área ao longo

dos dias, conforme a Figura 19 e Figura 20. Em uma análise mais específica, foram comparados os resultados dos dois tipos de imagem pelos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentados. Na Tabela 1, encontram-se os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das imagens digitalizadas e imagens Fujii.

Com relação aos tipos de imagem, as curvas mostraram mais estáveis nas imagens Fujii, que trazem informações tanto da atividade biológica quanto da transmitância da luz laser na folha. Essa estabilidade deve-se ao fato do Método de Fujii ser um bom diferenciador de tecidos, o que proporcionou uma melhor detecção das bordas.

As imagens Fujii tiveram melhores resultados por terem apresentado coeficientes de determinação relativamente maiores, indicando uma maior tendência no decréscimo linear dos valores de área com a perda de água pela muda;

Quanto às abordagens, a binarização, técnica utilizada na 3ª abordagem apresentou melhores resultados nas imagens Fujii, também em função do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O *Threshold* aplicado nas 1ª e 2ª abordagens apresentaram resultados menos eficientes para parâmetros de comparação.

Pelos resultados, verificou-se a capacidade da técnica em seguir a redução de água na folha em função do aumento do estresse hídrico. As variações produzidas nos valores podem ser reduzidas, por exemplo, por meio de técnicas mais avançadas de processamento de imagens provenientes de iluminação laser.

No Anexo B, encontram-se os resultados das análises das áreas das imagens Fujii e imagens digitalizadas utilizadas nas três abordagens.

TABELA 1 Coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Tipo de abordagem / Folha	Imagens PCX ( $R^2$ )	Imagens Fujii ( $R^2$ )
1º/ Folha A	0,3031	0,4407
1º/ Folha B	0,5459	0,5294
2º/ Folha A	0,2455	0,4053
2º/ Folha B	0,2747	0,5102
3º/ Folha A	0,4893	0,4979
3º/ Folha B	0,1723	0,6179

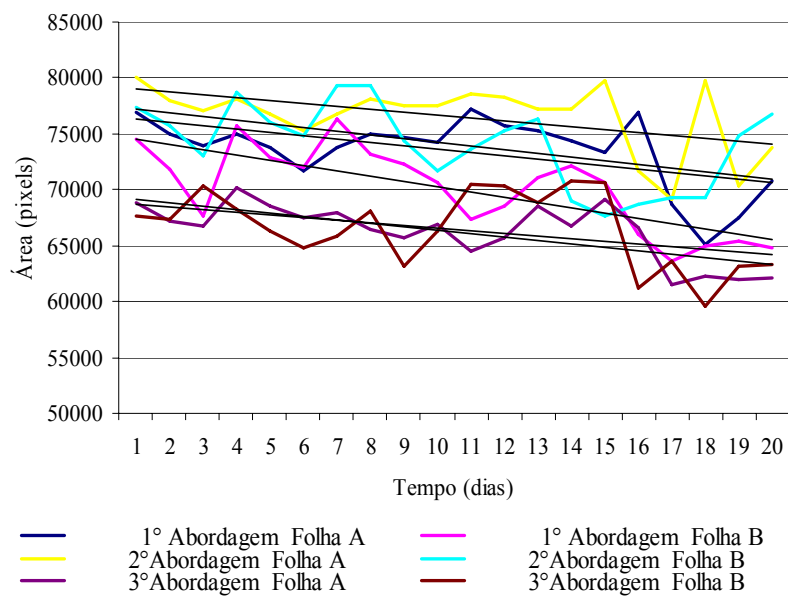


FIGURA 19 Áreas das imagens digitalizadas ao longo do tempo.



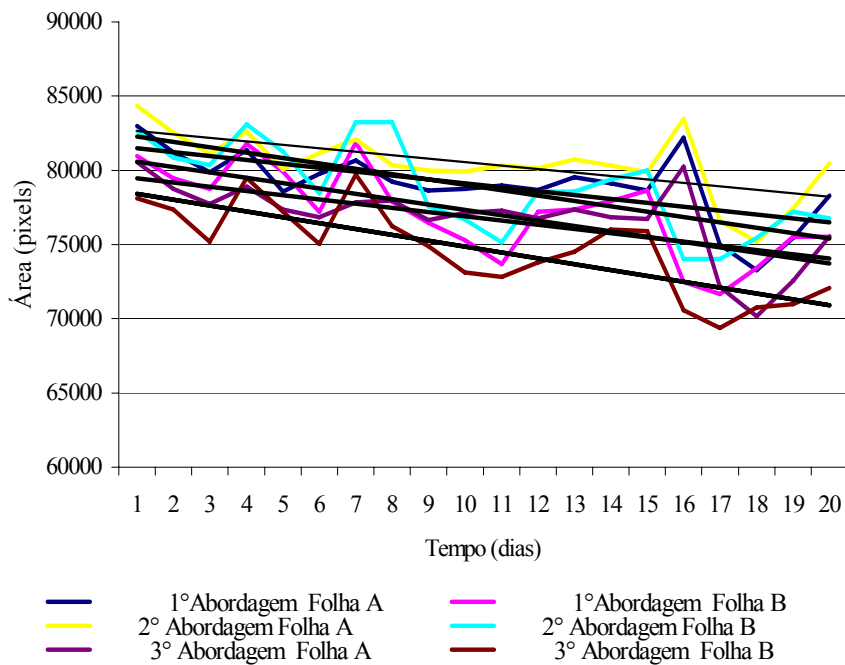


FIGURA 20 Áreas das imagens Fujii ao longo do tempo.

## 4.2 Interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica de uma folha de Café arábica

### 4.2.1 Processamento de imagens

#### 4.2.1.1 Primeira abordagem sem a adição da luz não coerente

O resultado obtido é mostrado na Figura 26, sendo que a sequência de imagens apresenta os passos para seleção da área a ser mensurada. Na Figura 21, é possível observar a imagem obtida pelo método de Fujii et al. (1985) e a binarização.

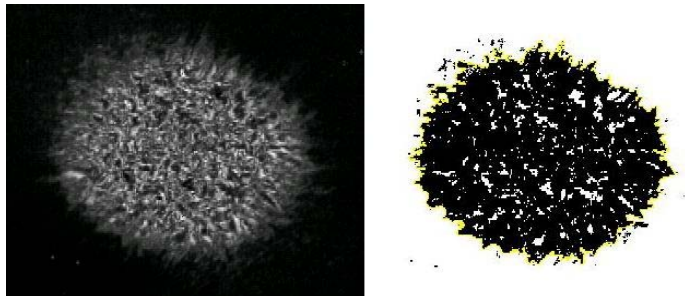


FIGURA 21 Etapas de visualização da imagem Fujii e imagem binarizada, respectivamente.

#### 4.2.1.2 Segunda Abordagem com a adição da luz não coerente

O resultado obtido para esse processamento pode ser observado na Figura 22, que apresenta a imagem no formato .BMP obtida pelo método de Fujii e os passos de utilização da função *Find Edjes*, binarização e uso da função *Dilate* respectivamente.

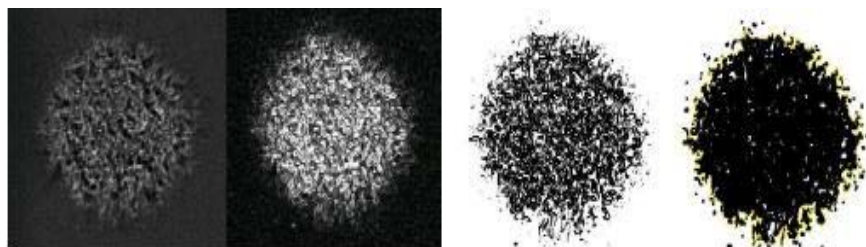


FIGURA 22 Etapas de transformação da imagem após Fujii, após função *Find Edjes*, binarização e uso da função *Dilate*, respectivamente.

#### 4.2.2 Análise do nível de cinza e da área ao longo do tempo nas duas abordagens

Percebeu-se que tanto a área do *speckle* dinâmico quanto os níveis de cinza tiveram uma tendência a manter seus valores constantes. O cômputo da área do *speckle* dinâmico foi a que melhor representou essa tendência, com a menor variação nos valores nos coeficientes de variação (Tabela 2).

Tabela 2 Comparação dos coeficientes de variação.

Coeficientes de variação		
	laser e luz não coerente	laser
Área	1.07%	1.98%
Níveis de cinza	6.45%	3.56%

As Figuras 23 e 24 apresentam abordagens utilizando respectivamente à não injeção de luz não-coerente e injeção, além do laser.

A injeção de luz não coerente gerou dois fenômenos nos gráficos de tendência, que mostram a influência dessa luz no cálculo utilizando o cômputo dos níveis de cinza, que aumentou o patamar da curva de tendência quando mais luz atingia o objeto. Na Figura 24 nota-se que o aumento da atividade da folha expressa apenas pelo nível de cinza, evidenciando a influência de luz na folha nos primeiros momentos de iluminação; porém, somente com uma maior quantidade de luz presente no ambiente e atingindo toda a planta. No anexo C, encontram-se os resultados das análises das áreas do *speckle* dinâmico e dos níveis de cinza das imagens.

Esse acréscimo pode ser observado quando apenas o laser incidia em parte da folha pelo cômputo da área. Esse fenômeno ocorreu em apenas um

ponto inicial, ocasionando um acréscimo de atividade medida em 1%.

Pelos resultados, verifica-se que a incidência do laser não afeta significativamente a atividade da folha, confirmando os experimentos de Seitz (1979).

A iluminação pelo laser em ambiente com a presença de luz natural ou artificial não coerente não afeta o resultado, em especial se o cômputo avaliar a área de atividade.

A redução do patamar da área de atividade com a presença de luz não coerente é devido à necessidade de mais passos que permitiriam a binarização da imagem.

Vale ressaltar que a influência do laser de baixa potência em outros materiais deve ser avaliada, uma vez que não se pode estender os resultados conseguidos pela folha, se considerar aspectos com fotofobia de algumas espécies ou a fotoativação de espécimes, mesmo com pouca luz.

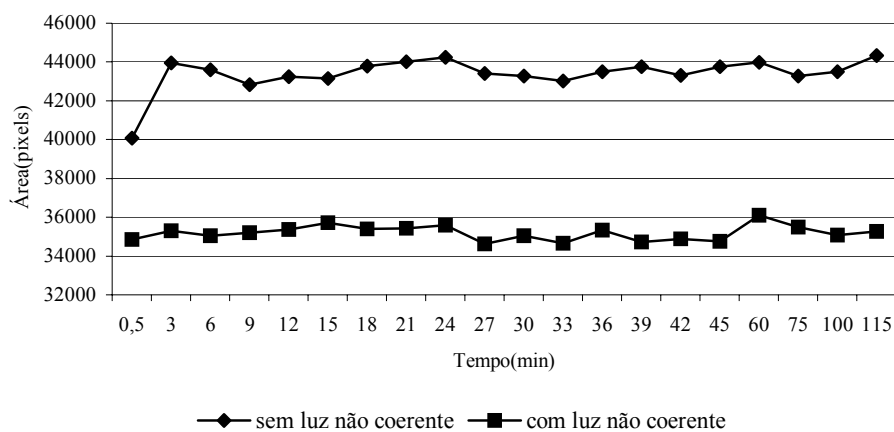


FIGURA 23 Gráfico de comparação das áreas do *speckle* ao longo do tempo com e sem adição de luz coerente.

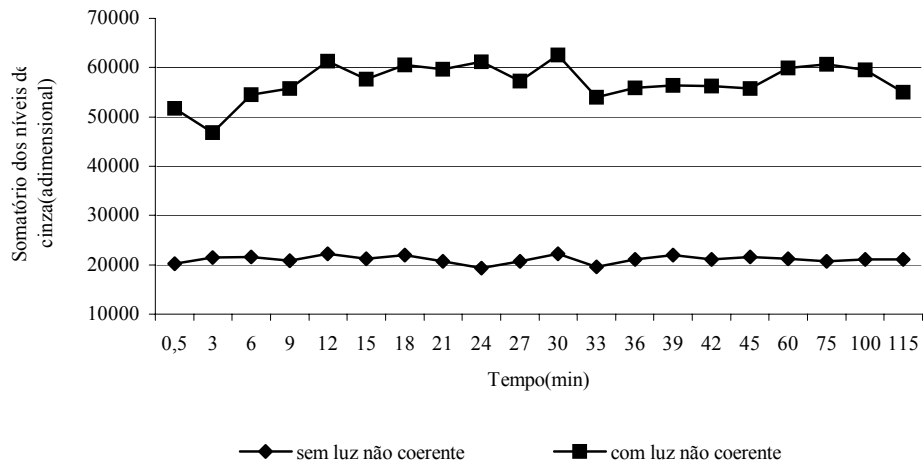


FIGURA 24 Gráfico de comparação dos níveis de cinza do *speckle* dinâmico ao longo do tempo com e sem adição de luz coerente.

#### 4.3 Determinação da interferência nas diferentes posições de iluminação pelo laser incidindo na folha

Encontram-se na Figura 25 as imagens Fujii e binarizadas de todos os pontos de iluminação nas duas faces.

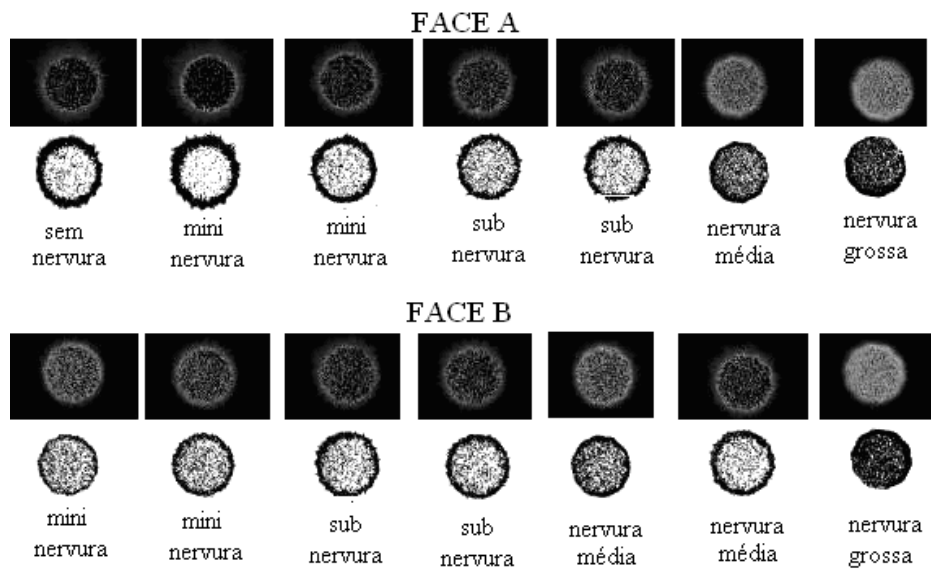


FIGURA 25 Imagens Fujii e binarizadas da Face A e Face B.

Encontra-se na Figura 26 a classificação das nervuras.

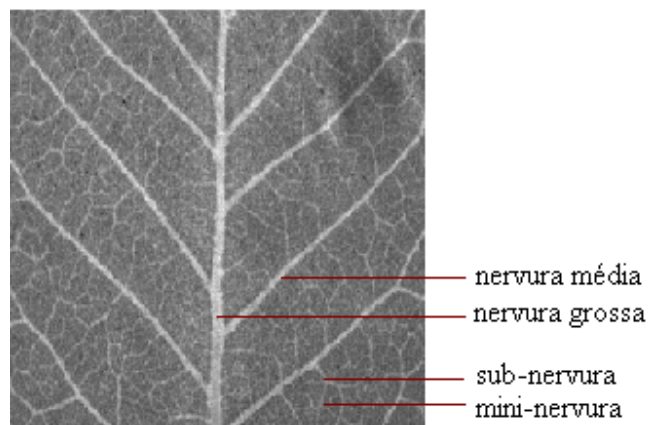


FIGURA 26 Classificação das nervuras.

Percebe-se a diferenciação das imagens nos vários pontos e também nas duas faces iluminadas. Mas, para uma maior precisão, analisou-se o comportamento da área do *speckle* dinâmico e somatório dos níveis de cinza ao longo dos pontos de iluminação.

Na Tabela 3, encontram-se os valores de área do *speckle* dinâmico e níveis de cinza para cada posição de iluminação da folha, conforme indicado na Figura 25. As unidades de área e níveis de cinza são, respectivamente, pixels e unidade adimensional.

TABELA 3 Valores de área e níveis de cinza das 14 diferentes posições de iluminação.

<b>(FACE)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
área(A)	65442	69843	59985	56308	58560	48667	49702
área (B)	48926	53075	57752	56071	49075	57210	49238
nível de cinza (A)	21009	22030	19980	19944	20962	23053	25295
nível de cinza (B)	21905	21101	20517	20292	23917	21333	26407

Os níveis de cinza tenderam a aumentar nas duas faces; já o comportamento da área do *speckle* dinâmico, na mesma situação, foi diferente entre as faces A e B. Tanto a posição de iluminação quanto a face iluminada interferem nos resultados. A fim de reduzir os erros, é recomendado manter os padrões de face e posição.

#### **4.4 Viabilidade do uso do Momento de Inércia**

Um fator preponderante nas observações do biospeckle é a intensidade de luz utilizada. Dessa maneira, quando a intensidade da iluminação da amostra é menor que a sensibilidade do sensor, há perda de informação, que deixa de ser registrada. Por outro lado, quando a iluminação é muito intensa, isto é, quando o sensor do dispositivo de registro fica saturado, também ocorre a perda de informação, Arizaga (2008).

Os cálculos dos níveis de cinza máximo e mínimo das imagens STS da Figura 27 estão apresentados na Figura 28. O nível de cinza de cada pixel da imagem pode variar entre 0 a 255. O valor 0 representa um pixel preto e o valor 255 representa um pixel branco. Pelos resultados, foi possível verificar a possibilidade do uso do Momento de Inércia, com essa configuração de iluminação e cor da folha, pois não tivemos saturação dos pixels. Na Figura 27 encontram-se as imagens STS de alguns pontos de iluminação em folhas verdes e amarelas captadas e, na Figura 28, os valores dos níveis de cinza máximo e mínimo de cada imagem STS. No Anexo D, encontram-se os histogramas das demais imagens STS do experimento.



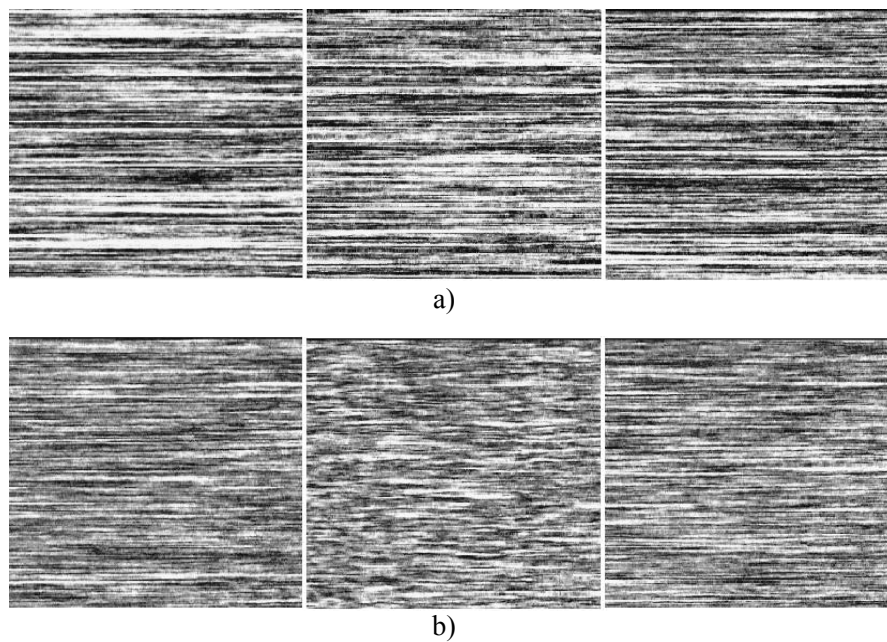


FIGURA 27 Imagens STS de folhas amarelas (A) e folhas verdes (B).

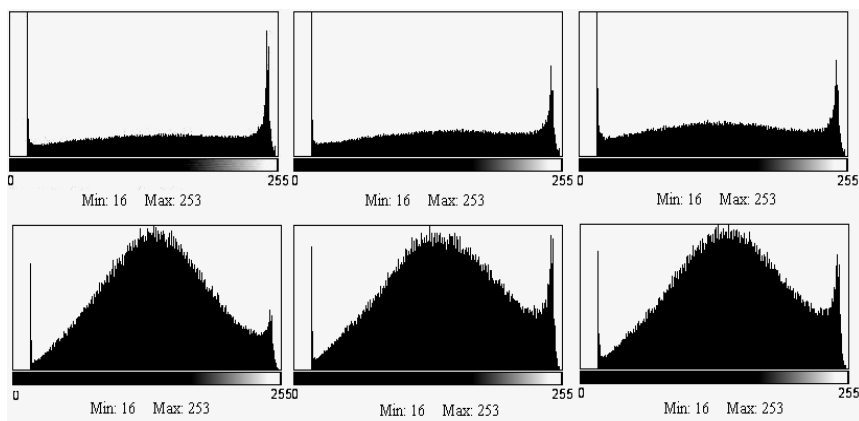


FIGURA 28 Histograma do máximo e mínimo nível de cinza de cada imagem STS.

#### 4.5 Comparação de metodologias de determinação do potencial hídrico na folha do cafeeiro usando a ótica com metodologia padrão

Os resultados relativos ao experimento que avaliou a comparação de metodologias da bomba de Scholander, cálculo de área do *speckle* dinâmico, somatório dos níveis de cinza e Momento de Inércia podem ser resumidos e comparados pela Figura 29 e Figura 30. Para isso, transformaram-se as unidades de medida das 4 abordagens em uma unidade padrão. Tal unidade foi conseguida pela relação de cada valor com o maior valor de cada atributo; logo, pode variar de 0 a 1. Além disso, os grupos de tensão de água no solo foram ordenados crescentemente.

Na Tabela 4, podem-se observar as pressões lidas pelos sensores matriciais de cada grupo. Os gráficos do 3° e 4° dias estão apresentados na Figura 29 e Figura 30, respectivamente.

No Anexo E apresentam-se as médias dos valores das repetições para cada planta dos dois grupos de tensão de água no solo.

TABELA 4 Pressões lidas pelos sensores matriciais.

LEITURA DO TENSIOMETROS – Pressão (Kpa)					
Grupos	1° dia	2° dia	Grupos	3° dia	4° dia
B1 e B2	14	15	I1 e I2	14	14
C1 e C2	53	54	F1 e F2	32	32
A1 e A2	70	70	G1 e G2	79	94
D1 e D2	103	125	H1 e H2	119	133
E1 e E2	239	239	J1 e J2	239	239

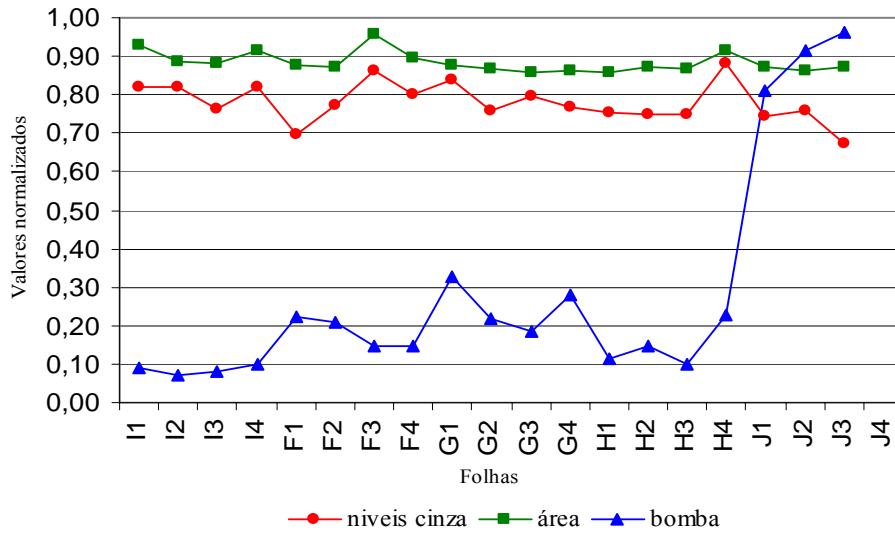


FIGURA 29 Resultados dos valores dos níveis de cinza, área do *speckle* dinâmico e bomba de Scholander, no 3º dia.

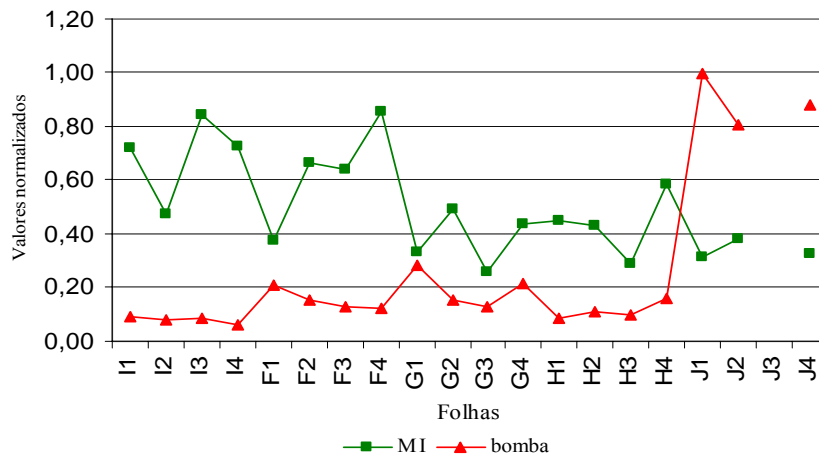


FIGURA 30 Resultados dos valores do Momento de Inércia e da bomba de Scholander, no 4º dia.

Analisando os gráficos da Figura 29 e Figura 30, percebe-se que em ambos os dias os valores de pressão da bomba de Scholander tenderam a subir, já que a tensão de água no solo também aumenta. Já os valores de área do *speckle* dinâmico, níveis de cinza e Momento de Inércia tiveram decréscimos, que estão relacionados com atividade biológica e transmitância da luz laser pela folha, o que já era esperado para área, confirmando o 1º experimento. Mas os índices de área do *speckle* dinâmico e níveis de cinza tiveram pouca variação entre as menores e as maiores tensões de água no solo conseguidas, além de decrescerem linearmente.

Os padrões STS analisados para obtenção do momento de inércia podem ser vistos de forma ilustrativa na Figura 31, observando-se uma maior descontinuidade das linhas para os dados de maior umidade.

O Momento de Inércia foi a ferramenta que melhor representou o status hídrico foliar, apesar das contraposições de alguns pontos. No Momento de Inércia, a diferença entre os maiores e os menores valores conseguidos foi grande, mas não houve homogeneidade nos resultados. A grande variabilidade dos valores do Momento de Inércia pode ter origem na metodologia utilizada. Nesse caso, o fato de as folhas terem sido alojadas em local frio (dentro do isopor com gelo), causando condensação de água na superfície, contribuiu significativamente na determinação do Momento de Inércia.

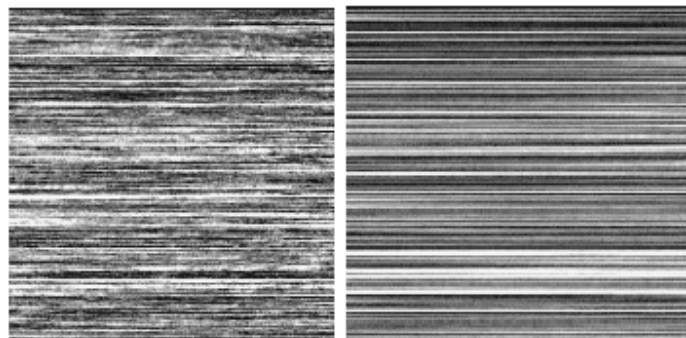


FIGURA 31 Imagens STS, sendo a da esquerda com maior atividade, consequentemente maior Momento de Inércia.

#### **4.6 Comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo do tempo**

Neste ensaio, desejava-se verificar o comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo dos dias. Como as mudas de café utilizadas encontravam-se ainda em saquinhos de 11cm x 22 cm, o processo de perda de água foi bastante rápido.

No quinto dia de iluminação, todas as plantas encontravam-se com murchamento bem acentuado.

Na Figura 32 encontra-se a média dos comportamentos do Momento de Inércia diante o comportamento do Momento de Inércia nas cinco plantas de Café arábica, variedade Mundo Novo saturadas com concentração salina de 6 dS, ao longo dos cinco dias de iluminação e, na Figura 33, encontra-se a média das plantas sem acompanhamento de saturação. Cada curva representa a média dos pontos iluminados de cada planta.

Na planta saturada com concentração salina, houve no 3º dia uma mudança acentuada no comportamento dos valores do Momento de Inércia. Na planta sem acompanhamento de saturação, a mudança no comportamento dos

valores do Momento de Inércia ocorreu antes, ou seja, no 2º dia. Essa mudança foi acompanhada pelo início do estresse hídrico vegetal dos cafeeiros, visualizado pelo murchamento das folhas. No 5º dia já há uma tendência de equilíbrio nos valores de Momento de Inércia. A partir desse ponto, a atividade biológica conservou-se em níveis mínimos, resultado do forte estresse hídrico e extremo murchamento foliar, chegando a índices irreversíveis para o vegetal.

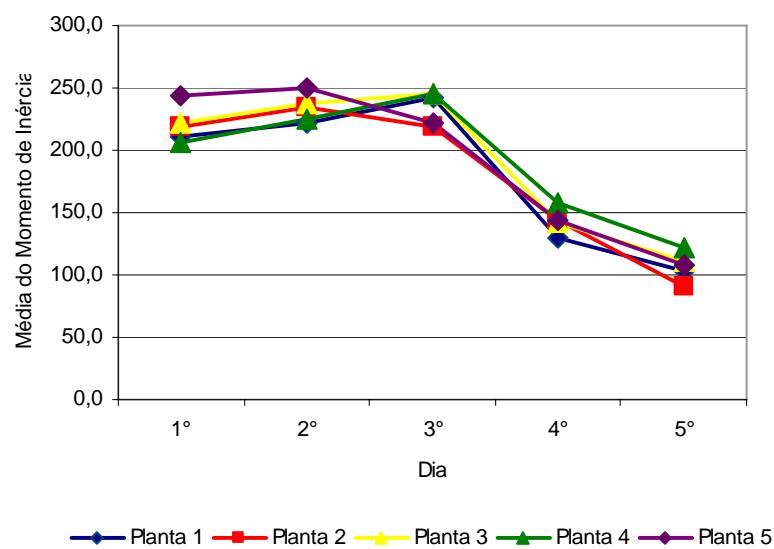


FIGURA 32 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas 5 plantas, com saturação salina ao longo do tempo.

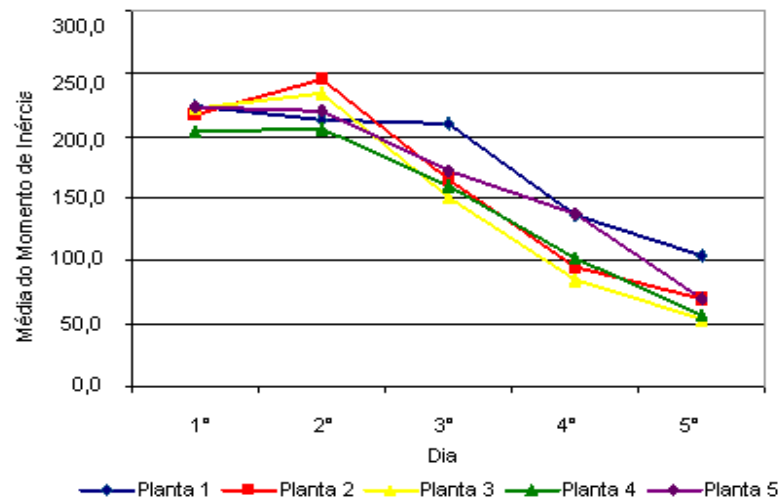


FIGURA 33 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas 5 plantas, sem acompanhamento de saturação.

Em uma análise individual do resultado do Momento de Inércia das plantas saturadas com sal, foi constatado que os resultados seguem um padrão, havendo um ponto de inflexão das curvas próximo do 3º dia. Foi significativo o fato de o ponto de inflexão estar bem definido, dada a sua grande importância. Pelas Figuras 34, 35, 36, 37 e 38, pode-se perceber esse ponto de inflexão de cada planta. Esse ponto representa um marco nas alterações fisiológicas da planta, as quais coincidem com o início do estresse hídrico do vegetal.

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados provenientes da câmara de Scholander (5º experimento) e do Momento de Inércia deste experimento, diante da perda de água ao longo dos dias, percebe-se em ambos houve um ponto de inflexão.

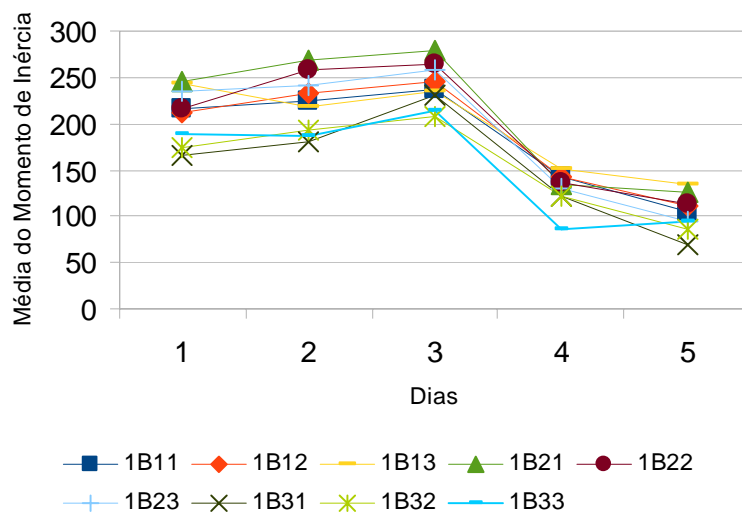


FIGURA 34 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 1, ao longo do tempo.

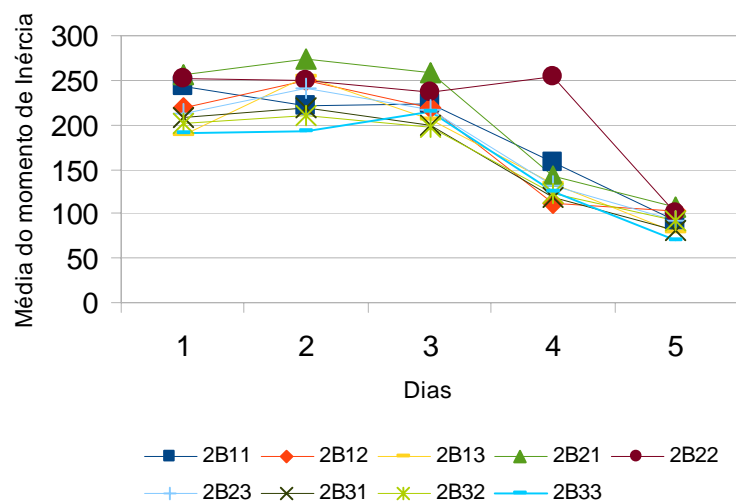


FIGURA 35 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 2, ao longo do tempo.



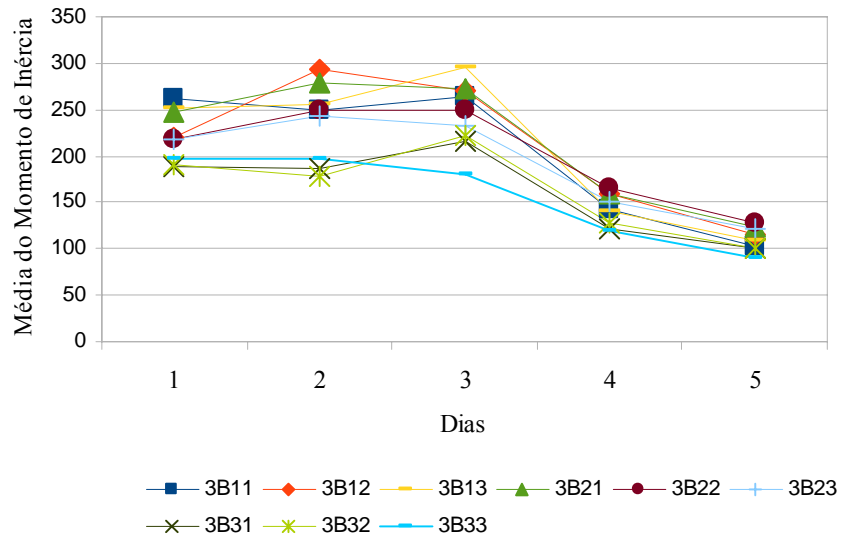


FIGURA 36 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 3, ao longo do tempo.

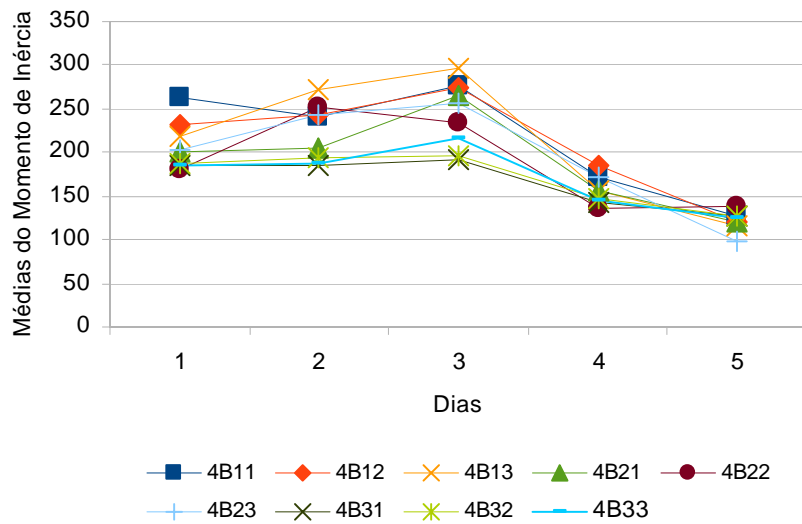


FIGURA 37 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 4, ao longo do tempo.

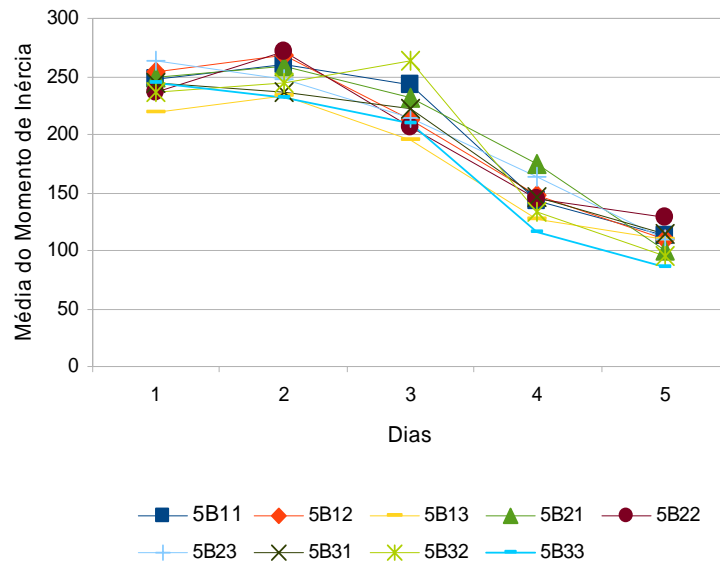


FIGURA 38 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 5, ao longo do tempo.

Nas plantas sem acompanhamento de saturação do Momento de Inércia, também foi constatado que os resultados seguem um padrão, mas o ponto de inflexão das curvas ocorreu próximo do 2º dia (Figuras 39, 40, 41, 42 e 43).

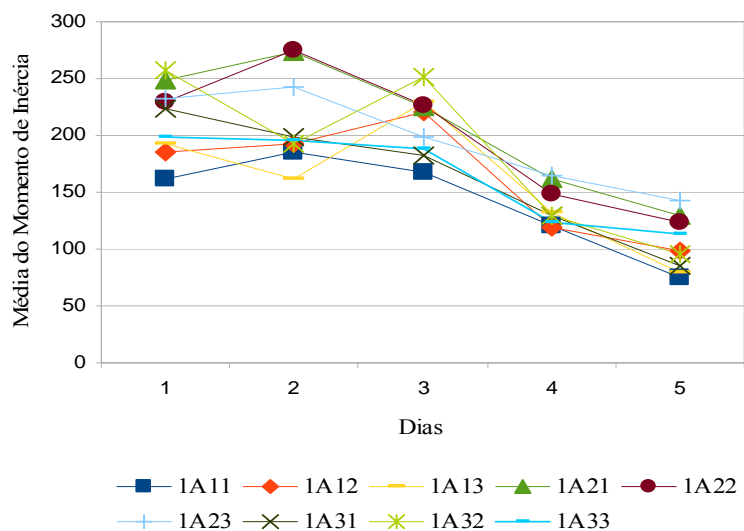


FIGURA 39 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 1, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.

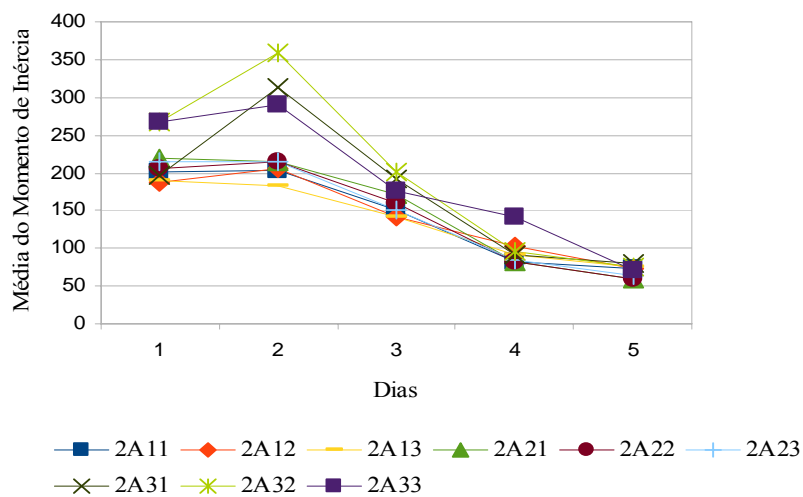


FIGURA 40 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 2, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.

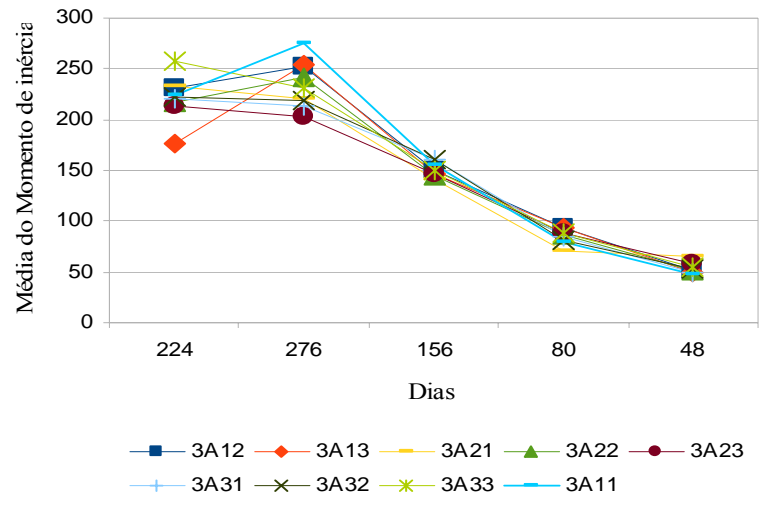


FIGURA 41 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 3, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.

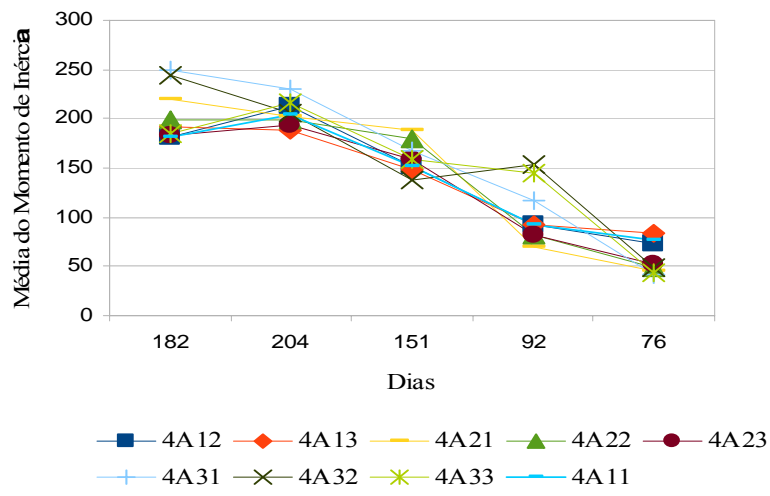


FIGURA 42 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 4, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.

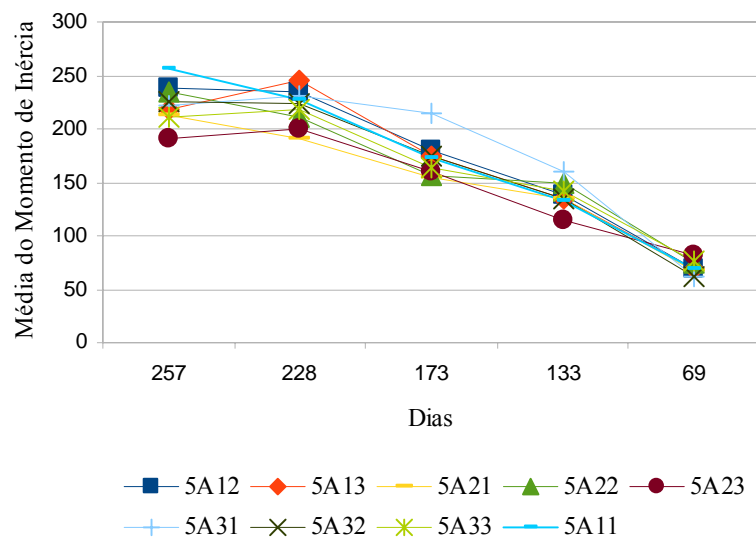


FIGURA 43 Comportamento do Momento de Inércia da perda de água pela planta 5, sem acompanhamento de saturação ao longo do tempo.

Na Figura 44, apresentam-se 4 imagens STS. As duas superiores foram geradas no 1º dia, em que havia bastante água disponível e, as duas inferiores, geradas no 5º dia, quando já estavam sofrendo de estresse hídrico. No 1º dia, as imagens apresentaram STS com elevado nível de atividade. Já no 5º dia, o STS constituiu-se por barras verticais paralelas, indicando a queda progressiva de atividade.

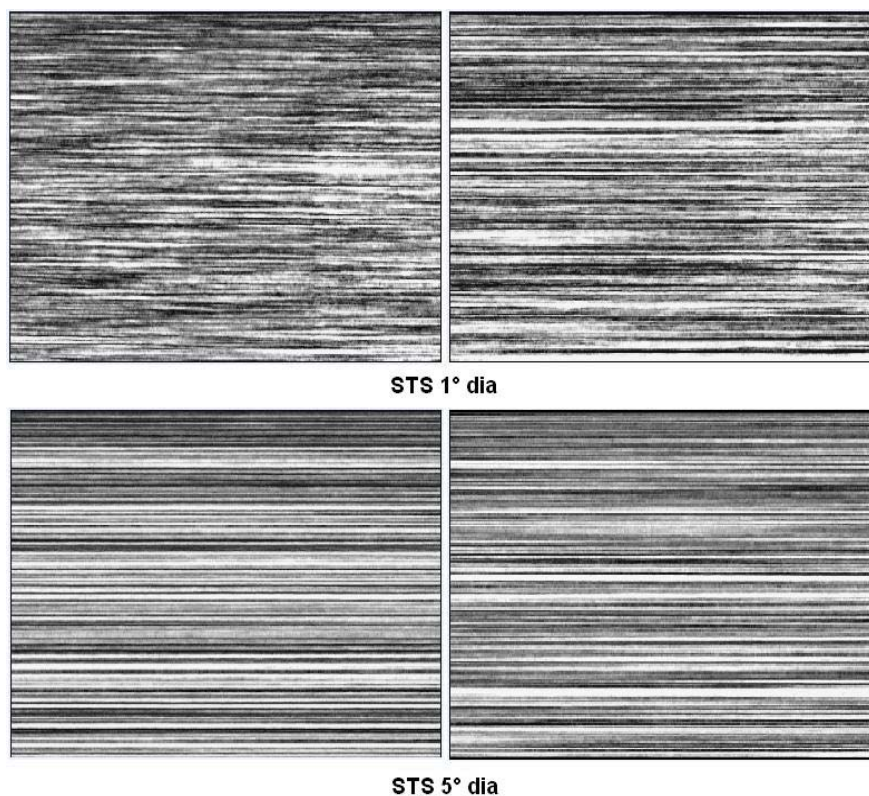


FIGURA 44 Imagens STS do 1° e 5° dias de iluminação

Os resultados relativos ao experimento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica ao longo dos dias podem ser resumidos pela Análise de Variância dos valores de Momentos de Inércia.

Baseando-se na análise de variância (Tabela 5) obtidas pelo teste F, foi constatado que todos os parâmetros da equação foram significativos ( nível de significância 5%), ou seja, todos os parâmetros são verdadeiros tanto para o experimento saturação com concentração salina e sem acompanhamento de saturação. Com esses resultados, confirma-se que a perda de água da folha do

Café arábica influencia no *speckle* dinâmico.

Tabela 5 Quadro da análise de variância para as regressões.

FV	G.L	Quadrado médio	
		Sem acompanhamento	Saturação com sal
Dia	1	726575*	452137*
I(Dia <sup>2</sup> )	1	34795*	118491*
I(Dia <sup>3</sup> )	1	28069*	20107*
Planta	4	6556*	1502*
Resíduos	217	712	826

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Sendo que:

FV – Fonte de variação

GL – Graus de liberdade

QM – Quadrados Médios, que é obtido pela razão entre a Soma de Quadrados e o respectivo número de Graus de Liberdade.

Encontra-se na Figura 45 e Figura 46 a tendência das médias dos valores do Momento de Inércia para cada dia do experimento saturado com sal, e do experimento sem acompanhamento de saturação. Observa-se, então, que independentemente do experimento, houve um decréscimo no valor do Momento de Inércia ao longo dos dias.

O que se observa na Tabela 6 é que a equação de regressão utilizada para o ajuste, uma polinomial de terceiro grau, apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) no valor de 76,15%, para o experimento saturado com sal. e uma curva representando a evolução do Momento de Inércia expressa por  $87,2 + 182,0487*x - 63,8476*x^2 + 5,5704*x^3$ . Já para o experimento sem

acompanhamento de saturação, apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) no valor de 83,57%, uma curva representando a evolução do Momento de Inércia expressa por  $133,733 + 159,731*x - 66,665*x^2 + 6,581*x^3$ .

Pela análise de variância dos dados, verificou-se que eles são significativos entre os diversos dias.

Tabela 6 Equação ajustada e o coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Variável	Equação	$R^2$
Sem acompanhamento	$133,733 + 159,731*x - 66,665*x^2 + 6,581*x^3$	0,8357
Saturação com sal	$87,2 + 182,0487*x - 63,8476*x^2 + 5,5704*x^3$	0,7615

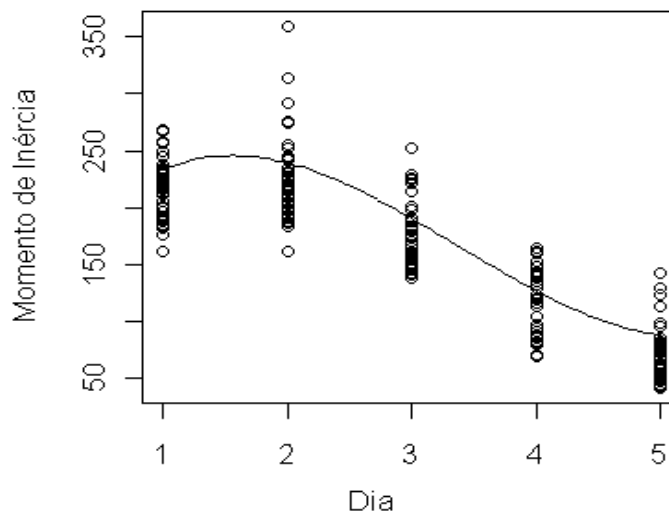


FIGURA 45 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas plantas saturadas com sal ao longo do tempo.



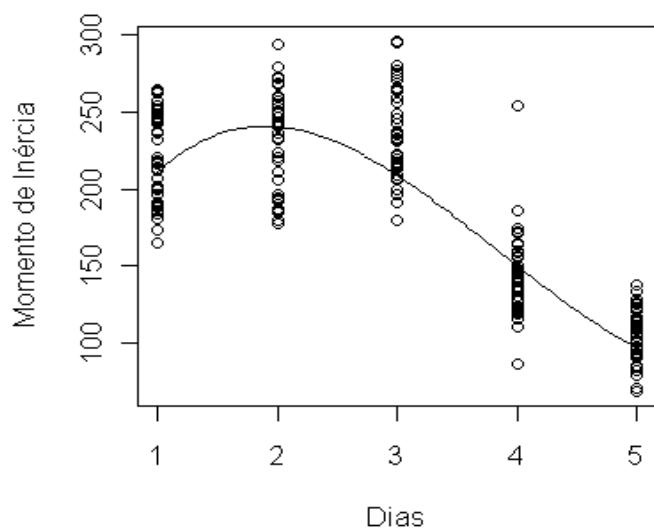


FIGURA 46 Média dos comportamentos do Momento de Inércia da perda de água pelas plantas sem acompanhamento de saturação.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi analisada a identificação de conteúdo de umidade de folhas de cafeeiros mediante duas diferentes técnicas: uma baseada no *speckle* dinâmico e outra utilizando como metodologia padrão a câmara de Scholander.

Pelos resultados verifica-se que há uma relação direta entre a área do *speckle* dinâmico e a umidade foliar.

Os valores dos níveis de cinza do *speckle* dinâmico também diminuem à medida que a umidade foliar decresce.

Verificou-se também que o cálculo da área e o somatório dos níveis de cinza do *speckle* dinâmico não tiveram influência significativa pela incidência do laser ao longo do tempo.

Com base neste trabalho, conclui-se que é de grande importância a fixação de um ponto de iluminação na face da folha. A iluminação deve ser feita em locais onde não exista sistema vascular visível. Não havendo um padrão de iluminação, a comparação dos dados de folhas fica errada, mascarando os reais resultados.

Comparando-se as técnicas utilizadas para avaliar o *speckle* dinâmico, a que melhor representou a identificação de conteúdo de água da folha do cafeeiro foi o Momento de Inércia. Os valores dos Momentos de Inércia decresceram à medida que os níveis de hidratação das folhas também diminuíram.

Pela análise dos gráficos provenientes da câmara de Scholander (5º experimento) e do Momento de Inércia (6º experimento), diante da perda de água ao longo dos dias, foi possível identificar semelhanças entre eles.

No experimento do comportamento do Momento de Inércia diante da perda de água da folha do Café arábica, ao longo do tempo, pôde-se comprovar de forma conclusiva e direta a influência da diminuição da água na folha do

cafeeiro com os resultados do Momento de Inércia. A partir do Momento de Inércia é possível estabelecer o estado hídrico dos cafeeiros e essa tecnologia apresenta-se como uma contribuição sólida e inovadora.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL - Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: Instituto FNP, 2007. Disponível em:  
<<http://www.agrianula.com.br/agricultura/café/index.php>>. Acesso em: 20 jan. 2007.

AIZU, Y.; ASAKURA, T. Bio-speckle phenomena and their application to the evaluation of blood flow. **Optics & Laser Technology**, Surrey, v.23, n.4, p.205-219, Aug. 1991.

ALFONSI, R.R. Histórico climatológico da cafeicultura brasileira. In: INFORMATIVO Garcafé. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2000. v.1, p.7-11.

ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: L.R. Angelocci, 2002. p.71-104.

ANTUNES, R.C.B.; RENA, A.B.; MANTOVANI, E.C.; ALVARENGA, A.P.; COSTA, L.C.; DIAS, A.S.C. Influência da fertirrigação com nitrogênio e potássio nos componentes vegetativos do cafeeiro Arábica em formação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos...** Poços de Caldas: EMBRAPA Café, 2000. v.2, p.802-806.

ARIZAGA, R. Methods of dynamic speckle analysis statistical analysis. In: RABAL, H.J.; BRAGA JÚNIOR, R.A. **Dynamic laser speckle and applications**. 1. ed. Boca Raton: CRC, 2008. p.95-114.

ARIZAGA, R.; RABAL, H.; CAP, N.; TRIVI, M. Activity image in dynamical speckle. In: IBEROAMERICAN OPTICS MEETING, 3., 1999; LATIN AMERICAN MEETING ON OPTICS, LASERS, AND THEIR APPLICATIONS, 6., 1999, Cartagena de Índias. **Anais...** Cartagena de Índias: SPIE, 1999a. v. 3572. p.310-314.

ARIZAGA, R.; TRIVI, M.R.; RABAL, H.J. Analisis de diagramas de speckle dinamicos utilizando la matriz de coocurrencia. In: RIAO - ENCUESTRO IBERO-AMERICANO DE ÓPTICA, 3., 1998, Cartagena das Índias. **Anais...** Cartagena das Índias: Academia Colombiana de Ciências Exactas Físicas Naturales, 1998. 1 CD-ROM.

ARIZAGA, R.; TRIVI, M.R.; RABAL, H.J. Speckle time evolution caracterizacion by co-ocurrence matrix analysis. **Optics & Laser Technology**, Surrey, v.4, n.3, p.1-7, Mar. 1999b.

ASAKURA, T., TAKAI, N. Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the difuse object. **Journal of Applied Physics**, Berlin, v.25, n.3, p.179-194, July 1981.

BARROS, G.S.C. **Agronegócio**: uma lição de eficiência. 2002. Disponível em: <<http://www.ciagriusp.br>>. Acesso em: 8 set. 2007.

BERGKVIST, A. **Biospeckle-based study of the line profile of light scattered in strawberries**. 1997. 62p. Dissertation (Master in Science) - Faculty of Technology at Lund University, Lund.

BOYER, J.S. Plant productivity and environment. **Science**, Washington, v.218, n.4571, p.443-448, Oct. 1982.

BRAGA JÚNIOR, R.A. **BioSpeckle**: uma contribuição para o desenvolvimento de uma tecnologia aplicada à análise de sementes. 2000. 126p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRAGA JÚNIOR, R.A.; FABBRO, I.M. da; BOREM F.M.; RABELO, G.F.; ARIZAGA H.; RABAL, J.; TRIVI, M. Assessment of seed viability by laser speckle techniques. **Biosystems Engineering**, London, v.86, n.3, p.287-294, Nov. 2003.

BRAGA JÚNIOR, R.A.; RABELO, G.F.; GRANATO, L.R.; SANTOS, E.F.; MACHADO, J.C.; ARIZAGA, R.; RABAL, H.J.; TRIVI, M. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique. **Biosystems Engineering**, London, v.91, n.4, p.465-469, Aug. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Modernização do agronegócio brasileiro**. Disponível em: <<http://www.extranet.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2007.

BRIERS, J.D. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimen. **Optics Communications**, Amsterdam, v.13, n.3, p.324-326, Mar. 1975.

CAIRO, P.A.R. **Curso básico de relações hídricas de plantas**. Vitória da Conquista: UESB, 1995. 32p.

CANNY, M.J. Apoplastic water and solute movement: new rules for an old space. **Annual Review of Plant physiology and Plant molecular Biology**, Palo Alto, v.46, p.215-236, June 1995.

CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.37, n.1, p.1-36, Jan. 2001.

CHRISTOFIDIS, C. **Considerações sobre a deriva nas pulverizações agrícolas e seu controle**. São Paulo: Teejet South América, 1997. 15p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra 2005/2006**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/centro.asp?aPAG=27>>. Acesso em: 25 jan. 2007.

CONSELHO NACIONAL DE AGRICULTURA E DESENVOLVIMENTO RURAL. **Balança comercial**. Disponível em: <<http://www.confagri.pt/Apresentacao/Representacao/Nacional/cnadr.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

DAINTY, J.C. Some statistical properties of random speckle patterns in coherent and partially coherent illumination. **Journal of Modern Optics**, London, v.17, n.10, p.761-772, Oct. 1970.

DAMATTA, F.M.; RENA, A.B. Tolerância do café à seca. In: ZAMBOLIN, L. (Ed.). **Tecnologia de produção de café com qualidade**. Viçosa, MG: UFV/Departamento de Fitopatologia, 2001. p.65-100.

DIAS, C.P.; ARAÚJO, W.L.; MORAES, G.A.B.K. de; POMPELLI, M.F.; BATISTA, K.D.; CATEN, A.T.; VENTRELLA, M.C.; DAMATTA, F.M. Crescimento e alocação de biomassa em duas progênies de café submetidas a déficit hídrico moderado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2005. 1 CD-ROM.

- DROZD, D. The effect of laser radiation on spring wheat properties. **International Agrophysics**, Lublin, v.8, n.2, p.209-213, 1994.
- DUDIN, G.D.; LOGINOV, D.A.; KRIVOSHEINA, O.S. Irradiation of barley seeds with laser and red lighth. **Zemledelie**, Moscow, v.1, n.1, p.33-53, 1995.
- ENES, A.M.; RABELO, G.F.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; RODRIGUES, S. Utilização do laser aplicado na diferenciação de tecidos vivos e mortos em sementes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Anais...** Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2004. 1 CD-ROM.
- EVANOFF, C.E. A. **Biologia del cafe**. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 1994. 308p.
- FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; LESSI, R.; YAMADA, A.; SILVA, V.A. Efeito do déficit hídrico e do uso de granulados de solo para recuperação de lavouras irrigadas por sistema de gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia, 1998. p.97-99.
- FUJII, H.; ASAKVRAT, T.; NOHIRA, K. Blood flow observed by time-varying laser speckle. **Optics letters**, New York, v.10, n.3, p.104-106, Mar. 1985.
- GUTIÉRREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of American Society of Horticulture Science**, Alexandria, v.119, n.3, p.652-657, June 1994.
- KRAMER, P.J. Measurement of plant water status: historical perspectives and current concerns. **Irrigation Science**, New York, v.9, n.4, p.257-287, Oct. 1988.
- MARTINS, C.P.; GOMES, N.M.; VILELA, L.A.A. Avaliação da produtividade, rendimento, maturação e tamanho dos grãos das duas primeiras safras de café irrigado por pivô central, sob diferentes regimes de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 26., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. p.153-155.
- MARUR, C.J. **Estudo da fisiologia e Biofísica do estresse hídrico em duas cultivares de algodoeiro**. 1993. 152p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MAZZAFERA, P.; CARVALHO, A. Produção e tolerância à seca de cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v.46, n.2, p.403-415, dez. 1987.

MURAMATSU, M.; EIJU, T.; SHIRAI, T.; MATSUDA, K. Application of a liquid crystal spatial light modulation to optical roughness measurements by holographic interferometry using two refractive indices. **Optics and Laser Technology**, Surrey, v.29, n.5, p.271-273, July 1997.

NASCIMENTO, A.L. **Biospeckle laser**: uma contribuição para o desenvolvimento da técnica na avaliação da atividade biológica em meios fluidos. 2005. 41p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

NJOROGE, J.M. A review of some agronomic investigations on arábica coffee in Kenya. **Kenya Coffee**, Nairobi, v.54, n.629, p.553-567, Mar. 1989.

OULAMARA, A.; TRIBILLON, G.; DUVERNOY, J. Biological activity measurement on botanical specimen surface using temporal decorrelation effect of laser speckle. **Journal of Modern Optics**, London, v.36, n.2, p.165-179, Feb. 1989.

OULAMARA, A.; TRIBILLON, G.; DUVERNOY, J.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M.R.; RABAL, H. J. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics and Laser Technology**, Surrey, v.31, n.2, p.163-169, Mar. 1999.

PAJUELO, M.; BALDWIN, G.; RABAL, H.; CAP, N.; ARIZAGA, R.; TRIVI, M. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. **Optics and Laser in Engineering**, London, v.40, n.2, p.13-24, Aug. 2003.

RABAL, H.J.; BRAGA JÚNIOR, R.A. **Dynamic laser speckle and applications**. Boca Raton: CRC, 2008. 304p.

RABAL, H.J.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; TRIVI, M.R.; FABBRO, I.M.D. O uso do laser na agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia, 1998. 1 CD-ROM.

RABELO, G.F. **Avaliação da aplicação do speckle dinâmico no monitoramento da qualidade da laranja**. 2000. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.



RABELO, G.F.; BRAGA JUNIOR, R.A.; FABBRO, I.M.D. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.570-575, Oct./Dec. 2005.

REIS, G.N.; MIGUEL, A.E.; OLIVEIRA, J.A. Efeito da irrigação em presença e ausência de adubação NPK, em cafeeiros em produção: resultado de três produções Caratinga-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 16., 1990, Espírito Santo do Pinhal. **Anais...** Espírito Santo do Pinhal: MAPA/PROCAFÉ, 1990. p.19-21.

RIGHI, C.A. **Avaliação ecofisiológica do cafeeiro (Coffea arabica L.) em sistema agroflorestal e em monocultivo**. 2005. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

RODRIGUES, S. **Efeito estocástico em speckle dinâmico**. 2007. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RODRIGUES, S.; SANTOS, E.F.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; RABELO, G.F.; CARVALHO, M.L.M.; BORÉM, F.M.; TRIVI, M.R.; FABBRO, I.M. dal; SILVA, A.Q. Análise do biospeckle laser em diferentes sementes utilizando métodos de processamento de padrão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

RUTH, B. Superposition of two dynamic speckle patterns. An application to noncontact blood flow measurements. **Journal of modern optics**, London, v.34, n.2, p.257-273, Feb. 1987.

SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Plant physiology**. 2. ed. Belmont: Wadsworth, 1978. 422p.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMINGSSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Pressure in vascular plants. **Science**, Washington, v.148, n.3668, p.339-346, Apr. 1965.

SEITZ, K. Cytoplasmic streaming and cyclosis of chloroplasts. In: HAUPT, W.; FELNLEIB, M.E. **Encyclopedia of plant physiology, new ser**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. v.7, p.150-169.

SHIMABUKURO, F.R.; DAL FABRO, I.M.; RODRIGUES, S. Utilização do biospeckle na determinação da umidade do solo. In: CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 13., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: FEAGRI/UNICAMP, 2005. Disponível em: <<http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xiiicongresso/cdrom/pdfN/236.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

SILVA, A.M.; LIMA, E.P.; COELHO, G.; COELHO, M.R.; COELHO, G.S.; FREITAS, R.A. Comportamento fisiológico de cafeeiro sob diferentes condições hídricas e seu efeito na produção. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2001. p.66-71.

SILVA, C.R. **Evapotranspiração e desenvolvimento de limeira ácida ‘Tahiti’ na ausência e presença de estresse hídrico.** 2005. 99p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SILVA, E.A.; BRUNINI, O.; SAKAI, E.; ARRUDA, F.B.; GALLO, P.B.; PEREIRA, A.C. Efeito de variáveis edafoclimáticas e da intensidade/duração do déficit hídrico na uniformidade de produção e produtividade do cafeeiro arábica na localidade de Mococa, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL E WORKSHOP INTERNACIONAL DE CAFÉ & SAÚDE, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2003. v.1, p.1-4.

SILVA, F.C. **Aplicação do speckle dinâmico para o estudo do processo de secagem de pintura.** 2000. 67p. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, M.R.; MORI, F.A.; RABELO, G.F.; BRAGA JÚNIOR, R.A. Interação da luz laser para a avaliação da textura de madeiras nativas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.1-2, p.167-175, mar./jun. 2005.

SOARES, A.R.; MOURA, B.R.; RODRIGUES, S.B.S.; MUDRIK, A.S.; MANTOVANI, E.C.; VICENTE, M. Utilização de diferentes fontes de nitrogênio e potássio na produtividade de cafeeiros irrigados e fertirrigados (resultados de quatro colheitas). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 29., 2003, Araxá. **Anais...** Rio de Janeiro: REPORARTE, 2003. v.1, p.60.

SOUSA, M.B.A.; MANTOVANI, E.C.; SOUZA, L.O.; BUFFON, V.B.; BONOMO, R. Avaliação de irrigação em propriedades de café conilon no norte do Espírito Santo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 3., 2000, Araguari. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1999. v.1, p.1-6.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TOBIN, M.F.; LOPES, O.R.; KURSAR, T.A. Responses of tropical understory plants to a severe drought: tolerance and avoidance of water stress. **Biotropica**, Washington, v.31, n.4, p.570-578, Dec. 1999.

TOTH, M.; KERPESEI, I.; KOZMA, L.; KLUJBER, L. Influence of wavelenght laser lights on the carbohydrate metabolism in germinating maize seeds. **Acta Botanica Hungarica**, Budapest, v.38, n.1, p.421-430, 1993.

VASILENKO, A.V. Accelerating the growth of scots pine seedlings. **Lesnoe Khozyaistvo**, Moskva, v.3, n.1, p.39-40, 1992.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SOUSA, M.B.A.; BONOMO, R. Influência de diferentes lâminas de irrigação nos parâmetros de crescimento do cafeeiro na região de Viçosa, MG. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos...** Brasília: EMBRAPA Café, 2000. v.2, p.879-881.

WEI, C.; STEUDLE, E.; TYREE, M.T. Water ascent in plants: do ongoing controversies have a sound basis. **Trends in Plants Science**, London, v.4, n.9, p.372-375, Sept. 1999.

XU, Z.; JOENATHAN, C.; KHORANA, B.M. Temporal and spatial properties of the timevarying speckles of botanical specimens. **Optical Engineering**, California, v.34, n.5, p.1487-1502, May 1995.

## ANEXOS

ANEXO A	<b>Página</b>
FIGURA 1A Modelo protótipo.....	77
FIGURA 2A Protótipo desenvolvido no laboratório .....	77

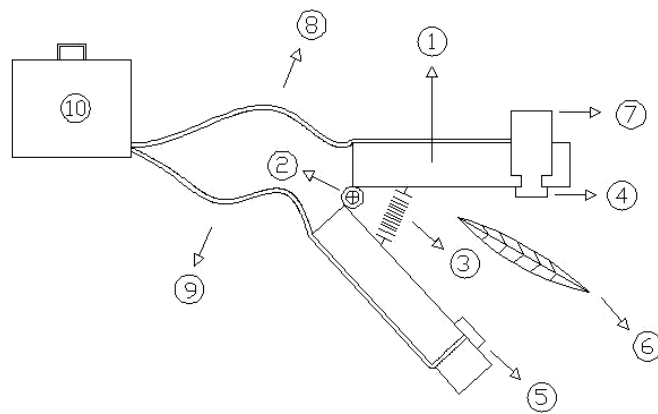


FIGURA 1A Modelo protótipo.

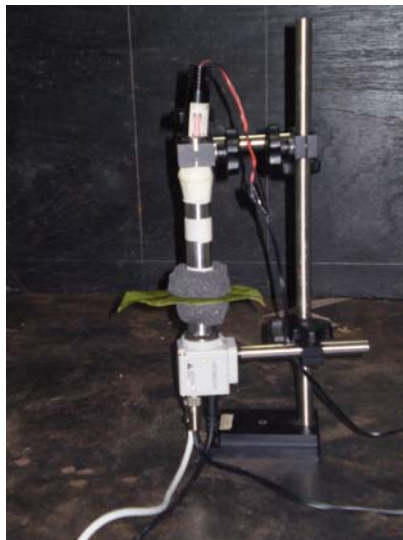


FIGURA 2A Protótipo desenvolvido no laboratório.

A Figura 1A representa o protótipo da invenção, que é composto conforme descrição abaixo:

- 1 – grampo;
- 2 – articulação;
- 3 – mola;
- 4 e 5- borrachas de vedação;
- 6 - folha (órgão) vegetal;
- 7 - câmera de vídeo;
- 8 - cabo para transmissão da imagem;
- 9 - cabo de fibra ótica ou laser;
- 10 - unidade de processamento e Laser estável de baixa potência ou fonte do laser.

O produto é capaz de medir o momento de inércia de folhas (órgãos) vegetais. Para a medição, o grampo (1), composto de uma articulação (2) e uma mola (3), deve ser fechado até que as borrachas (4 e 5) façam contato perfeito com a superfície da folha. A câmera de vídeo (7) capta as imagens provenientes da folha iluminada pelo laser ou extremidade da fibra ótica (9) e as transmite pelo cabo de transmissão (8) até a unidade de processamento localizada em (10).

O método proposto pelo laser é rápido, preciso, conta com uma metodologia simples, não destrutiva e automatizada. O produto apresenta boa portabilidade, podendo ser utilizado em condições de campo. A produção em escala industrial do produto é economicamente viável, já que as tecnologias exigidas em seu projeto encontram-se disponíveis atualmente a custos razoáveis. A grande demanda pelos resultados aliada às suas vantagens faz deste produto um diferencial.

A Figura 2A, representa-se o protótipo da invenção, que foi desenvolvido no laboratório utilizando dispositivos existentes no laboratório.

ANEXO B	Página
TABELA 1B Valores das áreas das Imagens Fujji .....	80
TABELA 2B Valores das áreas das Imagens digitalizadas .....	81

TABELA 1B Valores das áreas das Imagens Fujji no correlacionamento da transmissão da luz pela folha, com a perda de água ao longo do .. tempo.

Dia	Abordagem 1		Abordagem 2		Abordagem 3	
	Folha A	Folha B	Folha A	Folha B	Folha A	Folha B
1°	83004	80970	84354	82633	80541	78105
2°	81228	79470	82545	80833	78736	77381
3°	79882	78742	81129	80381	77729	75188
4°	81377	81796	82619	83090	78901	79493
5°	78551	79903	80061	81261	77369	77231
6°	79754	77207	81136	78460	76828	75020
7°	80675	81853	82084	83245	77833	79707
8°	79239	77901	80374	83245	77956	76252
9°	78636	76462	79985	77597	76641	74895
10°	78754	75313	79907	76700	77125	73125
11°	78966	73687	80338	75155	77301	72810
12°	78688	77211	80149	78569	76770	73814
13°	79526	77361	80726	78550	77364	74521
14°	79128	77913	80333	79380	76833	76001
15°	78619	78624	79871	79982	76742	75886
16°	82198	72505	83480	74028	80248	70574
17°	74985	71658	76630	74028	72162	69376
18°	73284	73423	75170	75445	70154	70778
19°	75447	75513	77425	77194	72575	70980
20°	78289	75530	80473	76768	75560	72082



TABELA 2B Valores das áreas das Imagens digitalizadas no correlacionamento da transmissão da luz pela folha, com a perda de água ao longo do tempo.

Abordagem 1		Abordagem 2		Abordagem 3	
Folha A	Folha B	Folha A	Folha B	Folha A	Folha B
76973	74471	80050	77322	68914	67593
74916	71817	77922	75755	67180	67312
73942	67669	77110	73031	66772	70400
75003	75654	78118	78790	70134	68180
73718	72831	76771	76012	68589	66357
71621	72061	75277	74853	67430	64842
73822	76268	76807	79275	67931	65826
74965	73238	78154	79275	66432	68169
74739	72356	77520	74327	65737	63157
74222	70697	77536	71707	66967	66246
77197	67380	78576	73610	64482	70460
75666	68611	78261	75295	65757	70382
75259	71095	77270	76342	68587	68780
74396	72184	77158	68974	66747	70788
73355	70649	79736	67578	69184	70649
76901	66077	71726	68738	66562	61270
68642	63599	69141	69255	61570	63599
65176	64997	79758	69238	62208	59540
67441	65404	70299	74770	61980	63159
70807	64858	73806	76802	62152	63370

LEGENDA	
Abordagem1	Threshold 1 (de dentro p/ fora)
Abordagem2	Threshold 2 (de fora p/ dentro)
Abordagem3	Binary
Vermelho	Provável erro de medição

ANEXO C

**Página**

TABELA 1C Resultados da área e dos níveis de cinza ..... 83

TABELA 1C Resultados da área e dos níveis de cinza na interferência do laser e da luz não coerente na atividade biológica em folha de Café arábica ao longo do tempo.

<b>Tempo de iluminação (sem luz)</b>			<b>Tempo de iluminação (com luz)</b>		
<b>tempo (min)</b>	<b>área (pixels)</b>	<b>níveis cinza</b>	<b>tempo (min)</b>	<b>Área (pixels)</b>	<b>níveis cinza</b>
0,5	40058	20188	0,5	34836	51687
3	43942	21493	3	35301	46824
6	43613	21548	6	35059	54502
9	42818	20892	9	35196	55787
12	43233	22172	12	35364	61313
15	43162	21203	15	35726	57631
18	43779	21999	18	35385	60589
21	44020	20759	21	35438	59618
24	44244	19370	24	35586	61163
27	43413	20659	27	34634	57209
30	43261	22189	30	35038	62513
33	43019	19518	33	34647	53963
36	43512	21102	36	35346	55826
39	43742	21964	39	34711	56380
42	43310	21045	42	34877	56257
45	43751	21555	45	34758	55696
60	43978	21214	60	36105	59958
75	43270	20714	75	35489	60668
100	43491	21102	100	35080	59575
115	44342	21077	115	35258	55061

ANEXO D	Página
FIGURA 1D Histograma da planta amarela 1 .....	85
FIGURA 2D Histograma da planta verde 2 .....	86
FIGURA 3D Histograma da planta verde 1 .....	87
FIGURA 4D Histograma da planta amarela 2 .....	88

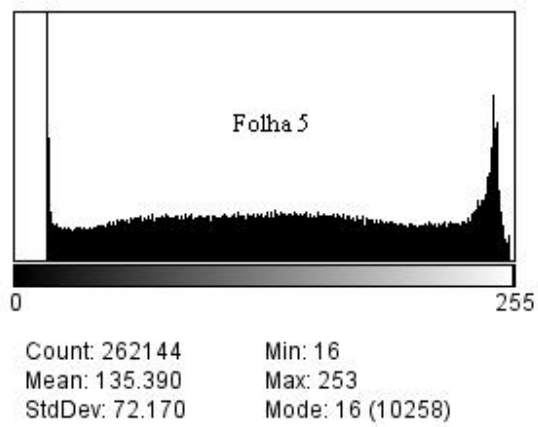
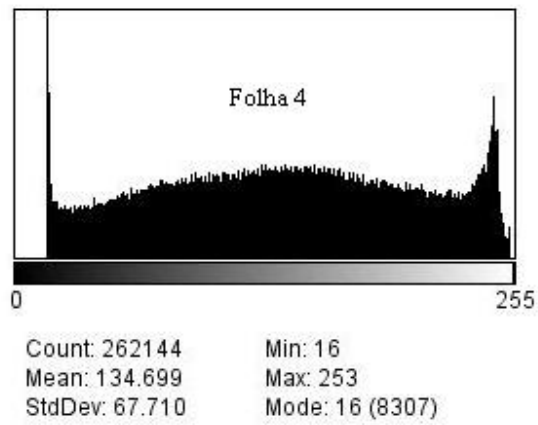


FIGURA 1D Histograma da planta amarela 1.

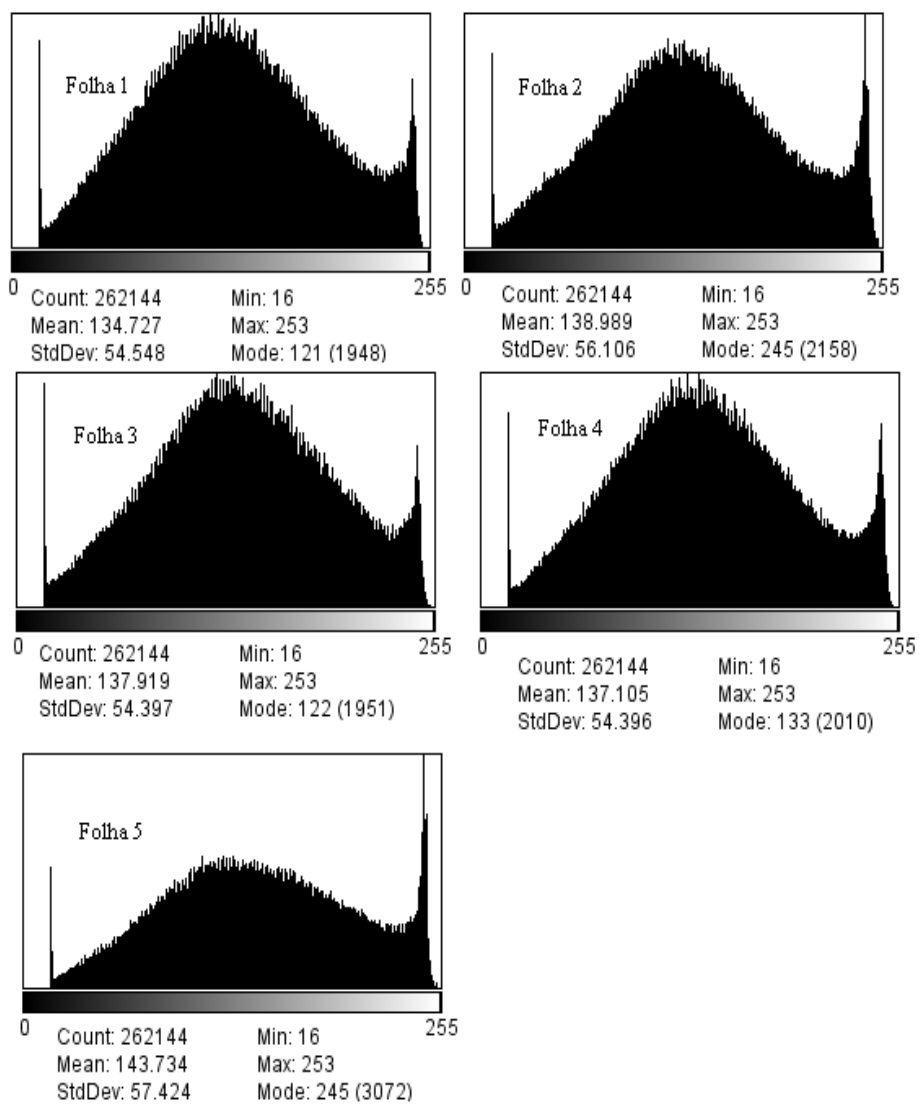


FIGURA 2D Histograma da planta verde 2.

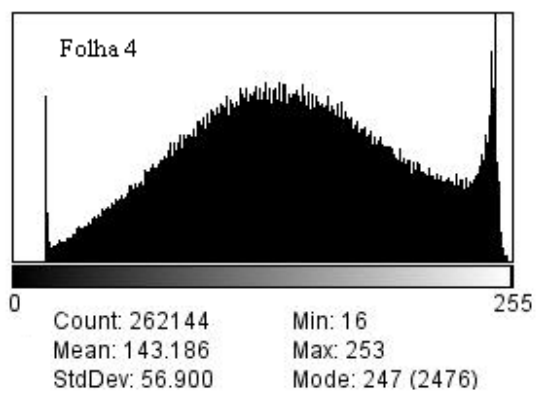
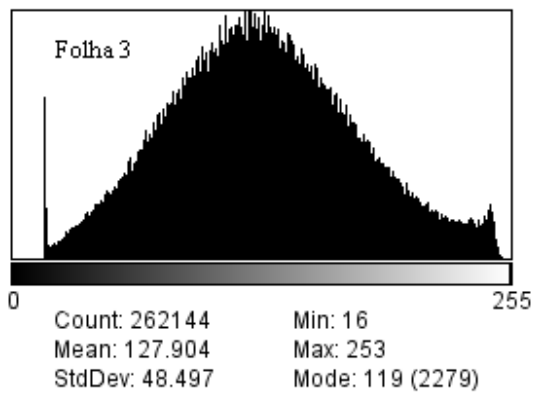


FIGURA 3D Histograma da planta verde 1.

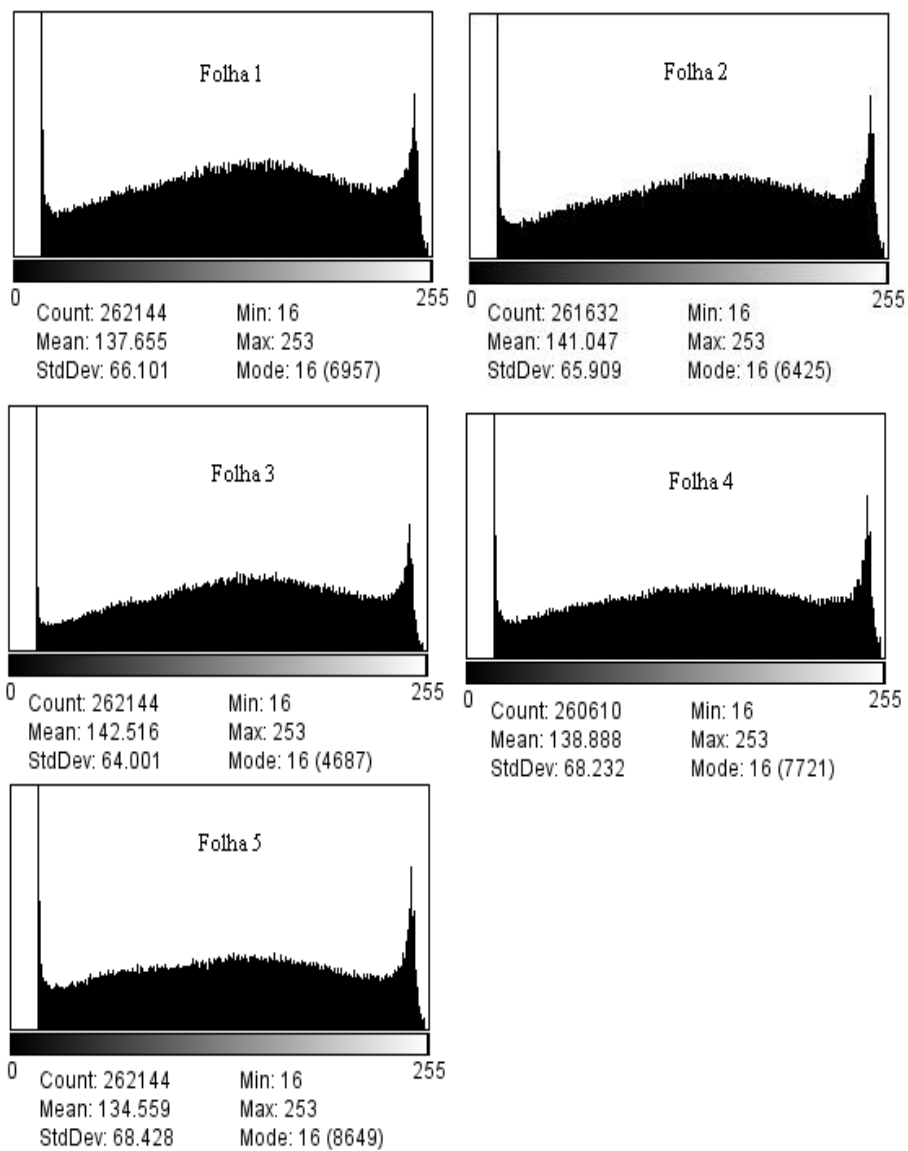


FIGURA 4D Histograma da planta amarela 2.



ANEXO E

**Página**

TABELA 1E	Médias dos valores das áreas do <i>speckle</i> dinâmico, dos níveis de cinza, da câmara de Scholander para o 1º e 2º dia .....	90
TABELA 2E	Médias dos valores do Momento de Inércia e da câmara de Scholander para o 3º e 4º dia .....	91

TABELA 1E Médias dos valores das áreas do *speckle* dinâmico, dos níveis de cinza, da câmara de Scholander para o 1º e 2º dia.

<b>FOLHAS 1º dia</b>	<b>níveis cinza</b>	<b>área</b>	<b>bomba</b>	<b>FOLHAS 2º dia</b>	<b>MI</b>	<b>bomba</b>
15A1	0,7072	0,9516	0,4674	16A1	0,7098	0,4667
15A2	0,7616	0,9686	0,2899	16A2	0,2957	0,4121
15A3	0,6893	0,9464	0,1630	16A3	0,4353	0,2182
15A4	0,6894	0,9544	0,1884	16A4	0,1910	0,3030
15B1	0,7207	0,9395	0,0797	16B1	0,5556	0,1545
15B2	0,6737	0,9430	0,2174	16B2	0,6814	0,1970
15B3	0,7113	0,9559	0,1739	16B3	0,4031	0,1455
15B4	0,6876	0,9432	0,2319	16B4	0,6318	0,1576
15C1	0,7269	0,9341	0,1739	16C1	0,4940	0,1485
15C2	0,8384	0,9521	0,2391	16C2	0,4371	0,1682
15C3	0,7314	0,9304	0,1775	16C3	0,6685	0,1879
15C4	0,7440	0,9361	0,2101	16C4	0,5675	0,1879
15D1	0,7561	0,9737	0,3841	16D1	0,5941	0,2818
15D2	0,6804	0,9414	0,1739	16D2	0,6345	0,1485
15D3	0,6644	0,9358	0,1667	16D3	0,4637	0,2091
15D4	0,7232	0,9497	0,1449	16D4	0,7961	0,1667
15E1	0,7209	0,9519	0,8768	16E1	0,3131	0,8970
15E2				16E2	0,6731	0,8272
15E3	0,6833	0,9248	0,7971	16E3	0,5611	0,8091
15E4	0,7181	0,9571	0,8623	16E4	0,2176	0,9030

TABELA 2E Médias dos valores do Momento de Inércia e da câmara de Scholander para o 3º e 4º dia.

<b>FOLHAS 3º dia</b>	<b>níveis cinza</b>	<b>área</b>	<b>bomba</b>	<b>FOLHAS 4º dia</b>	<b>MI</b>	<b>bomba</b>
17F1	0,6984	0,8757	0,2231	18F1	0,3781	0,2108
17F2	0,7711	0,8735	0,2077	18F2	0,6677	0,1569
17F3	0,8604	0,9557	0,1487	18F3	0,6398	0,1275
17F4	0,8025	0,8961	0,1487	18F4	0,8547	0,1225
17G1	0,8365	0,8753	0,3256	18G1	0,3353	0,2843
17G2	0,7598	0,8652	0,2179	18G2	0,4935	0,1544
17G3	0,7966	0,8587	0,1846	18G3	0,2607	0,1275
17G4	0,7684	0,8613	0,2795	18G4	0,4388	0,2181
17H1	0,7543	0,8575	0,1154	18H1	0,4478	0,0882
17H2	0,7487	0,8698	0,1487	18H2	0,4338	0,1127
17H3	0,7508	0,8668	0,1000	18H3	0,2886	0,1005
17H4	0,8804	0,9141	0,2256	18H4	0,5841	0,1593
17I1	0,8182	0,9294	0,0897	18I1	0,7174	0,0931
17I2	0,8212	0,8869	0,0731	18I2	0,4716	0,0784
17I3	0,7644	0,8795	0,0821	18I3	0,8438	0,0858
17I4	0,8197	0,9126	0,0974	18I4	0,7274	0,0637
17J1	0,7453	0,8706	0,8103	18J1	0,3114	1,0000
17J2	0,7602	0,8642	0,9128	18J2	0,3811	0,8088
17J3	0,6711	0,8740	0,9641	18J3		
17J4				18J4	0,3254	0,8824

<b>Legenda</b>
Média 1 repetição
Média 2 repetições
Média 3 repetições
Sem dados

Os códigos utilizados podem ser entendidos da seguinte forma:

exemplo: 15A1 = 15 = dia(1º); A = grupo de tensão de água no solo A;

1 = número da planta.

ANEXO F	<b>Página</b>
FIGURA 1F Mudanças de café utilizadas no experimento .....	93
FIGURA 2F Mudanças de café com sensor matricial (Watermark) .....	93
FIGURA 3F Estação de leitura do sensor matricial (Watermark) .....	93
FIGURA 4F Configuração experimental do experimento Laser .....	94
FIGURA 5F Configuração experimental da câmara de Scholander .....	94



FIGURA 1F Mudas de café utilizadas no experimento.



FIGURA 2F Mudas de café com sensor matricial.



FIGURA 3F Estação de leitura do sensor matricial.



FIGURA 4F Configuração experimental do experimento Laser.



FIGURA 5F Configuração experimental da câmara de Scholander.

ANEXO G

**Página**

TABELA 1G Momento de Inércia das folhas 1, 2 e 3 do experimento saturado com concentração salina.....	96
TABELA 2G Momento de Inércia das folhas 4 e 5 do experimento saturado com concentração salina.....	97
TABELA 3G Momento de Inércia das folhas 1, 2 e 3 do experimento saturado sem acompanhamento se saturação .....	98
TABELA 4G Momento de Inércia das folhas 4 e5 do experimento saturado sem acompanhamento se saturação .....	99

TABELA 1G Momento de Inércia das folhas 1, 2 e 3 do experimento saturado com concentração salina.

<b>Momento de Inércia</b>					
<b>Planta/Folha/Rep</b>	<b>1º DIA</b>	<b>2º DIA</b>	<b>3º DIA</b>	<b>4º DIA</b>	<b>5º DIA</b>
1B11	217	224	237	142	104
1B12	212	232	246	142	112
1B13	244	218	235	151	134
1B21	246	269	280	135	126
1B22	216	257	264	136	114
1B23	236	242	259	131	94
1B31	165	180	231	122	69
1B32	174	194	207	122	85
1B33	189	187	215	87	94
2B11	243	221	223	157	93
2B12	218	249	220	111	102
2B13	188	253	206	134	79
2B21	257	273	259	142	107
2B22	252	249	236	254	100
2B23	213	240	217	131	92
2B31	207	219	200	119	82
2B32	201	211	197	123	93
2B33	191	192	215	124	71
3B11	263	249	264	143	102
3B12	221	294	271	159	116
3B13	251	255	295	140	109
3B21	247	279	273	160	123
3B22	219	250	249	165	128
3B23	219	243	232	150	122
3B31	188	186	215	121	100
3B32	190	178	222	128	101
3B33	197	197	180	120	91

Simbologia: 1B11 (ex.: Em ordem: planta- com sal- folha - repetição da folha)



TABELA 2G Momento de Inércia das folhas 4 e 5 do experimento saturado com concentração salina.

<b>Momento de Inércia</b>					
Planta/Folha/Rep	1º DIA	2º DIA	3º DIA	4º DIA	5º DIA
4B11	262	240	277	171	126
4B12	232	244	275	186	121
4B13	218	273	296	156	117
4B21	200	206	266	157	121
4B22	181	253	233	137	138
4B23	202	244	256	172	97
4B31	184	185	191	143	128
4B32	188	193	197	147	126
4B33	186	187	216	145	125
5B11	247	260	243	143	112
5B12	254	268	213	148	110
5B13	219	233	196	127	110
5B21	249	259	232	175	100
5B22	237	272	206	145	129
5B23	264	247	214	164	109
5B31	245	236	222	146	115
5B32	237	244	263	134	96
5B33	244	232	209	116	86

Simbologia: 4B11 (ex.: Em ordem: planta- com sal- folha - repetição da folha)

TABELA 3G Momento de Inércia das folhas 1, 2 e 3 do experimento sem acompanhamento de saturação.

<b>Momento de Inércia</b>					
<b>Planta/Folha/Rep</b>	<b>1º DIA</b>	<b>2º DIA</b>	<b>3º DIA</b>	<b>4º DIA</b>	<b>5º DIA</b>
1A11	162	186	167	121	75
1A12	185	192	221	119	99
1A13	193	162	229	132	79
1A21	249	274	225	162	129
1A22	229	275	226	149	123
1A23	232	243	198	165	143
1A31	224	198	183	129	86
1A32	257	192	252	130	96
1A33	199	196	188	123	113
2A11	201	203	152	83	73
2A12	188	206	142	104	74
2A13	190	184	141	92	75
2A21	220	215	171	83	59
2A22	205	216	159	83	60
2A23	216	215	152	85	63
2A31	197	314	191	92	80
2A32	267	359	201	97	76
2A33	268	291	176	142	70
3A11	224	276	156	80	48
3A12	231	252	150	94	51
3A13	176	255	147	94	50
3A21	233	220	141	71	66
3A22	217	242	145	87	52
3A23	213	203	147	88	58
3A31	220	214	161	85	50

Simbologia: 3A11 (ex.: Em ordem: planta- sem sal- folha - repetição da folha)

TABELA 4G Momento de Inércia das folhas 4 e 5 do experimento sem acompanhamento de saturação.

<b>Momento de Inércia</b>					
Planta/Folha/Rep	1º DIA	2º DIA	3º DIA	4º DIA	5º DIA
4A11	182	204	151	92	76
4A12	182	212	151	92	74
4A13	192	188	148	92	83
4A21	219	202	188	70	45
4A22	199	198	180	82	48
4A23	184	194	158	82	52
4A31	250	230	167	117	42
4A32	245	205	138	153	49
4A33	185	217	158	144	43
5A11	257	228	173	133	69
5A12	238	234	180	139	69
5A13	218	245	175	135	69
5A21	212	191	154	135	68
5A22	235	210	157	149	75
5A23	190	200	160	114	82
5A31	221	230	214	160	62
5A32	226	224	174	135	62
5A33	211	218	164	141	77

Simbologia: 4A11 (ex.: Em ordem: planta- sem sal- folha - repetição da folha)